

NÖHÜ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ NOHU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

ISSN: 2564-6605

Cilt: 10 Sayı: 1 2021
Volume: 10 Issue: 1 2021



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

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



Dergi Sahibi/Journal Owner

Prof. Dr. Kutsi Savaş Erduran

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

Baş Editör/Editor-in-Chief

Prof. Dr. Mustafa Sarıdemir

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

Yardımcı Editörler/Associate Editors

Prof. Dr. Mustafa Korkaç

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

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

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

Dr. Öğr. Üyesi/Assist. Prof. Dr. Hasan Erhan Yücel

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

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

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

Yayın Danışma Kurulu/Editorial Advisory Board

Prof. Dr. Adnan Görür

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

Prof. Dr. Metin Yıldırım

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

Prof. Dr. Murat Gökçek

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

Prof. Dr. Fahrettin Öztürk

Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye/Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Turkey

Prof. Dr. Muhammad Imran Asghar

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

Prof. Dr. Ceyhan Karpuz

Pamukkale Üniversitesi, Türkiye/Pamukkale University, Turkey

Prof. Dr. Cengiz Duran Ateş

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



Editör Kurulu/ Editorial Board

Prof. Dr. Mustafa Sarıdemir (Baş Editör/ <i>Editor-in-Chief</i>)	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Prof. Dr. Mustafa Korkanç (Yardımcı Editör/ <i>Co-Editor</i>)	Jeoloji Mühendisliği <i>Geological Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Şakir Dokuz (Yardımcı Editör/ <i>Co-Editor</i>)	Bilgisayar Mühendisliği <i>Computer Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Hasan Erhan Yücel (Yardımcı Editör/ <i>Co-Editor</i>)	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Firdevs Uysal (Yardımcı Editör/ <i>Co-Editor</i>)	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Prof. Dr. Fehiman Çiner	Çevre Mühendisliği <i>Environmental Engineering</i>
Prof. Dr. Süreyya Meriç Pagano	Çevre Mühendisliği <i>Environmental Engineering</i>
Prof. Dr. Osman Sivrikaya	İnşaat Mühendisliği <i>Civil 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. Muhammad Imran Asghar	Uygulamalı Fizik Bölümü <i>Department of Applied Physics</i>
Doç. Dr. Yasin Kabalıcı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği <i>Electrical Electronics Engineering</i>
Doç. Dr. Bora Timurkutluk	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>
Doç. Dr. Ali Özgün Ok	Geomatik Mühendisliği <i>Geomatics Engineering</i>
Doç. Dr. Kutalmış Gümüş	Harita Mühendisliği <i>Geomatics Engineering</i>
Doç. Dr. Aydın Yeşildirek	Mekatronik Mühendisliği <i>Mechatronics Engineering</i>
Doç. Dr. Serkan Çayırılı	Maden Mühendisliği <i>Mining Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Ehsan Noroozinejad	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Murat Çiflikli	Jeoloji Mühendisliği <i>Geological Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Hatice Sinem Şaş Çaycı	Üretim Mühendisliği <i>Manufacturing 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. Hamza Alaşalvar	Gıda Mühendisliği <i>Food Engineering</i>
Arş. Gör. Kübra Nur Gül	Elektrik-Elektronik Mühendisliği <i>Electrical Electronics Engineering</i>



Yazışma Adresi

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

Correspondence Address

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

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

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

Dergi Bilgisi

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

Publication information

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

Özetlenme, Dizinlenme/Abstracting, Indexing

TRDİZİN



TÜBİTAK
ULAKBİM

DOAJ
DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS

Erişilebilirlik /Accessibility

BASE
Bielefeld Academic Search Engine

copac*

DergiPark
AKADEMİK

asos
akademi sosyal bilimler indeksi

OpenAIRE

Google
scholar

CiteFactor
Academic Scientific Journals



İÇİNDEKİLER/CONTENTS

Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering

Müşteri davranış tahmini için yeni bir model: bankacılık sektörü için uygulama (Araştırma Makalesi)
A model for prediction of customer behavior: A case study for banking sector (Research Article)

Kevser Özdem, M. Ali Akcayol

1-8

Çevre Mühendisliği / Environmental Engineering

Evaluation of the air quality and CO₂-equivalent change of Kayseri during the COVID-19 outbreak (Research Article)
COVID-19 salgını sırasında Kayseri'nin hava kalitesi ve eşdeğer CO₂ değişiminin değerlendirilmesi (Araştırma Makalesi)

Şükrü Taner Azgın, Nesrin Kekeçoğlu, Rabia Ennur Yamaç

9-15

Dezenfeksiyon ünitesi risk analizi: içme suyu arıtma tesisi (Araştırma Makalesi)
Risk analysis in disinfection unit: drinking water treatment plant (Research Article)

Cihan Özgür

16-22

Lastik üretiminden kaynaklanan yüzey aktif madde içeren atık suların koagülasyon bazlı arıtma alternatiflerinin PROMETHEE yaklaşımı ile değerlendirilmesi (Araştırma Makalesi)
Evaluation of coagulation based treatment alternatives of wastewater containing surfactant from tire manufacturing by PROMETHEE approach (Research Article)

Elif Durna, Nevim Genç

23-32

Sızıntı suyundan foto-elektro-Fenton yöntemi ile KOI ve renk giderimi üzerine akım yoğunluğu ve pH etkisi (Araştırma Makalesi)
The effect of current density and pH on COD and color removal from leachate by the photo-electro-Fenton method (Research Article)

Kasım Atmaca, Nevzat Beyazıt

33-37

Google Earth Engine ile arazi kullanımı haritalarının üretimi (Araştırma Makalesi)
Producing land use maps with Google Earth Engine (Research Article)

Majid Aghlmand, Kaan Kalkan, Mehmet İnanç Onur, Gürkan Öztürk, Ecem Ulutak

38-47

Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Electrical-Electronic Engineering

Yüksek hızlı terahertz kablosuz haberleşme için iletim pencereleri ve link hesabı (Araştırma Makalesi)
Transmission windows and link budget for high speed terahertz wireless communication (Research Article)

Ayhan Yazgan, Emin Tuğcu, Cenk Albayrak, Kadir Türk

48-53



Uçağın trim parametresinin ANFIS kullanılarak tahmin edilmesi (Araştırma Makalesi)
Predicting trim parameter of an aircraft using ANFIS (Research Article)

Fatma Yıldırım Dalkıran, Fadiş Rabia Yıldırım

54-62

A modular buck-boost drive system for torque ripple minimization of switched reluctance machines (Research Article)
Anahtarlamalı relüktans makinalarının moment salınımı minimizasyonu için modüler bir yükseltici-alçaltıcı sürücü sistemi (Araştırma Makalesi)

Burak Tekgün

63-70

Yer altına gömülü üç boyutlu cisimlerin bozulmuş born iteratif yöntemi ile tespit edilmesi (Araştırma Makalesi)
Reconstruction of three dimensional objects buried underground by distorted born iterative method (Research Article)

Rıza Erhan Akdoğan, Kamil Fatih Dilaver, Tülün Durukan, Yasemin Altuncu

71-78

Easy detection of chloroform in drinking water by quartz crystal microbalance sensor (Research Article)
İçme sularındaki kloroformun kuvars kristal mikroterazi sensör ile kolay tespiti (Araştırma Makalesi)

Mehmet Çağrı Soylu

79-83

Alternatif Rician sönümlenmesi için geliştirilmiş Gauss gürültüsünün hata analizi (Araştırma Makalesi)
Error analyse of generalized Gaussian noise for alternate Rician fading (Research Article)

Mehmet Bilim

84-90

Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering

Tedarik zincirinde değer katmayan faaliyetlerin ortadan kaldırılması: İmalat sektöründe bir değer akış haritalama uygulaması (Araştırma Makalesi)
Eliminating non value-added activities in supply chain: A value stream mapping case study in manufacturing sector (Research Article)

Nuri Özgür Doğan, Aycan Kama

91-99

Tahmin performansını arttırmak için kolektif öğrenme yaklaşımı: engelli bireylere yönelik deneysel çalışma (Araştırma Makalesi)
Ensemble learning approach for enhancing performance prediction: experimental study for disabled people (Research Article)

Melda Kokoç, Fatih Kokoç

100-114

AHP ve ANP yöntemleri kullanılarak tehlikeli madde depo yeri seçimi: Kırıkkale ilinde bir uygulama (Araştırma Makalesi)
Selection of the warehouse location for hazardous materials using AHP and ANP methods: a case study in Kırıkkale (Research Article)

Nursena Oral, Rabia Yumuşak, Tamer Eren

115-124

Stokastik çok kriterli kabul edilebilirlik analizi ile bitkisel atık yağ toplama kutuları için yer seçimi (Araştırma Makalesi)
Site selection for waste vegetable oil collection boxes using stochastic multicriteria acceptability analysis (Research Article)

Ashlı Çalış Boyacı

125-131



Gıda Mühendisliği / Food Engineering

Elma atıklarından elma sirkesi üretimi üzerine bir araştırma (Araştırma Makalesi)

A research on the production of apple vinegar from apple wastes (Research Article)

Hasan Tangüler, Hande Mert, Furkan İlman, Büşra Yücel, Selen Gençtürk

132-139

Zeytin çekirdeği antioksidanlarının dondurarak kurutma tekniği ile mikroenkapsülasyonu: Toz ürünün fiziksel ve kimyasal karakterizasyonu (Araştırma Makalesi)

Microencapsulation of olive stone antioxidants by freeze-drying technique: Physical and chemical characterization of powder product (Research Article)

Emine Nakilcioğlu Taş, Semih Ötleş

140-149

Ekmek üretiminde ekşi maya üzerine taze meyvelerin kullanımının etkisi (Araştırma Makalesi)

The effect of the use of fresh fruits on sourdough in bread production (Research Article)

Bihter Yıldız, Avni Çakıcı, Dilek Yaprak Uslu, Hasan Uslu

150-159

Use of fruits and vegetables in meat and meat products in terms of dietary fiber (Review Article)

Meyve ve sebzelerin diyet lifi bakımından et ve et ürünlerinde kullanımı (Derleme Makalesi)

Hülya Şen Arslan, Cemalettin Sarıçoban, Sabire Yerlikaya

160-167

Gıda takviyeleri kullanım alışkanlıklarının değerlendirilmesi (Araştırma Makalesi)

Evaluation of food supplements usage habits (Research Article)

Eda Kılıç Kanak, Seda Nur Öztürk, Yağmur Özdemir, Kübra Asan, Suzan Öztürk Yılmaz

168-177

Harita Mühendisliği / Geomatic Engineer

Turizm kentlerinde taşınmaz değerlemenin CBS ve AHP yöntemi yardımıyla incelenmesi: Alanya kenti örneği (Araştırma Makalesi)

Analysis of real estate in tourism cities by GIS and AHP method: The case of Alanya city (Research Article)

Tansu Alkan, Süleyman Savaş Durduran

178-187

Enerji talep tahmini için metodoloji geliştirme: 2030 yılı Türkiye örneği (Araştırma Makalesi)

Developing methodology for energy demand estimation: 2030 year case of Turkey (Research Article)

Harika Ülkü, Şükran Yalpır

188-201

Kabuk yoğunluğu değişiminin gravimetrik jeoit belirlemeye etkisi (Araştırma Makalesi)

Effect of crust density variation on gravimetric geoid determination (Research Article)

Fahrettin Doğdu, Ramazan Alpay Abbak

202-208



İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

T en-kesitli betonarme kirişlerin şekil değiştirme esaslı hasar sınırlarının araştırılması (Araştırma Makalesi)

Investigation of deformation based damage limits of reinforced concrete t beams (Research Article)

Rohullah Jamal, S. Bahadır Yüksel

209-216

Betonarme perde duvarların farklı yapı malzemeleri açısından değerlendirilmesi (Derleme Makalesi)

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

Abdulkadir Cüneyt Aydın, Barış Bayrak

217-240

A comparative study on the sodium sulfate resistance of concrete with the supplementary cementitious materials (Research Article)

Tamamlayıcı çimentolu malzemelerle betonun sodyum sülfat direnci üzerine karşılaştırmalı bir çalışma (Araştırma Makalesi)

İşıl Sanrı Karapınar, Hasan Biricik

241-246

Sarmal malzemeli granüler kolonların sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi (Araştırma Makalesi)

Investigation of encased granular columns with finite element method (Research Article)

Can Erenson, Niyazi Uğur Terzi

247-254

Farklı uç sınır koşullarına sahip kirişin Carrera Birleşik Formülasyon (CUF) çerçevesinde statik analizi (Araştırma Makalesi)

Static analysis of a beam with different end boundary conditions via Carrera Unified Formulation (CUF) (Research Article)

Esra Eylem Karataş

255-265

Harçsız yığma duvarlı betonarme çerçevenin nümerik analizi (Araştırma Makalesi)

Numerical analysis of reinforced concrete frame with dry stack masonry infill (Research Article)

Hakan Koman, Halil Nohutcu

266-275

Gelir getirmeyen su oranı tahmin modelleri (Araştırma Makalesi)

Prediction models for non-revenue water ratio (Research Article)

Burak Kızılöz, Eyüp Şişman

276-283

Tarihi Şenkaya Yünören Köprüsünün deprem performansının incelenmesi (Araştırma Makalesi)

Earthquake performance of historical Şenkaya Yünören Bridge (Research Article)

Oğuzhan Çelebi, Abdulkadir Cüneyt Aydın

284-300

Etkileşimli parçacık hidrodinamiği kullanılarak trapez eşik üzerinden geçen baraj yıkılması akımının sayısal olarak modellenmesi (Araştırma Makalesi)

Numerical modeling of dam-break flow over trapezoidal obstacle using smoothed particle hydrodynamics (Research Article)

Selahattin Kocaman

301-306



Nano parçacık silisyum dioksit (SiO_2) ile yüksek fırın cürufu karışımının kompaksiyon özelliklerine etkisi (Araştırma Makalesi)
Effects of the mixture of nanoparticle silicon dioxide (SiO_2) with blast furnace slag on the compaction characteristics (Research Article)

Firdevs Uysal, Vedat Yılmaz

307-311

Cam elyaf takviyeli polyester (CTP) profillerden oluşan tek eğrilikli uzay kafes kirişlerin yapay sinir ağları ile analizi (Araştırma Makalesi)
Analysis of single-curved space cage beams consisting of glass fiber reinforced polyester (GFRP) profiles with artificial neural networks (Research Article)

Ahmet Arslan, Metin Hakan Severcan

312-318

Eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş helislerin karışık sonlu eleman yöntemi ile serbest titreşim analizi (Araştırma Makalesi)
Free vibration analysis of axially functionally graded helices via mixed finite element method (Research Article)

Merve Ermiş

319-327

Su içeriği ve ısıl kür süresinin atık bazalt tozu esaslı geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi (Araştırma Makalesi)
The effects of water content and thermal curing time on physical and mechanical properties of waste basalt powder based geopolimer mortars (Research Article)

Serhat Çelikten, İsmail İsa Atabey

328-332

Betonarme kolonların dayanım zarflarının kesme dayanımı modelleri ile karşılaştırılması (Araştırma Makalesi)
Comparison of strength envelopes of RC columns with shear strength models (Research Article)

Tamer Dirikgil

333-350

Tekrarlı trafik yükleri altında farklı kil içeriklerine sahip orta-sıkı kum-kil karışımlarının esneklik modülünün incelenmesi (Araştırma Makalesi)
Investigation of resilient modulus of medium-dense sand-clay mixtures with different clay contents under repeated traffic loads (Research Article)

Halil İbrahim Fedakar

351-357

Kimya Mühendisliği / Chemical Engineering

Direct Red BWS tekstil boyası adsorpsiyonunun Taguchi L9(3⁴) ortogonal deney tasarımı ile araştırılması (Araştırma Makalesi)
Investigations of adsorption of Direct Red BWS textile dye using Taguchi L9(3⁴) orthogonal experimental design (Research Article)

Erbil Kavcı

358-363

Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering

Design and development of an autonomous bicycle (Research Article)
Otonom bir bisikletin tasarımı ve geliştirilmesi (Araştırma Makalesi)

İlyas Kacar, Mehmet Ali Eroğlu, Mehmet Kürşat Yalçın

364-372



Yüksek ısı akıllı hareketli bir plakadan olan ısı transferine nanoakışkanların ve çarpan jetlerin müşterek etkisinin sayısal incelenmesi (Araştırma Makalesi)

Numerical investigation of combined effect of nanofluid and impinging jet on heat transfer from a high heat flux moving surface (Research Article)

Mustafa Kılıç, Murat Gökçek

373-379

Experimental study for artificial neural network (ANN) based prediction of electric energy production of diesel engine based cogeneration power plant (Research Article)

Dizel motorlu kojenerasyon santralinin elektrik enerjisi üretiminin yapay sinir ağı (YSA) ile tahmini üzerine deneysel çalışma (Araştırma Makalesi)

Andaç Batur Çolak

380-392

The influence of perturbation motion over a slender delta wing under sideslip angle (Research Article)

Salınım hareketinin sapma açısı altındaki bir delta kanada etkileri (Araştırma Makalesi)

Mehmet Oğuz Taşcı, Sergen Tümse, Beşir Şahin, İlyas Karasu, Hüseyin Akıllı

393-403

Hidrojen neden potansiyel bir ulaşım yakıtı olarak seçilmelidir? (Araştırma Makalesi)

Why to select hydrogen as a potential transportation fuel? (Research Article)

Ayfer Veziroğlu

404-411

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği / Metallurgical and Materials Engineering

The impact of seawater aging on basalt/graphene nanoplatelet-epoxy composites: performance evaluating by Dynamic Mechanical Analysis (DMA) and short beam shear (sbs) tests (Research Article)

Deniz suyu yaşlandırmasının bazalt/grafen nanolevha-epoksi kompozitler üzerindeki etkisi: Dinamik Mekanik Analiz (DMA) ve kısa kiriş kayma testleri ile performans değerlendirmesi (Araştırma Makalesi)

Hasan Ulus

412-419

Yüksek iletkenliğe sahip farklı üç boyutlu grafen hidrojelilerin hazırlanması (Araştırma Makalesi)

Preparation of high conductive different sizes of three dimensional graphene hydrogels (Research Article)

Ersan Harputlu

420-425

1.4462 (AISI 2205) dubleks paslanmaz çelikte ısı işlem koşullarının faz değişimi, sertlik ve korozyon davranışı üzerine etkilerinin incelenmesi (Araştırma Makalesi)

Investigation of the effects of heat treatment conditions on phase change, hardness and corrosion behavior in the 1.4462 (AISI 2205) duplex stainless steel (Research Article)

Gökhan Özer

426-431

Diğer / Other

Effect of dispersion coefficient on polymer injection studied with random walk particle tracking method (Research Article)

Rastlantısal parçacık hareket yöntemiyle incelenen dağılım katsayısının polimer enjeksiyonu üzerine etkisi (Araştırma Makalesi)

Gökhan Mamak, İsmail Durgut

432-438

Müşteri davranış tahmini için bir model: Bankacılık sektörü için uygulama

A model for prediction of customer behavior: A case study for banking sector

Kevser Özdem^{1,*} , M. Ali Akcayol¹ 

¹Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara, Türkiye

Özet

Son yıllarda kampanya temelli satışlar çok büyük bir hızla artmaya devam etmektedir. Günümüzde birçok sektörde satışlar kampanyaya dayalı olarak gerçekleşmektedir. Bu nedenle kampanya yönetimi oldukça önemli bir konu haline gelmiştir. Literatürde kampanya planlaması ve yönetimi konusunda detaylı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu makalede, bankacılık sektöründe kampanya yönetimi ve müşterilerin kampanyaya yönelik ileriye dönük davranışlarının tahmini için bir model geliştirilmiştir. Bankacılık sektörüne özgü geliştirilen birliktelik analizi yapısı kullanılarak bir Portekiz bankasına ait kampanya verilerinden yaygın öge kümeleri ve birliktelik kuralları oluşturulmuştur. Elde edilen kurallarla kampanyaya katılan müşterilerin ileriye dönük davranışları tahmin edilmiştir. Ayrıca, müşterilerin davranışlarını etkileyen öznitelikler belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, en çok medeni hal ve kredi durumunun müşteri davranışını etkilediğini göstermiştir. Müşterilerin kampanyaya katılıp katılmayacakları geliştirilen model kullanılarak tahmin edilmiştir. Müşterilerin kampanyaya katılım tahmininde %87 oranında başarı sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Büyük veri analitiği, Veri madenciliği, Birliktelik analizi, Banka pazarlama kampanyası

1 Giriş

Günümüzde kampanya temelli satışlar birçok sektörde giderek artan bir öneme sahiptir. Pek çok alanda satışlar kampanyaya dayalı olarak gerçekleşmektedir. Bu değişimin bir sonucu olarak kampanya planlaması ve yönetimi oldukça önemli bir konu haline gelmiştir. Kampanya yönetimi, doğru iletişim tarzını kullanarak doğru müşteriye doğru kanaldan doğru bilgi ve teklifleri sunmaktır [1]. Bankacılık sektörü, bu konuya önem verilen başlıca alanlardan birisidir ve müşteriye uygun planlanmış kampanyalar çok önemlidir. Bu nedenle bankacılık sektöründe müşteri davranışının önceden tahmin edilebilmesi, kurumun pazarlama hedeflerine uygun kampanyalarla müşterilerine mümkün olan en iyi şekilde hitap edebilmesini sağlamaktadır.

Literatürde birliktelik kurallarının farklı alanlardaki kullanımına yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır, ancak bankacılık sektöründe müşterilerin gelecekteki davranışlarını tahmin etmeye yönelik çalışma bulunmamaktadır.

Hsieh, bir bankadaki kredi kartı müşterilerini yönetmek için entegre bir veri madenciliği ve davranışsal puanlama modeli önermiştir [4]. Farklı müşteri grupları için Apriori algoritması kullanılarak profiller oluşturulmuştur. Bu çalışmada, müşterileri davranışsal olarak tanımlamanın pazarlama stratejisi geliştirmeyi kolaylaştırdığı gösterilmiştir. Birliktelik kuralları, pazarlama alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Literatürde bu alanda

Abstract

Campaign based sales continue to increase at a very rapid rate in recent years. Today, sales in many sectors are based on the campaign. Therefore, campaign management has become a very important issue. There is no detailed study on campaign planning and management in the literature. In this article, a model is developed for campaign management in the banking sector and prediction of prospective behaviors of customers towards the campaign. Using the association analysis structure developed specifically for the banking sector, frequent itemsets and association rules were created from the campaign data of a Portuguese bank. The prospective behavior of the customers participating in the campaign was estimated with the rules obtained. In addition, attributes that affect the behavior of customers have been identified. Experimental results have shown that marital status and credit status affect customer behavior the most. Using the developed model, a prediction is made on whether the customers will participate in the campaign or not. 87% success was achieved in the prediction of customers' participation in the campaign.

Keywords: Big data analysis, Data mining, Association analysis, Bank marketing campaign

yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Wong ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, doğrudan pazarlamanın etkisinin artırılabilmesi için bir müşteri alt kümesi oluşturulmuştur [5].

Chen ve arkadaşları, müşteri davranışındaki değişiklikleri belirlemek için veri madenciliği yöntemi geliştirmişlerdir [6]. Birliktelik kuralları, müşteri profili ile satın alınan ürün öğeleri arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre müşteri davranışındaki değişiklikler için önerilen yaklaşım, yöneticilerin daha iyi pazarlama stratejileri geliştirmelerine yardımcı olmaktadır.

Moro ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, pazarlama kampanyalarının veri madenciliği tekniklerinin kullanılarak geliştirilebileceği gösterilmiştir [7]. Bu çalışmada, müşterinin kampanyaya katılım yapmasına göre başarı değerlendirmesi yapan bir model geliştirmişlerdir. Bu modelin, başarıyı etkileyen temel özellikleri belirleyerek, iş gücü, telefon iletişimleri, zaman gibi mevcut kaynakların daha iyi yönetilmesine ve yüksek kaliteli, uygun fiyatlı potansiyel satın alma müşterilerinin seçimine yardımcı olarak kampanya verimliliğini artırdığı gösterilmiştir.

Dongre ve arkadaşları, perakende sektöründe daha iyi uygulamalar için gizli örüntülerin bulunmasının önemli bir problem olduğunu belirtmiştir [8]. Birliktelik kuralları, verisetinden keşfedilen bilgiler kullanılarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan veriseti üzerinde Apriori

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kevserozdem@gazi.edu.tr (K. Özdem)

Geliş / Recieved: 08.07.2020 Kabul / Accepted: 11.11.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.766503

algoritması uygulanmış ve farklı güven değerleri ile ilişkilendirme kuralları oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre perakende sektöründeki verisetlerinde faydalı gizli örüntülerin bulunmasında oluşturulan birliktelik kurallarının faydalı olduğu belirtilmiştir.

Li ve arkadaşları 2015 yılında yaptıkları çalışmada [9], tüketicilerin katılım davranışlarını yakalamak için bir dizi dinamik nitelik kullanımı önermiştir. Çalışmada, pazarlama kampanyalarına yanıt verme ve daha sonra ücretli kullanıcılara dönüşme olasılığı daha yüksek olan kullanıcıların belirlenmesi üzerine çalışılmıştır. Kullanıcının hem görünür hem de gizli davranış kalıplarını yakalayan çeşitli dinamik nitelikler keşfedilmiştir.

Amini ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaya [10] göre, doğrudan pazarlamanın amacı, pazarlama kampanyası mesajlarına yanıt verme olasılığı en yüksek olan doğru müşterileri bulmaktır. Bu müşterileri tahmin etmek için veri madenciliği teknikleri kullanılabilir. Bununla birlikte dengesiz veriler, tahmin işlemine bazı zorluklar getirmektedir. Bu çalışmada, kümeleme ve yetersiz örnekleme ile dengesizlik ortadan kaldırılarak bir sınıflandırma yöntemi önerilmiştir. Deneysel sonuçlar ile önerilen yöntemin, tahmin doğruluğunu artırabildiği gösterilmiştir.

Miguéis ve arkadaşlarının 2017 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada [11], bir bankanın gerçek verileri kullanarak doğrudan pazarlama kampanyalarına verilen yanıtı öngörmek için bir model önerilmiştir. Bu tekniğin bankacılık alanında uygulanması başlangıç aşamasında olduğu belirtilmiştir. Yanıt tahmini için rastgele ormanlardan, sınıf dengesizliği için ise SMOTE ve EasyEnsemble yöntemlerinden yararlanılmıştır.

Parlar 2017 yılındaki çalışmasında [12], müşteri verilerinin sahip olduğu boyut göz önünde bulundurulduğunda, bir insan analist ekibi ile manuel olarak analiz etmenin imkansız olduğunu belirterek, kampanyanın etkinliğini artırmak ve önemli nitelikleri yorumlamak için veri madenciliği tekniklerini kullanmıştır. Önemli nitelikleri seçmek için bilgi kazanımı (information gain) ve Ki-kare yöntemleri göz önünde bulundurulmuştur. Deneysel sonuçlarda, azaltılmış nitelik kümesinin sınıflandırma performansını iyileştirdiğini gösterilmiştir.

Ładyżyński ve arkadaşları, 2019 yılında yaptıkları çalışmada [13], kredi ile ilgilenen müşterileri belirlemek amacıyla rastgele ormanlar ve derin sinir ağları ile sınıflandırmaya dayalı bir sistem önerilmiştir. Ancak, elde edilen bulgular sonucunda, önerilen sistemde iyileştirme ve daha fazla araştırma yapılması gerektiği belirtilmiştir.

2 Müşterilerin ileriye dönük davranış tahmini

Farklı alanlarda başarılı bir şekilde kullanılan veri madenciliği yöntemlerinin başında yaygın öge kümeleri (frequent itemset) ve birliktelik kuralları gelmektedir.

Veri madenciliği, basit ve açık olmayan, önceden bilinmeyen ve yararlı olan örüntülerin ya da bilginin çok büyük miktarlardaki veriden çıkarılmasıdır. Birliktelik kuralları, veri madenciliğinde ilginç örüntülerin veya ilişkilerin keşfi amacıyla farklı alanlarda yaygın kullanılan bir yöntemdir. En yaygın uygulama alanları olarak market

sepeti analizi, tıbbi tanı, protein dizisi analizi, sahtekarlık tespiti ve siber dolandırıcılık tespiti örnek olarak sayılabilir [2, 14-17].

Veritabanlarından kurallar çıkarılması, Agrawal ve Swami tarafından önerildiğinden itibaren farklı alanlardaki çalışmalarda yoğun ilgi görmüştür [3, 14, 15, 18, 19]. Bu kurallar, A ve B nitelik değerleri olmak üzere, $A \rightarrow B$ şeklinde ifade edilebilmektedir. Bu kurallar, A kümesindeki olayların gerçekleşmiş olması durumunda B kümesindeki olayların gerçekleşme olasılığını incelemektedir.

Birliktelik kurallarının elde edilmesinde ilk aşama, yaygın öge kümelerinin tümünün oluşturulmasıdır. Bu kümeler, belirlenen eşik destek değerini sağlayacak ölçüde verisetinde bulunan öğelerden oluşmaktadır. Destek sayısı (σ), bir öğeler kümesinin veri kümesinde görülme sıklığı, başka bir deyişle öğeler kümesinin içinde bulunma sayısıdır. Destek oranı (s) ise, öğeler kümesinin içinde bulunduğu hareketlerin toplam hareketlere oranı olarak ifade edilmektedir.

Daha sonra, elde edilen iki ve daha fazla ögeye sahip kümeler kullanılarak belirlenen minimum güven (c) değerinden yüksek güvene sahip kurallar oluşturulmaktadır. $A \rightarrow B$ kuralı için güven değeri, $A \cup B$ öğeler kümesinin bulunduğu hareketlerin, A öğeler kümesinin bulunduğu hareketlere oranıdır. A ve B verisine ait öğeler kümesi olmak üzere bu oran Denklem (1) ile ifade edilir.

$$c = \frac{\sigma(A \cup B)}{\sigma(A)} \quad (1)$$

$A \rightarrow B$ kuralı için güven değeri, A ögesinin bulunduğu herhangi bir küme içerisinde B ögesinin bulunma olasılığı olarak da ifade edilebilmektedir.

Yaygın öge kümelerinin ve birliktelik kurallarının elde edilebilmesi için gereken yaygın öge kümelerinin oluşturulmasında çeşitli algoritmalarla yararlanılmaktadır. Apriori, bu algoritmalarla en önemli olanıdır ve oldukça yaygın kullanılmaktadır.

Apriori algoritması, özellikle çok büyük ölçekli verisetleri üzerinde gerçekleştirilen veri madenciliği çalışmalarında yaygın kullanılmaktadır [20, 21-23]. Büyük ölçekli veri setlerinde yüksek ölçeklenebilir, yüksek performans ve kolay uygulanabilir olmasından dolayı başarılı sonuçlar vermektedir. Bu yaklaşım, aşağıdan yukarıya yapılandırma yaparak bir kümenin destek değerinin, boş küme hariç tüm alt kümelerinin destek değerinden büyük olamayacağı kuralını uygular [24].

Birliktelik kuralları farklı uygulamalarda başarılı bir şekilde kullanılmıştır [25- 28]. Ancak, bankacılık sektöründe müşterilerin ileriye dönük davranış tahmini için yapılan çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, bankacılık sektöründe kampanya yönetimi amacıyla yaygın öğeler ve birliktelik kuralları probleme özgü bir şekilde uyarlanarak kullanılmıştır. İlk olarak birliktelik kuralları yardımı ile bir tahmin modeli geliştirilmiştir. Daha sonra, bir test kümesi üzerinde bu model kullanılarak ileriye dönük müşterilerin kampanyaya katılım katılmayacakları tahmin edilmiştir.

Bu çalışmada geliştirilen tahmin modelinde, probleme özgü geliştirilmiş bir birliktelik analizi kullanılmıştır. Bu

analizin gerçekleştirilmesinde hız açısından verimli olması amacıyla yaygın olmayan kümelerin üst kümelerinin de yaygın olamayacağı kuralından yararlanılmıştır.

Öncelikle, verisetinde bulunan yaygın öğeleri oluşturmak amacıyla, bir elemandan başlanarak eşik değeri sağlayacak şekilde sırasıyla daha fazla eleman içeren yaygın öğe kümeleri üretilmiştir. Daha sonra, elde edilen bu yaygın öğe kümelerine geliştirilen birliktelik analizi uygulanarak müşterinin kampanyaya katılımını içeren kurallar oluşturulmuştur.

3 Veriseti

Bu çalışmada kullanılan veriseti, bir Portekiz bankacılık kurumunun doğrudan pazarlama kampanya bilgilerini içermektedir [7]. Pazarlama kampanyalarının en önemli bileşeni telefon görüşmeleridir. Verisetinde, müşteriye ait kişisel bilgiler ve kampanya ile ilgili görüşmeler yer almaktadır ve müşterinin kampanyaya katılıp katılmadığı etiketi belirtilmiştir.

Çalışmada kullanılan verisetinde toplam 45211 kayıt bulunmaktadır ve eksik veri bulunmamaktadır. Bu kayıtların 5289 tanesi kampanyayı kabul eden müşterilere, kalan 39922 tanesi ise kampanyayı reddeden müşterilere aittir. Verisetinden örnek bir kısım **Tablo 1**'de sunulmuştur.

3.1 Veri önışleme

Veri önışleme aşamasında, 'age', 'balance' ve 'campaign' isimli niteliklere ait değerler gruplandırılmıştır. Veri içerisinde bulunan 'Evet' ve 'Hayır' gibi değerler, özelliğın daha anlaşılabilir olması amacıyla daha açık ifadeler kullanılarak genişletilmiştir. Nitelik çıkarımı (feature extraction) yapılarak çok düşük etkiye sahip ve tekrar eden değerler verisetinden çıkartılmıştır. Veri önışleme aşamasından sonra elde edilen verisetinde bulunan nitelikler ve değerleri **Tablo 2**'de verilmiştir.

3.2 Eğitim ve test verisetleri

Bu çalışmada veriseti, eğitim verisi (training data) ve test verisi (test data) olarak ikiye bölünmüştür. Verisetinin %70'lik kısmı eğitim verisi olarak, kalan %30'luk kısmı ise test verisi olarak belirlenmiştir. Eğitim ve test verileri rastgele seçilerek oluşturulmuştur. Eğitim verisinde 31647, test verisinde ise 13564 veri kullanılmıştır. Eğitim verisi, kampanya kabul ve ret durumları ile ilgili birliktelik kuralları elde etmek amacıyla, test verisi ise yeni gelecek müşteriler için tahmin amaçlı kullanılmıştır. Eğitim verisi ile elde edilen kurallardan yola çıkılarak geliştirilen model kullanılarak, test verisi üzerinde müşterilerin kampanyaya katılıp katılmayacaklarına ilişkin tahmin yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tablo 1. Veriseti alanları ve örnek değerleri

Age	Job	Marital	Education	Default	Balance	Housing	Loan
58	management	married	tertiary	no	2143	yes	no
44	technician	single	secondary	no	29	yes	no
33	entrepreneur	married	secondary	no	2	yes	yes
42	entrepreneur	divorced	tertiary	yes	2	yes	no

Tablo 2. Verisetindeki nitelikler ve değerleri

Nitelik	Değerler
Age (Müşterinin yaşı)	(85+, 75-84, 65-74, 55-64, 45-54, 35-44, 25-34, 18-24)
Job (Müşterinin işi)	(admin, unemployed, management, housemaid, entrepreneur, student, blue-collar, self-employed, retired, technician, services)
Marital (Medeni hali)	(married, divorced, single)
Education (Eğitim durumu)	(primary, secondary, tertiary)
Default (Kredi durumu)	(credit, no_credit)
Balance (Bakiyesi-Euro)	(40000+, 20000-40000, 10000-20000, 5000-10000, 1000-5000, 900-1000, 800-900, 700-800, 600-700, 500-600, 400-500, 300-400, 200-300, 100-200, 0-100)
Housing (Konut kredisi)	(housing, no_housing)
Loan (Kişisel kredi)	(loan, no_loan)
Month (Müşteri ile görüşülen ay)	("jan", "feb", ..., "nov", "dec")
Campaign (Kampanya için görüşme sayısı)	(60-69, 50-59, 40-49, 30-39, 20-29, 10-19, 5-9, 1-4)
Y (Kampanya kabul durumu)	(subscribed, deny)

4 Deneysel sonuçlar

Bu çalışmada yapılan deneysel çalışmalar için geliştirilen yazılım, Python programlama dili ile Jupyter Notebook kullanılarak geliştirilmiştir.

Geliştirilen model ile yaygın öğe kümesi seçiminde minimum destek değeri, farklı değerler üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda, 0.5 olarak belirlenmiştir. Bu durumda yaygın öğe olarak belirtilen kümelerin, verisetinin yarısında bulunduğu ifade edilmektedir. Seçilen minimum destek değeri ile elde edilen yaygın öğe kümeleri, kampanya kabul durumları {subscribed} için **Tablo 3**'te ve kampanya ret durumları {deny} için **Tablo 4**'te verilmiştir

Tablo 3. {subscribed} için minimum destek değeri 0.5 olduğunda 1, 2, 3, 4, 5-yaygın öge kümeleri

Yaygın öge sayısı	Yaygın öge kümeleri
1	{1-4}, {married}, {no_credit}, {no_housing}, {no_loan}, {subscribed}
2	{1-4, no_credit}, {1-4, no_housing}, {1-4, no_loan}, {1-4, subscribed}, {married, no_credit}, {married, subscribed}, {no_credit, no_housing}, {no_credit, no_loan}, {no_credit, subscribed}, {no_housing, no_loan}, {no_housing, subscribed}, {no_loan, subscribed}
3	{1-4, no_credit, no_housing}, {1-4, no_credit, no_loan}, {1-4, no_credit, subscribed}, {1-4, no_housing, no_loan}, {1-4, no_housing, subscribed}, {1-4, no_loan, subscribed}, {married, no_credit, subscribed}, {no_credit, no_housing, no_loan}, {no_credit, no_housing, subscribed}, {no_credit, no_loan, subscribed}, {no_housing, no_loan, subscribed}
4	{1-4, no_credit, no_housing, no_loan}, {1-4, no_credit, no_housing, subscribed}, {1-4, no_credit, no_loan, subscribed}, {1-4, no_housing, no_loan, subscribed}, {no_credit, no_housing, no_loan, subscribed}
5	{1-4, no_credit, no_housing, no_loan, subscribed}

Tablo 4. {deny} için minimum destek değeri 0.5 olduğunda 1, 2, 3, 4-yaygın öge kümeleri

Yaygın öge sayısı	Yaygın öge kümeleri
1	{1-4}, {deny}, {housing}, {married}, {no_credit}, {no_loan}, {secondary}
2	{1-4, deny}, {1-4, married}, {1-4, no_credit}, {1-4, no_loan}, {deny, housing}, {deny, married}, {deny, no_credit}, {deny, no_loan}, {housing, no_credit}, {married, no_credit}, {no_credit, no_loan}, {no_credit, secondary}
3	{1-4, deny, no_credit}, {1-4, deny, no_loan}, {1-4, married, no_credit}, {1-4, no_credit, no_loan}, {deny, housing, no_credit}, {deny, married, no_credit}, {deny, no_credit, no_loan}
4	{1-4, deny, no_credit, no_loan}

Kabul durumunda eşiği geçen en fazla beş elemanlı küme elde edilirken ret durumunda en fazla dört elemanlı küme elde edilmiştir. Elde edilen yaygın öge kümeleri kullanarak kampanya kabul ve ret durumları ile ilgili minimum güven değeri 0,5 olan kurallar oluşturulmuştur. Böylece yalnızca kabul ve ret ile güçlü bağlantısı bulunan kurallar seçilmiştir. Seçilen birliktelik kuralları için güven, destek ve interest değerleri **Tablo 5** ve **Tablo 6**'da sunulmuştur.

Tablo 5. Ret ile ilgili birliktelik kuralları

Kural	Güven	Destek	Interest
{1-4}->{deny}	0.88	0.76	-0.01
{housing}->{deny}	0.92	0.51	0.04
{married}->{deny}	0.90	0.54	0.01
{no_credit}->{deny}	0.88	0.87	0.00
{no_loan}->{deny}	0.87	0.74	-0.01
{1-4, no_credit}->{deny}	0.87	0.74	-0.01
{1-4, no_loan}->{deny}	0.87	0.63	0.02
{housing, no_credit}->{deny}	0.92	0.50	0.04
{married, no_credit}->{deny}	0.90	0.53	0.01
{no_credit, no_loan}->{deny}	0.87	0.73	-0.01
{1-4, no_credit, no_loan}->{deny}	0.87	0.62	-0.02

Elde edilen birliktelik kurallarının güven, destek ve interest değerleri değerlendirildiğinde kampanyaya katılım durumunu en çok müşterinin medeni hali, kredi durumu ve kampanya kapsamında kaç defa arandığının etkilediği görülmektedir. **Tablo 5**'te koyu olarak belirtilen satırlarda da görülebileceği üzere ev kredisi bulunan müşterilerin %92'si

kampanyayı reddetmiştir. Medeni hali evli olan müşterilerin ise %90'ı kampanyayı reddetme eğilimindedir.

Interest değeri esas alınarak yapılan değerlendirmede, **Tablo 6**'da koyu renkle verilen {1-4, no_credit, no_housing, no_loan} öge kümesi dikkat çekmektedir. Bu kümenin tüm veriseti içerisindeki destek değeri 0.32 iken kabul eden müşteri verilerindeki destek değeri 0.55 olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla, 0.23'lük bir interest değeri ile bu kümede bulunan nitelikler, kabul durumunu destekleyen faktörler olarak belirmektedir. Aynı şekilde koyu olarak verilmiş diğer satırlar da incelendiğinde, 0.23 ve 0.21 farklar ile bu öge kümelerinin, kabul eden müşteri verileri içerisinde daha yaygın olduğu fark edilmektedir. Yani kampanya kapsamında 1-4 defa aranmış olan ve herhangi bir kredisi bulunmayan müşterilerin kampanyayı kabul etme eğiliminde oldukları görülmektedir.

Müşterinin medeni halinin evli olması ve hali hazırda bir ev kredisinin bulunması ise **Tablo 6**'da negatif interest değeri ile de anlaşılacağı üzere, kampanyaya ters bir etki yaparak müşteriyi ret durumuna yönlendiren en etkili nitelikler olarak görülmektedir.

Farklı eşik değerleri kullanılarak gerçekleştirilen birliktelik analizleri sonucunda elde edilen bulgular, test verisi üzerine uygulanarak yeni gelecek müşterilere yönelik tahminler gerçekleştirilmiştir. Yapılan tahminler, müşterilerin verdiği kararlar ile karşılaştırıldığında; 0.3 eşik değeri kullanıldığında tahminlerin %82 oranında, 0.5 eşik değeri kullanıldığında %87 oranında, 0.7 eşik değeri kullanıldığında %86 oranında doğru olduğu tespit edilmiştir. Test kümesinde yapılan ileriye dönük tahminin doğruluk değerleri ayrıntılı olarak, 0.3 eşik değeri için **Tablo 7**'de, 0.5 eşik değeri için **Tablo 8**'de ve 0.7 eşik değeri için **Tablo 9**'da verilmiştir.

Tablo 6. Kabul ile ilgili birliktelik kuralları

Kural	Güven	Destek	Interest
{1-4}->{subscribed}	0.93	0.11	0.06
{married}->{subscribed}	0.52	0.06	-0.08
{no_credit}->{subscribed}	0.99	0.12	0.01
{no_housing}->{subscribed}	0.63	0.07	0.19
{no_loan}->{subscribed}	0.91	0.11	0.07
{1-4, no_credit}->{subscribed}	0.92	0.11	0.07
{1-4, no_housing}->{subscribed}	0.59	0.07	0.21
{1-4, no_loan}->{subscribed}	0.84	0.10	0.12
{married, no_credit}->{subscribed}	0.52	0.06	-0.07
{no_credit, no_housing}->{subscribed}	0.63	0.07	0.19
{no_credit, no_loan}->{subscribed}	0.90	0.11	0.07
{no_housing, no_loan}->{subscribed}	0.59	0.07	0.21
{1-4, no_credit, no_housing}->{subscribed}	0.58	0.07	0.21
{1-4, no_credit, no_loan}->{subscribed}	0.84	0.10	0.12
{1-4, no_housing, no_loan}->{subscribed}	0.55	0.06	0.23
{no_credit, no_housing, no_loan}->{subscribed}	0.59	0.07	0.21
{1-4, no_credit, no_housing, no_loan}->{subscribed}	0.55	0.06	0.23

Tablo 7. 0.3 eşik değeri kullanılarak yapılan tahmine ait doğruluk tablosu

	Ret durumu	Kabul durumu	Toplam
Ret tahmini	10 164	648	10 812
Kabul tahmini	1 808	944	2 752
Toplam	11 972	1 592	13 564

Tablo 8. 0.5 eşik değeri kullanılarak yapılan tahmine ait doğruluk tablosu

	Ret durumu	Kabul durumu	Toplam
Ret tahmini	10 610	406	11 016
Kabul tahmini	1 362	1 186	2 548
Toplam	11 972	1 592	13 564

Tablo 9. 0.7 eşik değeri kullanılarak yapılan tahmine ait doğruluk tablosu

	Ret durumu	Kabul durumu	Toplam
Ret tahmini	10 562	520	11 082
Kabul tahmini	1 410	1 072	2 482
Toplam	11 972	1 592	13 564

Tablo 7'ye göre 13564 verinin 10812 tanesi model tarafından ret olarak tahmin edilmiştir. Bunların 10164 tanesi (doğru pozitif) gerçekte de kampanyayı reddeden müşterilerdir. 648 tanesi (yanlış pozitif) ise aslında kampanyayı kabul etmiştir. Gerçekte reddeden 11972 müşteriden 1808 tanesi (yanlış negatif) ise model tarafından tespit edilememiştir.

Tablo 8'e göre 13564 verinin 11016 tanesi model tarafından ret olarak tahmin edilmiştir. Bunların 10610 tanesi gerçekte de kampanyayı reddeden müşterilerdir. 406 tanesi ise aslında kampanyayı kabul etmiştir. Gerçekte reddeden 11972 müşteriden 1362 tanesi ise model tarafından tespit edilememiştir.

Tablo 9'a göre 13564 veriden 11082 tanesi model tarafından ret olarak tahmin edilmiştir. Bunların 10562 tanesi doğru pozitif, 520 tanesi yanlış pozitifdir. Gerçekte kampanyayı reddeden 11972 müşteriden 1410 tanesi ise model tarafından tespit edilemeyerek yanlış negatif kategorisinde belirlemiştir.

Bu değerler; literatürde yaygın olarak kullanılmakta olan doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), duyarlılık (recall) ve F1-skoru ölçütlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Doğruluk, yapılan tahminin hangi oranda doğru olduğunu göstermektedir. Bu oran **Denklem (2)**'de olduğu gibi ifade edilebilmektedir.

$$\text{doğruluk} = \frac{\text{doğru tahmin sayısı}}{\text{toplam tahmin sayısı}} \quad (2)$$

Bu ifade matematiksel olarak, DP doğru pozitif sayısı, DN doğru negatif sayısı, YP yanlış pozitif sayısı ve YN yanlış negatif sayısı olmak üzere, **Denklem (3)**'te daha detaylı bir şekilde sunulmuştur.

$$\text{doğruluk} = \frac{DP + DN}{DP + DN + YP + YN} \quad (3)$$

Kesinlik ölçütü, ret tahmini yapılanların gerçekte ne kadarının ret olduğunu belirtmektedir. Matematiksel olarak, **Denklem (4)**'te verildiği üzere, doğru pozitif sayısının toplam pozitif sayısına oranı şeklinde hesaplanabilmektedir.

$$\text{kesinlik} = \frac{DP}{DP + YP} \quad (4)$$

Duyarlılık ölçütü, ret durumlarının ne kadarının ret olarak tahmin edilebildiğini göstermektedir. Bunun için doğru pozitiflerin, doğru pozitifler ve pozitif olması gereken ancak negatif olarak tahmin edilen yanlış negatiflerin toplamına oranı alınmaktadır. Bu oran **Denklem (5)**'te gösterilmiştir.

$$\text{duyarlılık} = \frac{DP}{DP + YN} \quad (5)$$

F1-skoru ise, **Denklem (6)**'da ifade edildiği üzere, kesinlik ve duyarlılık değerlerinin harmonik ortalamasını vermektedir.

$$\text{F1 skoru} = 2 \times \frac{\text{kesinlik} \times \text{duyarlılık}}{\text{kesinlik} + \text{duyarlılık}} \quad (6)$$

Geliştirilen model kullanılarak test kümesinde yapılan tahminlere ilişkin ölçütler, farklı eşik değerlere göre **Tablo 10**'da ve görsel olarak **Şekil 1**'de verilmiştir.

Tablo 10. Ret tahminine yönelik başarı ölçütleri

Ölçüt	0.3 Eşiği	0.5 Eşiği	0.7 Eşiği
Doğruluk (Accuracy)	0.82	0.87	0.86
Kesinlik (Precision)	0.94	0.96	0.95
Duyarlılık (Recall)	0.85	0.87	0.88
F1-skoru	0.89	0.91	0.91

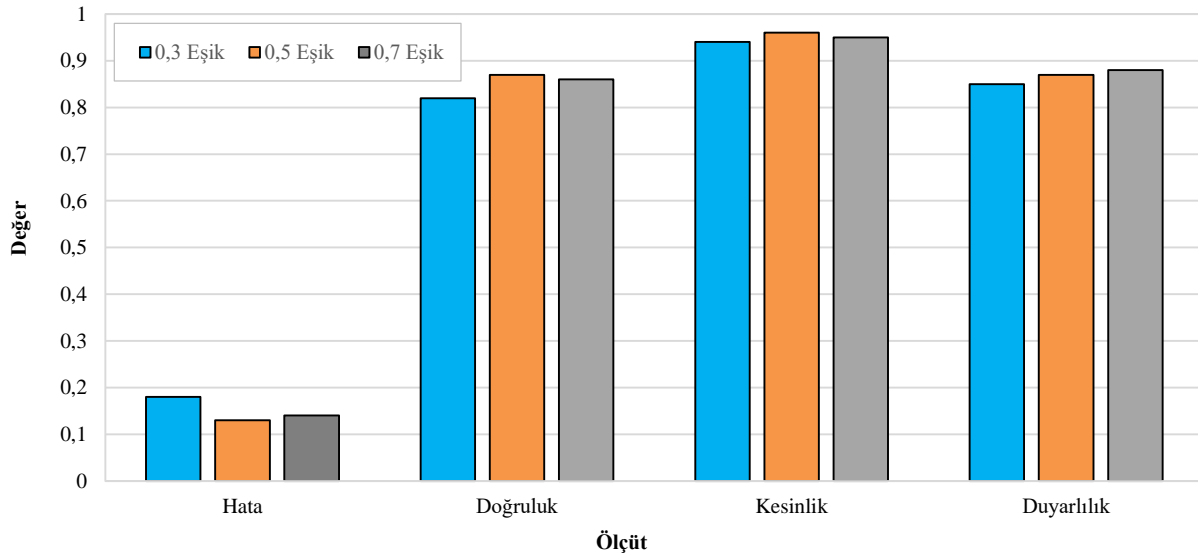
Farklı eşik değerleri ile gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar incelendiğinde, en doğru tahminlerin 0.5 ile yapıldığı gözlemlenmiştir. 0.3 değeri kullanılarak yapılan tahminlerde önemsiz ya da önemi düşük birçok öge kümesi ve kural da tahmin sürecine dahil edildiğinden yanlış tahminler ortaya çıkmaktadır. 0.7 değeri kullanılarak yapılan tahminlerin sonuçları ise 0.3 ile karşılaştırıldığında daha iyi olmasına rağmen 0.5 ile elde edilen sonuçlar kadar başarılı olamamıştır. Bunun nedeni, aslında ayırt etmede önemli olabilecek kuralların 0.7 ile yapılan deneylerde bulunan fazla kısıtlamadan dolayı sürece dahil edilememesi olarak görülmektedir.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, bankacılık sektöründe kampanya yönetimi için yaygın öge ve birliktelik kurallarına dayalı bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile müşterilerin kampanyaya yönelik ileriye dönük davranışlarının tahmini gerçekleştirilmiştir.

Bu amaçla, veri ön işlemeden geçirilen veri setinden farklı minimum destek değerleri kullanılarak yaygın öge kümeleri ve bu kümelere yararlanılarak birliktelik kuralları elde edilmiştir. Elde edilen kurallardan yola çıkarak müşterilerin kampanyaya yönelik kabul ve ret davranışlarını tahmin eden bir sistem geliştirilmiştir.

Deneysel sonuçlara göre, müşterinin kampanya kapsamında 1-4 defa aranmış olması ve herhangi bir kredisinin bulunmaması 0.23'lük bir interest değeri ile kabul durumunu desteklemektedir. Aynı şekilde, müşterilerin ev ya da kişisel bir kredisinin bulunmaması, kampanyayı kabul eden müşterilerde %21 oranında daha yaygın bir durumdur. Öte yandan, müşterinin evli olmasının, kampanyayı kabul eden müşteriler içerisinde %8 oranında daha az yaygın olduğu görülmüştür. Tek başına {no_credit} niteliğinin ise hem ret hem de kabul verilerinde yakın bir dağılıma sahip olduğundan, davranış tahmininde bir etkisinin bulunmayacağı gözlemlenmiştir.



Şekil 1. Doğruluk değerleri grafiği

Müşterinin evli olması ve hali hazırda bir ev kredisinin bulunması ise kampanyaya ters bir etki yaparak müşteriye ret durumuna yönlendirmektedir. Ev kredisi bulunan müşterilerin %92'si kampanyayı reddetmiştir. Medeni hali evli olan müşterilerin ise %90'ı kampanyayı reddetme eğilimindedir. Elde edilen bu sonuçlar, banka tarafından daha sonra oluşturulacak kampanyalarda müşteri davranışlarının tahmin edilmesi veya müşteri profiline uygun kampanya oluşturulması amacıyla kullanılabilir.

Bu kapsamda test verisi üzerinde yapılan deneyler sonucunda 0.5 eşik değeri ile eğitilen modelin daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Müşteri davranışı, bu model tarafından %87 oranında, 0.3 eşik değeri ile oluşturulan model tarafından ise 0.82 oranında bir doğruluk ile tahmin edilebilmiştir. 0.7 ile oluşturulan model ise %86 ile bu orana yakın olsa da gerisinde kalmıştır.

En başarılı model ile yapılan tahminde, kampanyayı reddeden müşterilerin %87'si tespit edilmiştir. Kampanyayı reddedeceği tahmin edilen müşterilerin ise %96'sı gerçekten kampanyayı reddetmiştir. Geliştirilen bu modeli kullanarak bankalar, ileriye dönük müşteri davranış tahmini gerçekleştirebilecektir. Müşteri davranışlarının bu başarı ile önceden tahmin edilebiliyor olması bankanın müşterilerine uygun kampanyalar ile hedefine ulaşmasına yardımcı olacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] H. Hippner, W. Leusser and K. D. Wilde, Campaign management of the fourth generation. Proceedings of 42nd Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 1-9, Waikoloa, Hawaii, 5-8 January 2009.
- [2] S. T. U. Huq and V. Ravi, Evolutionary multi-objective optimization framework for mining association rules. *arXiv preprint arXiv:2003.09158*, 2020.
- [3] R. Agrawal, T. Imieliński, and A. Swami, Mining association rules between sets of items in large databases. ACM SIGMOD international conference on management of data, pp. 207-216, Washington D.C., USA, June 1993.
- [4] N. C. Hsieh, An integrated data mining and behavioral scoring model for analyzing bank customers. *Expert systems with applications*, 27 (4), 623-633, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2004.06.007>.
- [5] K. W. Wong, S. Zhou, Q. Yang, and J. M. S. Yeung, Mining customer value: From association rules to direct marketing. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 11 (1), 57-79, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10618-005-1355-x>.
- [6] M. C. Chen, A. L. Chiu, and H. H. Chang, Mining changes in customer behavior in retail marketing. *Expert Systems with Applications*, 28 (4), 773-781, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2004.12.033>.
- [7] S. Moro, R. Laureano, and P. Cortez, Using data mining for bank direct marketing: An application of the crisp-dm methodology. *Proceedings of European Simulation and Modelling Conference-ESM '2011*, pp. 117-121, Guimaraes, Portugal, 24-26 October 2011.
- [8] J. Dongre, G. L. Prajapati, and S. V. Tokekar, The role of Apriori algorithm for finding the association rules in data mining. *Proceedings of 2014 International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT)*, pp. 657-660, Ghaziabad, India, 7-8 February 2014.
- [9] Y. Li, P. Murali, N. Shao, and A. Sheopuri, Applying data mining techniques to direct marketing: challenges and solutions. *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Data Mining Workshop (ICDMW) '15*, 2015, pp. 319-327, Atlantic City, NJ, USA, 14-17 November 2015.
- [10] M. Amini, J. Rezaeenour, and E. Hadavandi, A cluster-based data balancing ensemble classifier for response modeling in bank direct marketing. *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 14 (4), 1550022, 2015. <https://doi.org/10.1142/S1469026815500224>.
- [11] V. L. Miguéis, A. S. Camanho, and J. Borges, Predicting direct marketing response in banking: comparison of class imbalance methods. *Service Business*, 11 (4), 831-849, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11628-016-0332-3>.
- [12] T. Parlar, Using data mining techniques for detecting the important features of the bank direct marketing data. *International Journal of Economics and Financial Issues*, 7 (2), 692, 2017.
- [13] P. Ładyżyński, K. Żbikowski, and P. Gawrysiak, Direct marketing campaigns in retail banking with the use of deep learning and random forests. *Expert Systems with Applications*, 134, 28-35, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.05.020>.
- [14] M. A. Valle, G. A. Ruz, and R. Morrás, Market basket analysis: Complementing association rules with minimum spanning trees. *Expert Systems with Applications*, 97, 146-162, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.12.028>.
- [15] G. Agapito, P. H. Guzzi, and M. Cannataro, Parallel extraction of association rules from genomics data. *Applied Mathematics and Computation*, 350, 434-446, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2017.09.026>.
- [16] A. Verma, A. Taneja, and A. Arora, Fraud detection and frequent pattern matching in insurance claims using data mining techniques. *Tenth International Conference on Contemporary Computing (IC3)*, pp. 1-7, Noida, India, 10-12 August 2017.
- [17] K. C. Lekha, and S. Prakasam, Data mining techniques in detecting and predicting cyber crimes in banking sector. *International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, pp. 1639-1643, Chennai, India, 1-2 August 2017.
- [18] C. C. Shen, L. Y. Hu, and Y. H. Hu, Comorbidity study of borderline personality disorder: applying association rule mining to the Taiwan national health insurance

- research database. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 17 (1), 8, 2017. <https://doi.org/10.1186/s12911-016-0405-1>.
- [19] H. Changhai, and H. Shenping, Factors correlation mining on maritime accidents database using association rule learning algorithm. *Cluster Computing*, 22 (2), 4551-4559, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10586-018-2089-z>.
- [20] R. Agrawal, and R. Srikant, Fast algorithms for mining association rules. *Proceedings of 20th int. conf. very large data bases, VLDB*, pp. 487-499, Santiago de Chile, Chile, 12-15 September 1994.
- [21] S. Rathee, and A. Kashyap, Adaptive-Miner: An efficient distributed association rule mining algorithm on Spark. *Journal of Big Data*, 5 (1), 6, 2018. <https://doi.org/10.1186/s40537-018-0112-0>.
- [22] S. Biswas, N. Biswas, and K. C. Mondal, Parallel Apriori based distributed association rule mining: A comprehensive survey. *Fourth International Conference on Research in Computational Intelligence and Communication Networks (ICRCICN)*, pp. 202-207, Kolkata, India, 22-23 November 2018.
- [23] E. Stamoulakatou, A. Gulino, and P. Pinoli, DLA: A distributed, location-based and Apriori-based algorithm for biological sequence pattern mining. *IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, pp. 1121-1126, Seattle, WA, USA, 10-13 December 2018.
- [24] B. Liu, *Web data mining: exploring hyperlinks, contents, and usage data*. Leipzig: Springer Science & Business Media, 2007. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-37882-2>
- [25] H. Yang, C. Rudin, and M. Seltzer, Scalable Bayesian rule lists. *Proceedings of International Conference on Machine Learning*, pp. 3921-3930, Sydney, Australia, 6-11 August 2017.
- [26] T. Wang, Multi-value rule sets for interpretable classification with feature-efficient representations. *Proceedings of Advances in Neural Information Processing Systems*, pp. 10835-10845, Montreal, Canada, 2-8 December 2018.
- [27] C. Song, and T. Ge, Discovering and managing quantitative association rules. *Proceedings of the 22nd ACM international conference on Information & Knowledge Management*, pp. 2429-2434, San Francisco, California, USA, October 2013.
- [28] F. Mendoza Palechor, A. Carrascal Oviedo, and E. De la Hoz, Association rules implementation for affinity analysis between elements composing multimedia objects. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 97 (6), 1764-1774, 2019. Available: <http://hdl.handle.net/11323/5262>.





Evaluation of the air quality and CO₂-equivalent change of Kayseri during the COVID-19 outbreak

COVID-19 salgını sırasında Kayseri'nin hava kalitesi ve eşdeğer CO₂ değişiminin değerlendirilmesi

Şükrü Taner Azgın^{1,2*} , Nesrin Kekeçoğlu² , Rabia Ennur Yamaç² 

¹ Erciyes University, Energy Conversion Research, and Application Center, Kayseri, 38039, Turkey

² Erciyes University, Environmental Engineering Department, 38039, Kayseri, Turkey

Abstract

The focus of this paper is to evaluate the air quality change of Kayseri Province during the Covid-19 outbreak and examine the possible climate change impact. Air quality were evaluated using PM₁₀, SO₂, air temperature, and natural gas consumption data for 56-day quarantine period in Kayseri. Analysis of variance (ANOVA) applied to all data set and then the Tukey-Kramer procedure implemented. CO₂ equivalent calculated with EPA (United States Environmental Protection Agency) formulas. The PM₁₀ concentration of 2020 decreased by 40% and 9% in the city center and organized industrial zone (OIZ), respectively compared to 2019. As for SO₂, 34% and 30% decreased was seen for the city center and OIZ, respectively. CO₂ emission from transportation and natural gas decreased by 5.5 times and 16% than normal periods, respectively. Total reducing CO₂ emission during 56-day pandemic period was almost 1 million ton.

Keywords: Air quality, Climate change, COVID-19, CO₂-equivalent, Kayseri, Turkey,

1 Introduction

27 pneumonia cases whose ethiology is unknown and which showed itself in SARS-CoV and MERS-CoV strains before in 2003 and 2012 were detected in Wuhan city in China and the rapid increase in the number of cases in a very short period of time caused to worries in all over the world [1-3]. World Health Organization (WHO) declared this virus called as Covid-19 as global health emergency on January 30th, 2020 after its expansion to some countries with the foreign and domestic travels of the people [4, 5]. There are approximately 4,179,479-approved cases and a total of 287,525 deaths all over the world as of May 13th, 2020 and these numbers continue increasing day by day [5, 6].

The first emergence date of the virus in Turkey is March 11th, 2020 and there are 143114 approved cases and a total of 3952 deaths as of March 13th, 2020 according to the data of the Ministry of Health in the Republic of Turkey [7]. Turkey is one of the countries taking the earliest precautions regarding Covid-19, the precautions have been gathered under the headlines such as for the resource, for the infection way and for the healthy people and they continue to be taken [8]. Within this scope; social and communal precautions are taken in the struggle with the pandemia and the numbers of

Özet

Bu çalışma ile Covid-19 karantina önlemlerinin Türkiye genelinde başladığı 11 Mart 2020 tarihi kıstas alınarak Kayseri ili hava kalitesindeki değişimin belirlenmesi ve CO₂ eşdeğeri cinsinden iklim değişikliği üzerinde yarattığı pozitif katkının ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. 11 Mart-5 Mayıs dönemlerine ait 56 günlük 2020 yılı ve geçmiş beş yıla ait PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonları, doğal gaz tüketim verileri, ortalama hava sıcaklığı ve araç trafiğine dair veriler temin edilip varyans (ANOVA) ve Tukey-Kramer çoklu karşılaştırma testi yapılmıştır. CO₂ eşdeğerlikleri EPA (U.S. Environmental Protection Agency) hesaplama kriterleri uyarlanarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda kent merkezine ait PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonu 2020 yılında 2019'a göre sırasıyla %40 ve %34 azalırken, OSB bölgesi için bu değerler 2019'a kıyasla sırasıyla %9 ve %30 düşüş göstermiştir. Normal duruma göre CO₂ emisyonları araç trafiği için 5.5 kat ve doğal gaz tüketimi için ise %16 oranında düşüş göstermiştir. Atmosfere salınımı engellenen CO₂ emisyonu toplamda 1 milyon (1,003,455) ton olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Hava kalitesi, Covid-19, CO₂-eşdeğer, İklim değişikliği, Kayseri, Türkiye

cases, tests, deaths and intubated patients are daily published in the website of the ministry <https://covid19.saglik.gov.tr/>. After the observance of the first case in March 11th, 2020; chronologically, schools were dismissed in Turkey all over the country as of March 12th, comprehensive travel and transportation were limited on March 15th, all foreign flights were stopped as of March 28th, domestic plane-bus travels were subjected to permit and vehicle capacities were decreased by 50%. Curfew was declared for citizens below 20 and above 65 on April 4th, curfews were applied every weekend and in all official holidays following April 10th and continue to be applied [7]. The legislative background of the alternative methods such as flexible working, working on shift and home working were arranged in public and private sector. Legislative regulations were realized in the issue of proceeding to distance education and flexible academic calendar following the obligatory cessation of the education by the necessary ministries [7]. A new normalization process was entered as of May 11th depending on the decreasing number of cases, curfews were decreased from 31 cities to 15 cities and flexibility decisions were reached in social life areas [8].

WHO has demanded the people all over the world to obey to the social distance applications, avoid from mass

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: stazgin@erciyes.edu.tr (S. T. Azgın)

Geliş / Recieved: 15.10.2020 Kabul / Accepted: 03.12.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngmuh.811079

transportation vehicles and isolate themselves from other people during the pandemic and suggested rapid and hard precautions to keep people at their home by closing the schools, industries, operations, travels, domestic and international borders for many countries [9]. This unaccustomed situation has brought the normal life to a halt all over the world as of February 2020 and a perceptual improvement has been observed in terms of environment [9]. Studies conducted on the positive or negative impacts of Covid-19 process all over the world in terms of the environment have rapidly started to take their places in the literature. While Scripps Oceanography Institute has foreseen that the fossil fuel usage will decrease by approximately 10% all over the world due to the expansion of Covid-19 [10], studies showing that waste amounts have decreased at the beaches due to the number of visitors and the package based inorganic waste types have increased in parallel to the increase in online food consumption have been published [11]. In their study, Calma et.al. [12] have specified that there has been an increase in the waste stemming from the personal protective equipment such as mask and glove in the countries and also in the report prepared by RIVM National Public Health and Environment Institute in Netherlands, they have expressed that first findings about Covid-19 have been found in the canalization systems. In the study conducted by Barcelo [13], it has been stated that Covid-19 virus has been detected in the samples of canalization waters coming from Australia. While air pollution stemming from human activities has been observed to have decreased during the quarantine period, the studies within this scope have been generally seen to have started to aggregate on the impacts of air pollution on the expansion of Covid-19 or on human health [14-16].

The main aim of this conducted study is to reveal what kind of a positive impact the 56-day (March 11th, 2020-May 5th, 2020) period taken to the scope of the study will cause to in terms of the climate change during the pandemic process. Within this direction; the change in the air quality of Kayseri has been assessed upon the parameters of PM₁₀ and SO₂ and CO₂ equivalents prevented to be released in this process have been calculated in terms of the natural gas consumption and the decrease in traffic. An assumption has been presented with reliable data that could be attained at short period without neglecting the requirement that many different parameters should be considered when it is thought within the city scale. The study has a more different qualification than the air pollution studies specified in the literature with this aspect it has, and it has the property of being the first representation in terms of Turkey. Results of the study are leading within the direction of submitting a foresight for the precautions necessary to be taken by the countries in the struggle against global climate change.

2 Material and methods

2.1 Study area

Kayseri is the third largest city of Central Anatolia after Ankara and Konya and is also an important industrial center. According to the data of TUIK; the city with the population of 1,407,409 as of December 2019 is settled in Central

Kızılırmak side and on the foot slopes of Erciyes Mountain [17]. Kayseri whose wind speed is 1.8 m/s, average air temperature is 10.6 °C and average precipitation amount is 389 mm according to the long-year average data of the Regional Directorate of Meteorology (RDM) is located relatively like a pot with its six neighbor cities and the high mountains surrounding it. Kayseri Organized Industrial Zone (OIZ) being a value assessment zone of ours and bearing 17 out of 500 greatest companies of Turkey and in which companies above 500 in almost all sectors conduct production is at a distance of 15 km to the city centrum and is established on an area of 11,500,000 square meter. With its status, OIZ continues its production and employment activities in a quality of giving acceleration to the developing economy of mainly Kayseri and Turkey [17]. The settlement location of the study region is shown in Figure 1.



Figure 1. Location of Kayseri city center and OIZ region (Source: Google Maps)

2.2 Collection of data sets

56-day supplied data belonging to the previous five years within the period of March 11th-May 5th within the scope of the study and their properties are summarized in Table 1. Consumptions of fossil fuel known to be efficient on the air quality, but to which we could not find the opportunity of reaching to “reliable” data sets in this process except for natural gas used for heating purposes in the city centrum have not unfortunately been evaluated within the scope of the study. Turkish statistical Institute (TUIK) and Highway Commission vehicle data have been proportioned again and calculated for Kayseri using EPA factors for revealing the impact caused by traffic jam.

2.3 Statistical analyses

Statistical evaluation of the difference among the data sets has been conducted with variance (ANOVA) analysis. Besides, ANOVA and afterwards, Tukey-Kramer procedure have been applied on the data belonging to previous years. All the analyses have been conducted on Excel with the reliability range acceptance of 95%.

Table 1. Data sets and sources

Parameter	Region	Data Source	Period
Average Air Temperature	City Center	Regional Directorate of Meteorology [18]	
Average Wind Velocity	City Center		
Natural Gas Consumption	City Center	KayseriGaz Incorporated Company [19]	2016-2017-2018-2019 and 2020 data for the period of March 11-May 5.
Natural Gas Consumption	Organized Industrial Zone		
PM ₁₀ Concentration	City Center and Organized Industrial Zone	Ministry of Environment and Urbanization/ National Air Quality Monitoring Network [20]	
SO ₂ Concentration	City Center and Organized Industrial Zone		
Number of road motor vehicles registered to the traffic	Kayseri Province	Turkish Statistical Institute-TÜİK [21]	Data for the end of March 2020
Distribution of registered vehicles by fuel types	Kayseri Province		
Average distance traveled by vehicles annually	Kayseri Province	Highway Transportation Statistical Report [22]	Year 2018

2.3 Calculation of CO₂ equivalent

Consumption of natural gas being one of the types of fossil fuel considered to have an impact on the air pollution on provincial basis and in the periods specified in OIZ and the greenhouse gas emission equivalent of the emission amounts stemming from traffic depending on the decrease in the number of vehicles in the traffic have been calculated with conversion formulas in terms of CO₂ equivalents. All calculation coefficients and formulas have been taken from EPA (United States Environmental Protection Agency). The formula coefficients and resources used in the conversion are shown in Table 2. CO₂ equivalent calculation has been calculated according to the decrease occurring in the consumption of natural gas upon the consumption in m³ supplied from KayseriGAZ. Emission conversion coefficients given in Table 2 and taken from EPA have been used in the CO₂ equivalent calculation regarding the decrease in the emission stemming from traffic. Criteria conversions have been calculated by conversion from the highway traffic data given in Table 1 in the calculation of emission stemming from traffic.

Table 2. CO₂ emission coefficients originated from vehicles [23]

Vehicle Type	The amount of emissions	CO ₂	Source
Car	0.368 kg CO ₂ /mile		(EPA 2019) [23, 25]
Minibus	0.501 kg CO ₂ /mile		
Van	0.501 kg CO ₂ /mile		
Motorcycle	0.197 kg CO ₂ /mile		
Bus	1.256 kg CO ₂ /mile		
Truck	1.456 kg CO ₂ /mile		
Fuel Type	The amount of emissions	CO ₂	Source
Natural Gas	1.858×10 ⁻³ CO ₂ /m ³	Metric ton	(EPA 2019) [24]
Gasoline	8.887×10 ⁻³ CO ₂ /Gallon	Metric ton	
Diesel	10.180×10 ⁻³ CO ₂ /Gallon	Metric ton	Federal Register (2010) [25]
LPG	5.680×10 ⁻³ CO ₂ /Gallon	Metric ton	

3 Results and discussion

3.1 Changes of PM₁₀ and SO₂ concentration

The changes of PM₁₀ and SO₂ concentrations have been assessed for the periods of March 11th being the date pandemia started and May 5th being the end of the assessment interval of the study. 56-day (March 11th-May 5th period interval) average change graphs between the years 2016-2020 are shown in Figure 2. PM₁₀ concentration belonging to 2020 has shown a decrease by 40% when compared to 2019 by decreasing from 49 µg/m³ to 29 µg/m³. The decrease in OIZ of PM₁₀ concentration has been 9% for the same period by decreasing from 40 µg/m³ to 37 µg/m³. SO₂ concentration belonging to 2020 has been calculated for the city centrum and OIZ respectively as 34% by decreasing from 6 µg/m³ to 3 µg/m³ and as 30% by decreasing from 6.50 µg/m³ to 4.55 µg/m³. p value confidence range has been 5.56 x 10⁻¹⁸ being too lower than 0.05 as a result of the regression (one-way ANOVA) test within the confidence range of 95% for the purpose of evaluating the statistical significance of the city centrum concentration of PM₁₀ among years. Average PM₁₀ concentration on March 11th-May 5th period bears statistically significant difference among years. Similar statistical difference has also been significant for the city centrum concentration of SO₂ value.

PM₁₀ and SO₂ concentrations within OIZ have shown statistically significant difference in terms of the values of the last five years especially in the quarantine process covering 56 days. However, Tukey-Kramer multiple comparison test has been applied to the data sets following ANOVA test for the purpose of being able to statistically assess the difference of each year with another year. Table 3 summarizes the results of all conducted statistical analyses. When the analysis results in Table 3 are carefully examined, average PM₁₀ and SO₂ values measured in 2020 pandemia

period for the city centrum are statistically and significantly different when compared to the average results of 2019. For OIZ; it has been concluded that there is a significant difference only for SO₂.

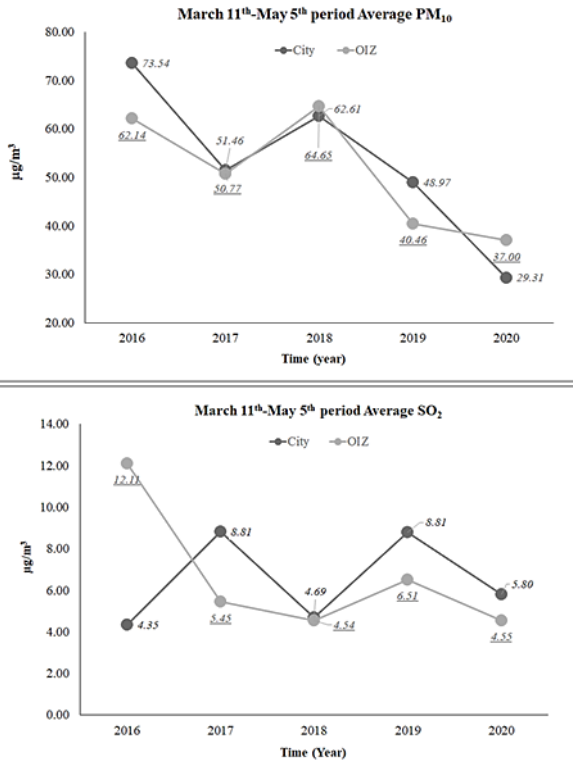


Figure 2. Periodical Change of Concentrations of PM₁₀ and SO₂

3.2 Natural gas consumption changes

The relation of natural gas consumption has been evaluated for March 11th being the commencement of the pandemia and May 5th being the end of the evaluation range. The average change graphs attained for 56 days between the years 2016-2020 are shown in Figure 3. While natural gas consumption has shown a decrease by 13.5% in 2020 when compared to 2019 for city centrum, this value has been 28% in OIZ. The increase in the consumption of natural gas observed in the transition from 2018 to 2019 has occurred as a result of the increase in the investments by the natural gas supplier company on the city adjacent area (Figure 3-c).

As seen in the results of the statistical analysis given in Table 3; the air temperature and natural gas consumption values belonging to the city centrum in 2020 have not shown any statistically significant difference when compared to 2019. However, in contrast, the decrease by 13.5% is thought to stem from the schools, dormitories, university, and public institutions finalizing their activities.

The relation of the natural gas consumption used in the city centrum during the pandemia to the air temperature is clearly seen from Figure 3-b and Figure 3-c. Natural gas consumption values in terms of OIZ have relatively shown a different course. According to the results of Tukey-Kramer multiple comparison test (Table 3); the consumption of 2020 is statistically and significantly different when compared to 2019. This result not observed in city centrum has been interpreted within the direction that there is a decrease in the natural gas consumption stemming from the process related to the work slow-down and curfews during the quarantine period in OIZ. How the average air temperature in Kayseri and OIZ natural gas consumption have changed is seen in Figure 3-d.

3.3 CO₂ equivalences

3.3.1 Conversion of natural gas consumption

Natural gas consumption is 1 million 766 thousand standard m³ in Kayseri city centrum in 2019 during March 11th-May 5th period. It has decreased to 1 million 512 thousand standard m³ on average during the pandemia process in 2020. The values have been measured as respectively 329 thousand and 237 thousand standard m³ within the same period among the years for OIZ. A total of 345 thousand standard m³ natural gas consumption has been saved in 2020 during the pandemia period when compared to 2019 for the city centrum and OIZ. Approximate CO₂ equivalent of this value is 640 metric tons (581 tons) according to EPA calculation factors given in Table 2. Equivalent CO₂ release of 581 tons has not been given to the atmosphere during the quarantine period due to the decrease depending on the natural gas usage. As a result of the comparison conducted according to the normal period; CO₂ release has decreased by 16% for the city of Kayseri during 56-day pandemia process because of the comparison conducted when compared to the normal period.

Table 3. Tukey-Kramer multiple comparison test results (Num df=5, Den df=219)

Years	City Center		Organized Industrial Zone		City Center		OIZ		City Center
	PM ₁₀ P<0.5	SO ₂ P<0.5	PM ₁₀ P<0.5	SO ₂ P<0.5	Natural Gas Consumption P<0.5	Natural Gas Consumption P<0.5	Natural Gas Consumption P<0.5	Natural Gas Consumption P<0.5	Air Temperature P<0.5
2016-2020	*	*	*	*	*	-	-	*	*
2017-2020	*	*	-	-	*	*	*	*	-
2018-2020	*	-	*	-	*	*	*	*	*
2019-2020	*	*	-	*	-	*	*	*	-

* The Tukey-Kramer multiple comparison test shows that the value between two years has a statistically "significant difference". (Abs diff > critical range)
 - The Tukey-Kramer multiple comparison test shows that the value between two years is statistically "no significant difference". (Abs diff < critical range)

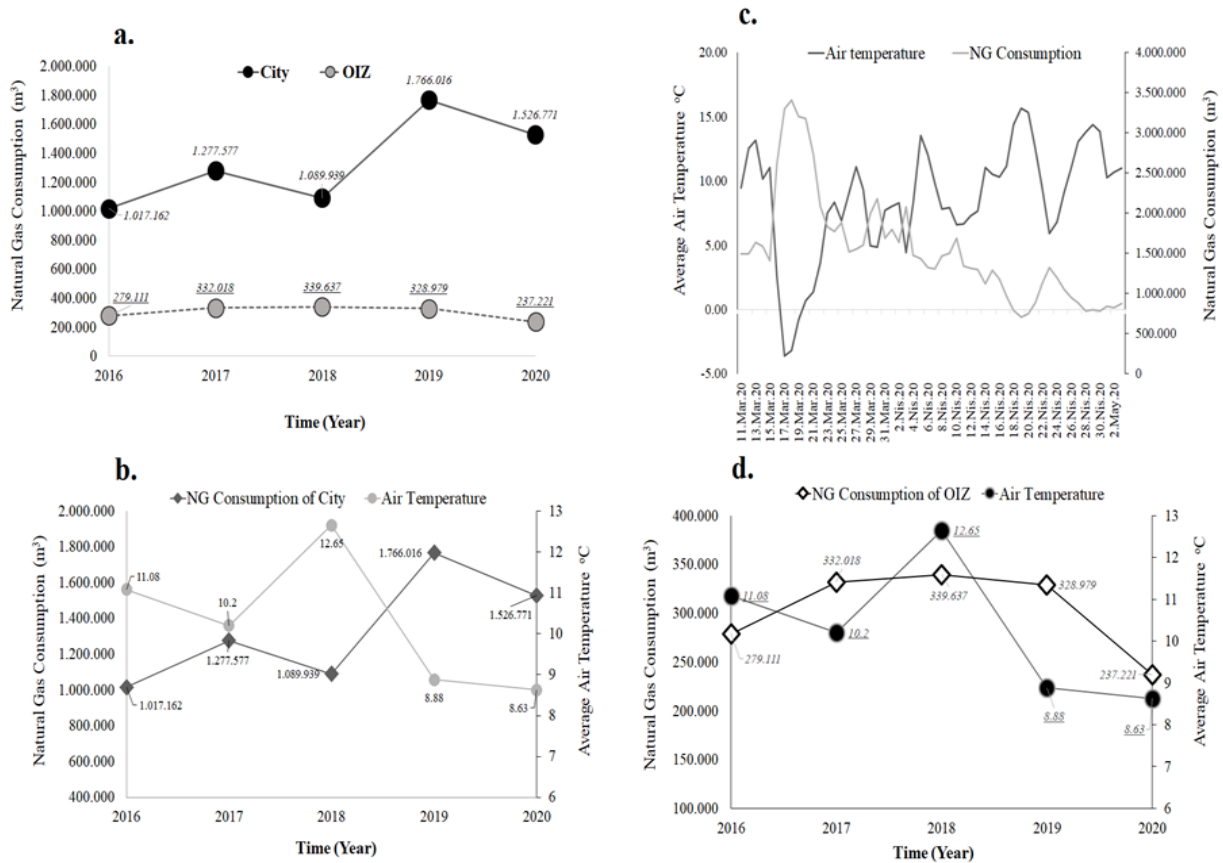


Figure 3. Natural gas consumption and air temperature comparison chart

3.3.2 CO₂ equivalent originated from traffic

According to TUIK data, the number of vehicles registered in traffic is around 341 thousand as of the end of March 2020 in Kayseri (private earth movers, tractors, and the vehicles whose registration is not known have been excluded). The distribution has been calculated according to the vehicle types for Kayseri from the report of “Vehicle number distribution” published by TUIK for Turkey in general. “Normal situation” and the assumption of “the decrease in vehicle usage by 80% in quarantine days” have been compared based on the distances of the vehicles covered daily on average. Results of the CO₂ equivalents calculated according to the EPA criteria given in Table 2 are specified in Table 4.

It has been calculated that approximately 1 million (1003455) tons of equivalent CO₂ have not been released to the atmosphere with the assumption of 80% decrease in vehicle usage in traffic for 56 days during the pandemic quarantine period being our periodical examination range. CO₂ not released to the atmosphere by the countries in the struggle with global warming and whose importance is the highest among greenhouse gases has the qualification of being the most efficient indicator. The calculating simulation values showing what kind of a positive impact the amount of CO₂ prevented to be released in general of the city of Kayseri

during the 56-day pandemic restriction has caused are shown in Figure 4.

4 Conclusion

56-day restriction process within the scope of Covid-19 precautions has caused to decreases by 40% and 34% in PM₁₀ and SO₂ concentrations when compared to 2019 in the air quality of Kayseri city centrum. Same parameters have respectively shown a decrease by 9% and 30% for OIZ. PM₁₀ concentration in 2020 has been statistically and significantly different when compared to its values belonging to the last 5 years in city centrum. While natural gas consumption is 13.5% for the same period in city centrum, it has decreased by 28% in OIZ. A statistically significant difference has been observed to be existent for OIZ consumption values in 2020 in the assessment of the last five years. While the decrease occurring in city centrum by 13.5% has been considered to stem from schools, dormitories, university and public institutions stopping their activities, the decrease in OIZ has been interpreted within the direction of the decrease in natural gas consumption stemming from work slow-down and process during the quarantine period.

The decrease in total natural gas consumption and emission decrease originating from traffic have been calculated in CO₂ as an answer for the question “Has 56-day process had any positive impact on climate change in CO₂ equivalent?”

Table 4. Calculation of emission equivalent of CO₂ originated from traffic.

Type of Vehicle	¹ Number of vehicles registered to traffic in Kayseri	² The average annual distance travelled by vehicle (km)	The average daily distance travelled by vehicle (km)	³ CO ₂ equivalent under normal conditions within 56 days (10 ³ ton)	⁴ CO ₂ equivalent in assumption of 80% reduction for 56 days (10 ³ ton)
Automobile	203845	-	-	-	-
Powered by gasoline	49417	13117	36	234	47
Powered by diesel	78244	13117	36	370	74
LPG	76185	13117	36	361	72
Minibus	8064	26396	73	10	2
Bus	3473	44491	124	19	1.4
Van	62374	17845	50	54	11
Truck	13801	45735	127	89	6
Motorcycle	54582	3766	10	4	2
Total	346139	177584	492	1237	234
Avoiding CO ₂				1003x10 ³ ton CO ₂	

- ¹. By the end of March 2020, the number of vehicles registered in Kayseri in traffic distribution is calculated by dividing the number of cars in Turkey.
- ². The values published by the Turkish Statistical Institute (TUIK) for Turkey in 2016 was used in the same way for Kayseri.
- ³. On quarantine days, the calculation was made by estimating that the average distance traveled was normal. (Table 2).
- ⁴. Calculated on the quarantine days with the assumption that driving by 80% was reduced due to the distance traveled in traffic. (Table 2).

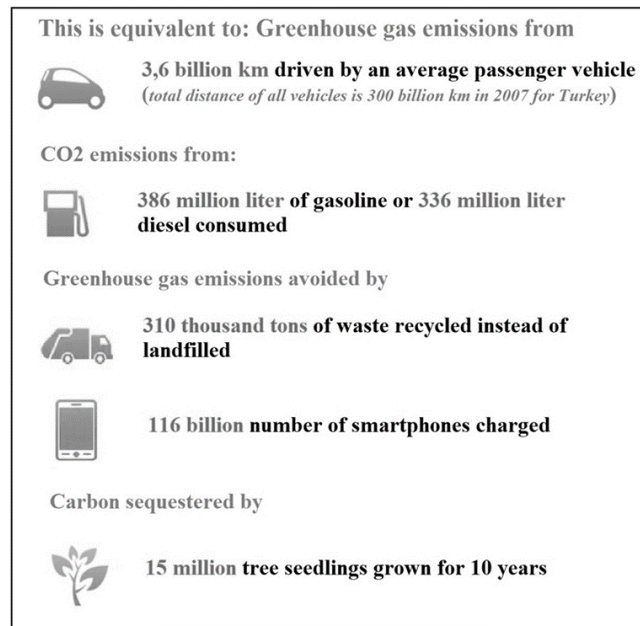


Figure 4. CO₂ equivalency results.

A total of 1003455 tons of CO₂ have not been released to atmosphere in the city of Kayseri during the restriction period. The positive impacts caused by this amount have been shown in Figure 4 in detail. As a result of this study, how the cities and even countries could make a contribution with their consumption limitations has been relatively revealed in the event that people may have to struggle with a more serious climate change phenomenon. We know very that that the decreases in CO₂ emissions in short term could be striking for the societies to review their consumption habits and to see the harmful effect they serve although it does not bring any sharp solution in the struggle with climate change.

Acknowledgment

We would like to thank the General Manager of KAYSERİGAZ, who provided reliable data for the completion of the study in a short time, and Mr. Özlem Acur, the corporate communication officer, and Environmental Engineer Mr. Hikmet Coşkun on behalf of the Kayseri Meteorology Regional Directorate.

Declaration of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Similarity rate (iThenticate): 9%

References

- [1] S. Saadat, D. P. Chaudhery, M. Hussain, Environmental perspective of COVID-19. *Science of The Total Environment*, 728, 138870, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138870>.
- [2] C. Sohrabi, Z. Alsafi, N. O'Neill, M. Khan, A. Kerwan, A. Al-Jabir, C. Iosifidis and R. Agha, World Health Organization declares global emergency: A review of the 2019 novel coronavirus (COVID-19). *International Journal of Surgery*, 76, 71-76, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijso.2020.03.036>.
- [3] A. Imran and O.M.L Alharbi, COVID-19: Disease, management, treatment, and social impact. *Science of The Total Environment*, 728, 138861, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138861>.
- [4] M. Şahin, Impact of weather on COVID-19 pandemic in Turkey. *Science of The Total Environment*, 728, 138810, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138810>.
- [5] A. Chauhan and R. P. Singh, Decline in PM2.5 concentrations over major cities around the world associated with COVID-19. *Environmental Research*, 187, 109634, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109634>.
- [6] S. Muhammad, X. Long, and M. Salman, COVID-19 pandemic and environmental pollution: A blessing in disguise?, *Science of The Total Environment*, 728, 138820, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138820>.
- [7] Turkish Ministry of Health daily COVID-19 report. <https://www.saglik.gov.tr/>, Accessed: 23 May 2020.
- [8] J. Berman and K. Ebisu, Changes in U.S. air pollution during the COVID-19 pandemic, *Science of The Total Environment*, 739, 139864, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139864>.
- [9] World Health Organization, Coronavirus disease 2019 (COVID-19) situation report-78. https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200407-sitrep-78-covid-19.pdf?sfvrsn=bc43e1b_2, Accessed: 23 May 2020.
- [10] Scripps Institution of Oceanography, Research in the time of COVID-19. <https://scripps.ucsd.edu/news/research-time-covid-19>, Accessed: 16 May 2020.
- [11] M. A. Zambrano-Monserrate, M. A. Ruano, L. Sanchez-Alcalde, Indirect effects of COVID-19 on the environment. *Science of the Total Environment*, 728, 138813, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138813>.
- [12] Justine Calma, The COVID-19 pandemic is generating tons of medical waste. <https://www.theverge.com/2020/3/26/21194647/the-covid-19-pandemik-is-generating-tons-of-medical-waste>, Accessed: 26 May 2020.
- [13] D. Barcelo, An environmental and health perspective for COVID-19 outbreak: Meteorology and air quality influence, sewage epidemiology indicator, hospitals disinfection, drug therapies and recommendations. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8 (4), 104006, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104006>.
- [14] A.P. Yunus, Y. Masago, and Y. Hijioka, COVID-19 and surface water quality: Improved lake water quality during the lockdown. *Science of The Total Environment*, 731, 139012, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139012>.
- [15] Y. Zhu, J. Xie, F. Huang, L. Cao, Association between short-term exposure to air pollution and COVID-19 infection: Evidence from China. *Science of The Total Environment*, 727, 138704, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138704>.
- [16] F. Dutheil, J.S. Baker, and V. Navel, COVID-19 as a factor influencing air pollution?, *Environmental Pollution*, 263 (A), 114466, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114466>.
- [17] Turkish Statistical Institute, <https://data.tuik.gov.tr/tr/>, Accessed 13 April 2020.
- [18] Ministry of Agriculture and Forestry, General Directorate of Meteorology. <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=parametrelerinTurkiyeAnalizi>, Accessed: 21 May 2020.
- [19] Kayseri Gaz General Directorate, Annual reports. <http://www.kayserigaz.com.tr/faaliyet-raporlari>, Accessed 21: May 2020.
- [20] Ministry of Environment and Urbanization, National air quality monitoring network. <https://www.havaizleme.gov.tr/>, Accessed: 20 April 2020.
- [21] Turkey Statistical Institute (TUIK), Transportation and communication report. <https://data.tuik.gov.tr/tr/>, Accessed: 13 May 2020.
- [22] Turkish General Directorate of Highways, Highway transportation statistics. <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Yayinlar/YayinPdf/KarayoluUlasimIstatistikleri2019.pdf>, Accessed: 11 May 2020.
- [23] Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2017. Environmental Protection Agency, Washington DC, US, Technical Report (EPA), Chapter 3 (Energy), Tables 3-13, 3-14, and 3-15, 2019.
- [24] Light-Duty vehicle greenhouse gas emission standards and corporate average fuel economy standards; Final Rule. *Federal Register*, 75 (88), 7 May 2010.
- [25] Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2017. Environmental Protection Agency, Washington DC, US, Technical Report (EPA), Annex 2 (Methodology for estimating CO₂ emissions from fossil fuel combustion), Table A-42, 2019.



Dezenfeksiyon ünitesi risk analizi: içme suyu arıtma tesisi

Risk analysis in disinfection unit: drinking water treatment plant

Cihan Özgür^{1,*} 

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sütçüler Prof. Dr. Hasan Gürbüz Meslek Yüksekokulu, 32950, Isparta Türkiye

Özet

Bu çalışmada içme suyu arıtma tesisi dezenfeksiyon ünitelerinde meydana gelebilecek tehlike ve tehlikelerin doğal sonucu olarak ortaya çıkan risk faktörlerinin, risk analizi ve risk değerlendirme çalışması gerçekleştirilmiştir. İçme suyu arıtma tesislerinde, kaynak olarak kullanılan su kütlelerine göre farklı prosesler uygulanmaktadır. Ülkemizde ve dünya genelinde en yaygın kullanılan dezenfektanlar klor, kloramin ve ozondur. Ülkemizde atıksu arıtma tesislerinde gerçekleştirilmiş risk analizi çalışmaları mevcuttur ancak içme suyu arıtma tesislerinde özellikle dezenfeksiyon ünitelerinde gerçekleştirilmiş bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada içme suyu arıtma tesisi dezenfeksiyon ünitelerinde çalışma ortamından, dezenfektan türünden ve çalışanlardan ileri gelen riskler belirlenmiştir. Tüm riskler 5x5 matris risk analiz yöntemine göre yorumlanmıştır. Dezenfeksiyon ünitelerinde temel sorun kişilerin yetersiz eğitim alması, uygun kişisel koruyucu donanım kullanılmaması ve dezenfektan maruziyeti olduğu tespit edilmiştir. İşçilerin bilinçlendirilmesi ve düzenli aralıklarla verilecek eğitimlerle dezenfeksiyon ünitelerinin hem işçi hem de ortam sağlığı açısından oldukça güvenilir bir yer olması kaçınılmazdır.

Anahtar kelimeler: Dezenfeksiyon, İçme suyu, İş sağlığı ve güvenliği, L matris, Risk analizi

Abstract

In this study, risk analysis and risk assessment study of risk factors arising as a natural result of hazards and hazards that may occur in disinfection units of drinking water treatment plants were carried out. Different processes are applied in drinking water treatment plants according to the water bodies used as sources. The most widely used disinfectants in our country and worldwide are chlorine, chloramine and ozone. There are risk analysis studies carried out in wastewater treatment plants in our country, but there is no study carried out in drinking water treatment plants, especially disinfection units. In this study, the risks arising from the working environment, disinfectant type and employees in the drinking water treatment plant disinfection units were determined. All risks were interpreted according to the 5x5 matrix risk analysis method. It has been determined that the main problem in disinfection units is the inadequate training of people, the use of appropriate personal protective equipment and the disinfectant exposure. It is inevitable that disinfection units will be a very reliable place in terms of both worker and environmental health with trainings to be given at regular intervals.

Keywords: Disinfection, Drinking water, L matrix, Occupational health and safety, Risk analysis

1 Giriş

İnsanlar için içilebilir su, yüzeysel su kaynaklarından, doğal su kaynaklarından ve yeraltı sularından sağlanmaktadır [1]. Artan çevre kirliliği ile birlikte var olan su kaynaklarının kirlenmesi, su kaynaklarının arıtma proseslerine tabi tutulduktan sonra son tüketiciye ulaştırılmasına neden olmaktadır. Su kaynaklarının içerdiği kirlilik miktarına göre, farklı arıtma proseslerinin kullanılması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Ancak suların kirlilik düzeyi ne olursa olsun tüm su kaynakları içme suyu şebekelerine verilmeden önce dezenfeksiyon prosesine maruz kalmalıdır [2].

İçme suyu kaynaklarının fiziksel, kimyasal ve biyolojik karakterizasyonu sonrası, suyun tipolojisine göre farklı su arıtma prosesleri uygulanmaktadır. Su karakterine göre su kaynakları üç farklı sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar sadece fiziksel arıtmanın uygulandığı (A1) su sınıfı, konvansiyonel arıtma proseslerinin uygulandığı (A2) su sınıfı ve ileri arıtma proseslerinin uygulandığı (A3) su sınıfıdır [3]. Tüm su sınıflarında uygulanan son proses dezenfeksiyondur. İçme suyu dezenfeksiyonunda klor, kloramin, ozon, UV ışınları en yaygın kullanılan dezenfektanlardır [4].

Özellikle klor kullanımı ile birlikte içme suyu arıtma tesislerinde birçok tehlikenin ortaya çıkması söz konusudur ve bu yüzden dezenfeksiyon ünitelerinde risk analizi hazırlanmalıdır [5]. İş Sağlığı ve Güvenliği Risk

Değerlendirmesi Yönetmeliği'ne (2012) göre tehlike "işyerinde var olan ya da dışarıdan gelebilecek, çalışanı veya işyerini etkileyebilecek zarar veya hasar verme potansiyeli" şeklinde ifade edilmektedir [6]. İlgili yönetmeliğe göre hem çalışan hem de toplum sağlığı açısından içme suyu arıtma tesisi risk analizi yapılması gereken önemli iş kollarından biridir. Ülkemizde birçok sektörde hazırlanmış risk analizi çalışmaları mevcuttur. Ancak içme suyu arıtma tesislerinde gerçekleştirilen bir risk analizi çalışması mevcut değildir. Özellikle dezenfeksiyon ünitelerinde meydana gelebilecek kazalar büyük tehlikeler yaratabilecek kazalar olabileceği gibi aynı zamanda ölümcül sonuçlar meydana getirebilecek türdedir.

Klor dünya geneli içme suyu arıtma tesislerinde ve dağıtım şebekelerinde en fazla kullanılan dezenfektan türüdür [7-11]. Klor ucuz olması ve kolay işletilebilir olması açısından tercih edilmektedir. Halk sağlığı açısından patojen öldürme potansiyeli göze alındığında klor çok etkili bir dezenfektandır. Klor içme suyu arıtma tesislerinde gaz klor olarak kullanılması durumunda arıtma tesislerinin kapasitelerine göre seçilmektedir (50-500-1000 kg). 50 kg'lık tüpler dikey konumda, 500 kg ve 1000 kg'lık tüpler ise yatay konumda ve yuvarlanmayı engelleyecek şekilde depolanmaktadır [12]. Sodyum hipoklorit ise sıvı halde bulunan ve %12-15 aktif klor içeren bir klor kaynağıdır. Hem gaz halde hem de sıvı halde kullanılan klor kaynakları,

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cihanozgur@isparta.edu.tr (C. Özgür)

Geliş / Received: 21.05.2020 Kabul / Accepted: 09.10.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.741014

suya ihtiyacı olan konsantrasyonlarda klorinatörler vasıtasıyla verilmektedir. Klorinatörler küçük tesislerde tüp üzerine veya duvara monte edilirken, büyük tesislerde ise tüp/tank odasından ayrı bir odada monte edilmektedir. Klor tesisi tüm gerekli vakum vanaları, gaz girişleri, emniyet delikleri, çözelti nakil hatlarıyla donatılıp, sıvı klor gazının klorinatöre girmesini önlemek için sıvı klor kapanı kullanılmaktadır. Katı klor kaynağı olarak kalsiyum hipoklorit ($\text{Ca}(\text{OCl})\text{Cl}$) (kireç kaymağı) kullanılmaktadır. Katı klor içerisindeki klorun uçup gitmemesi için karanlık ve kuru yerlerde kapalı bidonlarda korunmalıdır.

Kloramin klordan 200 kat daha az etkili bir dezenfektandır ve arıtma tesislerinde ön dezenfektan olarak kullanılmaktadır. Birincil (ön) dezenfektan olarak kloramin seçilmesi durumunda maksimum limit olan 4 mg/L'nin insan sağlığı için bir risk teşkil etmediği bilinmektedir [13]. İçme suyu arıtma tesislerinde kullanılan bir diğer dezenfektan ise ozon (O_3)'dur. Ozon son derece kararsız bir yapıda olduğundan uygulanacağı yerde üretilmektedir. Ozon su arıtma tesislerinde sadece birincil (ön) dezenfektan olarak kullanılmaktadır ve muhakkak bakiye dezenfektan olma özelliği olan bir başka dezenfektanla birlikte kullanılmalıdır. Ozon toksik, mavimsi, kararsız, patlamaya eğilimli ve bitkiler ve hayvanlar üzerinde zararlı etkilere sahip olan bir gazdır. Ozon gazı alçak basınç, orta basınç ve yüksek basınçlı sistemlerden üretilmektedir. Konvansiyonel alçak basınçlı gaz hazırlama sistemleri; birinci filtre, basınçlandırma ünitesi, soğutuculu kurutucu, nem alıcı kurutucu ve ikinci filtreden oluşmaktadır. İlk filtreler gazdaki tozu, oksitlenmiş metal parçalarını ve diğer hava ile taşınan partikülleri tutmaktadır. İkinci filtre ise nem alıcıların tozunu tutar. Besleme gazı basınçlandırması alçak basınçlı sistemlerde blower, yüksek basınçlı sistemlerde ise kompresör ile yapılmaktadır. Gaz hazırlama sistemi boruları çelik, dikişsiz bakır, paslanmaz çelik veya galvanizli çelik olmalıdır ve sistemdeki maksimum basınca dayanıklı olacak şekilde tercih edilmelidir.

Risk analizi, iş kazaları ve meslek hastalıklarının ortaya çıkmasına neden olan faktörleri belirleyerek, görünmeyen tehlikelerin ortaya çıkmasını engelleyen bir kurallar bütünüdür. Risk analizi hazırlamanın çalışma ortamında yazılı talimatların oluşması, yazılı politikaların belirlenmesi, çalışanların iş sağlığı ve güvenliği konularında bilgi sahibi olmalarının sağlanması, çalışma ortamında tehlikelerin ve alınması gereken tedbirlerin belirlenmesi, güvenlik tedbirlerinin ve güvenlik bilincinin gözden geçirilmesine olanak sağlaması ve çalışma ortamı için gerekli düzeltici ve önleyici faaliyetlerin gerçekleştirilmesi ve tehlikelerin ortadan kaldırılması için yararları bulunmaktadır [14].

İçme suyu arıtma tesislerinde dezenfektan olarak kullanılan klor, kloramin ve ozon gibi kimyasalların, canlılar ve insanlara maruziyeti neticesinde sağlık üzerinde olumsuz etkiler yarattığı bilinmektedir. Benzer şekilde klor tanklarından ve ozon jeneratörlerinden ileri gelebilecek tehlikeler de bilinmektedir. Risk analizi uygulamalarının işletmeler ve çalışanlar üzerinde olumlu etkileri olduğu gibi, uygulama esnasında birçok problem de meydana gelebilmektedir. Risk analizi sonuçları çoğu zaman objektif değil sübjektiftir. Kalitatif risk analizinde risk sayısal veriler

yerine sözel tanımlarla ifade edilmektedir. İşletmeye uygun doğru risk analizi yönteminin belirlenememesi neticesinde işletme hem zaman hem de maddi kayıplar yaşayabilmektedir. Tüm işletmelerde farklı tehlikeler mevcut olduğundan her işletmeye adapte olan bir risk analizi metodolojisi mevcut değildir. Son olarak risk analizini gerçekleştirecek personelin tecrübesi risk analizi sonucunu etkileyebilmektedir [15].

Bu çalışmada da içme suyu arıtma tesislerinde özellikle dezenfeksiyon ünitelerinde kullanılan dezenfektanlardan ileri gelebilecek riskler belirlenmiş, olasılık ve şiddetleri de analiz edilmiştir. Tüm içme suyu arıtma tesislerinde uygulanması zorunlu olan dezenfeksiyon prosesi üzerine gerçekleştirilen risk analizinin bu alanlarda çalışma yapan uzmanlara yol gösterici özellikte olması hedeflenmektedir.

2 Materyal ve metod

İçme Suyu Elde Edilen veya Elde Edilmesi Planlanan Yüzeysel Suların Kalitesine Dair Yönetmelik'te su kaynakları iyi kaliteden kötü kaliteye doğru A1-A2-A3 olmak üzere üç kategoriye ayrılmıştır. A1 su sınıfı basit bir fiziksel arıtma ardından dezenfekte edilen suları, A2 su sınıfı fiziksel ve kimyasal arıtma ardından dezenfekte edilen suları, A3 su sınıfı ise fiziksel, kimyasal arıtma ardından ileri arıtma teknikleri uygulandıktan sonra dezenfeksiyona maruz kalan su sınıflarını temsil etmektedir. A1 su sınıfına ait bir su kaynağının arıtılmasına dair proses akış şeması Şekil 1'de, A2 su sınıfına ait bir su kaynağının arıtılmasına dair proses akış şeması Şekil 2'de, A3 su sınıfına ait bir su kaynağına dair proses akış şeması ise Şekil 3'te gösterilmektedir.

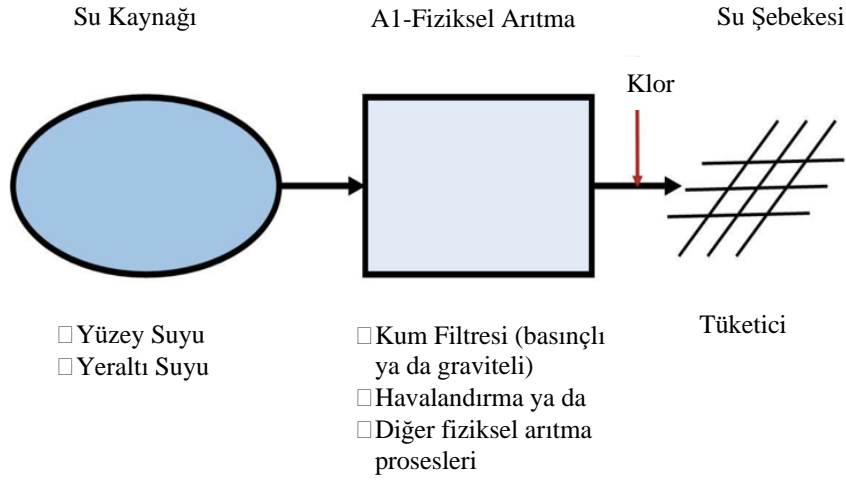
Çalışma kapsamında, farklı su tiplerinin arıtıldığı içme suyu arıtma tesislerinin laboratuvarlarında ve işletme aşamasında çalışan teknik personeller ile sözlü görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca benzer sistemlerin kullanıldığı yüzme havuzlarında çalışan teknik personeller ile de görüşmeler sağlanmıştır. Çalışmada kolay uygulanabilirliği nedeniyle hemen her işletmede sıklıkla uygulanabilen 5x5 risk analizi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde meydana gelebilecek tehlikelerden kaynaklanabilecek olasılık ve şiddet parametreleri dikkate alınmaktadır. Her bir parametre 1-5 aralığında değer almaktadır. Olasılık ve şiddet parametreleri için değerler tablosu sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 1. Olasılık parametreleri için ölçü değerleri [17]

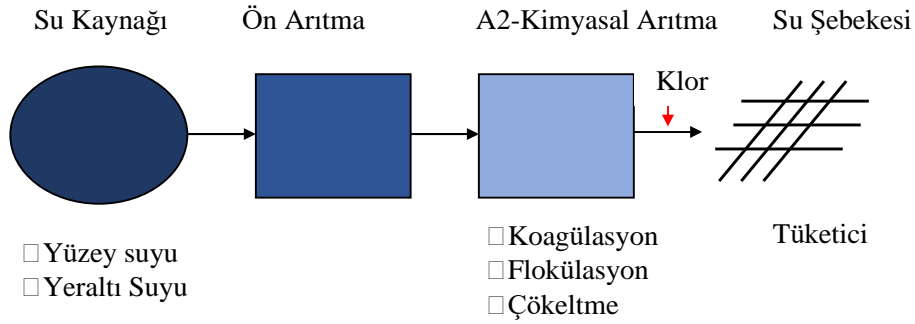
Olasılık	Açıklama
1	Hemen hemen hiç
2	Çok az (Yılda bir)
3	Az (Yılda birkaç kez)
4	Sıklıkla (Ayda bir)
5	Çok sıklıkla (Haftada bir, her gün)

Tablo 2. Şiddet parametresi için ölçü değerleri [17]

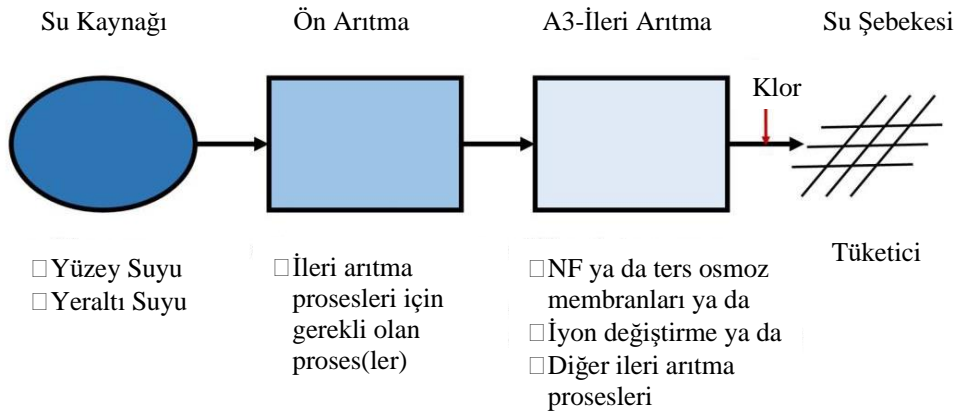
Şiddet	Açıklama
1	İş saati kaybı yok, hemen giderilebilen, ilk yardım gerektiren
2	İş günü kaybı yok, kalıcı etkisi olmayan
3	Hafif yaralanma, kısa süreli tedavi
4	Ciddi yaralanma, uzun süreli tedavi, meslek hastalığı
5	Ölüm, sürekli iş göremezlik



Şekil 1. A1 tipi içme suyu arıtma tesisi [16]



Şekil 2. A2 tipi içme suyu arıtma tesisi [16]



Şekil 3. A3 tipi içme suyu arıtma tesisi [16]

5x5 risk analizi yöntemiyle her bir tehlikenin risk değerlendirme puanı **Denklem 1**'e göre hesaplanmaktadır.

$$\text{Risk Değerlendirme Skoru (RDS)} = \text{Olasılık} * \text{Şiddet} \quad (1)$$

Hesap yapılırken tehlikenin olasılığı göz önüne alınarak 1-5 arası puanlanır. Aynı şekilde şiddet tablosundan da

tehlikeye göre 1-5 arası bir puan seçilir ve her iki değerin çarpımı ile RDS hesaplanır. RDS sonucuna göre 1-6 arası değer alanlar "Mevcut durumda iş sağlığını ve güvenliğini tehlikeye sokacak risk az miktarda, koruyucu ekipman ve eğitimle risk azaltılabilir" olarak sınıflanır. RDS sonucu 8-12 arası değer alanlar "Emniyet tedbirlerinin alınması gerekmektedir. İlk fırsatta bu tedbirler uygulamaya

geçirilerek risk minimize edilmelidir” olarak sınıflanır. RDS skoru 15-25 arası puan alanlar ise “Acil olarak emniyet tedbirleri alınmalı, yeterli kontrol tedbirleri alınıncaya kadar çalışma durdurulmalı, insanlar uzak tutulmalı ve yönetim bilgilendirilmelidir” şeklinde sınıflandırılmaktadır.

3 Bulgular ve tartışma

İçme suyu arıtma tesisi dezenfeksiyon ünitelerinde gerçekleştirilen risk analizi çalışmaları bu alanda çalışan teknik personeller ile yapılan sözlü görüşmeler neticesinde ve daha önce benzer alanlarda uygulanan çalışmalar baz alınarak tamamlanmıştır. Dezenfeksiyon ünitelerinde çalışanların ve tesisin zarar görmemesi için uygulanması gereken ideal fiziki şartlar şu şekildedir: (1) “İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik” uyarınca içme suyu şebekelerinde en son tüketiciye ulaşan suda 0,5 mg/L bakiye klor olacak şekilde klorlama yapılması gerekmektedir. (2) Dezenfeksiyon ünitelerinde klorlama odası, klor tüpü tankları depolama odası, klor kumanda-kontrol odası, yedek malzeme odası, tuvalet-duş olmalıdır. (3) Klorlama ünitesi son derece kaliteli bir şekilde dış ortamdan izole edilmiş ve iyi bir şekilde aydınlatılmış olmalıdır. (4) Bölümlerin her biri dışarıya açılan bir kapıya sahip olmalıdır. (5) Klor gazı korozif ve tahriş edici bir gaz olduğundan herhangi bir kaçak durumunda göz yıkama duşları ve acil duşları düzenli aralıklarla kontrol edilmelidir. (6) Sulardaki bakiye klor miktarını ölçen analizörlerin kalibrasyonu sık sık kontrol edilmeli ve cihazın ölçüm yaparken kullandığı çözümler kontrol edilerek yenilenmelidir. (7) Klor ünitesi sürekli ısıtılmalı veya soğutulmalı ve ortam sıcaklığının 10°C'nin altına düşmesi engellenmelidir.

Klor, kloramin ve ozonun “Malzeme Güvenlik Bilgi Formları” incelendiğinde her üç kimyasalın insanlara teması sonucunda ciltte, gözde ve solunum sisteminde ciddi hasarlara sebep olduğu görülmektedir. Ayrıca bu kimyasalların insanlar üzerinde toksik özellik göstermeleri dezenfeksiyon ünitelerinde çalışan insanların iyi bir şekilde korunma gereksinimi ortaya çıkarmaktadır.

Çalışmada tehlike ve riskler belirlenirken herhangi bir işletmede oluşabilecek elektrik, aydınlatma gibi riskler dikkate alınmazken, sadece dezenfeksiyon ünitelerine özgü tehlike ve riskler üzerinde durulmuştur. Tablo 3, 4 ve 5'te bulunan tehlike ve riskler 5x5 risk analiz yöntemine göre analiz edilmiştir. Her bir riskin olasılık değeri Tablo 1, şiddet değeri ise Tablo 2'ye göre belirlenmiştir.

Tablo 3, 4 ve 5'te içme suyu arıtma tesisleri dezenfeksiyon ünitesi için belirlenen 29 adet tehlike gösterilmektedir. Bu tehlikeler Risk Değerlendirme Skorlarına (RDS) göre sıralanmıştır. Bu tabloya göre (1) puan alan tehlikeler “Çok Hafif Seviyeli”, (2-6) puan alan tehlikeler “Düşük”, (8-12) puan alan tehlikeler “Orta”, (15-20) puan alan tehlikeler “Yüksek”, (25) puan alan tehlikeler ise “Tolere Edilemez” olarak tanımlanmaktadır. Çalışma bulgularına göre çalışmada ortaya çıkan tehlikelerin %17'si “Düşük”, %63'ü “Orta”, %20'si ise “Yüksek” olarak tanımlanmıştır.

Tablo 3, 4 ve 5'e göre (15-20) arası puan alan tehlikelerin genellikle çalışanların kimyasallara temas etmesi neticesinde ortaya çıktığı görülmektedir. Bu sorun hemen her sektörde

çalışanların kişisel koruyucu donanımları kullanmaya yönelmemesi ile ilgilidir. Ancak klor, kloramin, ozon gibi dezenfektanlarla çalışan kişilerde uzun süreli maruziyet sonrası üst solunum yollarında ciddi hasarlar ve uzun dönemde meslek hastalıklarına yakalanmaları sorunu ortaya çıkmaktadır [18]. (8-12) arası puan alan tehlikeler ise çalışılan kimyasalların Malzeme Güvenlik Bilgi Formlarının yeterince incelenmemesi sonucu ortaya çıkabilecek hataları kapsamaktadır. Dezenfeksiyon ünitelerinde çalışanların zaman içerisinde işletme körlüğüne yakalanmaları ve kendilerine duydukları özgüven ile birlikte kimyasalların kullanımına yeterince özen göstermedikleri görülmektedir. Bu sorun dezenfeksiyon ünitelerinde çalışanların düzenli aralıklarla eğitimlere tabi tutulması ile çözülebilir. (2-6) arası puan alan tehlikeler ise dezenfeksiyon ünitelerinde kullanılan ekipmanların iyi bir şekilde sabitlenmemesi ve ekipmanların çalışanlar veya diğer ekipmanlar üzerine düşmesi sonucu ortaya çıktığı görülmüştür. Bu durum dezenfeksiyon ünitesi içindeki tüm ekipmanların iyi bir şekilde sabitlenmesi ve etiketlenmesi ile çözülebilir.

Çalışma kapsamında içme suyu dezenfeksiyon ünitelerinde meydana gelebilecek 29 farklı risk belirlenmiştir. Bu risklere karşı uygulanabilecek önlem planları, pratik uygulamalar oluşturulabilmesi amacıyla 3 grupta incelenmiştir. Bu gruplar dezenfeksiyon ünitelerinin doğal ortamından kaynaklanabilecek riskler, kullanılan dezenfektandan kaynaklanabilecek riskler ve çalışanlardan ileri gelebilecek riskler olarak gruplanmıştır. Tablo 3 dezenfeksiyon ünitelerinin doğal çalışma ortamından ileri gelebilecek riskleri göstermektedir ve bu tabloda toplam 9 risk belirlenmiştir. Tablo 4 kullanılan dezenfektanlardan kaynaklanabilecek riskleri göstermektedir ve 6 risk içermektedir. Tablo 5 ise çalışanlardan kaynaklanabilecek riskleri göstermektedir ve 14 farklı riski kapsamaktadır.

Tablo 3 incelendiğinde RDS skorlarının 5-16 arasında değiştiği görülmüştür. 1 ve 2 numaralı tehlikeler “Düşük” tehlikeli sınıfına girmektedir.

Kırık malzemelerin kullanımlarının engellenmesi ve daha fazla yangın söndürme tüpünün tesise kazandırılması ile bu tehlikeler önenebilir. 3-4-5-6-7 numaralı tehlikeler ise “Orta” tehlikeli sınıfa girmektedir.

Kullanılan makine ve ekipmanların bakımlarının ve kontrollerinin düzenli yapılması, uygun sağlık ve güvenlik işaretlerinin tesis içine yerleştirilmesi ve ne ifade ettiklerinin açıklanması gerekmektedir. İçme suyu arıtma tesislerinde dezenfektanlar hibrit olarak kullanılabilir. Klor öncesi ozon kullanımı hem klorun konsantrasyonunu azaltmakta hem de klorun etkinliğini arttırmaktadır. Ozon jeneratörü kullanılan tesislerde düzenli aralıklarda ozon konsantrasyonu kontrol edilmelidir. Tesis içerisinde sürekli havalandırmanın çalıştığından emin olunmalıdır. 8-9 numaralı tehlikeler “Yüksek” tehlikeli sınıftadır. Havalandırmadan kaynaklı patlama meydana gelmemesi için havalandırma sistemi kontrol edilmeli ancak yine de patlama ihtimaline karşı acil durum planlarının hazırlanması gerekmektedir. Ayrıca çalışanlar toksik inhalanlara maruz kaldığı için düzenli aralıklarla sağlık kontrollerinden geçirilmelidir.

Tablo 3. Dezenfeksiyon ünitelerinin doğal çalışma ortamından kaynaklanabilecek tehlikeler ve riskler

Tehlike ve Oluşturduğu Risk	Olasılık	Şiddet	RDS
1 Laboratuvarda çatlak veya kırık malzeme kullanımına bağlı kesik veya batma sonucu yaralanmalar	5	1	5
2 Yeterli sayıda, uygun kapasitede ve yanıcı madde kaynağına uygun yangın söndürme cihazının bulunmaması neticesinde maddi hasar oluşması	2	3	6
3 Klorinatörün çalışmaması sonucu doğru klor dozlaması yapılamaması sonucu su kalitesinin bozulması	2	4	8
4 Bakiye klor ölçüm cihazının çalışmaması sonucu sudaki klor konsantrasyonunun doğru ölçülememesi	2	4	8
5 Sağlık ve güvenlik işaretlerinin olmaması, hatalı davranış veya çalışma yöntemi ve dikkatsizlik sonucu yaralanma	3	3	9
6 Ozon jeneratörü odasının ısı kontrolünün yapılmaması sonucu istenilen konsantrasyonda ozon üretilmemesi	3	3	9
7 Çalışma ortamının havasız olması neticesinde solunum rahatsızlıkları	3	4	12
8 Havalandırmanın sağlanamaması sonucu depolama alanında gaz sıkışması meydana gelmesi	3	5	15
9 Havalandırmanın sağlanamaması sonucu çalışanlarda üst solunum yollarında, deride ve gözde iritasyon görülmesi	4	4	16

Tablo 4. Dezenfektandan kaynaklanabilecek tehlike ve oluşturduğu riskler

Tehlike ve Oluşturduğu Risk	Olasılık	Şiddet	RDS
1 Dezenfektan (klor, kloramin, ozon) kullanımı sonucu yaralanmalar	3	4	12
2 Dezenfektanın (klor, kloramin, ozon) cilt ile temas etmesi sonucu yanıklar ve yaralanmalar	3	4	12
3 Ozon odasında çelik dışı metal kullanımı neticesinde ekipmanlarda kullanılan vanaların sızdırmazlık halkaları, contalar, numune pompalarının diyaframlarının ozon teması ile tahriş olması	4	3	12
4 Dezenfektanların (klor, kloramin, ozon) yeni kaplara aktarılması sonucu yaralanmalar	5	3	15
5 Dezenfektan (klor, ozon) hazırlanması sırasında oluşan gazlar neticesinde solunum rahatsızlıkları sonucu yaralanmalar	5	4	20
6 Gaz, sıvı veya katı formdaki klor kaynağının çalışma ortamına temas etmesi sonucu dezenfeksiyon ünitesinde çalışan kişilere teması ile vücutta tahriş veya zehirlenme görülmesi	5	4	20

Tablo 5. Çalışanlardan ileri gelebilecek riskler

Tehlike ve Oluşturduğu Risk	Olasılık	Şiddet	RDS
1 Sıvı klorun yanlış depolanması sonucu sodyum hipokloritin aktif klor içeriğinin azalması ve dezenfektan olarak kullanılamaması	2	1	2
2 Klor tüplerinin düzgün depolanmaması neticesinde 50 kg'lık tüplerin çalışanların üzerine düşmesi	2	3	6
3 Klor tüplerinin düzgün depolanmaması neticesinde tüplerin devriliş diğer makine teçhizata zarar vermesi	2	3	6
4 Çalışanların ekipmanlar veya kimyasal malzemeleri kullanarak şakalaşmaları sonucu yaralanmalar	4	2	8
5 Klor tüplerinin düzgün depolanmaması neticesinde tüplerin düşmesi sonucu doldurma ünitelerinin hasar görmesi ve gaz kaçaklarının meydana gelmesi	2	4	8
6 Kimyasal maddelerin ve numunelerin taşınması esnasında düşürülmesi veya dökülmesi sonucu yaralanmalar	3	3	9
7 Kimyasal çözeltilerin hazırlanması esnasında hatalı davranış veya çalışma yöntemi sonucu yaralanmalar	3	3	9
8 Kimyasal maddelerin uygun depolanmaması sonucu yangın veya patlama	2	5	10
9 Laboratuvar tezgahlarındaki şişe ve kapların dikkatsizlik sonucu devrilme, kayma ve düşmesi neticesinde yaralanmalar	5	2	10
10 Çalışan personelin ağız ile sıvı çekmesi sonucu sıvının yutulması veya teması sonucu zehirlenme veya yaralanmalar	3	4	12
11 Kimyasal maddelerin bulunduğu şişe ve kapların etiketlenmemesi sonucu yaralanmalar	3	4	12
12 Kimyasal madde bulunan şişe kapaklarının aynı olması veya değiştirilmesi sonucu kullanım sırasında yaralanma	3	4	12
13 Satın alınan kimyasal maddelerin hatalı kayıt edilmesi sonucu yaralanmalar	3	4	12
14 Çalışan personelin kullanılan kimyasal malzemeyi koklaması veya tatması sonucu zehirlenme ve yaralanmalar	4	4	16

Tablo 4 incelendiğinde 1-2-3 no'lu risklerin “Orta” tehlikeli sınıfta olduğu görülmektedir. Dezenfektanlarla çalışanlara eğitimler düzenlenmeli, malzeme güvenlik bilgi formları dağıtılmalı ve tesis içerisine uyarı işaretçiler yerleştirilmelidir. Ayrıca çalışanlara uygun olacak şekilde tam yüz maskesi, klora karşı koruyucu giysi, PVC veya kauçuk eldiven temin edilmelidir. Ozon jeneratörü ile çalışan tesislerde de kontroller sürekli olarak gerçekleştirilmelidir. 4-5-6 no'lu riskler ise “Yüksek” tehlikeli sınıftadır. Çalışanlara temin edilen uygun kişisel koruyucu donanımların (KKD) doğru kullanıldığından emin olunmalı ve yenilenmesi gereken durumlarda ivedilikle yeni KKD'ler temin edilmelidir.

Tablo 5 incelendiğinde 1-2-3 no'lu risklerin “Düşük” tehlikeli sınıfta yer aldığı görülmektedir. Kullanılan tüm dezenfektanların saklama koşulları malzeme güvenlik bilgi formları doğrultusunda gerçekleştirilmelidir. Ayrıca klor tüplerinin doğru yöntemlerle duvara sabitlendiğinden emin olunmalıdır. 4-5-6-7-8-9-10-11-12-13 no'lu riskler “Orta” tehlike risklerdir. Tesiste çalışan herkese düzenli aralıklarla eğitimler verilmeli ve tesis güvenliğinde çalışanların rolünün çok önemli olduğu vurgulanmalıdır. Tesis kuralları kesin ve net ifadelerle belirtilmeli, uygun noktalara bu kurallar yerleştirilmeli ve tesiste görevli tüm çalışanların bu kuralları okuduğundan emin olunmalıdır. 14 no'lu risk “Yüksek” tehlikeli olarak sınıflanmaktadır. Tesis içerisinde verilen eğitimlerde çalışanların psiko-sosyal durumları da irdelenmeli ve bu konuda güven vermeyen çalışanların yalnız çalışmalarına müsaade edilmemelidir.

4 Sonuçlar

İçme suyu arıtma tesisinde dezenfeksiyon ünitelerinde kullanılan dezenfektanların, çalışanlar ve ortam üzerinde yarattığı olumsuz etkilerin boyutlarının belirlenebilmesi bir ihtiyaçtır. Bu çalışmada tüm iş kollarında kabul görmüş olan 5x5 ya da başka bir ifadeyle L matris değerlendirmesi uygulanmıştır. Ülkemizde içme suyu arıtma tesisleri, tesis içerisinde kullanılan su kütlelerinin kaynağına göre temel olarak 3 sınıfa ayrılmaktadır. Ancak tüm tesislerde son aşamada dezenfeksiyon prosesi uygulanması zorunludur. Dezenfeksiyon prosesi temel olarak İçme suyu şebekesinin son noktasına serbest klor ulaştırmakla yükümlüdür. Bu yüzden son dezenfektan olarak klor kullanımı zorunludur. Ancak bazı tesislerde klor kullanımını desteklemek amacıyla klor öncesi kloramin ya da ozon da kullanılabilir. Ancak klor öncesi kloramin ya da ozon da kullanılabilir.

İçme suyu arıtma tesisi dezenfeksiyon ünitelerinde uygulanan işlemler benzer olduğundan, bu çalışma tüm içme suyu arıtma tesisleri için örnek olabilecek niteliktedir. Ülkemizde atıksu arıtma tesislerinde gerçekleştirilen çeşitli risk analizi çalışmaları mevcuttur ancak içme suyu arıtma tesislerinde özellikle dezenfeksiyon ünitelerinde gerçekleştirilmiş risk analizi çalışmalarına rastlanmamıştır. Dezenfeksiyon ünitelerinde çalışanların dezenfektanlarla teması, dezenfektanların yanlış kullanımı, dezenfektanların yanlış depolanması gibi tehlikeler mevcuttur. Bu çalışmada toplam 29 farklı tehlike belirlenmiştir. Tespit edilen tehlikeler içme suyu arıtma tesislerinden kaynaklanan tehlikeler, içme suyu arıtma tesisinde kullanılan dezenfektanlardan ileri gelen tehlikeler ve içme suyu arıtma

tesislerindeki çalışanlardan kaynaklanan tehlikeler olarak gruplanmış ve değerlendirilmiştir. Tehlikelerin %20'si (15-20) puan aralığında değer alırken bu tehlikeler çalışanlar üzerinde meslek hastalıklarına veya ciddi sağlık sorunlarına yol açabilecek niteliktedir. Diğer tespit edilen tehlikeler ise tesis içerisinde alınabilecek eğitimler ile kısa sürede çözülebilir durumdadır. Dezenfektan maddeler ile çalışan kişilerin uzun yıllar içerisinde meslek hastalıklarına yakalanma ihtimalleri yüksektir, bu yüzden dezenfeksiyon alanında çalışanlar üzerindeki kontrol mekanizmaları artırılmalıdır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 11

Kaynaklar

- [1] D. T. Williams, F. M. Benoit, G. L. Lebel. Trends In Levels Of Disinfection By-Products. *Environmetrics*, 9, 555-563, 1998. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-095X\(199809/10\)9:5<555::AID-ENV323>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-095X(199809/10)9:5<555::AID-ENV323>3.0.CO;2-W).
- [2] C. Cortes and R. Marcos. Genotoxicity of disinfection byproducts and disinfected waters: A review of recent literature. *Mutat Res Gen Tox En* 831, 1–12, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2018.04.005>.
- [3] İSAMKK. İçme Suyu Arıtma Metotları ve Kimyasal Kullanımı, Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Ankara, 2017.
- [4] S. Chowdhury. Occurrences and changes of disinfection by-products in small water supply systems. *Environ Monit Assess*, 190:32, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6410-8>.
- [5] S. Musah, C. F. Schlueter, D. M. Humphrey Jr., K. S. Powell, A. M. Roberts, G. W. Hoyle. Inhibition of chlorine-induced airway fibrosis by budesonide. *Toxicology and Applied Pharmacology*, Volume 315, 15 January 2017, Pages 1-11, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2018.08.024>.
- [6] İSGRDY. İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara, 2012.
- [7] F. Al-Otoum, M. A. Al-Ghouti, T. A. Ahmed, M. Abu-Dieyeh, M. Ali. Disinfection by-products of chlorine dioxide (chlorite, chlorate, and trihalomethanes): Occurrence in drinking water in Qatar. *Chemosphere*, Volume 164, December 2016, Pages 649-656, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.008>.
- [8] Z. B. Guo, Y. L. Lin, B. Xu, C. Y. Hu, H. Huang, T. Y. Zhang, W. H. Chu, N. Y. Gao. Factors affecting THM, HAN and HNM formation during UVchlor(am)ination of drinking water. *Chemical Engineering Journal* 306 1180,1188,2016. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.051>.
- [9] H. Hong, Q. Song, A. Mazumder, Q. Luo, J. Chen, H. Lin, H. Yu, L. Shen, Y. Liang. Using regression models to evaluate the formation of trihalomethanes and haloacetonitriles via chlorination of source water with low SUVA values in the Yangtze River Delta region,

- China. *Environmental Geochemistry and Health* 38 1303–1312, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10653-016-9797-1>.
- [10] A. Jia, C. Wu, Y. Duan. Precursors and factors affecting formation of haloacetonitriles and chloropicrin during chlor(am)ination of nitrogenous organic compounds in drinking water. *Journal of Hazardous Materials* 308 411–418, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.01.037>.
- [11] J. Fu, X. Wang, W. Bai, H. Yang, Y. F. Xie. Azo compound degradation kinetics and halonitromethane formation kinetics during chlorination. *Chemosphere* 174 110-116, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.098>.
- [12] İlbank. İçmesuyu Arıtma Tesisi Projesi Proses Şartnamesi, 2013
- [13] USEPA. *Water Treatment Manual: Disinfection*, ISBN: 978-184095-421-0, 2011.
- [14] C. Gökdere. Çevre laboratuvarında risk analizi. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2017.
- [15] B. Ünlü. İş sağlığı ve güvenliği kapsamında çevre projelerinin risk analizi. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [16] D. Barış. Çok kriterli analiz yöntemi kullanılarak en uygun pestisit arıtma teknolojisinin seçilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2018.
- [17] E. D. Güner. Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi Çevresel Risk Analizi. *Pamukkale Üniv Muh Bilim Derg*, 24(3), 476-480, 2017. <http://doi.org/10.5505/pajes.2017.16023>.
- [18] İSGÜM. Meslek hastalıkları ve iş ile ilgili tanı rehberi. (Türkiye’de İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Koşullarının İyileştirilmesi Projesi-TR0702.20-01/001, 2012.



Lastik üretiminden kaynaklanan yüzey aktif madde içeren atık suların koagülasyon bazlı arıtma alternatiflerinin PROMETHEE yaklaşımı ile değerlendirilmesi

Evaluation of coagulation based treatment alternatives of wastewater containing surfactant from tire manufacturing by PROMETHEE approach

Elif Durna^{1,*} , Nevim Genç¹ 

¹ Kocaeli Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 41000, Kocaeli, Türkiye

Özet

Bu çalışmada, araç lastiği üretim prosesinde preslenen hammadde hamurunun birbirine yapışmasını engellemek için kullanılan yüzey aktif madde içeren atık suyun, konvansiyonel koagülasyon ve mikrodalga oksidasyonu destekli elektrokoagülasyon prosesleri ile arıtımı incelenmiştir. Prosesler Taguchi deney tasarımı yöntemi (L8) ile maksimum kimyasal oksijen ihtiyacı giderimini sağlayacak biçimde optimize edilmiştir. Pareto analizi ile mikrodalga oksidasyonu destekli elektrokoagülasyon prosesinde en etkili parametrenin mikrodalga süresi, konvansiyonel koagülasyon prosesinde ise $FeCl_3 \cdot 7H_2O$ dozu olduğu bulunmuştur. Varyans analizi ile iki proses için de belirlenen modellerin kimyasal oksijen ihtiyacı giderimini açıklamada anlamlı olduğu belirlenmiştir. Optimum deneysel koşullardaki kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi, kimyasal çamur üretimi, işletme maliyeti ve proseslerin tercih edilebilirlik seviyeleri dikkate alınarak, çok kriterli karar verme süreçlerinden olan PROMETHEE yöntemi ile en uygun proses mikrodalga oksidasyonu destekli elektrokoagülasyon olarak belirlenmiştir. Mikrodalga oksidasyonu destekli elektrokoagülasyon prosesinde, optimum şartlarda kimyasal oksijen ihtiyacı giderim verimi, çamur miktarı ve işletim maliyetleri sırasıyla % 66.9, 6.27 g/L ve 1.195 €/L olarak bulunmuştur. Prosesinin seçiminde kimyasal oksijen ihtiyacı giderim verimi ve çamur miktarı kriterlerinin pozitif yönde etki ettikleri belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kimyasal koagülasyon, Mikrodalga, Elektrokoagülasyon, Pareto analizi, PROMETHEE

1 Giriş

Sabun ve deterjanlar, yüzey aktif maddeler (ticari deterjanlar da genellikle % 10-30 yüzey aktif madde içerir), polifosfat tuzları ve ağartıcılar içeren formüle edilmiş ürünlerdir. Yüzey aktif maddeler, elektrolitik ayrışma özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Burada hidrofilik polar grubun tabiatı, anyonik, katyonik, noniyonik ve amfoterik, belirleyici unsurdur. Anyonik yüzey aktif maddeler sulu çözeltide negatif yüklenmiş yüzey aktif madde üretir, genellikle sülfat, karboksilat veya sülfonat gruplarından türer. Katyonik yüzey aktif maddeler ise çözelti içinde pozitif yüklü yüzey aktif madde üretirler, başlıca aminler ve türevleri ile quaternary amonyum tuzları gibi quaternary azot bileşiklerdir. Kötü temizleme özelliğinden dolayı deterjan olarak çok az kullanılırlar. Noniyonik yüzey aktif maddeler başlıca karboksilik asit amidleri ve esterlerdir (alkoksik olmuş alkoller). Noniyonik yüzey aktif maddelerde hidrofilik ve hidrofobik gruplar organiktir, amfoterik yüzey

Abstract

In this study, the treatment of wastewater containing surfactant used to prevent the sticking of the raw material pulp pressed in the tire production process, with conventional coagulation and microwave oxidation-supported electrocoagulation processes was investigated. The processes were optimized to ensure maximum chemical oxygen demand removal by the Taguchi experimental design method (L8). With Pareto analysis, it was found that the most effective parameter in microwave oxidation-supported electrocoagulation processes is microwave duration while the most effective parameter in the conventional coagulation process was $FeCl_3 \cdot 7H_2O$ dose. Analysis of variance found that the models determined for both processes were significant in explaining chemical oxygen demand removal. The appropriate process has been determined as the microwave oxidation-supported electrocoagulation, with the PROMETHEE method considering the optimum experimental conditions, chemical oxygen demand removal, chemical sludge production, operating cost and the preferability criteria of the processes. In microwave oxidation-supported electrocoagulation process, under optimum conditions, chemical oxygen demand removal efficiency, the amount of sludge production and operating costs were found as 66.9 %, 6.27 g / L and 1.195 € / L, respectively. It was determined that the criteria of chemical oxygen demand removal efficiency and sludge amount had a positive effect on the selection of the process.

Keywords: Chemical coagulation, Microwave, Electrocoagulation, Pareto analysis, PROMETHEE.

aktif maddeler ise sistemin pH'sına bağlı olarak sulu çözeltide hem anyonik hem de katyonik özellik gösterirler. Bu bileşiklerin esas tipi, lineer alkan sülfonatların analoglarıdır. Yüzey aktif maddeler, doğal sularda 1 mg/L gibi düşük derişimlerde bile köpürme problemlerine sebep olur, ancak insanlara bu derişim toksik değildir [1]. Toksikite genellikle deterjanların türüne bağlıdır. Genel olarak noniyonik bileşiklerin daha az toksik olduğu, anyonik olanların ise çok toksik olduğu kabul edilir [2]. Katyonik yüzey aktif maddelerin toksisitesi ise anyoniklerden yüksektir [3].

Atık su arıtım ünitelerinde yüzey aktif maddeler, köpük oluşturması, lipofilik grupları solubilize etmesi, sıvının yüzey gerilimini veya katı/sıvı ara yüzey gerilimini etkilemesi suretiyle ince partiküllerin stabilizasyonuna sebep olmaları nedeniyle fizikokimyasal veya biyolojik arıtım ünitelerinde problemlere neden olurlar. Noniyonik deterjanlar özellikle karakteristik özelliklerinden dolayı

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: elif.durna@kocaeli.edu.tr(E. Durna)

Geliş / Received: 13.06.2020 Kabul / Accepted: 25.11.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngmuh.7523

geniş ölçüde kabul görmüştür, çünkü deterjanın formülasyonunda fosfat veya kostik dolgu malzemesine gereksinim duyulmamaktadır. Noniyonik yüzey aktif maddelerin iyonik yüzey aktif maddelere göre en önemli dezavantajı biyo-bozunurluk derecesinin nispeten düşük olmasıdır. Bu yüzden heterodisperse noniyonik yüzey aktif maddelerin gideriminde adsorpsiyon prosesi önemli bir yer tutmaktadır [1].

Atık sudan yüzey aktif madde giderimi için fiziksel-kimyasal [4-7], biyolojik [8-10], membran proses [11] ve ileri oksidasyon [4, 12, 13] gibi çeşitli arıtım metotları kullanılmaktadır. Ticari ölçekteki uygulamalarda etkili, ekonomik ve çevre dostu olması bakımından adsorpsiyon prosesi oldukça tercih edilmektedir. Birçok teknik ile kıyaslandığında adsorpsiyon prosesi ile yüzey aktif maddelerin arıtımı çok iyi performans göstermektedir. Adsorpsiyon prosesi için çeşitli maddeler geliştirilmiştir. Aktif karbon en uygun adsorbenttir, ancak sentezlenmesi oldukça pahalı ve rejenere edilmesi de oldukça güçtür. Bu nedenle sürdürülebilir, çevreci, ekonomik ve yüksek verime sahip adsorbentlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır [7].

Bunun yanı sıra en yaygın uygulanan proseslerden olan koagülasyon-flokülasyon prosesinin ekonomik olduğu, işletiminin kolay ve enerji tüketiminin az olduğu ifade edilmektedir. Ancak bu proseste kullanılan ticari kimyasal koagülantların insan sağlığını ve çevreyi olumsuz etkilediği bilinmektedir [11]. Deterjan gideriminde koagülasyon prosesinin etkili olduğu kanıtlanmıştır. Ticari koagülantlar ve polielektrolitlerin kullanımı ile %50'ye yakın anyonik deterjan giderimi elde edilmiştir [2].

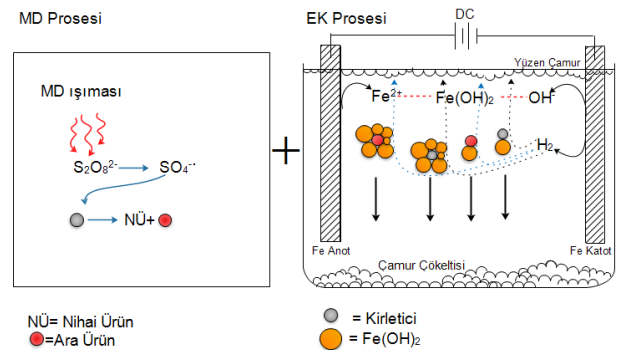
Yüzey aktif maddelerin parçalanabilirliği düşük olduğu için konvansiyonel arıtım üniteleri ile giderimi güçtür. Genellikle arıtma çamurlarında birikerek, arıtma çamurlarının tarımsal kaynaklı kullanımını sınırlamaktadır. Evsel atık sularda yüzey aktif maddelerin konsantrasyonları 1-10 mg/L arasında değişebilmektedir. yüzey aktif madde üretim endüstrisinde ise bu değer 300 mg/L ye kadar ulaşabilmektedir [15]. Evsel atık su arıtım ünitelerinde, evsel atık sulardaki yüzey aktif maddelerin derişimi 1-3 mg/L ye kadar düşebilmektedir, fakat bu durum çamurda önemli miktarda yüzey aktif madde birikimine sebep olmaktadır [16]. Yüzey aktif maddelerin biyoparçalanabilirliği literatürde anyonik>noniyonik>katyonik şeklinde sıralanmıştır [17].

Yüzey aktif maddeler biyolojik yaşam üzerinde olumsuz etkilere sebep olur. Biyolojik ve kimyasal arıtma tesislerinde de suyun yüzey gerilimini azalttıklarından dolayı suda bulunan partiküler maddelerin çökmesini engelleyerek süspansiyon halinde suyun yüzeyinde kalmasına neden olurlar.

Yüzey aktif maddeler günlük yaşamda genellikle çeşitli yüzeylerden kiri uzaklaştırma özellikleri nedeni ile kullanılmaktadır. Birçok endüstriyel uygulamada farklı amaçlar için de kullanılmaktadır. Bu çalışmada araç lastiği üretim prosesinde preslenmiş hammadde hamurunun birbirine yapışmasının engellenmesinde kullanılan yüzey aktif madde içeren atık suyun arıtımı çalışılmıştır.

Araç lastiği, çok çeşitli hammaddelerin kullanımı ile oluşan ileri bir üründür. Otomobil lastiği ağırlıklı olarak %47 kauçuk, %21.5 karbon siyahı, %16.5 metal, %7.5 katkı malzemesi ve %5.5 tekstil malzemesi içerir. Üretim prosesinde lastiği oluşturan hammaddelerin karışımı ile oluşan çığ hamurunun preslenip meskole olmasını ve istiflenirken birbirine yapışmasını önlemek için anyonik ve noniyonik bazlı yüzey aktif maddeler kullanılır. Kullanılan yüzey aktif maddeler tamamen sülfat edilmiş tabii yağlardan üretilmiş modifiye sabun esaslı olduğundan kauçuk hamuruna zarar vermez. Preslenmiş hamurun kapalı bir tank içindeki yüzey aktif maddeye daldırılması ile veya yüzey aktif maddenin hamura püskürtülmesi sureti ile uygulanmaktadır. Lastiğin yapısına zarar vermeyen ve preslenen lastiklerin birbirine yapışmasını engelleyen yüzey aktif maddeler lastik üretim sektöründe önemli bir kirlilik kaynağı oluşturmaktadır.

Lastik üretim prosesinde yüzey aktif madde içeren su preslenmiş lastiklere uygulandıktan sonra, oluşan süzöntü kısmı toplanmakta ve geri devir yaptırılmak sureti ile birkaç kez kullanılmaktadır. Bu sular etkinliğini yitirdiğinde genellikle ya arıtma işlemine alınmaktadır ya da lisanlı firmalara verilerek bertarafı gerçekleştirilmektedir. Endüstride bu atık sular genellikle konvansiyonel koagülasyon (K.K) prosesi uygulanarak arıtılmaktadır. Bu çalışmada K.K'ya alternatif olarak mikrodalga (MD) ön arıtımı müteakip elektrokoagülasyon prosesinin (EK) uygulandığı kombine prosesin etkinliği incelenmiştir. Kombine proseste atık suya ilk olarak persülfat anyonu (PS) ilave edilerek MD ışımaya maruz bırakılmıştır. MD ışımaya PS'nin aktivasyonunu sağlayarak yüzey aktif maddenin kısmi oksidasyonunu sağlayan $SO_4^{\cdot-}$ radikalinin oluşmasını sağlamaktadır. Ön işleme uğramış atık su ikinci aşamada EK'ye tabi tutulmuştur. EK prosesi üç aşamada gerçekleşir [18]: (i) Anotun elektro çözülmesi ile koagülant ve metal hidroksitlerin oluşumu, (ii) Elektrostatik yük nötralizasyonu ile kirlenmelerin destabilizasyonu, ve (iii) Flok oluşumu. Demir elektrotlarının kullanıldığı kombine proseste gerçekleşen mekanizmalar Şekil 1'de gösterilmiştir



Şekil 1. EK, MD ve MD+EK proseslerinin KOİ giderimi

Bu çalışmada yüzey aktif madde içeren bu suların konvansiyonel kimyasal koagülasyon K.K prosesi ve mikrodalga ışımaya kombine olmuş elektrokoagülasyon prosesi (MD+EK) ile arıtımı karşılaştırılmıştır. Her iki

proses için Taguchi deneysel tasarımı uygulanarak, maksimum KOİ giderimi için deneysel şartlar optimize edilmiştir. Çalışmanın son aşamasında çok kriterli karar verme süreçlerinden olan PROMETHEE yöntemi kullanılarak bu atık suların arıtımı için en uygun proses belirlenmiştir.

2 Materyal ve metot

Denemelerde kullanılan atık su preslenen çiğ lastik hamurunun batırıldığı noniyonik yüzey aktif maddesi içeren tank çıkışından alınmıştır. Atık su 1/5 oranında seyreltikten sonra kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan yüzey aktif madde içerikli atık suyun özellikleri Tablo 1’de belirtilmiştir.

Tablo 1. PROMETHEE analizi alternatif proseslerin kriter değerleri

KOİ (mg/L)	pH	İletkenlik (µs/cm)
820-1090	7-7.5	750-764

Çalışmada kullanılan sodyum persülfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$, %98 saflıkta), $\text{FeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, Na_2SO_4 , H_2SO_4 ve NaOH Merck’ten temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan polielektrolit anyonik karakterde olup ticari ölçekte uygulanmaktadır.

Her bir deney serisinde arıtılan atık su KOİ analizinden önce Hettich Üniversal 320 santrifüj cihazında, 15 dakikada 3500 rpm’de santrifüjlenmiştir. Alınan üst sıvıda standart 5220-C kapalı reflüks titrasyon yöntemine göre KOİ analizi yapılmıştır [19].

2.1 Metodoloji

Bu çalışmada iki farklı arıtım prosesi, mikrodalga ışıma ile kombine olmuş elektrokoagülasyon (MD+EK) ve konvansiyonel koagülasyon (KK) incelenmiştir.

MD+EK kombine prosesinde atık suya sülfat radikalinin oluşması için deney tasarım deseninde belirlenmiş dozlarda sodyum persülfat (PS) ilave edildikten sonra belirli sürede belirli güçteki mikrodalga ışımaya maruz bırakılmıştır. Kısmi oksidasyona uğrayan bu atık su ortam sıcaklığına getirildikten sonra demir elektrotlar ile elektrokoagülasyona tabi tutulmuştur. EK sonrası üst sıvıdan alınan numune santrifüjlendikten sonra KOİ analizi yapılmıştır. PS’yi aktive etmek için gerekli MD ışıması, 2450 MHz frekans ve 700 W’a kadar güce sahip evsel MD fırını ile sağlanmıştır (CLATRONIC, Model MWG 786). Elektrokoagülasyon reaktörü polipropilen malzemeden oluşmakta olup 15*15*20 cm boyutlarındadır. Demir elektrot plakalarının aktif alanı 35 cm² dir. Güç kaynağı olarak Mervesan marka 0-30 volt 5 Amper güç ayarlı DC güç kaynağı kullanılmıştır.

Konvansiyonel koagülasyon prosesinde atık suyun kimyasal koagülasyonu VELD Scientifica JLT6 jar testi cihazında yapılmıştır. Deney tasarım deseninde belirlenen dozlarda polielektrolit ve $\text{FeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ilave edilip, pH’ı istenen seviyeye getirilmiş atık su, önce hızlı daha sonra yavaş karıştırma işlemine maruz bırakılmıştır. Oluşan flokula

yaşlar çökeltilmiş ve üst sıvıdan alınan numune santrifüjlendikten sonra KOİ analizi yapılmıştır.

Ham atık su ile proses çıkış suyunun KOİ değerleri dikkate alınarak giderim verimi (%) hesaplanmıştır. Proseslerin optimum koşullarındaki çamur miktarları APHA standart metot toplam katı madde tayini (1989 S.2-75, GEMS S.22) ile belirlenmiştir. Tayin, çökelen kimyasal çamurun 105 °C’de sabit tartıma gelinceye kadar kurutulması ile gerçekleştirilmiştir [19].

2.2 Optimizasyon çalışması

Atık suyun en yüksek KOİ giderimini sağlayacak optimum parametre seviye kombinasyonlarının belirlenmesi ve her bir parametrenin KOİ giderimi üzerine etki düzeyinin saptanması amacıyla her iki proses için Taguchi metodolojisi kullanılarak deney tasarımı ve optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Her iki prosesin deney tasarımında KOİ giderimi üzerine etkili olan 7 parametre, 2 seviyeli olarak göz önünde bulundurulmuştur. Parametre seviyeleri yapılan ön deneysel çalışmanın sonuçları dikkate alınarak belirlenmiştir. Deneysel tasarımda kullanılan en önemli kavram Sinyal/Gürültü (S/G) oranıdır. S/G oranı kullanılarak sürecin optimize edilmesi ile, proses şartlarının kararlılığı sağlanmıştır [20]. Taguchi deneysel tasarımı ve analizleri için Design Expert 10.0.4 yazılımı kullanılmıştır.

2.3 Çok kriterli karar verme süreci ile en uygun proses seçimi

Seçimde ulaşılmak istenen hedefi birçok parametrenin belirlediği ve değerlendirilen alternatiflerin her birinin kendine özgü avantajlarının bulunduğu durumlarda karar verme işlemi güç olmaktadır. Bu tür durumlarda çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemleri kullanmaktaki amaç, alternatif ve kriter sayılarının fazla olduğu durumlarda karar verme mekanizmasını kontrol altında tutabilmek ve karar sonucunu mümkün olduğu kadar kolay ve çabuk elde etmektir [21]. Çok kriterli problemlerin çözümünde kullanılan yöntemlerden olan PROMETHEE yöntemi Brans ve Vincle (1985) tarafından önerilen ve sonrasında geliştirilen bir yöntemdir. Diğer çok kriterli karar verme yöntemleri ile kıyaslandığında PROMETHEE yöntemi, anlaşılabilir metodolojisi ve uygulama kolaylığı açısından öne çıkmaktadır [22]. PROMETHEE yönteminde iki alternatifin (a ve b) kriterler bakımından karşılaştırılması yapılır ve bir P fonksiyonu seçilir. Bu fonksiyon iki alternatif arasındaki farkı, 0–1 aralığında değişen bir tercih derecesi içinde ve belirli bir kriter bazında açıklar. Bu P fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_j(a, b) = \begin{cases} 0, & f(a) \leq f(b) \\ p[f(a) - f(b)], & f(a) > f(b) \end{cases} \quad (1)$$

Alternatifler seçilen tercih fonksiyonu ile kriter bazında ikili olarak karşılaştırılır. PROMETHEE uygulaması bir dizi adımlar takip edilerek gerçekleştirilir [22-24]. Öncelikle her bir kriter için 6 tercih fonksiyonundan (olağan, U-tipi, V-tipi, seviyeli, lineer ve gaussian) uygun olanı seçilir.

Belirlenen tercih fonksiyonu ile alternatiflerin ikili karşılaştırmaları yapılır ve her alternatif için tercih indeksi **Denklem (2)** ile belirlenir.

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^n w_j \times P_j(a, b) \quad (2)$$

n, değerlendirme faktörü sayısını ifade ederken w_j kriterlerin önem ağırlığını ifade eder.

Tercih indeksleri belirlendikten sonra her alternatifi için pozitif ve negatif akımlar belirlenir (**Denklem (3)** ve **(4)**).

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A} \pi(a, b) \quad (3)$$

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A} \pi(b, a) \quad (4)$$

Bir alternatifi pozitif akım değeri ($\Phi^+(a)$) bir diğer alternatifler üzerinde nasıl bir üstünlük sağladığını gösterir ve ne kadar büyük ise o alternatif üstün konuma gelir. Negatif akım değeri ise alternatif üzerinde diğer alternatiflerin üstünlüğünü ifade eder. Dolayısıyla negatif akım $\Phi^-(a)$ ne kadar küçük olursa alternatif diğer alternatiflerden o kadar üstün olur.

Hesaplanan pozitif ve negatif akımlar ile PROMETHEE I kısmi sıralama ve PROMETHEE II net sıralama belirlenir. Bu durumda a alternatifi ile b alternatifi arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde olur.

$$(a), (b)'den üstündür \left\{ \begin{array}{l} \Phi^+(a) > \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) > \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) = \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) = \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \end{array} \right\} \quad (5)$$

$$(a), (b)'den farksızdır \{ \Phi^+(a) = \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \} \quad (6)$$

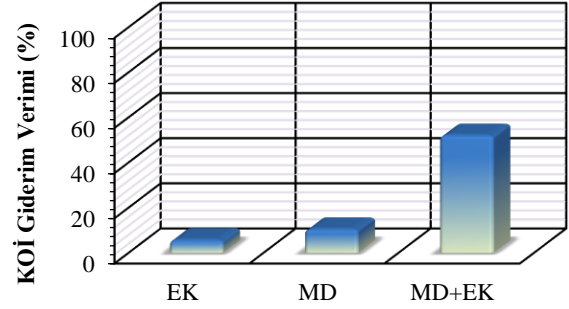
$$(a)(b)karşılaştırılmaz \left\{ \begin{array}{l} \Phi^+(a) > \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) > \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) < \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \end{array} \right\} \quad (7)$$

Bu çalışmada PROMETHEE yöntemi yüzey aktif madde içeren atık su arıtımı için önerilen MD+EK ve K.K alternatif proseslerinden en uygun olanı belirlemek için kullanılmıştır. PROMETHEE analizleri Visual PROMETHEE (Academic Edition) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Alternatifleri karşılaştırmak için KOİ giderim verimi, çamur oluşumu, işletme maliyeti ve tercih edilebilirlik olarak dört kriter belirlenmiştir. Kriterlerden tercih edilebilirlik kriteri üç karar vericinin görüşü ile beş noktalı sözel veri girişine göre yazılıma sözel olarak girilmiştir ve tüm kriterlere eşit ağırlıklandırma yapılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Ham atık su pH 7'de, 4 amperde (A), 30 dakika boyunca demir elektrotları ile EK prosesine maruz bırakıldığına

KOİ'nin %5.8 oranında giderildiği belirlenmiştir. KOİ gideriminin çok düşük olması üzerine ham atık suya oksidasyon ajanı olarak PS ilavesinden sonra mikrodalga ışımaya maruz bırakılması ile KOİ giderim veriminin %10.5 seviyelerine arttığı belirlenmiştir. Yapılan ön çalışmalar ile atıksuyun KOİ gideriminde EK ve MD proseslerinin ayrı ayrı uygulanmasında oldukça etkisiz kaldığı ve her iki prosesin entegre işletimi ile Şekil 2'de gösterildiği gibi KOİ gideriminin % 52 seviyelerine çıktığı saptanmıştır.



Şekil 2. EK, MD ve MD+EK proseslerinin KOİ giderimi

3.1. Atık suyun MD ile kombine olmuş EC (MD+EC) prosesi ile arıtımının optimizasyonu

Mikrodalga oksidasyonu ile desteklenmiş elektrokoagülasyon (MD+EK) prosesinde KOİ giderim verimini etkileyen parametreler; MD oksidasyonu için PS dozu ($3-10 \text{ g S}_2\text{O}_8^{2-}$ anyon/L), MD gücü (406-700 W), MD süresi (10-30 dk) olarak, EK prosesi için ise EK süresi (20-60 dk), akım (2.5-4 amper), pH (7-9) ve elektrotlar arası mesafe (1-2 cm) olarak belirlenmiştir. Her bir parametre için iki seviye dikkate alınmıştır. Seviyeler yapılan ön çalışmalar ile belirlenmiştir. Uygulanan deney tasarım deseni ve cevap parametresi olarak ele alınan KOİ giderim verimleri **Tablo 2'**de verilmiştir. (MD+EK) prosesini etkileyen parametrelerin optimizasyonu, KOİ giderimini maksimize edecek biçimde çözümlenerek belirlenmiştir.

Modelin uygunluğu ANOVA analizi ile değerlendirilmiştir. MD+EK prosesi için ANOVA analiz sonucu **Tablo 3'**de verilmiştir. Yüksek F değerleri ve 0.05 den küçük P değerleri modelin anlamlı olduğunu göstermektedir [25]. F ve P değerleri oluşturulan modelin yanıtı açıklamak için anlamlı olduğunu göstermektedir. P değerlerine bakıldığında pH parametresinin KOİ giderimine önemli bir etkisi olmadığı görülmektedir. Diğer tüm parametrelerin P değerleri 0.05 den küçük olduklarından yanıtta önemli derecede etki ettiği söylenebilir.

Optimizasyon sonucunda (MD+EK) prosesinde maksimum KOİ giderimini verecek optimum deneysel koşullar; 30 dakika MD süresi, 700 W MD gücü, $10 \text{ g S}_2\text{O}_8^{2-}$ anyon/L PS dozu, 60 dakika EK süresi, 4 A akım, pH 9 ve 2 cm elektrotlar arası mesafe olarak belirlenmiştir. Taguchi deney tasarım modelinin optimum şartlarda öngördüğü KOİ giderim verimi %64.9 olarak belirlenirken bu şartlarda gerçekleştirilen doğrulama deneyi ile KOİ giderim verimi %65.2 olarak elde edilmiştir. Modelin ön gördüğü KOİ giderim verimi ile deneysel KOİ giderim veriminin yakın olması modelin anlamlılığını göstermektedir.

Tablo 2. MD+EK prosesinin Taguchi deneysel tasarımı ve elde edilen KOİ yanıt değerleri

No	PS dozu (g S ₂ O ₈ ²⁻ anyon/L)	MD gücü (W)	MD süresi (dk)	EK süresi (dk)	Akım (A)	pH	Elektrot arası mesafe (cm)	KOİ giderim verimi (%)
1	3	406	10	20	2.5	7	1	7.82
2	3	406	10	60	4	9	2	11.73
3	3	700	30	20	2.5	9	2	35.09
4	3	700	30	60	4	7	1	53.69
5	10	406	30	20	4	7	2	45.10
6	10	406	30	60	2.5	9	1	48.58
7	10	700	10	20	4	9	1	50.54
8	10	700	10	60	2.5	7	2	38.69

Tablo 3. MD+EK prosesinin ANOVA tablosu

Parametre	Kareler toplamı	SD*	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri
Model	2155.40	6	359.23	7081.55	0.0091
A-MD süresi	695.35	1	695.35	13707.43	0.0054
B-MD gücü	524.48	1	524.48	10339.08	0.0063
C-PS dozu	678.53	1	678.53	13375.79	0.0055
D-EK süresi	25.01	1	25.01	493.06	0.0287
E-Amper	119.33	1	119.33	2352.25	0.0131
G-Elektrot aralığı	112.70	1	112.70	2221.71	0.0135
Hata	0.051	1	0.051		
Toplam	2155.46	7			

* F parametresi (pH), KOİ giderimine etkisinin çok az olması nedeniyle hataya dahil edilmiştir. SD: serbestlik derecesi.

KOİ giderim verimi üzerine her bir parametrenin etkisini gösteren Pareto analizi Şekil 3'te verilmiştir. Pareto analizindeki t değerleri ANOVA üzerindeki F değerlerinin karekökünü temsil eder. Bonferroni limiti üzerindeki parametreler yanıtta yüksek etki ile etki eden parametreleri gösterirken, t limiti ile Bonferroni limiti arasında kalan parametreler etkili olma potansiyeline sahip olan parametreleri gösterir. t limiti altında kalan parametreler ise yanıtta etkisi önemli olmayan parametrelerdir [26, 27]. Şekilden de görüldüğü üzere proseste en önemli parametreler MD süresi, PS dozu ve MD gücü olmuştur. Akım, elektrot aralığı ve EK süresi önemli olma potansiyeline sahip parametrelerdir. pH parametresi ise yanıtta etkisi olmayan parametre olarak belirlenmiştir ve çözümlemede hataya dahil edilmiştir.

Literatürde yüzey aktif madde giderimi için mikrodalga ile aktive olmuş persülfat oksidasyonunun ve elektro koagülasyonun ardışık prosesler olarak kullanıldığı bir çalışma bulunmamaktadır. Ancak Bhandari ve Gogate [28] bir anyonik yüzey aktif madde olan sodyum dodesil benzen sülfonat (SDBS)'ın gideriminde çeşitli oksidasyon ajanlarını aktive etmek için mikrodalga ışınmasını kullanmışlardır. Çalışma sonucunda mikrodalgaın oksidatif bozunma hızını

ve süresini önemli ölçüde arttırdığını gözlemlemişlerdir. Mikrodalga gücünün 280 watt'a kadar artışının önemli ölçüde SDBS gideriminde etkili olduğunu, 280 watt üzeri mikrodalga gücünün giderim verimine oranla ek maliyet getirebileceğini bildirmişlerdir. Aynı zamanda kullanılan üç oksidasyon ajanı, KPS, NH₃PS ve NaPS kullanımı ile sırasıyla % 98.3, % 82.2 ve % 68.2 bozunma derecesi elde etmişlerdir. Bu çalışmada MD prosesi ile EK prosesi birlikte değerlendirildiğinden MD prosesine etki eden MD süresi ve PS dozu gibi parametreler COD gideriminde EK prosesinden daha etkili olmuştur.

3.2 Atık Suyun konvansiyonel koagülasyon prosesi ile arıtımının optimizasyonu

Konvansiyonel koagülasyon prosesi ile yüzey aktif madde içeren atık suyun arıtım prosesinde KOİ gideriminde etkili olan parametreler pH (7-9), FeCl₃.7H₂O dozu (24-48 mg/L), polielektrolit dozu (8-16 mg/L), hızlı ve yavaş karıştırma hızı (hızlı karıştırma için 50-100, yavaş karıştırma için 10-30 rpm) için ve süreleri (hızlı karıştırma için 1-5, yavaş karıştırma için 5-15 dk) olarak belirlenmiştir. Her bir parametrenin 2 seviyesi dikkate alınmış olup, seviyeler ön denemeler ile belirlenmiştir.

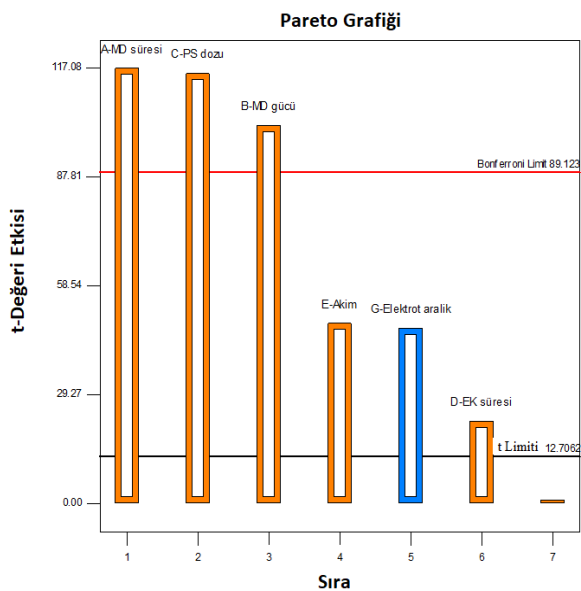
Tablo 4. K.K prosesinin Taguchi deneysel tasarımı ve elde edilen KOİ yanıt değerleri

No	pH	FeCl ₃ .7H ₂ O (mg/L)	Polielektrolit (mg/L)	Hızlı Karıştırma hızı (rpm)	Yavaş Karıştırma hızı (rpm)	Hızlı Karıştırma süresi (dk)	Yavaş karıştırma süresi (dk)	KOİ giderim verimi (%)
1	7	24	8	50	10	1	5	53.79
2	7	24	8	100	30	5	15	48.92
3	7	48	16	50	10	5	15	39.68
4	7	48	16	100	30	1	5	48.44
5	9	24	16	50	30	1	15	42.12
6	9	24	16	100	10	5	5	46.98
7	9	48	8	50	30	5	5	19.74
8	9	48	8	100	10	1	15	12.93

Tablo 5. K.K prosesinin ANOVA tablosu

Parametre	Kareler toplamı	SD*	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri
Model	1529.52	5	305.90	646.55	0.0015
A-pH	596.27	1	596.27	1260.25	0.0008
B-FeCl ₃ .7H ₂ O dozu	630.33	1	630.33	1332.25	0.0007
C- Polielektrolit dozu	218.71	1	218.71	462.25	0.0022
E- Y.K hızı (rpm)	4.26	1	4.26	9.00	0.0955
G- Y.K süresi (dk)	79.96	1	79.96	169.00	0.0059
Hata	0.95	2	0.47		
Toplam	1530.47	7			

* D (hızlı karıştırma hızı) ve F (hızlı karıştırma süresi) parametreleri, KOİ giderimine etkilerinin çok az olması nedeniyle hataya dahil edilmiştir. SD: serbestlik derecesi.



Şekil 3. MD+EK prosesinin Pareto grafiği

Taguchi deney deseni ve cevap parametresi olarak alınan KOİ giderim verimi Tablo 4'te verilmiştir. KOİ giderimini maksimize edecek optimum deneysel koşullar pH=7, 24

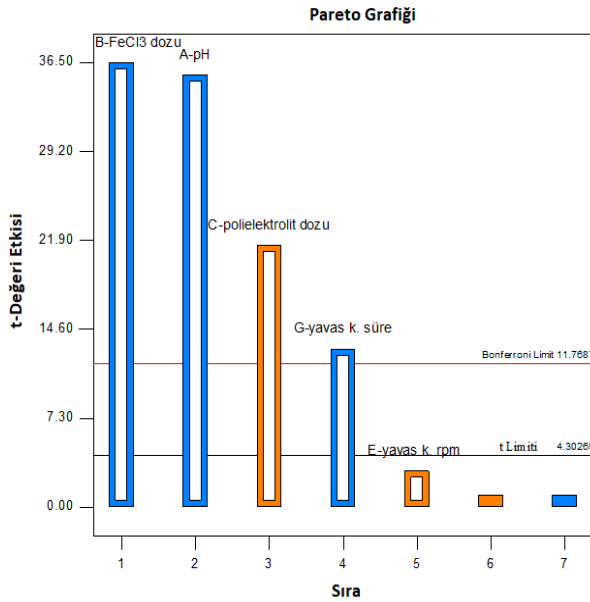
mg/L FeCl₃.7H₂O dozu, 8 mg/L polielektrolit dozu, 50 rpm hızlı karıştırma hızı, 10 rpm yavaş karıştırma hızı, 1 dakika hızlı karıştırma süresi, 5 dakika yavaş karıştırma süresi olarak belirlenmiştir. Modelin öngördüğü KOİ giderim verimi %53.8 olarak belirlenmiştir. Optimum şartlarda yapılan doğrulama deneyinde KOİ giderim verimi %54.3 olarak belirlenmiştir. Bu değer deneysel olarak belirlenen en yüksek KOİ giderim verimi olmuştur. K.K prosesi için ANOVA analizi Tablo 5'te verilmiştir. Yüksek F değeri ve 0.05 den küçük P değeri oluşturulan modelin KOİ giderimi için anlamlı olduğunu göstermektedir. Hızlı karıştırma süresi ve hızı ile yavaş karıştırma hızı parametreleri KOİ giderimine önemli derecede etki etmeyen parametreler oldukları belirlenmiştir.

Konvansiyonel koagülasyon prosesinde KOİ giderimini etkileyen parametrelerin etki düzeyleri, Pareto analizi Şekil 4'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere FeCl₃.7H₂O dozu, pH, polielektrolit dozu ve yavaş karıştırma süresi etkili parametreler olurken, yavaş ve hızlı karıştırma hızları ile hızlı karıştırma süresinin KOİ giderimine etkisi önemsiz olan parametreler olduğu belirlenmiştir.

Park vd. [29] çalışmalarında sentezledikleri flokülant ile konvansiyonel koagülasyon yöntemi kullanılarak atık sudaki anyonik yüzey aktif maddelerin uzaklaştırılması için en uygun koşulları araştırmışlardır. Çalışmanın PARETO analizi incelendiğinde yanıtta en çok etki eden parametrelerin

sıralaması flokülant dozu > pH > koagülant dozu olarak elde edilmiştir. Hızlı-yavaş karıştırma süresi ve hızı gibi parametrelerin optimizasyon prosesine dahil edilmediği görülmüştür. Bu çalışma sonucunda da incelenen hızlı-yavaş karıştırma süresi ve hızı parametrelerinin yanıtta göz ardı edilecek düzeyde az etkisi olduğu, buna karşın koagülant dozu ve pH parametrelerinin örnek çalışma ile uyumlu olarak yanıtta en çok etki eden parametreler olduğu görülmektedir.

Yüzey aktif maddeler içerdikleri heterosiklik atomlar, substituentlerin sayısı ve pozisyonu, tersiyer dallanma gibi özellikleri nedeniyle birçok kirleticiye göre zor parçalanabilirliktedirler. Bunun yanı sıra hidrofilik grupların elektriksel yükü de flok oluşum mekanizmasında etkilidir. Bu çalışmada kullanılan sürfaktan içerikli atıksuyun kimyasal yapı ve elektriksel yük özelliklerinin ileri oksidasyon ve koagülasyonda giderim veriminin düşük kalmasına neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4. K.K prosesinin Pareto grafiği

3.3 Uygun prosesin PROMETHEE yöntemi ile belirlenmesi

MD+EK ile K.K proseslerinin her ikisi de KOİ giderimi için uygulanabilir proseslerdir. Ancak bir işletme için proses seçiminde pek çok kriter etkilidir. Bu çalışmada iki prosesden en uygun olanının seçiminde, her iki proses için belirlenen optimum şartlar altında işletim maliyeti, üretilen kimyasal çamur miktarı, KOİ giderim verimi ve prosesin tercih edilebilirliği açısından değerlendirilmiştir. İşletim maliyeti için iki prosesdeki enerji ve kimyasal tüketimi (PS, H₂SO₄, NaOH, polielektrolit ve FeCl₃.7H₂O) ve elektrotların yıpranma tükenme maliyeti dikkate alınmıştır. Enerji tüketiminde birim enerji maliyeti TEDAŞ (Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi)'nin ev/mesken için enerji tüketim maliyeti baz alınarak 0.074 € / kWh olarak kabul edilmiştir. Demir elektrotlarının tüketim maliyeti Gengeç vd. (2012)'de [30] önerilen şekilde Denklem (8)'e göre hesaplanmıştır.

$$\text{Elektrot tüketimi (kg/m}^3\text{)} = \frac{i \times t_{EC} \times M_w}{z \times f \times v} \quad (8)$$

Bu denklemde U hücre voltajı (V), i akım (A), t_{EC} çalışma süresi (s), v atık suyun hacmi (m³), M_w, elektrot malzemesinin moleküler kütlesi, z aktarılan elektron sayısı (demir elektrot için 2 alınmıştır) ve F, Faraday sabitini (96487 C / mol) ifade eder.

Her iki alternatif prosesin karşılaştırılması için PROMETHEE yöntemi kullanılmıştır ve değerlendirilen kriterlerin aldığı değerler Tablo 6'da sunulmuştur. İşletim maliyeti, çamur miktarı ve KOİ giderim verimi sayısal, tercih edilebilirlik ise sözel ifade olarak alınmıştır. MD+EK prosesinin KOİ verimi K.K prosesinden nispeten yüksek olmasına rağmen K.K prosesinin maliyeti daha düşüktür. MD+EK prosesi ile ortaya çıkan çamur miktarı ise K.K prosesine göre oldukça düşük bulunmuştur. Tercih edilme kriteri üç karar vericinin sözel verilerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir. K.K prosesi daha çok uygulanan ve işletmesi kolay bir proses olduğundan MD+EK prosesinden daha çok tercih edilmiştir.

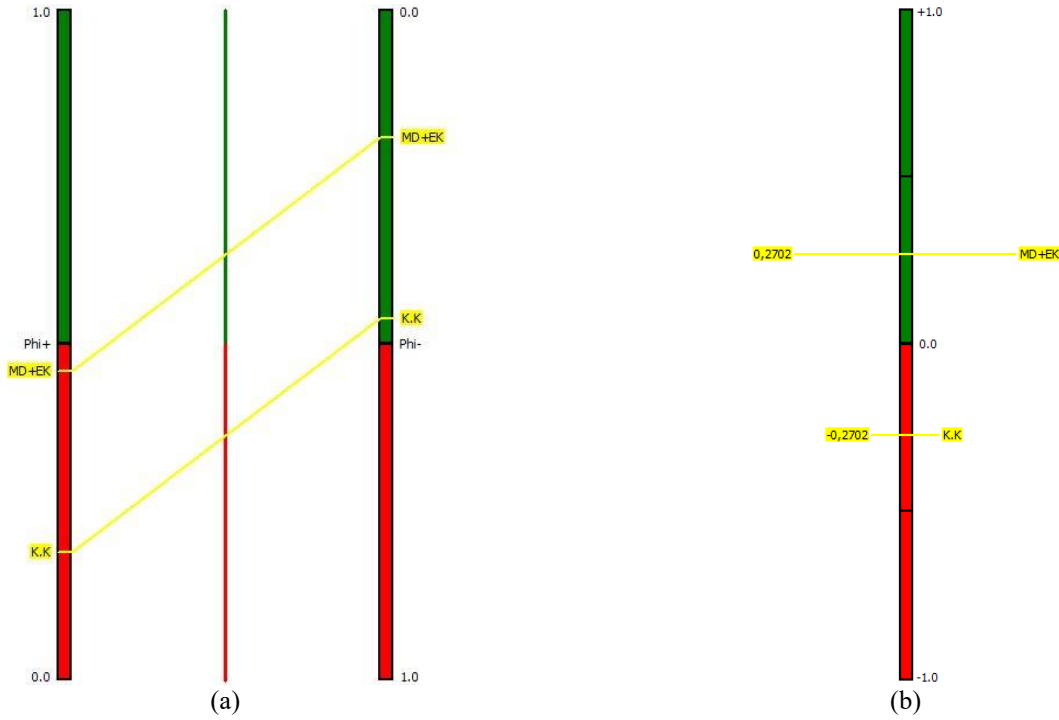
Tablo 6. PROMETHEE analizi alternatif proseslerin kriter değerleri

Proses	KOİ verimi (%)	İşletme maliyet i (€/L)	Çamur miktarı (g/L)	Tercih edilme
MD+EK	66.9	1.195	6.27	orta
K.K	54.2	0.564	19.72	iyi

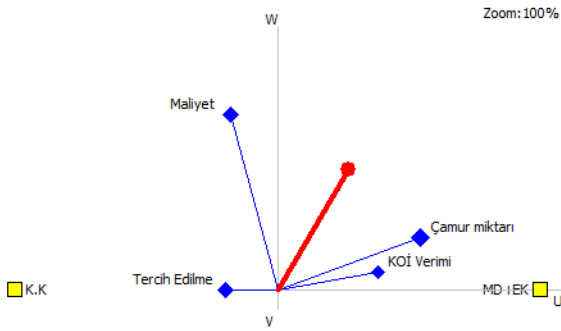
Visual PROMETHEE yazılımı ile belirlenen alternatiflerin PROMETHEE I (kısmi sıralama) ve PROMETHEE II (net sıralama) sonuçları Şekil 5'te (a,b) gösterilmiştir.

Alternatiflerin sıralamasında PROMETHEE I ve PROMETHEE II için 0 ve +1 arasında hesaplanan akımlara bakıldığında MD+EK prosesinin pozitif akımı K.K'ya göre +1 e daha yakın olarak bulunmuştur. Negatif akımlarda ise MD+EK prosesi 0'a daha yakındır. Bu nedenle MD+EK prosesinin daha tercih edilebilir olduğu söylenebilir. PROMETHEE II ise PROMETHEE I de bulunan akımların farkı ile bulunur ve daha net bir sıralama ifade eder (Şekil 5 (b)). PROMETHEE II'de de görüldüğü gibi MD+EK prosesi K.K'ya göre daha tercih edilebilir bir alternatif olmuştur.

GAIA düzlemi PROMETHEE sonuçlarını daha etkileşimli ve görsel olarak ifade eden bir prosedürdür [24]. GAIA düzlemindeki noktalar alternatifleri, vektörler de kriterleri ifade eder. Kırmızı bir vektör ile gösterilen karar vektörü ise en uygun alternatifin seçim yönünü gösterir. Bu çalışma için GAIA düzlemi Şekil 6'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi karar vektörüne en yakın alternatif MD+EK alternatifidir. İşletme maliyetini ve çamur oluşumunu gösteren vektörler daha uzun olduklarından karar vektörünü daha çok etkileyen kriterler olmuşlardır. Ayırıştırma gücü az olan kriter vektörlerinin uzunlukları kısa olacaktır [31].

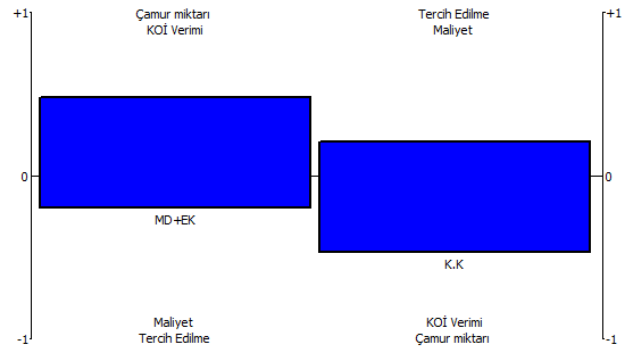


Şekil 5. Alternatiflerin kısmi sıralaması, PROMETHEE I (a), alternatiflerin net sıralaması, PROMETHEE II (b)



Şekil 6. Alternatiflerin GAIA gösterimi

PROMETHEE analizi içerisinde ki bir diğer analiz PROMETHEE Rainbow analizidir. Bu analiz ile alternatiflerin sıralamasına pozitif ve negatif yönde etki eden kriterler çubuk dilimler şeklinde net bir biçimde görülebilir. Her bir dilim, bir kriterin katkısı ile alternatifin net akış skoruna orantılıdır. Olumlu (yukarıya doğru) dilimler iyi özelliklere karşılık gelirken, negatif (aşağı doğru) dilimler olumsuz özelliklere karşılık gelmektedir [32]. Bu çalışma için PROMETHEE Rainbow analizi Şekil 7’de gösterildiği gibidir. Şekilde görüldüğü gibi MD+EK prosesini çamur miktarı ve verim kriterleri pozitif yönde etkilerken maliyet ve tercih edilme kriterleri ise negatif yönde etki etmiştir. K.K alternatifini ise tercih edilme ve maliyet kriterleri pozitif yönde etki ederken KOİ verimi ve çamur miktarı kriterleri negatif yönde etki etmiştir. KOİ verimi ve çamur miktarı kriterleri alternatiflerin sıralamasında daha etkili kriterler olduklarından MD+EK prosesi, K.K prosesine göre daha çok tercih edilebilir olmuştur.



Şekil 7. PROMETHEE Rainbow analizi

4 Sonuçlar

Yüzey aktif madde endüstrilerde farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Araç lastiğin üretim prosesinde lastiği oluşturan preslenmiş çığ hamurun birbirine yapışmasını engellemek için yüzeyine yüzey aktif madde uygulanmaktadır. Endüstride bu işlem sonucu oluşan süzüntü suyu, önemli bir kirlilik kaynağı oluşturmaktadır. Bu çalışmada yüzey aktif maddesi içeren atık suyun K.K ve MD+EK prosesleri ile arıtımı incelenmiştir. Her iki proses maksimum KOİ giderimini sağlayacak biçimde optimize edilmiştir. Çok kriterli karar verme süreçlerinden olan PROMETHEE yöntemi kullanılarak uygun proses belirlenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur;

- K.K için optimum şartlar pH 7.24 mg/L FeCl₃.7H₂O dozu, 8 mg/L polielektrolit dozu, 50 rpm hızlı

karıştırma hızı, 10 rpm yavaş karıştırma hızı, 1 dakika hızlı karıştırma süresi, 5 dakika yavaş karıştırma süresi olarak, MD+EK prosesi için optimum şartlar 30 dakika MD süresi, 700 W MD gücü, 10 g S₂O₈²⁻ anyon/L PS dozu, 60 dakika EK süresi, 4 A akım, pH 9 ve 2 cm elektrotlar arası mesafe olarak belirlenmiştir.

- Belirlenen optimum şartlarda gerçekleştirilen doğrulama deneyleri ile MD+EK prosesinin KOİ giderim verimi % 65.2 bulunurken K.K prosesinin KOİ giderim verimi 54.3 olarak bulunmuştur.
- Pareto analizi, K.K prosesinde en etkili parametrenin FeCl₃.7H₂O dozu olduğunu, MD+EK prosesinde ise MD süresi olduğunu göstermiştir.
- Prosesler KOİ giderim verimi, kimyasal çamur üretimi, işletme maliyeti ve tercih edilebilirlik kriterleri dikkate alınarak PROMETHEE yöntemi ile analiz edildiğinde en uygun prosesin MD+EK prosesi olduğu belirlenmiştir.
- MD+EK prosesinin belirlenmesinde KOİ giderim verimi ve çamur miktarı kriterlerinin seçimi pozitif yönde etkileyerek sonuçta etkili oldukları saptanmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] K. Lawrence, L.K. Wang, Y.T. Yung-Tse Hung, H. Howard, H.H Lo, and C. Constantine Yapijakis, Handbook of Industrial and Hazardous Wastes Treatment. Marcel Dekker Publishing, New York, 2004.
- [2] J. Kaleta, and M. Elektorowicz, The removal of anionic surfactants from water in coagulation process, Environmental Technology (United Kingdom), 34(5-8), 999–1005, 2013. <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.733415>
- [3] M.J. Scott and M.N. Jones, The biodegradation of surfactants in the environment. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes, 1508(1-2), 235-251, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0304-4157\(00\)00013-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4157(00)00013-7)
- [4] S.M. Mirbahoush, N. Chaibakhsh and Z. Moradi-Shoeili, Highly efficient removal of surfactant from industrial effluents using flaxseed mucilage in coagulation/photo-Fenton oxidation process. Chemosphere, 231(51-59), 2019. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.118>
- [5] M.A. Aboulhassan, S. Souabi, A. Yaacoubi, and M. Baudu, Removal of surfactant from industrial wastewaters by coagulation flocculation process. International Journal of Environmental Science & Technology, 3(4), 327–332, 2006. <https://doi.org/10.1007/BF03325941>
- [6] S. Verma, B. Prasad and I.M. Mishra, Pretreatment of petrochemical wastewater by coagulation and flocculation and the sludge characteristics. Journal of Hazardous Materials, 178(1-3), 1055-1064, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.047>
- [7] A.A. Siyal, M.R. Shamsuddin, A. Low and N.E Rabat, A review on recent developments in the adsorption of surfactants from wastewater. Journal of Environmental Management, 254, 109797, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109797>
- [8] A.G.L. Moura, V.B. Centurion, D.Y. Okada, F. Motteran, T.P. Delforno, V.M. Oliveira, and M.B.A Varesche, Laundry wastewater and domestic sewage pilot-scale anaerobic treatment: Microbial community resilience regarding sulfide production. Journal of Environmental Management, 251, 109495, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109495>
- [9] A. Dhuiib, N. Hamad, and I. Hassairi, Degradation of anionic surfactants by Citrobacter braakii. Process Biochemistry, 38(8), 1245-1250, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(02\)00322-9](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(02)00322-9)
- [10] C.V. Faria, T.P. Delforno, D.Y. Okada, and M.B.A. Varesche, Evaluation of anionic surfactant removal by anaerobic degradation of commercial laundry wastewater and domestic sewage. Environmental Technology, 40(8), 988-996, 2019. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1414317>
- [11] J. Huang, L. Zhu, G. Zeng, L. Shi, Y. Shi, K. Yi, and X. Li, Recovery of Cd(II) and surfactant in permeate from MEUF by foam fractionation with anionic-nonionic surfactant mixtures. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 570, 81-88, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.03.010>
- [12] B. Mondal, A. Adak, and P. Datta, UV-H₂O₂ advanced oxidation of anionic surfactant: reaction kinetics, effects of interfering substances and operating conditions. Environmental Engineering & Management Journal, 18(6), 1245-1254, 2019. <https://doi.org/10.30638/eeemj.2019.119>
- [13] F. Aoudjit, O. Cherifi, and D. Halliche, Simultaneously efficient adsorption and photocatalytic degradation of sodium dodecyl sulfate surfactant by one-pot synthesized TiO₂/layered double hydroxide materials. Separation Science and Technology, 54(7), 1095-1105, 2019. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1527352>
- [14] R.C. Kaggwa, C.L. Mulalelo, P. Denny, and T.O Okurut, The impact of alum discharges on a natural tropical wetland in Uganda. Water Research, 35(3) 795-807, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00301-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00301-8)
- [15] C. Zhang, K.T. Valsaraj, W.D. Constant, and D. Roy, Aerobic biodegradation kinetics of four anionic and nonionic surfactants at sub- and supra-critical micelle concentrations (CMCs). Water Research, 33(1), 115-124, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\) 00170-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98) 00170-5)
- [16] M.I. Bautista-Toledo, J. Rivera-Utrilla, J. D. Méndez-Díaz, M. Sánchez-Polo, and F. Carrasco-Marín, Removal of the surfactant sodium dodecylbenzenesulfonate from water by processes based on adsorption/bioadsorption and biodegradation. Journal of Colloid and Interface Science, 418, 113-119, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.12.001>

- [17] H. Hidaka, T. Oyama, T. Horiuchi, T. Koike, and N. Serpone, Photo-induced oxidative synergistic degradation of mixed anionic/cationic surfactant systems in aqueous dispersions. A detailed study of the DBS/HTAB system. *Applied Catalysis B: Environmental*, 99(3-4), 485-489, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2010.06.041>
- [18] S. Sharma, and H. Simsek, Treatment of canola-oil refinery effluent using electrochemical methods: A comparison between combined electrocoagulation + electrooxidation and electrochemical peroxidation methods. *Chemosphere*, 221, 630-639, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.066>
- [19] APHA, Standard methods for the examination of water and wastewater. 21st edn. Washington, DC: American Public Health Association, 2005.
- [20] P.J. Ross, Taguchi Techniques for Quality Engineering. McGraw Hill Internatioanal, New York, 1996.
- [21] F. Urfahoglu, and T. Genç, Çok kriterli karar verme teknikleri ile Türkiye'nin ekonomik performansının avrupa birliği üye ülkeleri ile karşılaştırılması. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 35, 329-360, 2015. <https://doi.org/10.14780/iibdergi.201324469>
- [22] M. Gul, E. Celik, A. Taskin Gumus, and A.F. Guneri, A fuzzy logic based promethee method for material selection problems. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(1), 68-79, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2017.07.002>
- [23] J.P. Brans, P.H. Vincke, and B. Mareschal, How to select and how to rank projects: the promethee method. *European Journal of Operational Research*, 24(2), 228-238, 1986. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90044-5)
- [24] M. Behzadian, R.B Kazemzadeh, A. Albadvi, and M. Aghdasi, PROMETHEE: a comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 198-215, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.021>
- [25] J. Behin, N. Farhadian, M. Ahmadi, and M. Parvizi, Ozone assisted electrocoagulation in a rectangular internal-loop airlift reactor: Application to decolorization of acid dye. *Journal of Water Process Engineering*, 8, 171-178, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.10.003>
- [26] M. Asem, W.M.F.W. Nawawi, and D.N. Jimat, Evaluation of water absorption of polyvinyl alcohol-starch biocomposite reinforced with sugarcane bagasse nanofibre: optimization using two-level factorial design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 368, 012005, 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/368/1/012005>
- [27] M.M Abdulredha, S.A. Hussain, and L.C. Abdullah, Separation emulsion via non-ionic surfactant: an optimization. *Processes*, 7(6), 382, 2019. <https://doi.org/10.3390/pr7060382>
- [28] P.S. Bhandari, & P.R. Gogate, Microwave assisted persulfate induced degradation of sodium dodecyl benzene sulfonate. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 36(12), 200-2007, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11814-019-0390-z>
- [29] B.H. Park, S. Kim, A.Y. Seo, & T.G. Lee, Evaluation of optimal conditions for anionic surfactant removal in wastewater. *Chemosphere*, 263, 128174, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128174>
- [30] E. Gengec, M. Kobya, E. Demirbas, A. Akyol, and K. Oktor, Optimization of baker's yeast wastewater using response surface methodology by electrocoagulation. *Desalination*, 286, 200-209, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.11.023>
- [31] G. Tuzkaya, B. Gülsün, C. Kahraman, and D. Özgen, an Integrated fuzzy multi-criteria decision making methodology for material handling equipment selection problem and an application. *Expert Systems with Applications*, 37(4), 2853-2863, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.09.004>
- [32] R.J. Li, Fuzzy method in group decision making. *Computers & Mathematics with Applications*, 38 (1), 91-101, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0898-1221\(99\)00172-8](https://doi.org/10.1016/S0898-1221(99)00172-8)





Sızıntı suyundan foto-elektro-Fenton yöntemi ile KOİ ve renk giderimi üzerine akım yoğunluğu ve pH etkisi

The effect of current density and pH on COD and color removal from leachate by the photo-electro-Fenton method

Kasım Atmaca¹, Nevzat Beyazıt^{1*}

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 55210, Samsun, Türkiye

Özet

Sızıntı suları yüksek düzeylerde organik ve inorganik kirlenimlere sebep olmakta, sızma ve/veya yüzeysel akış ile yeraltı sularına ve yüzeysel sulara karışarak çevre ve insan sağlığı açısından tehlike oluşturabilmektedir. Bu çalışmada, sızıntı sularının arıtımı ve deşarjında önemli parametrelerden olan KOİ ve rengin foto-elektro-Fenton yöntemi ile giderimi çeşitli işletme koşulları altında araştırılmıştır. Arıtma ve maliyet sürecinde önemli olan işletme parametreleri belirlenerek optimize edilmiştir. Sızıntı suyundan foto-elektro-Fenton yöntemi ile KOİ ve renk giderimi üzerine akım yoğunluğu (10-50 A/m²) ve pH (2.5-5.0) etkileri incelenmiştir. Optimum deneysel koşullar için (pH: 3, akım yoğunluğu: 10 A/m²) maksimum %79.75 KOİ (90 dakika) ve %80.57 renk (45 dakika) giderim verimleri 11.02 ve 5.50 kWh/m³ elektrik enerjisi tüketimleri ile elde edilmiştir. Bu sonuçlar, sızıntı suyundan KOİ ve renk giderimi üzerine foto-elektro-Fenton yönteminin başarı ile uygulanabileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Sızıntı suyu, Foto-elektro-Fenton, KOİ, Renk, Giderim

1 Giriş

Sızıntı suyu, katı atıklardan yağmur suyunun sızması, doğal nem ve atıklarda meydana gelen biyokimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan yüksek oranda organik ve inorganik kirlenimlere içeren sıvı bir karışımdır. Sızıntı suları güvenli bir şekilde toplanıp, deşarj edilmezse, toprağı, yüzey suyunu ve yeraltı sularını önemli düzeylerde kirlenebilecek potansiyel bir kirlilik kaynağı haline gelebilir [1, 2]. Sızıntı suyu arıtma teknolojileri olarak; biyolojik ve fizikokimyasal yöntemler veya bu yöntemlerin birlikte kullanıldığı birleşik sistemler çoğunlukla tercih edilir [3].

Biyolojik arıtma sistemleri, yüksek biyokimyasal oksijen ihtiyacı giderme etkinliği sağlamakla birlikte genellikle yüksek moleküler ağırlıklı fraksiyonları parçalamak ve renk gidermek için yetersizdirler.

Fizikokimyasal arıtma prosesleri (koagülasyon-flokülasyon, kimyasal oksidasyon, hava sıyırma, membran prosesleri ve aktif karbon üzerinde adsorpsiyon) ayrı ayrı veya biyolojik arıtma prosesleri ile birlikte olarak kullanılabilir. Bununla birlikte, bu tekniklerin yüksek işletme maliyetleri ve düşük kirlenim verimliliği gibi dezavantajları vardır [4].

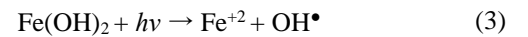
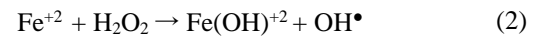
Elektrokimyasal arıtma gibi ileri oksidasyon prosesleri, bozunmaya dirençli organik kirlenim ve renk giderilmesi için en etkili arıtma teknolojileri arasındadır [5]. En yaygın

Abstract

Leachate contain high levels of organic and inorganic pollutants, and may cause danger to the environment and human health by mixing with groundwater and surface waters by infiltration and/or runoff. In this study, the removals of COD and color, which are important parameters for the treatment and discharge of leachate, by photo-electro-Fenton method, was investigated under various operating conditions. Operational parameters that are important for the treatment and cost processes were determined and optimized. The effects of current density (10-50 A/m²) and pH (2.5-5.0) on COD and color removal from the leachate by photo-electro-Fenton method were investigated. For optimum experimental conditions (pH: 3, current density: 10 A/m²) maximum 79.75% COD (90 minutes) and 80.57% color (45 minutes) removal efficiencies were obtained with 11.02 and 5.50 kWh/m³ electrical energy consumption. These results showed that the photo-electro-Fenton method can be successfully applied on COD and color removal from leachate.

Keywords: Leachate, Photo-electro-Fenton, COD, Color, Removal

kullanılan ileri oksidasyon prosesleri arasında; hidrojen peroksit (H₂O₂), H₂O₂/UV radyasyonu, ozonlama (O₃), O₃/UV radyasyonu, fenton (H₂O₂/Fe⁺²), foto-Fenton (UV/H₂O₂/Fe⁺²) prosesleri sayılabilir [6]. Elektrokimyasal ve fotokimyasal proseslerin Fenton prosesleri ile kombinasyonu; foto-elektro-Fenton prosesi olarak bilinir.



Denklem (1) Fenton reaksiyonunu göstermektedir. Denklem (1) ve (2)'ye göre Fe⁺² iyonları H₂O₂ ile reaksiyona girerek hidroksil radikalleri ve demir hidroksit kompleksleri oluşur. Denklem (3)'e göre oluşan demir hidroksit kompleksleri UV varlığında Fe⁺² ve hidroksil radikallerine dönüşmektedir [7]. Bu süreçlerde, Fe⁺² iyonlarının fotokimyasal rejenerasyonu ve komplekslerin foto-aktivasyonu, foto-elektro-Fenton sistemlerini daha verimli hale getirmektedir. Ayrıca Denklem (4) uyarınca UV'nin

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: nbeyazit@omu.edu.tr (N. Beyazıt)

Geliş / Recieved: 09.11.2020 Kabul / Accepted: 24.11.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.823630

H₂O₂ ile reaksiyonu ile doğrudan 2 mol OH• oluşturulabilir [8]. Bu nedenle, UV varlığında ortamda daha fazla OH• oluşturmak mümkündür. Bu durum, kirletici giderim verimliliğini arttırmaktadır.

Kang vd. [9], tekstil atıksuyundan renk giderimi üzerine Fe²⁺/H₂O₂/UV (pH: 4), H₂O₂/UV (pH: 4), Fe²⁺/H₂O₂/UV (pH: 7) ve Fe²⁺/H₂O₂ (pH: 4) proseslerini uygulamış, sırasıyla %93, 82, 73 ve 64'lük renk giderimleri elde etmişlerdir. Galehdar vd. [10], MDF atıksuyundan foto-Fenton yöntemi ile KOİ giderimi üzerine yaptıkları çalışmada, optimum koşullar altında (pH: 6.50, KOİ: 4000 mg/L, Fe²⁺/H₂O₂: 0.11, UV temas süresi: 70 dakika) %96 KOİ giderimi elde etmişlerdir. Asaithambi vd. [11], sızıntı suyundan foto-elektro-Fenton yöntemi ile KOİ ve renk giderimi üzerine yaptıkları çalışmada, optimum koşullar altında (pH: 3, akım yoğunluğu: 35 A/m², H₂O₂: 300 mg/L, UV lamba: 32 W, elektrotlar arası mesafe: 0.75 cm) %97 KOİ ve %100 renk giderimi elde etmişlerdir.

Bu çalışmada, sızıntı suyundan KOİ ve renk giderimi üzerine bazı önemli işletme parametrelerinin (akım yoğunluğu, pH) etkisi incelenmiştir. Ayrıca maksimum giderim verimlerinin elde edildiği koşullar için elektrik enerjisi tüketimleri hesaplanmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Atıksu karakterizasyonu

Deneylerde kullanılan sızıntı suyu, Samsun şehir merkezine yaklaşık 10 km mesafede bulunan Katı Atık Düzenli Depolama Tesisi sahasından temin edilmiştir. Depolama alanı 3 lottan oluşmakta olup birinci etap 5.6 hektar toplam parsel alanı, ikinci etap 4 hektar toplam parsel alanı ve üçüncü etap ise toplam 6.9 hektar parsel alanıdır. 2008 yılının Mayıs ayından bu yana düzenli depolama sahasında atık depolama işlemi gerçekleştirilmektedir. Depolama sahası bu özelliği ile orta yaşlı çöp sahası sınıfına girmektedir. Depolama sahasında günlük 900-1000 ton atık depolanmaktadır. Sahada günlük ortalama 300 m³ sızıntı suyu oluşmaktadır. Oluşan sızıntı suyu sahada artılmadan, her gün 30 m³ kapasiteli tankerler ile Samsun Doğu İleri Arıtma Tesisi'ne gönderilmektedir. Sızıntı suyunun özellikleri Tablo 1'de gösterilmektedir. Elektrokimyasal süreci etkileyebilecek askıda katı maddeleri uzaklaştırmak için atık su, 0.063 mm çapında bir elek kullanılarak bir ön filtreleme işlemine tabi tutulmuştur [12].

Tablo 1. Sızıntı suyu karakterizasyonu

Parametre	Seviye
pH	7.99-8.20
KOİ (mg/L)	7983-8150
İletkenlik (mS/cm)	20-40
Renk (Pt-Co)	1887-1980

Her deney için öncesinde foto-reaktör 2.2 L atık su ile doldurulmuş ve kesikli modda 250 rpm'de mekanik olarak karıştırılmıştır. Fe²⁺ iyonları elektriksel olarak anotta üretilirken, H₂O₂ dışarıdan ilave edilmiştir. Her deneyden sonra elektrotlar, deneyler sırasında elektrot yüzeylerinde oluşan mikrofilm tabakasını gidermek için birkaç dakika

konsantre HCl de bekletilmiş olup ardından damıtılmış su ile yeterince durulanmıştır.

2.2 Foto-reaktör

Bütün deneyler, iç çapı 7.70 cm, dış çapı 8.25 cm ve yüksekliği 48.5 cm olan pleksiglas malzemeden yapılmış silindirik bir foto-reaktör de gerçekleştirilmiştir. Foto-reaktörün içerisine bir adet 16 W gücünde düşük basınçlı cıva buharlı lamba (UV-C, 254 nm) ve 1 Anot (Demir) ve 1 Katottan (Paslanmaz çelik) oluşan elektrotlar yerleştirilmiştir. Elektrot boyutları 4.6 cm x 29.6 cm x 0.2 cm (genişlik x yükseklik x kalınlık) olup toplam aktif yüzey alanı 267.498 cm² olarak hesaplanmıştır. Foto-reaktör içindeki elektrotlar monopolar paralel modda yerleştirilmiş olup deneylerin başlangıcında doğrudan güç kaynağına (GW GPC-3060D Doğru Akım - 30V, 6A) bağlanmıştır. Deneylerde kullanılan foto-reaktörün üstten görünümü Şekil 1'de, elektrokimyasal sistem ise Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Foto-reaktörün üst görünümü



Şekil 2. Foto-elektro-Fenton sistemi

Deneylerde pH ayarlaması için H₂SO₄ (Merck) ve 1M NaOH (Sigma) kullanılmıştır. pH ölçümleri Thermo Scientific Orion 4 Star marka ve model pH metre ile yapılmıştır. Atıksuyun pH değeri istenilen değere getirildikten sonra her deney öncesi ham atık suda KOİ ve renk ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra atık su foto-reaktöre konulmuş, 1-2 dakika karıştırılmış ve istenilen miktarlarda H₂O₂ ilave edildikten hemen sonra gerilim ölçer ve UV lambası aynı anda çalıştırılmıştır. Örnekler periyodik aralıklarla (1, 3, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 dakika) alınmış olup 9000 rpm'de 10 dakika santrifüjlendikten sonra fotometre (Merck

Spectroquant Nova 60A marka ve modeli) kullanılarak KOİ ve renk ölçümleri yapılmıştır.

2.3 Analitik Sistem

Tüm deneyler, su ve atık su arıtımı için hazırlanmış Standart Yöntemlere göre (5520-D) yapılmıştır [13]. KOİ ölçümleri kapalı reflüx kolorimetrik yöntemle yapılmıştır. KOİ giderim verimleri, Denklem (5) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Giderim verimi (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (5)$$

C_0 = Başlangıç KOİ konsantrasyonu (mg/L)

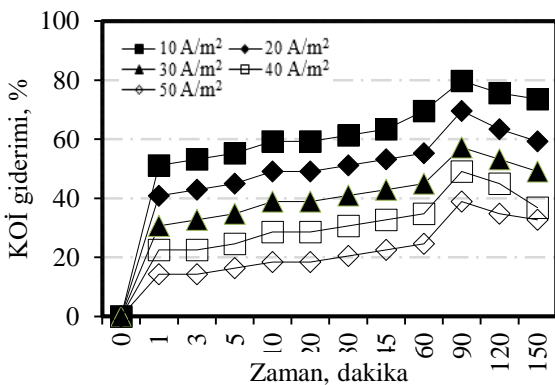
C_t = t anındaki KOİ konsantrasyonu (mg/L)

Renk ölçüm sonuçları, görsel karşılaştırma yöntemi kullanılarak (2120-B) Pt-Co birimleri ile elde edilmiştir. Bu kapsamda, renk için alınan numunelerin absorbansı 340 nm dalga boyunda ölçülmüş olup gerekli çarpım faktörü ile çarpılarak renk ölçüm sonuçları belirlenmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 KOİ ve renk giderimi üzerine akım yoğunluğunun etkisi

Akım yoğunluğu; reaksiyon hızını, ileri oksidasyon proseslerinde üretilen OH^\bullet miktarını, elektrik enerjisi tüketimini ve dolayısıyla arıtma işleminin maliyetini doğrudan etkiler [11]. Deneysel koşullar sabit tutulup (pH: 3, H_2O_2 : 500 mg/L, UV kaynağı: 16 W, elektrotlar arası mesafe: 1.0 cm, karıştırma hızı: 250 rpm), 10, 20, 30, 40 ve 50 A/m^2 akım yoğunlukları denenmiştir. Şekil 3 ve 4, sırasıyla KOİ ve renk giderimi üzerine akım yoğunluklarının etkilerini göstermektedir. Maksimum %79.75 KOİ ve %80.57 renk giderim verimlerine 10 A/m^2 akım yoğunluğunda sırasıyla 90. ve 45. dakikalarda, 3.79 ve 3.48 lik çıkış pH değerlerinde ulaşılmıştır.



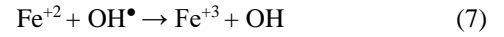
Şekil 3. KOİ giderimi üzerine akım yoğunluğunun etkisi (Anot: Demir, Katot: Çelik, pH: 3, H_2O_2 : 500 mg/L, UV lamba: 16 W, elektrotlar arası mesafe: 1.0 cm, karıştırma hızı: 250 rpm)

20, 30, 40, 50 A/m^2 akım yoğunluğu değerleri için elde edilen maksimum KOİ giderim verimleri sırasıyla %69.53, 57.26, 49.08, 38.8 olarak bulunurken, maksimum renk

giderim verimleri sırasıyla %70.87, 65.03, 55.33, 45.62 olarak bulunmuştur. Akım yoğunluğunun 10 A/m^2 'den 50 A/m^2 'ye çıkarılmasıyla KOİ giderimi, %79.75'ten %38.86'ya düşmüştür. Akım yoğunluğu artırıldığında, Denklem (6) uyarınca anottan birim zamanda çözünen Fe^{+2} iyonlarının miktarı artmaktadır.



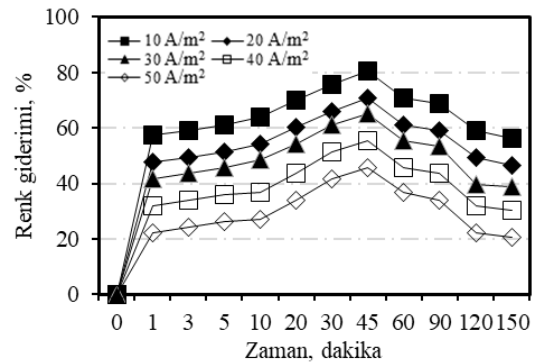
KOİ giderimindeki bu azalma, giderimde etkili OH^\bullet radikalının OH^- iyonlarına dönüşmesi gibi yan reaksiyonlara neden olan artan akımla açıklanabilir (Denklem 7).



Zhang vd. [14] tarafından yapılan çalışmada, benzer bir sonuç görülmüştür. Sızıntı suyundan KOİ giderimi üzerine yapılan çalışmada, akımın 250 mA'den 300 mA'ye yükseltilmesi KOİ gideriminin % 89.2'den 79.3'e düştüğü bildirilmiştir. Şekil 3'ten görüldüğü üzere 90 dakika boyunca, bütün akım yoğunluğu değerleri için KOİ giderimleri artmıştır. Bu durum ortamda artan OH^\bullet radikalleri ile açıklanabilir. 90 dakikalık arıtım sonucunda tüketilen elektrik enerjisi miktarları ise; 10, 20, 30, 40, 50 A/m^2 için sırasıyla 11.02, 11.31, 11.73, 12.37, 13.20 kWh/m^3 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4'te ise renk giderimi üzerine akım yoğunluğunun etkisi görülmektedir.

Akım yoğunluğunun 10 A/m^2 'den 50 A/m^2 'ye çıkarılmasıyla, 45 dakikalık arıtım sonunda renk giderimi; %80.57'den %45.62'ye düşmüştür. Bu durum artan akım yoğunluğuyla birlikte, anottan birim zamanda çözünen demir miktarının artması ve artan demirin suya renk vermesiyle ilişkilendirilebilir [15]. Bu nedenle akım şiddeti ve proses süresi oldukça önemli işletme parametresi olarak değerlendirilmelidir.

45 dakikalık arıtım sonucunda tüketilen elektrik enerjisi miktarları ise; 10, 20, 30, 40, 50 A/m^2 akım yoğunlukları için sırasıyla 5.51, 5.69, 5.92, 6.19, 6.60 kWh/m^3 olarak hesaplanmıştır. 45. dakikadan sonra ise; bütün akım yoğunlukları için renk giderim verimlerinin düştüğü görülmektedir. Bu durum ise ortamda bulunan OH^\bullet radikallerinin azalması ile açıklanabilir.

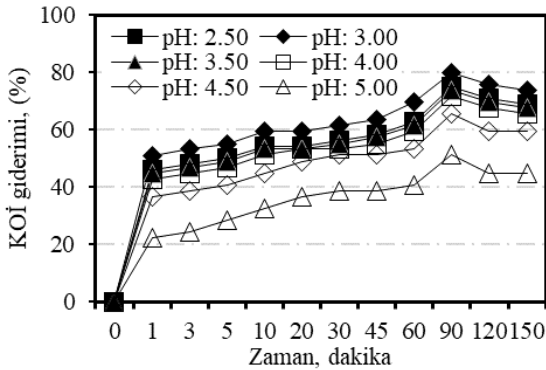


Şekil 4. Renk giderimi üzerine akım yoğunluğunun etkisi (Anot: Demir, Katot: Çelik, pH: 3, H_2O_2 : 500 mg/L, UV lamba: 16 W, elektrotlar arası mesafe: 1 cm, karıştırma hızı: 250 rpm)

Sonuç olarak en yüksek KOİ ve renk giderimi ve en düşük elektrik enerjisi tüketimi, 10 A/m² akım yoğunluğunda sağlandığından, optimum akım yoğunluğu değeri 10 A/m² olarak bulunmuştur.

3.2 KOİ ve renk giderimi üzerine pH'nın etkisi

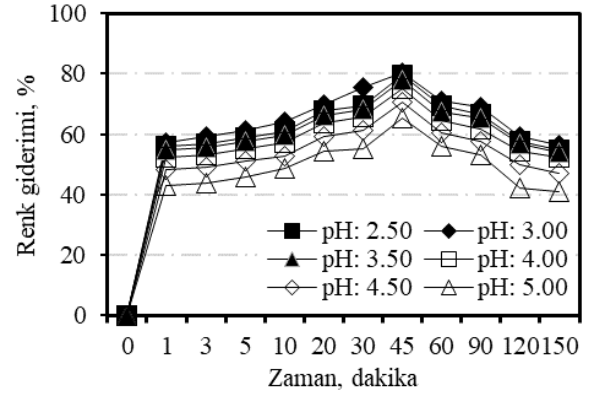
Atıksu pH değeri, foto-elektro-Fenton sistemlerinin verimliliğini doğrudan etkileyen çok önemli bir parametredir [11]. Foto-elektro-Fenton deneyleri asidik pH değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Bunun nedeni, asidik pH'larda baskın olan OH• radikallerinin, alkali pH'da baskın olan hidroperoksil (HO₂•) radikallerinden daha yüksek oksidasyon gücüne sahip olmasıdır. [16]. pH'nın, KOİ ve renk giderimi üzerine etkisini incelemek amacıyla diğer deneysel koşullar sabit tutularak (Akım yoğunluğu: 10 A/m², H₂O₂: 500 mg/L, UV kaynağı: 16 W, elektrotlar arası mesafe: 1 cm, karıştırma hızı: 250 rpm), pH etkisi (2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0) incelenmiştir. Şekil 5 ve 6'da görüldüğü üzere, maksimum %79.75 KOİ ve %80.57 renk giderim verimliliğine pH 3'te sırasıyla 90. ve 45. dakikalarda ulaşılmıştır. Maksimum KOİ ve renk gideriminin elde edildiği 90. ve 45. dakikaların sonunda atıksu çıkış pH ları sırasıyla 3.79 ve 3.48 olarak ölçülmüştür. pH 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 için elde edilen maksimum KOİ giderim verimleri sırasıyla %75.16, 79.75, 73.62, 71.57, 65.44, 51.13 iken (Şekil 5), maksimum renk giderim verimleri ise sırasıyla, %79.38, 80.57, 77.86, 75.23, 70.73, 65.40 (Şekil 6) olarak bulunmuştur. pH'nın 3'ten 5'e çıkarılmasıyla, KOİ giderimi 90 dakikalık arıtım sonunda %79.75'ten %51.13'e düşmüştür. Bu durum şu şekilde açıklanabilir: çözülmüş demir iyonları, Fe³⁺, Fe(OH)₃ olarak pH 3'ün üzerinde çökmeye başlar ve oluşan Fe(OH)₃ yalnızca çözülmüş Fe³⁺ konsantrasyonunu düşürmekle kalmaz, aynı zamanda elektrot yüzeylerinde birikerek, UV etkisi ile oluşabilecek Fe²⁺ rejenerasyonunu engelleyebilir.



Şekil 5. KOİ giderimi üzerine pH'nın etkisi (Anot: Demir, Katot: Çelik, akım yoğunluğu: 10 A/m², H₂O₂: 500 mg/L, UV kaynağı: 16 W, elektrotlar arası mesafe: 1 cm, karıştırma hızı: 250 rpm)

Benzer bir korelasyonu Asaithambi vd. [11] sızıntı suyundan foto-elektro-Fenton yöntemi ile KOİ giderimi üzerine yaptıkları çalışmada bulmuşlardır. pH'nın 3'ten 5'e yükseltilmesiyle KOİ giderim verimi %97'den %77'ye düşmüştür. Maksimum KOİ giderim verimlerinin elde edildiği 90 dakikalık arıtım sonunda elde edilen elektrik

enerjisi tüketimleri ise pH 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 için sırasıyla 11.04, 11.02, 11.04, 11.06, 11.05, 11.08 kWh/m³ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. Renk giderimi üzerine pH'nın etkisi (Anot: Demir, Katot: Çelik, akım yoğunluğu: 10 A/m², H₂O₂: 500 mg/L, UV kaynağı: 16 W, elektrotlar arası mesafe: 1 cm, karıştırma hızı: 250 rpm)

Şekil 6'dan görüldüğü üzere ilk 45 dakika boyunca bütün pH değerleri için renk giderim verimleri artmıştır. Bu durum zamanla ortamda artan OH• radikali ile açıklanabilir. 45 dakikalık arıtım sonunda elde edilen elektrik enerjisi tüketimleri pH 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 için sırasıyla 5.51, 5.50, 5.50, 5.52, 5.52, 5.53 kWh/m³ olarak hesaplanmıştır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, sızıntı suyundan KOİ ve renk giderimi üzerine akım yoğunluğu ve pH etkileri incelenmiş, maksimum KOİ ve renk giderimi için optimum koşullar belirlenmiştir. Giriş pH değeri 3'ten sonra KOİ ve renk giderimlerinde belirlenen azalmalar, pH 4'ten sonra artmıştır. Örneğin pH'nın 4'ten 5'e çıkarılmasıyla 90 dakika sonunda KOİ giderimi %71.57'den %51.13'e düşmüştür, renk giderimi için ise 45. dakikanın sonunda %75.23'ten %65.40'a düşmüştür. Akım yoğunluğu 10 A/m² den sonra artırılmaya devam edildiğinde hem KOİ hem de renk giderimlerinde azalmalar olmuştur. Ancak renk giderimi için bu azalma 30 A/m²'den sonra daha gözle görülür biçimdedir. Akımın 30 A/m²'den 50 A/m²'ye çıkarılmasıyla renk giderim verimi 45. dakikanın sonunda %65.03'ten %45.62'ye düşmüştür. KOİ giderimi ise 90 dakikanın sonunda %57.26'dan %38.86'ya düşmüştür. Optimum deneysel koşullar altında (akım yoğunluğu: 10 A/m² ve pH: 3) maksimum %79.75 KOİ ve %80.57 renk giderimi elde edilmiştir. Maksimum KOİ ve renk giderimlerinin elde edildiği süreler sonunda tüketilen elektrik enerjisi miktarları ise sırasıyla 11.02 ve 5.50 kWh/m³ olarak hesaplanmıştır. Kullanılan atıksuyun karakterizasyonu dikkate alındığında, elde edilen maksimum giderim verimleri ile; Su Kirliliği ve Kontrolü Yönetmeliği'nde sızıntı sularının deşarj izinleri kapsamında KOİ ve renk parametreleri için öngörülen sırası ile 700 mg/L ve 280 Pt-Co değerlerinin sağlanamayacağı anlaşılmış olup foto-elektro-Fenton yönteminin bir başka arıtma sistemi ile birlikte, arıtma öncesi veya sonrası olarak kullanılması daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma, Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından PYO.MUH.1904.19.015 Proje numarası ile desteklenmiştir. Yazarlar maddi destekleri için teşekkür ediyor.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.






Benzerlik oranı: %9

Kaynaklar

- [1] E. Atmaca, Treatment of landfill leachate by using electro- Fenton method, *J. Hazard. Mater.*, 163, 109-114, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.067>.
- [2] T.A. Kurniawan, W.-h. Lo, G.Y.S. Chan, Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate, *J. Hazard. Mater.*, 129, 80-100, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.08.010>.
- [3] S.M. Raghav, A.M. Abd El Meguid, H.A. Hegazi, Treatment of leachate from municipal solid waste landfill, *HBRC J.*, 9, 187-92, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2013.05.007>.
- [4] S. Renou, J.G. Givaudan, S. Poulain, F. Dirassouyan, P. Moulin, Landfill leachate treatment: review and opportunity, *J. Hazard. Mater.*, 150, 468-93, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.077>.
- [5] Y. Deng, J.D. Englehardt, Treatment of landfill leachate by the Fenton process, *Water Res.*, 40, 3683-94, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.08.009>.
- [6] S.K.A. Solmaz, A. Birgul, G.E. Ustun, T. Yonar, Colour and COD removal from textile effluent by coagulation and advanced oxidation processes, *Coloration Technology*, 122, 102-09, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2006.00016.X>.
- [7] P.H. Sreeja, K.J. Sosamony, A comparative study of homogeneous and heterogeneous photo-Fenton process for textile wastewater treatment, *Procedia Technology*, 24, 217-223, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procy.2016.05.065>.
- [8] A. Babuponnusami, K. Muthukumar, A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 557-572, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.10.011>.
- [9] S.F. Kang, C.H. Liao, S.T. Po, Decolorization of textile wastewater by photo-Fenton oxidation technology, *Chemosphere*, 41, 1287-94, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00524-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00524-X).
- [10] M. Galehdar, H. Younesi, M. Hadavifar, A.A. Zinatizadeh, Optimization of a photo-assisted Fenton oxidation process: A statistical model for MDF effluent treatment, *Journal of Clean.*, 37, 629-37, 2009. <https://doi.org/10.1002/clen.200900052>.
- [11] P. Asaithambi, R. Govindarajan, M.B. Yesuf, E. Alemayehu, Removal of color, COD and determination of power consumption from landfill leachate wastewater using an electrochemical advanced oxidation processes, *Separation and Purification Technology*, 233, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115935>.
- [12] M. Panizza, C.A. Martinez-Huitle, Role of electrode materials for the anodic oxidation of a real landfill leachate-comparison between Ti-Ru-Sn ternary oxide, PbO₂ and boron doped diamond anode, *Chemosphere*, 90, 1455-1460, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.09.006>.
- [13] E.W. Rice, R.B. Baird, A.D. Eaton, and L.L. Bridgewater, *Standard Methods in Examination of Water and Wastewater*, twenty-three ed. Water Environment Federation, American Public Health Association, Washington DC, 2012.
- [14] H. Zhang, D. Zhang, J. Zhou, Removal of COD from landfill leachate by electro-Fenton method, *Journal of Hazardous Materials*, 135, 106-11, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.025>.
- [15] A. Altin, An alternative type of photo-electro-Fenton process for the treatment of landfill leachate, *Separation and Purification Technology*, 61, 391-97, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.12.004>.
- [16] U. Bali, E. Catalkaya, F. Sengul, Photodegradation of Reactive Black 5, Direct Red 28 and Direct Yellow 12 using UV, UV/H₂O₂ and UV/H₂O₂/Fe²⁺ : a comparative study, *Journal of Hazardous Materials*, 114, 159-66, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.013>.



Google Earth Engine ile arazi kullanımı haritalarının üretimi Producing land use maps with Google Earth Engine

Majid Aghlmand ¹ , Kaan Kalkan ^{2,*} , Mehmet İnanç Onur ¹ , Gürkan Öztürk ³ ,
Ecem Ulutak ⁴ 

¹ Eskişehir Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

² TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Ankara, Türkiye

³ Eskişehir Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

⁴ Eskişehir Teknik Üniversitesi, Yer ve Uzay Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye

Özet

Sürekli gelişen şehirler, nüfus artışı ve iklimsel koşullar gibi ekosistem de meydana gelen olumsuz etkenler ile arazi kullanımı değişime uğramaktadır. Uzaktan algılama uyduları tarafından üretilen veriler, yeryüzü araştırmalarda önemli bir rol oynamaktadır. Arazi örtüsü haritaları, su ve biyokimyasal döngüler, enerji değişimleri veya biyolojik çeşitlilik değişiklikleri gibi çevresel süreçleri daha iyi anlamamıza yardımcı olur. Bu çalışma, Google Earth Engine bulut platformunda arazi kullanım haritalarının üretilebilirliğini test etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 01/01/2019 ve 01/01/2020 tarihleri arasında Landsat 8, Sentinel 1 ve Sentinel 2 uyduları tarafından çekilen tüm görüntüler kullanılmıştır. Daha sonra 5 farklı indeks; NDVI (Normalleştirilmiş fark bitki örtüsü endeksi), EVI(Gelişmiş Bitki Örtüsü Endeksi), NDWI (Normalleştirilmiş fark su endeksi), NDBI (Normalleştirilmiş fark oluşturma endeksi) ve UI (Kentsel indeks) hesaplanmış ve 19 farklı veri kombinasyonu dikkate alınmıştır. Daha sonra bu kombinasyonların her biri Destek Vektör Makineleri yöntemi(LibSVM) kullanılarak 5 sınıfa (Şehir alanı-yollar, su, ormanlık-koruluk, tarım dışı araziler ve tarım arazileri) ayrılmıştır. Her sınıflandırma için genel doğruluk ve Kappa Katsayısı hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. En iyi sınıflandırma, Landsat8, Sentinel-2, Sentinel-1 (VV), Landsat 8'den NDVI, Sentinel-2'den NDVI, NDBI, UI ve NDWI veri kombinasyonuna aittir. Bu kombinasyonda toplam doğruluk 96.62 ve kappa katsayısı 95.76 olmuştur.

Anahtar kelimeler: Arazi kullanım haritaları, Eskişehir, Google Earth Engine, Kontrollü sınıflandırma, Uzaktan algılama

1 Giriş

Küresel iklim değişikliğinin sonuçları gün geçtikçe kendisini hissettirmektedir [1]. Gelişen şehirler ve büyüyen insan nüfusu ile birlikte arazi kullanımlarının değerlendirilmesi ve analizi oldukça önemlidir. Küresel iklim değişikliğinin neden ve sonuçları ile alınması gereken önlemler belirlenmelidir [2]. Uzaktan algılama ve uydu görüntüleri sayesinde arazi kullanımının gözlemi ve analizini yapabilmek mümkündür. Son birkaç yıl içerisinde ortaya çıkan orta ve yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri ile uzaktan algılama yöntemleri ve uygulamalarına yenileri eklenmiştir [3, 4].

Uzaktan algılama görüntülerinden üretilen arazi örtüsü haritaları, arazi kaynakları yönetimi, kentsel planlama, hassas tarım ve çevre koruma gibi birçok alanda önemli bir rol oynamaktadır [5-8]. Arazi örtüsü haritaları, su ve biyokimyasal döngüleri, enerji değişimleri veya biyolojik

Abstract

Land use are changing due to negative factors occurring in the ecosystem such as continuously developing cities, population growth, and climatic conditions. Data produced by remote sensing satellites play an essential role in ground-based research. Land cover maps are prepared using this data. Land cover maps help us better understand environmental processes such as water and biogeochemical cycles, energy changes, or biodiversity changes. This study was carried out to test the producibility of land use maps on the Google Earth Engine cloud platform. All images acquired between 01/01/2019 and 01/01/2020 from Landsat 8, Sentinel 1, and Sentinel 2 were used in this study. Then 5 different indices NDVI, NDWI, NDBI, Ui, and EVI were calculated, and 19 different combinations of data were considered. Then, for each of these combinations, classification was performed by the LibSVM method in 5 classes: Urban Roads, Water, Forest-Grove, Non-agricultural Lands, and Agricultural Lands. Overall Accuracy and Kappa Coefficient were calculated for each classification, and results were compared. The best classification with Overall Accuracy 96.62 and Kappa Coefficient 95.76 belongs to the data combination of Landsat 8, Sentinel-1(VV), Sentinel-2, NDVI, NDBI, UI and NDWI from Sentinel-2 and NDVI from Landsat 8.

Keywords: Land use maps, Eskişehir, Google Earth Engine, Supervised classification, Remote sensing

çeşitlilik değişiklikleri gibi çevresel süreçleri daha iyi anlamamıza yardımcı olur [9].

Arazi örtüsü, temel iklim değişkeni olarak kabul edilmiştir ve ayrıca uzaktan algılama temel biyo-çeşitlilik değişkeni olarak önerilmiştir [10, 11]. Arazi örtüsünün, tematik ve yüksek çözünürlükte görüntülenebilir olması dünya yüzeyinin kolay bir şekilde izlenmesini ve karşılaştırma yapılmasını sağlamaktadır [12].

Bu sayede yeni nesil arazi kullanım analizleri ve haritaları ortaya çıkmıştır [13, 14]. Arazi kullanım haritalaması birkaç basamaktan oluşmaktadır. Bu basamaklar; verilerin seçilmesi, verilerin işlenmesi ve sınıflandırma işlemleridir. Eğer seçilen alan, ulusal veya bölgesel olarak seçilmiş ve oldukça büyük ise, verinin işlenmesinde sorunlar yaşanabilmektedir. Bir yıla ait büyük bir alanda pek çok uydu görüntüsünden yararlanılması gerektiği için bulutluluk oranı, verilerin büyüklüğü ve işlenmesi aşamalarında zorluklar yaşanabilmektedir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kalkaan@gmail.com (K. Kalkan)

Geliş / Recieved: 16.09.2020 Kabul / Accepted: 02.01.2021 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.795977

Ücretsiz olarak uydu görüntüsü elde etmek gün geçtikçe daha kolay hale gelmektedir. Copernicus programı [15] buna bir iyi örnektir. Sentinel-1 [16] ve Sentinel-2 [17] European Space Agency (ESA) Copernicus'a ait olan, iklim değişimi, güvenlik ve acil durum müdahalesi gibi durumlarda kullanılan ve veri sürekliliğini sağlamak için kullanılan uydulardır Sentinel-1 uydusunda bulunan radar sensörü bulutlardan etkilenmemektedir. Sentinel-1, Sentinel-2 ve Landsat 8 [18] uydu görüntülerine Google Earth Engine (GEE) [19] üzerinden kolay bir şekilde erişim sağlanabilmektedir. GEE uygulaması görüntüleri işlemede yerel saklama yerine bulut ortamında veriyi işlemeyi sağlamaktadır. Bu sayede bilgisayar özelliklerine bakılmaksızın istenilen sayıda görüntü sayısı çok daha hızlı ve kolay bir şekilde yapılabilmektedir. Bu tip platformlar sayesinde araştırmacılar büyük alanlarda büyük boyutta verileri analiz ederek sonuç elde edebilmektedir GEE büyük ölçekli verilerde hem donanımsal olarak güçlü bilgisayarlarla olan ihtiyacı azalmakta hem de kısa bir zaman diliminde analizi gerçekleştirerek kullanıcıların tasarruf yapmalarını sağlamaktadır [20]. GEE uygulamasında yer alan veri setleri oldukça zengindir. Farklı uydulara ait pek çok tarih aralığında bulunan uydu görüntülerini kullanabilmek mümkündür [21]. GEE kullanırken piksel seçimlerinde mean, median, min, max v.b. farklı yöntemler bulunmaktadır. Aynı zamanda GEE aracı ile bulut oranlarının az olduğu bölgeleri seçerken kod panelinden yararlanılarak bulutluluk oranının istenildiği şekilde seçilebilmesi mümkündür [22].

Farklı arazi örtüsü sınıfları göz önüne alınarak, uzaktan algılama alanında kullanılan birçok farklı yöntem değerlendirilerek, uzaktan algılanmış görüntülerde spektral ve spektral-uzamsal özelliklerin kullanımı farklı çalışmalarda araştırılmıştır [23–25].

NDVI(Normalleştirilmiş fark bitki örtüsü endeksi) ve EVI(Gelişmiş Bitki Örtüsü Endeksi) gibi indekslerin arazi kullanımı haritalamasında kullanımı bu haritaların üretilmesinde verimliliği arttırmaktadır. Bu indeksler sayesinde farklı alanların biyokütleri hakkında bilgi edilebilmektedir. Ayrıca, yaprak alan indeksi, biyokütle, kapalılık, fotosentez aktivitesi ve üretkenliği gibi analizler gerçekleştirilebilir [26, 27]. NDWI(Normalleştirilmiş fark su endeksi) su alanlarının bulunmasında ve bitkilerdeki su içeriğinin tespitinde verimli bir şekilde kullanılan bir indekstir [28]. Uydu görüntülerinde, yapılaşmış alanlar ile toprak alanlarını ayırt etmek genellikle zordur, bu arazi kullanımı türlerinin ayrılmasında doğruluğu arttıran

NDBI(Normalleştirilmiş fark oluşturma indeksi) ve Ui(Kentsel indeks) gibi indeksler kullanılmaktadır [29, 30].

Bu çalışma, Landsat 8, Sentinel-1 ve Sentinel-2 uydularından elde edilen verileri kullanarak Eskişehir ili arazi kullanımı haritalarının üretiminde en iyi doğruluğu elde etmek amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla, 01/01/2019 ve 01/01/2020 döneminde bu üç uydudan çekilen tüm görüntüler işleme alınmıştır. Ayrıca, sınıflandırmada NDVI, EVI, NDWI, NDBI ve Ui indeksleri hesaplanmıştır. Sınıflandırmanın temel verisini Landsat 8 oluşturacak şekilde planlanarak, tüm katmanların çözünürlüğü 30 metreye yeniden örneklenmiştir. Ardından, GEE'de LIBSVM yöntemini seçerek sınıflandırma farklı kombinasyonlarda adım adım gerçekleştirilmiştir. Her sınıflandırma için Overall Accuracy ve Kappa Coefficient değerleri hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

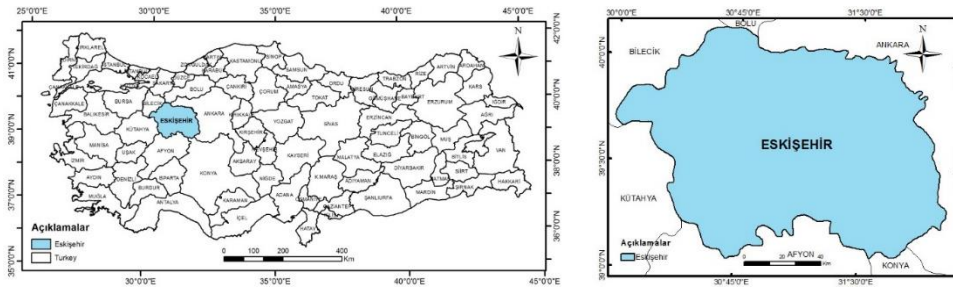
2 Materyal ve metod

2.1 Çalışma alanı

Çalışma alanı olarak Eskişehir ili seçilmiştir (Şekil 1). Eskişehir kuzeyinde Karadeniz, kuzeybatıda Marmara, batı ve güneybatıda Ege bölgesi ile komşu olmakla birlikte İç Anadolu Bölgesi'nin kuzeybatısında yer almaktadır. Eskişehir'in deniz yüksekliği ise 792 metredir. Eskişehir'in Seyitgazi, Sarıcakaya, Mihallıçık ilçelerinde farklı iklimler görülse de Eskişehir'in genel coğrafi karakteri İç Anadolu Bölgesine benzemektedir. Eskişehir'in alanı yaklaşık 13,653 km²'dir. Eskişehir'in kuzeyinde Bozdağ ve Sündiken dağları, güneyinde Emirdağ, doğuda Orta Asya vadisi ve batısında Türkmen dağları bulunmaktadır. Türkiye'nin tüm alanı ile Eskişehir oranlandığında Eskişehir ili Türkiye'nin %1.8'ini oluşturmaktadır [31]

2.2 Google Earth Engine (GEE)

GEE, bulut tabanlı coğrafi veri işleme platformudur ve tüm analizleri çok kısa bir sürede gerçekleştirmeyi sağlamaktadır. Google destekli platformda bulunan ve toplanan veriler herkesin erişimine açık olarak sunulmuştur. Ağaç, orman ve su alanları, arazi kullanımındaki değişiklikleri veya tarım alanlarının sağlığını değerlendirmek için GEE'yi kullanabilmek mümkündür. GEE, son 40 yıl içerisinde küresel ölçekli birçok veriyi sunmaktadır. Platform veri sunmakla kalmayıp aynı zamanda analiz yapmayı sağlayan oldukça güçlü araçlar içermektedir [32–35].



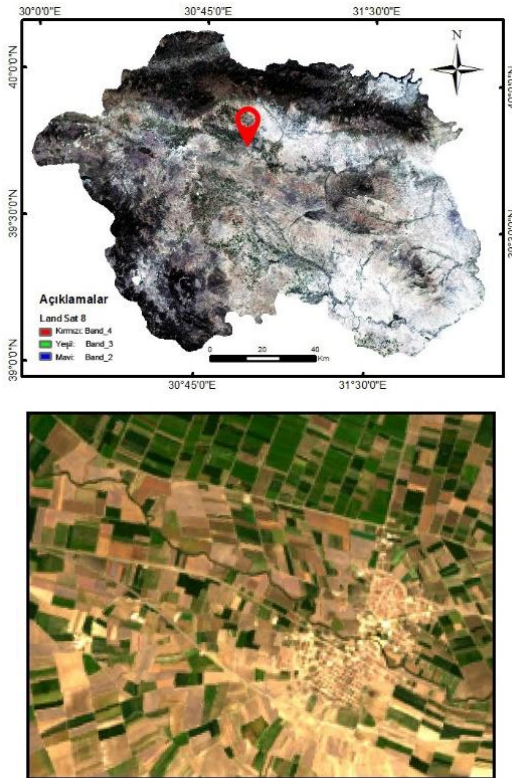
Şekil 1. Çalışma alanı

Landsat 8, Sentinel-1 ve Sentinel-2 verileri GEE'de mevcuttur. Bu çalışmada Landsat 8, Sentinel-1 ve Sentinel-2 verileri kullanılmıştır. GEE içerisindeki veriler, kullanıcıya hazır halde sunulmaktadır ve herhangi bir ön-işleme sürecinden geçirilmesi gerekmeyecek şekilde analizlerde kullanılabilir. Bu çalışmada kullanılan Sentinel-1 SAR GRD görüntüleri, termal gürültü giderme, radyometrik kalibrasyon ve arazi düzeltmesi gibi ön-işleme süreçlerinden geçirilmiştir. Sentinel-2 görüntülerine ise Level-1C ve Level-2A formatında erişilebilmektedir. Bu çalışmada Level-2A verileri kullanılmıştır. Landsat 8 verileri 3 ayrı ön-işleme seviyesinde sunulmaktadır; yüzey yansıtımı (Surface Reflectance), atmosfer üstü yansıtım (Top of Atmosphere) ve ham görüntüler. Bu çalışmada atmosferik düzeltmesi yapılmış yüzey yansıtımı verileri kullanılmıştır [36].

Çalışmada, 5 farklı indeks hesaplanmıştır. NDVI, EVI, NDWI, NDBI ve UI her biri hakkında bilgiler aşağıda verilmiştir.

2.3 Landsat 8

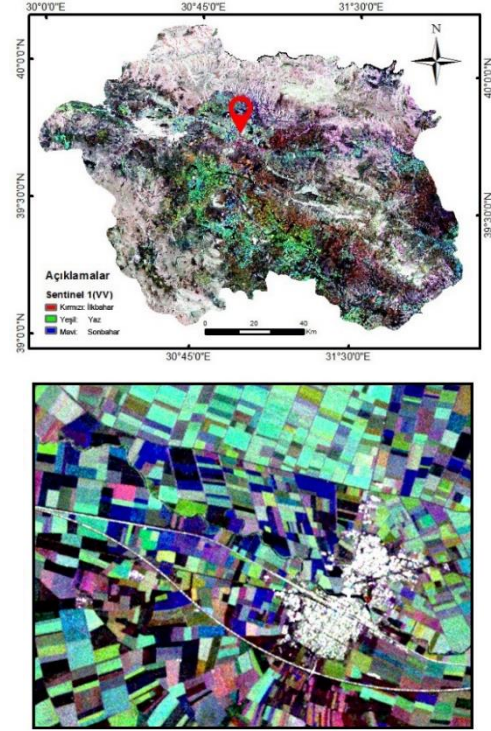
GEE'de bulunan Landsat 8 verileri, LaSRC yönetime ile atmosferik düzeltmesi gerçekleştirilmiş ve CFMASK algoritması ile hesaplanan bulut, gölge, su ve kar maskelerini içermektedir [36]. Landsat 8'den 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 bantlar kullanılmıştır. Eskişehir iline ait olan görüntüler üzerinde çalışılmıştır(Şekil 2). Her mevsimden veriler üzerinde analiz gerçekleştirilmiştir. En iyi görüntü ve analizi yapabilmek için ilk olarak maske algoritması uygulanmıştır daha sonra medyan değerler hesaplanmıştır.



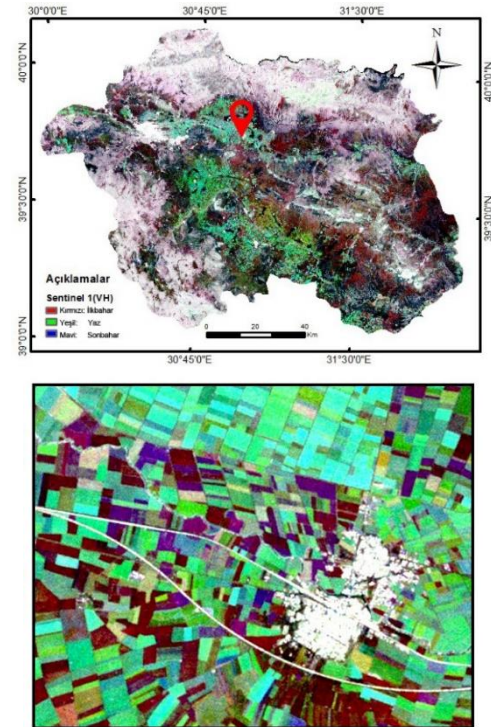
Şekil 2. Landsat 8 uydu görüntüsü

2.4 Sentinel-1

Bu çalışmada Sentinel-1 uydusunun VV ve VH bantları kullanılmıştır. Her bir mevsim için görüntü sayısı sırasıyla 87, 90, 88 ve 93'tür. Her bir mevsim için ayrı görüntüler ve görüntülerin medyanları kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. Sentinel-1 VV uydu görüntüsü



Şekil 4. Sentinel-1 VH uydu görüntüsü

Her bir mevsim için RGB bantları Şekil 3 ve 4’de gösterilmiştir. Şekil 5’de renklerin ve mevsimlerin kombinasyonu görüntülenebilir. Bu kombinasyon tüm veri setlerinde kullanılmıştır.



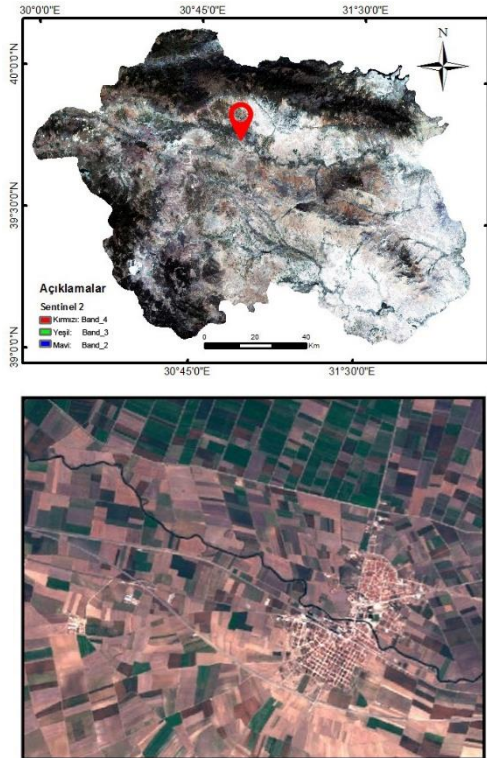
Şekil 5. Kırmızı, yeşil, mavi kombinasyonu [14]

Tablo 1. Sentinel-1 uydu bilgisi

İsim	Tanımlama	Dalga boyu	Çözünürlük
HH	Single co-polarization, horizontal transmit/horizontal receive	5.405 GHz	10 metre
HV	Dual-band cross-polarization, horizontal transmit/vertical receive	5.405 GHz	10 metre
VV	Single co-polarization, vertical transmit/vertical receive	5.405 GHz	10 metre
VH	Dual-band cross-polarization, vertical transmit/horizontal receive	5.405 GHz	10 metre

2.5 Sentinel-2

Sentinel-2 yüksek çözünürlüklü, geniş alanlı ve çok spektrumlu Copernicus arazi gözlem çalışmalarını destekleyen ve su, bitki örtüsü, toprak gibi alanların gözlemlenmesini sağlayan uydudur (Şekil 6).



Şekil 6. Sentinel-2 uydu görüntüsü

2.6 İndeksler

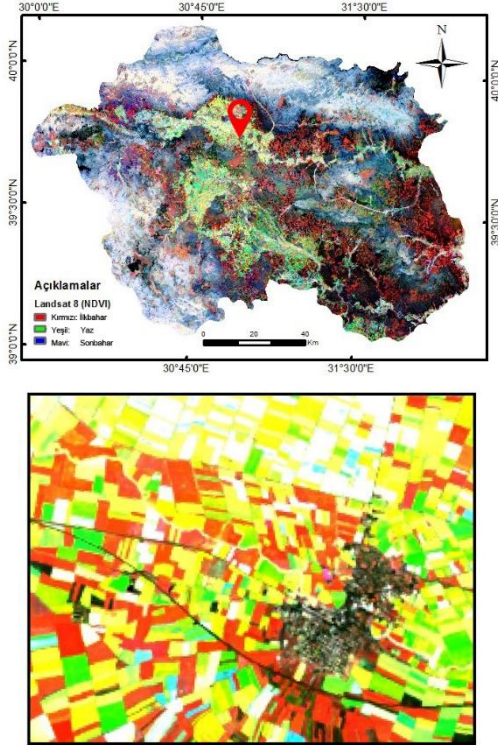
NDVI, EVI, NDBI, NDWI ve Ui indeksleri Sentinel-2 uydusu kullanılarak hesaplanmıştır. Sadece NDVI indeksi hesaplanırken Landsat-8 uydusu görüntüsü kullanılmıştır. Her bir indeks için formüller Tablo 2’de gösterilmiştir. İndeks hesaplarını yapabilmek için ilk olarak ilgili tarih aralıklarına ait görüntüler belirlenmiştir. Daha sonra, her bir görüntü için indeks hesabı yapılmıştır. Son görüntü “maximum value composite” algoritması kullanılarak piksel başına düşen maksimum değerler alınarak üretilmiştir.

Tablo 2. Araştırma kullanılan indeks bilgileri ve formülleri

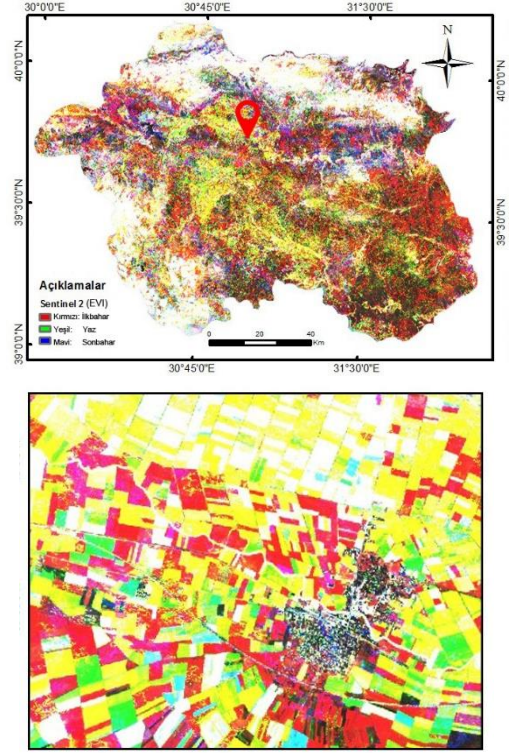
Tür	İndeks	Formül
Normalleştirilmiş fark bitki örtüsü indeksi[26]	NDVI	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$
Gelişmiş Bitki Örtüsü Endeksi[27]	EVI	$G * \frac{NIR - RED}{NIR + C1 * RED - C2 * Blue + L}$
Normalleştirilmiş fark su indeksi[28]	NDWI	$\frac{Green - NIR}{Green + NIR}$
Normalleştirilmiş fark oluşturma indeksi[29]	NDBI	$\frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR}$
Kentsel İndeks[30]	UI	$\frac{SWIR2 - NIR}{SWIR2 + NIR}$

Şekil 7’de Landsat-8 uydusu kullanılarak hesaplanan NDVI sonuçları görülmektedir ve Şekil 8’de ise Sentinel-2 uydusu kullanılarak hesaplanan NDVI sonuçları görülmektedir. Aşağıda bulunan görüntüde her bir mevsim için hesaplanan NDVI için RGB renk bantları kombinasyonlarından yararlanılmıştır.

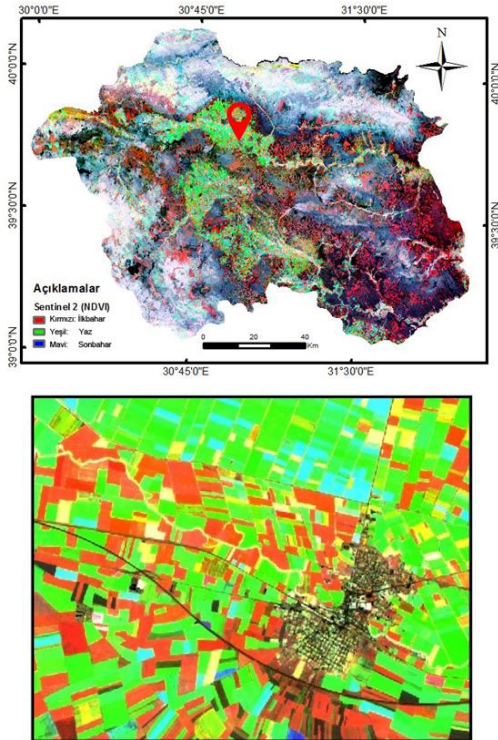
Eğer tarım arazileri ile çalışma yapılacak ise, sarı ile işaretli alanlar ilkbahar aylarında maksimum NDVI değerine sahip olan alanlardır. Yeşil ile işaretli olanlar, yaz aylarında maksimum NDVI değerine sahiptir ve mavi ile işaretli alanlar ise, sonbahar aylarında maksimum değere sahip alanlardır. Beyaz işaretli olan alanlar ise, her bir sezona ait 3 ay içerisinde en yüksek değere sahip olan alanlardır. NDVI hesaplanması Landsat-8’e ait 103 görüntü kullanılarak hesaplanmıştır. Aynı indeks Sentinel-2’ye ait 952 görüntü kullanılarak da hesaplanmıştır.



Şekil 7. NDVI - Landsat 8



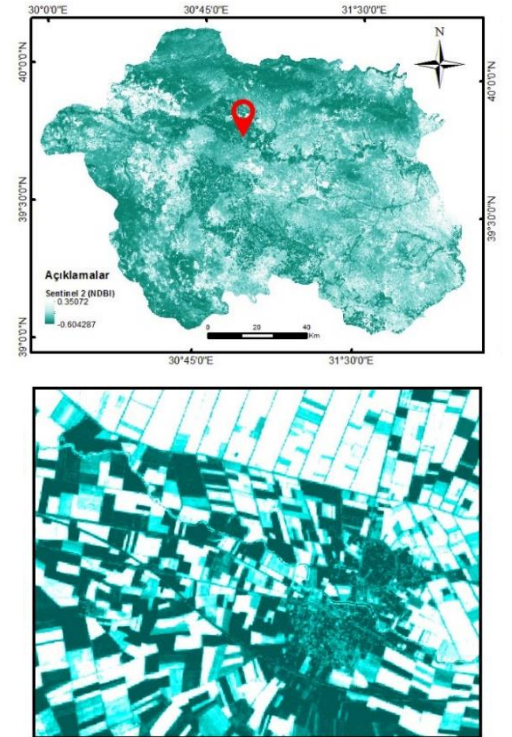
Şekil 9. EVI - Sentinel-2



Şekil 8. NDVI - Sentinel-2

Aynı zamanda, her bir mevsim için EVI indeksi hesaplanmıştır. Şekil 9'da EVI indeksin hesaplanması sonucunda ortaya çıkan sonuç görülmektedir. Her bir mevsime ait olan EVI indeks sonucunun daha iyi görünebilmesi için RGB bantlardan yararlanılmıştır.

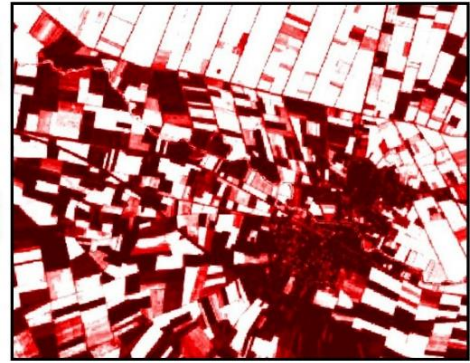
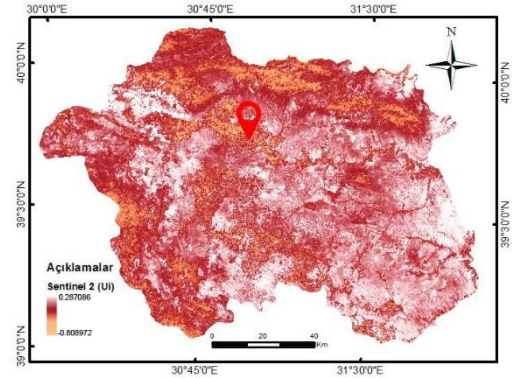
NDBI, UI ve NDWI indeksleri Tablo 2'de verilen formüller ile hesaplanmıştır. Bu 3 indeks her bir mevsim için değil sadece yaz mevsim verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Aşağıda bulunan Şekil 10, 11 ve 12'de GEE üzerinde hesaplanan indekslerin sonuçları verilmiştir.



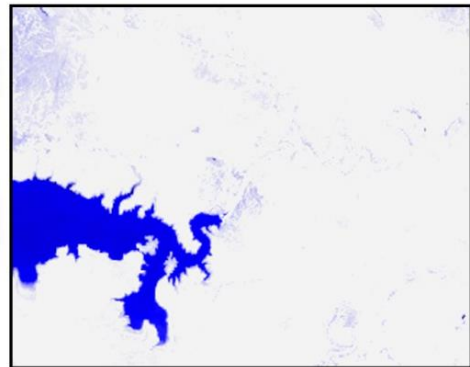
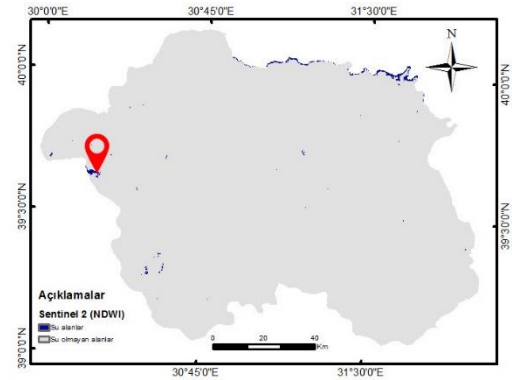
Şekil 10. NDBI - Sentinel-2

Tablo 3. Araştırma kullanılan tüm verilerin detaylı bilgileri

VERİ SETİ	Tarih Aralığı	Görüntü Sayısı	İşlem
	2019-01-01 - 2019-04-01	27	Median
USGS Landsat 8 Surface Reflectance Tier 1	2019-04-01 - 2019-07-01	27	Median
	2019-07-01 - 2019-10-01	29	Median
	2019-10-01 - 2020-01-01	20	Median
	2019-01-01 - 2019-04-01	234	Median
Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A	2019-04-01 - 2019-07-01	234	Median
	2019-07-01 - 2019-10-01	244	Median
	2019-10-01 - 2020-01-01	240	Median
	2019-01-01 - 2019-04-01	87	Median
Sentinel-1 SAR GRD: C-band Synthetic Aperture Radar Ground Range Detected, log scaling(VH)	2019-04-01 - 2019-07-01	90	Median
	2019-07-01 - 2019-10-01	88	Median
	2019-10-01 - 2020-01-01	93	Median
	2019-01-01 - 2019-04-01	87	Median
Sentinel-1 SAR GRD: C-band Synthetic Aperture Radar Ground Range Detected, log scaling(VV)	2019-04-01 - 2019-07-01	90	Median
	2019-07-01 - 2019-10-01	88	Median
	2019-10-01 - 2020-01-01	93	Median
	2019-01-01 - 2019-04-01	234	Max
Sentinel-2 EVI	2019-04-01 - 2019-07-01	234	Max
	2019-07-01 - 2019-10-01	244	Max
	2019-10-01 - 2020-01-01	240	Max
	2019-01-01 - 2019-04-01	234	Max
Sentinel-2 NDVI	2019-04-01 - 2019-07-01	234	Max
	2019-07-01 - 2019-10-01	244	Max
	2019-10-01 - 2020-01-01	240	Max
	2019-01-01 - 2019-04-01	27	Max
Landsat 8 NDVI	2019-04-01 - 2019-07-01	27	Max
	2019-07-01 - 2019-10-01	29	Max
	2019-10-01 - 2020-01-01	20	Max
Santinel-2 NDBI	2019-04-01 - 2019-07-01	234	Max
Santinel-2 Ui	2019-04-01 - 2019-07-01	234	Max
Santinel-2 NDWI	2019-04-01 - 2019-07-01	234	Max



Şekil 11. UI - Sentinel-2



Şekil 12. NDWI - Sentinel-2

2.7 Sınıflandırma metotları

GEE platformunda birçok farklı sınıflandırma yöntemi bulunmaktadır. Destek Vektör Makineleri (SVM) bunlardan bir tanesidir. SVM algoritması başarılı algoritmalarından birisi olarak bilinmektedir [37] ve son 10 yılda birçok çalışma SVM yöntemini parametrik olmayan kontrollü sınıflandırma çalışmalarında kullanmıştır [38-40]. Kısıtlı veri olması durumunda SVM yöntemi, Maksimum Olabilirlik gibi diğer geleneksel yöntemlere nazaran çok daha iyi sonuç vermektedir [41, 42]. SVM sınıfları en iyi şekilde ayıran hiper düzlemleri kullanarak sınıflandırma işlemini yapmaktadır [43]. Bu çalışmada Destek Vektör Makineleri Kitaplığı (LibSVM) yöntemi kullanılmıştır [44].

Bu metotta ilk olarak farklı sınıflara ait eğitim noktaları seçilir. Bu çalışmada 5 farklı sınıflandırma alanı belirlenmiştir bunlar; Şehir alanı-yollar, su, ormanlık-koruluk, tarım dışı araziler ve tarım arazileri olarak gösterilebilir. Aşağıda verilen Formül 1 ile örnek alanlarının sayısı belirlenmiştir. Bu formül her bir sınıf için 410 adet noktanın belirlenmesi ile uygulanmıştır. Bu noktaların seçimi Sentinel 2 ve Landsat 8'in görüntüleri incelenerek ve Google Earth Engine'in yüksek çözünürlüklü görüntüsü ile eşleştirilerek yapılmıştır. Daha sonra noktaların %70'i eğitim için ve %30'u ise test için rastgele seçilmiştir (Tablo 4).

$$N = \frac{Z^2(p)(q)}{E^2} \quad (1) [14]$$

Yukarıdaki formülde p tüm sınıflandırmanın beklenen doğruluğudur, $q = 100 - p$, E izin verilen hata sınırı ve $Z = 2$ %95 güven aralığında 1.96'nın standart sapmasıdır.

Tablo 4. Sınıflandırma bilgileri ve noktaların sayıları

No.	Sınıf adı	Eğitim Noktaları	Test Noktaları
1	Şehir alanı-yollar	287	123
2	Su	287	123
3	Ormanlık-koruluk	287	123
4	Tarım dışı araziler	287	123
5	Tarım arazileri	287	123

Google Earth Engine ile verilerin filtrelenmesi; tarih aralığı, coğrafi alan, bulut yüzdesi ve uydu görüntülerinde belirli özellikler seçilerek yapılır. Bu çalışmada, bu filtrelerden bazıları görüntü çağrılmasında kullanılmış ve özellikle indislerin hesaplanmasında Maximum Valio Composite algoritması kullanılmıştır.

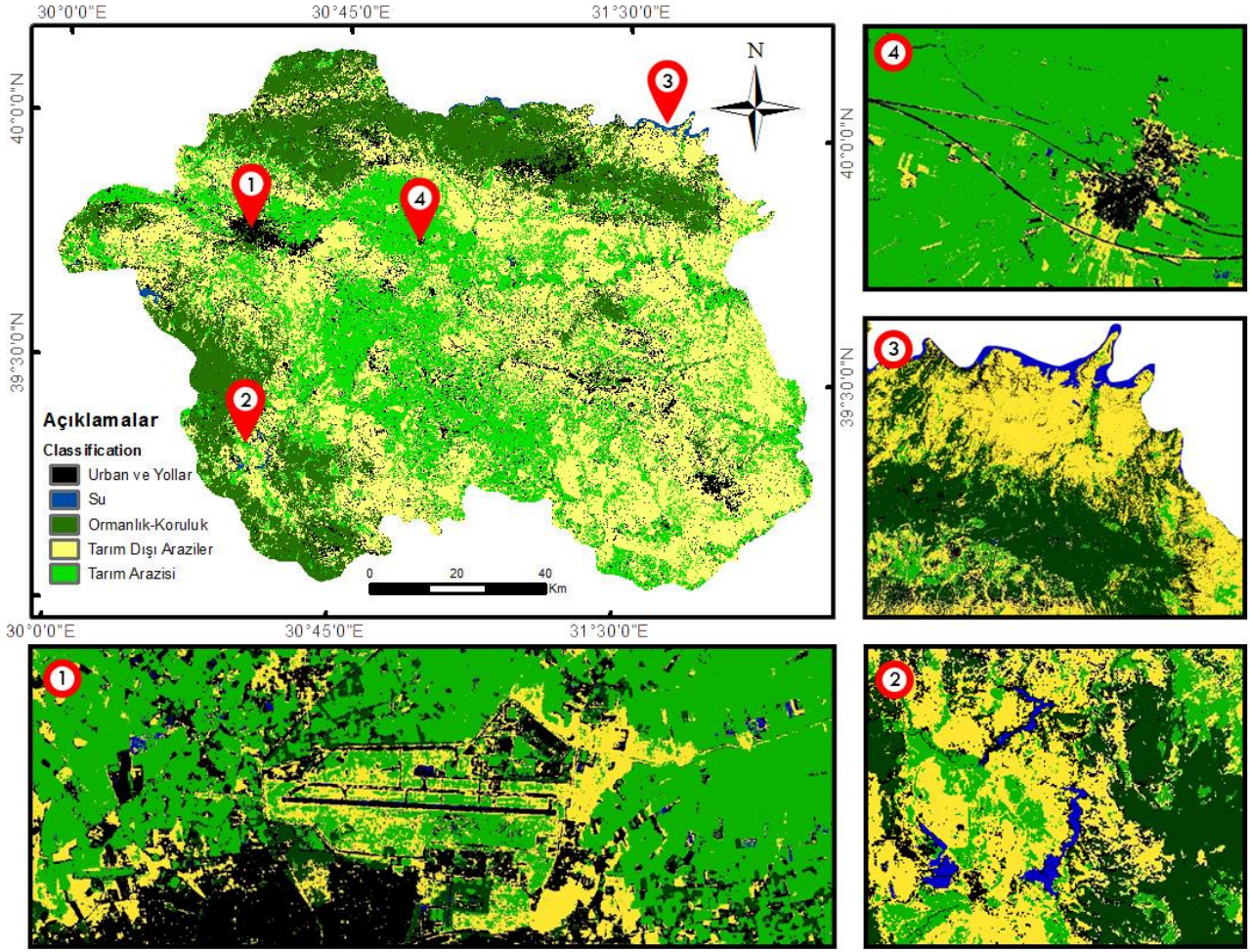
3 Bulgular ve tartışma

Veri kombinasyonlarının ve katmanların seçimi aşama aşama yapılmıştır. İlk olarak, sınıflandırma işlemi yapılmıştır ve sonuçların iyileştirilmesi için diğer veriler eklenmiştir. İlk olarak Landsat 8, Sentinel 1 ve Sentinel 2 uydularının görüntüleri ayrı ayrı sınıflandırılmış, daha sonra, diğer araştırmacılar tarafından yapılan araştırmalara dayanarak başka katmanlar eklenmiştir. Testin en yüksek doğruluğunu elde etmeye çalışılması için literatürde olan kombinasyonlara ilave yeni kombinasyonlar eklenmiştir. Tablo 5'de sınıflandırma ve farklı bileşiklerin sonuçları görülebilmektedir. Aynı zamanda, her bir kombinasyon için genel doğruluk ve kappa katsayısı hesaplanmıştır.

Tablo 5. Farklı kombinasyonlar ve her bir kombinasyon için hesaplanan Genel doğruluk ve Kappa katsayısı bilgileri

No.	Kombinasyon	Band	Genel doğruluk	Kappa katsayısı
1	L8 + S2 + S1VV + L8NDVI + S2NDVI + S2Ui + S2NDBI + S2NDWI	55	96.62	95.76
2	L8 + S2 + S1VV + S1VH	48	94.44	93.03
3	L8 + S2 + S1VH	44	94.41	93
4	L8 + S2 + S1VV + S1VH + L8NDVI + S2NDVI + S2Ui + S2NDBI + S2NDWI + S2EVI	63	93.91	92.39
5	L8 + S2 + S1VV + S1VH + L8NDVI + S2NDVI + S2Ui + S2NDBI + S2NDWI	59	93.75	92.18
6	L8 + S2	40	93.30	91.61
7	L8NDVI + S2NDVI + S1VV + S1VH + S2Ui + S2NDBI + S2NDWI	59	93.24	91.55
8	L8 + S1VV + S1VH	32	92.91	91.13
9	L8 + S2 + S1VV	44	92.09	90.12
10	S2 + S1VV + S1VH + S2NDVI + S2Ui + S2NDBI + S2NDWI + S2EVI	35	91.42	89.25
11	L8NDVI + S2NDVI + S1VV + S1VH + S2Ui + S2NDBI + S2NDWI + S2EVI	63	90.61	88.25
12	S1VV + S1VH + S2NDVI	12	91.27	89.07
13	L8 + S1VV	28	89.23	86.49
14	S2 + S1VV + S1VH	24	89.16	86.43
15	L8NDVI + S2NDVI + S1VV	12	88.09	85.1
16	S2 + S2NDVI	20	87.46	84.34
17	S2	16	85.35	81.66
18	S1VV + S1VH	8	81.76	77.2
19	L8	24	75.88	69.88

S1VV: Sentinel-1(VV); S1VH: Sentinel-1(VH); S2: Sentinel-2; L8: Landsat 8; L8NDVI: Landsat 8(NDVI); S2NDVI: Sentinel-2(NDVI); S2Ui: Sentinel-2(Ui); S2NDBI: Sentinel-2(NDBI); S2NDWI: Sentinel-2(NDWI); S2EVI: Sentinel-2(EVI)



Şekil 13. L8 + S2 + S1VV + L8NDVI + S2NDVI + S2Ui + S2NDBI + S2NDWI sınıflandırma sonuçları

Tablo 5'de görüldüğü üzere, eğer sınıflandırma için sadece Landsat 8 uydu görüntüleri ve bantları kullanıldığında, genel doğruluk 75.88 ve Kappa değeri 69.88 olmaktadır. Eğer sınıflandırmada Sentinel-1 görüntüleri (VV ve VH bantları) kullanılırsa, genel doğruluğu ve Kappa sırasıyla 81.76 ve 77.2 olarak bulunmaktadır. Bu sınıflandırmada sadece 8 bant kullanılmıştır. Bu bantlar, medyan algoritmasının kullanılması sonucu elde edilen 358 görüntünün VV ve VH bantlarıdır.

Sentinel-2 uydusu görüntülerinin kullanılmasında ise, genel doğruluk ve Kappa sırasıyla 85.35 ve 81.66'ya yükselmektedir. 16 adet katman sayısı ve sınıflandırma yapılmıştır. Medyan değeri 952 görüntü üzerinden elde edilmiştir.

Sonuçlar, bilgi katmanları eklenerek ve diğer uydu görüntüleri kullanarak, veriler birbirleriyle kombinlenerek ve farklı indeksler eklenerek, sınıflandırma doğruluğunun önemli ölçüde artırılabilceğini göstermektedir. Örneğin, Landsat ve Sentinel 2 uydu verileri birleştirilirse, genel doğruluk ve Kappa 93.30 ve 91.61'e yükselmektedir. Ayrıca, Sentinel 1 uydusunun VV ve VH bantlarını eklenirse, toplam doğruluğun 94.44'e, Kappa'nın ise 93.03'e yükseldiği görülmektedir.

Endekslerin kullanımı sınıflandırma kalitesini artırmaktadır. Farklı indeksler hesaplayıp bunları bilgi

katmanlarına ekleyerek sınıflandırma kalitesini artırmak da mümkündür. Sonuçlar göstermektedir ki; eğer 4 farklı indeksin hepsi hesaplanarak (NDVI, NDBI, Ui ve NDWI) ve Landsat 8, Sentinel 2 ve Sentinel 1-VV uydu verileri bir arada kullanıldığında doğruluk 96.62 ve kappa 95.76 olarak elde edilmektedir. Şekil 13'de sınıflandırma sonuçları verilmiştir. Bu kombinasyonda, Landsat 8 ve Sentinel 2 uydu bantlarının her biri kullanılarak NDVI hesaplanmıştır. Fakat diğer indeks hesaplamalarında sadece Sentinel 2 uydu bantları kullanılmıştır. Sentinel uydu VH bandı bu veri kombinasyonunda kullanılmamıştır çünkü bu bandın kullanılması genel doğruluğu ve Kappa'yı sırasıyla 93.75 ve 92.18'e düşürmüştür. Ayrıca, bantlar arasında EVI endeksi varsa, genel doğruluk ve Kappa 84 ve 80.07'ye düşmektedir.

Landsat 8 ve Sentinel 2 uydu bantları kullanılmadan sadece Sentinel 1 uydu verileri ile NDVI, NDWI, NDBI ve Ui sınıflandırması yapıldığı zaman genel doğruluğun ve Kappa katsayısının sırasıyla 91.61 ve 88.25'e yükseldiği görülmektedir.

4 Sonuç ve öneriler

Bu çalışma, Landsat 8, Sentinel-1 ve Sentinel-2 uydularından elde edilen verileri kullanarak Eskişehir ili arazi örtüsü haritasının üretiminde en iyi doğruluğu elde etmek amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla, 01/01/2019 ve

01/01/2020 döneminde bu üç uydudan çekilen tüm görüntüler işleme alınmıştır. Ayrıca, sınıflandırmada NDVI, EVI, NDWI, NDBI ve UI indeksleri hesaplanmıştır. Her sınıflandırma için Overall Accuracy ve Kappa Coefficient değerleri hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışma GEE platformunda yapılmıştır. GEE farklı kombinasyonları denemeyi sağlayan bununla birlikte sonuçları en kısa sürede ve en iyi şekilde almayı olanak sağlamaktadır. Sonuçlar, en iyi sınıflandırma sonucunun L8 + S2 + S1VV + L8NDVI + S2NDVI + S2Ui + S2NDBI + S2NDWI kombinasyonunun elde edildiğini göstermektedir.

Bu kombinasyonun sınıflandırılması ve hesaplanarak sonucu vermesi 60 dakikadan az sürede gerçekleştirilmektedir. Eğer bu kombinasyon ve sınıflandırmayı sıradan bir bilgisayar üzerinde yazılım kullanarak yapılmaya çalışıldığında sonucu almak aylarca sürebilmektedir. Birçok bilgisayar bu analizleri yapabilmek için yeterli kapasiteye sahip değildir. GEE, araştırmacılara sayısız veri sunmaktadır. Aynı zamanda hazır kodların bulunduğu veya kendi kod bloklarını yazabilecekleri bir platform sunmaktadır. Bu çalışmanın farklı veriler ve sınıflandırma yöntemleri kullanarak diğer çalışmalara yol gösterici olması öngörülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] J. Liu, C. Zhang, L. Kou, and Q. Zhou, Effects of climate and land use changes on water resources in the Taoyer river. *Advances in Meteorology*, 2017, Article ID 1031854, 13 pages 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1031854>
- [2] G. Cai, H. Ren, L. Yang, N. Zhang, M. Du, and C. Wu, Detailed urban land use land cover classification at the metropolitan scale using a three-layer classification scheme. *Sensors*, 19(14), 3120, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19143120>
- [3] A. A. Vaighan, N. Talebbeydokhti, and A. M. Bavani, Assessing the impacts of climate and land use change on streamflow, water quality and suspended sediment in the Kor River Basin, Southwest of Iran. *Environ Earth Sci*, 76(15), 543, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6880-6>
- [4] L. Li, Y. Chen, X. Yu, R. Liu, and C. Huang, Sub-pixel flood inundation mapping from multispectral remotely sensed images based on discrete particle swarm optimization. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 101, 10–21, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.11.006>
- [5] X. Zhang, L. Han, L. Han, and L. Zhu, How well do deep learning-based methods for land cover classification and object detection perform on high resolution remote sensing imagery?. *Remote Sens.*, 12(3), 417, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12030417>
- [6] C. Zhang, P. A. Harrison, X. Pan, H. Li, I. Sargent, and P. M. Atkinson, Scale Sequence Joint Deep Learning (SS-JDL) for land use and land cover classification. *Remote Sens. Environ.*, 237:111593, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111593>
- [7] C. Zhang, S. Wei, S. Ji, and M. Lu, Detecting large-scale urban land cover changes from very high resolution remote sensing images using cnn-based classification. *ISPRS Int J Geo-Information*, 8(4), 189, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijgi8040189>
- [8] K. Hussein, K. Alkaabi, D. Ghebreyesus, M. U. Liaqat, and H. O. Sharif, Land use/land cover change along the Eastern Coast of the UAE and its impact on flooding risk. *Geomatics, Nat Hazards Risk*, 11(1), 112–30, 2020. <https://doi.org/10.1080/19475705.2019.1707718>
- [9] E. F. Lambin, H. J. Geist, and E. Lepers, Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 28(1), 205–41, 2003. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>
- [10] Essential Climate Variables, World Meteorological Organization (WMO). <https://public.wmo.int/en/programmes/global-climate-observing-system/essential-climate-variables> Accessed: Jan. 05, 2021.
- [11] N. Pettorelli et al., Framing the concept of satellite remote sensing essential biodiversity variables: challenges and future directions. *Remote Sens. Ecol. Conserv.*, 2(3), 122–31, 2016. <https://doi.org/10.1002/rse2.15>
- [12] E. F. Lambin and H. J. Geist, *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [13] L. Carrasco, A. W. O’Neil, R. D. Morton, and C. S. Rowland, Evaluating combinations of temporally aggregated Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 for land cover mapping with Google Earth Engine. *Remote Sens.*, 11(3), 288, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11030288>
- [14] J. R. Jensen, *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Prentice-Hall Inc., 1996.
- [15] The Copernicus Open Access Hub, European Space Agency. <https://scihub.copernicus.eu/> Accessed: Jan. 05, 2021
- [16] Sentinel-1, European Space Agency. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1> Accessed: Jan. 05, 2021.
- [17] Sentinel-2, European Space Agency. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> Accessed: Jan. 05, 2021.
- [18] Landsat 8, U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8> Accessed: Jan. 05, 2021.
- [19] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore, Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ.*, 202, 18–27, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- [20] X. Wang et al., Tracking annual changes of coastal tidal flats in China during 1986–2016 through analyses of Landsat images with Google Earth Engine. *Remote Sens. Environ.*, 202, 18–27, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

- Sens. Environ., 238, 110987, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.030>
- [21] N. You and J. Dong, Examining earliest identifiable timing of crops using all available Sentinel 1/2 imagery and Google Earth Engine. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 161, 109–23, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.01.001>
- [22] G. Mateo-García, L. Gómez-Chova, J. Amorós-López, J. Muñoz-Marí, and G. Camps-Valls, Multitemporal cloud masking in the Google Earth Engine. *Remote Sens.*, 10(7), 1079, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10071079>
- [23] Q. Weng, Z. Mao, J. Lin, and W. Guo, Land-use classification via extreme learning classifier based on deep convolutional features. *IEEE Geosci Remote Sens Lett.*, 14(5), 704–8, 2017. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2672643>
- [24] K. Islam, M. Jashimuddin, B. Nath, and T. K. Nath, Land use classification and change detection by using multi-temporal remotely sensed imagery: The case of Chunati wildlife sanctuary, Bangladesh. *Egypt J Remote Sens Sp Sci.*, 21(1), 37–47, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.12.005>
- [25] J. R. B. Fisher, E. A. Acosta, P. J. Denny-Frank, T. Kroeger, and T. M. Boucher, Impact of satellite imagery spatial resolution on land use classification accuracy and modeled water quality. *Remote Sens Ecol Conserv.*, 4(2), 137–49, 2018. <https://doi.org/10.1002/rse2.61>
- [26] T. Hu, J. Yang, X. Li, and P. Gong, Mapping urban land use by using landsat images and open social data. *Remote Sens.*, 8(2), 151, 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8020151>
- [27] B. Matsushita, W. Yang, J. Chen, Y. Onda, and G. Qiu, Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: A case study in high-density cypress forest. *Sensors.*, 7(11), 2636–51, 2007. <https://doi.org/10.3390/s7112636>
- [28] W. Li et al., A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM+ and ALL. *Remote Sens.*, 5(11), 5530–49, 2013. <https://doi.org/10.3390/rs5115530>
- [29] T. L. Dammalage and N. T. Jayasinghe, Land-use change and its impact on urban flooding: A case study on Colombo district flood on May 2016. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, 9(2), 3887–91, 2019. <https://doi.org/10.48084/etasr.2578>
- [30] H. Li et al., Mapping urban bare land automatically from Landsat imagery with a simple index. *Remote Sens.*, 9(3), 249, 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9030249>
- [31] S. Ergen, A. Çelik, N. Çalışkan ve V. Yıldırım, Eskişehir istatistikleri. Eskişehir Büyükşehir Belediyesi Yayını, Eskişehir, 2018. http://www.eskisehir.bel.tr/dosyalar/istatistiklerle_eskisehir/2018.pdf
- [32] J. Koskinen et al., Participatory mapping of forest plantations with Open Foris and Google Earth Engine. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 148, 63–74, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.12.011>
- [33] Y. Wang, J. Ma, X. Xiao, X. Wang, S. Dai, and B. Zhao, Long-term dynamic of Poyang Lake surface water: A mapping work based on the Google Earth Engine cloud platform. *Remote Sens.*, 11(3), 313, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11030313>
- [34] M. Venkatappa, N. Sasaki, R. P. Shrestha, N. K. Tripathi, and H.-O. Ma, Determination of vegetation thresholds for assessing land use and land use changes in Cambodia using the Google Earth Engine cloud-computing platform. *Remote Sens.*, 11(13), 1514, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11131514>
- [35] P. R. Mirelva and R. Nagasawa, Application of Sentinel-1 data for classifying croplands using Google Earth Engine. *Int. J. Geoinformatics.*, 15(3), 2019.
- [36] Earth Engine Data Catalog. Google. <https://developers.google.com/earth-engine/datasets> Accessed: January 2021.
- [37] D. Poursanidis, N. Chrysoulakis, and Z. Mitraka, Landsat 8 vs. Landsat 5: A comparison based on urban and peri-urban land cover mapping. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 35, 259–69, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.09.010>
- [38] G. M. Foody and A. Mathur, Toward intelligent training of supervised image classifications: directing training data acquisition for SVM classification. *Remote Sens. Environ.*, 93(1–2), 107–17, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.06.017>
- [39] M. Pal and P. M. Mather, Support vector machines for classification in remote sensing. *Int. J. Remote Sens.*, 26(5), 1007–11, 2005. <https://doi.org/10.1080/01431160512331314083>
- [40] W. Li, R. Dong, H. Fu, J. Wang, L. Yu, and P. Gong, Integrating Google Earth imagery with Landsat data to improve 30-m resolution land cover mapping. *Remote Sens. Environ.*, 237, 111563, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111563>
- [41] P. Mantero, G. Moser, and S. B. Serpico, Partially supervised classification of remote sensing images through SVM-based probability density estimation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 43(3), 559–70, 2005. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.842022>
- [42] G. Mountrakis, J. Im, and C. Ogole, Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 66(3), 247–59, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001>
- [43] S. Park, J. Im, S. Park, C. Yoo, H. Han, and J. Rhee, Classification and mapping of paddy rice by combining Landsat and SAR time series data. *Remote Sens.*, 10(3), 447, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10030447>
- [44] C.-C. Chang, LIBSVM: a library for support vector machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2, 3, article:27: 1–27, 2011. <https://doi.org/10.1145/1961189.1961199>



Yüksek hızlı terahertz kablosuz haberleşme için iletim pencereleri ve link hesabı

Transmission windows and link budget for high speed terahertz wireless communication

Ayhan Yazgan^{1,*}, Emin Tuğcu², Cenk Albayrak², Kadir Türk¹

¹ Karadeniz Technical University, Electrical-Electronics Engineering Department, 61080 Trabzon, Turkey

² Karadeniz Technical University, Electronics and Communication Engineering Department, 61830 Trabzon, Turkey

Özet

Bu çalışmada, gelecek nesil terahertz kablosuz haberleşme sistemleri için uygun frekans bantları incelenmiş ve farklı atmosferik koşullar altında bu frekans bantları için link hesapları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada atmosferik koşulların değişiminden haberleşme sisteminin nasıl etkilendiği hususu dikkate alınarak makul zayıflama değerlerinde iletişim yapılabilecek 7 iletim penceresi (frekans bandı) olduğu gözlemlenmiştir. Bu iletim pencereleri içerisinde özellikle iç mekan ve dış mekan haberleşmesi için hangilerinin daha uygun olduğu konusu irdelenmiş ve Friis iletim denklemi kullanılarak link hesaplamaları ve gerekli doğrulamalar yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Atmosferik zayıflama, Link hesabı, Terahertz kablosuz haberleşme

Abstract

In this study, appropriate frequency bands are investigated for next generation terahertz wireless communication systems and the link budget calculations are conducted under different atmospheric conditions. Considering how the communication system is affected by the changes in atmospheric conditions in the study, it has been observed that there are 7 transmission windows (frequency bands) in which communication can be maintained at reasonable attenuation values. In these transmission windows, it is also investigated that which of them are appropriate for indoor and outdoor wireless communication and the necessary link calculations have been conducted and proved by using Friis transmission equation.

Keywords: Atmospheric attenuation, Link budget, Terahertz wireless communication

1 Giriş

Günümüzde özellikle kişisel mobil haberleşme cihazlarının yaygınlaşması ve işlevlerinin çeşitlenmesi ile kablosuz sistemler üzerinden talep edilen veri miktarı ve hızı katlanarak artmaktadır. Kablosuz haberleşme sistemleri, uydu haberleşmesi hariç, yoğunlukla 6 GHz altında sıkışık bir duruma gelen spektrumu paylaşmak durumundadır [1]. Bunun nedeni elektromanyetik yayılım açısından düşük frekans kullanmanın getirdiği avantajlardan dolayı lisanslı bantların bu bölgelere yoğunlaşmasıdır. Her ne kadar sistemlerin bant verimlilikleri teorik sınırlara yaklaşırsa da 100Gb/s ve üzeri bir hedef ya da genel itibarıyla yüksek hızlı haberleşme için yüksek frekans bölgesinde geniş spektrum bölgelerine ihtiyaç olduğu açıktır. Bu nedenle, elektromanyetik spektrumun milimetrik dalga ile kızılötesi dalga arasında bulunan terahertz bölgesi, sağladığı yüksek bant genişliği nedeniyle son zamanlarda haberleşme çalışan araştırmacıların dikkatini çekmektedir [1-3]. Terahertz frekans bölgesi, yıllardır astronomide gök cisimlerinin incelenmesi, fizik, kimya ve biyoloji alanında, spektroskopi çalışmalarında, güvenlik alanında ve görüntüleme sistemlerinde kullanılmaktadır [4]. Terahertz konusunda bir standart olmamasından da dolayı literatürde farklı tanımlamalar bulunmakla birlikte [5-8] en genel haliyle terahertz bandı, elektromanyetik spektrumun 0.275 THz ile 30 THz arasındaki bölgeyi kapsamaktadır. Terahertz bölgesi haberleşme amacı için kullanıldığında ise genellikle 1 THz altındaki zayıflamanın daha düşük olduğu bantlar tercih edilmektedir. Her haberleşme sisteminde olduğu gibi terahertz

haberleşmede de verici, alıcı, anten, kanal ve algoritma kritik bileşenlerdir. Bu bileşenler arasında terahertz haberleşme için sinyal üretimi UHF ya da mikrodalga bölgesindeki duruma göre çok daha karmaşık ve verimsizdir. Bu problemi çözmek ve yüksek hızlara ulaşabilmek için sinyal üretimi ve algılanması konusunda günümüzde pek çok yöntem geliştirilmeye devam etmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar incelendiğinde; gyrotron [9, 10] gibi yüksek güç gerektiren yapıların yanında rezonans tünel diyotlar (RTD) [11-13], farklı tür eklemlili çift kutup transistörler (HBT) [14], quantum kaskat lazerler (QCL) [15, 16], optik fotoiletken malzemeler (OPM) [17-19], bütünleyici metal oksit yarı iletken devreler (CMOS) [20, 21], yüksek elektron hızlı transistörler (HEMT) [22] ve impatt diyotlar [23] da kullanılmaktadır. Tüm bu sistemlerin verimleri oldukça düşüktür ve yüksek verimli sistemler için çalışmalar devam etmektedir. Diğer taraftan terahertz haberleşme sistemleri için kanal ölçümleri [1] ve anten tasarımları [18,19] yapılmakta ve standart oluşumuna katkı sağlayabilecek çalışmalar yürütülmektedir. Literatürde terahertz kablosuz haberleşme için link bütçeleme düşük bant için gerçekleştirilmekte ve yüksek hızlı haberleşme olanakları tartışılmaktadır [24]. Ayrıca 100 GHz, 350 GHz, 500 GHz ve 700 GHz için simülasyonlar yapılmış ve olası haberleşme performansları değerlendirilmiştir [25].

Bu çalışmadaki temel motivasyon terahertz bölgesindeki atmosferik sinyal zayıflamalarının oluşturduğu problemi minimize etmek için kablosuz terahertz haberleşme linki için en uygun frekansların belirlenmesi ve yüksek kazançlı

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ayhanyazgan@ktu.edu.tr (A. Yazgan)

Geliş / Received: 10.03.2020 Kabul / Accepted: 06.10.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.699397

antenler ile bu problemin kısmen çözülebilir olduğunun gösterilmesidir. Çalışmada, literatürde yapılan çalışmalara ek olarak iç ve dış mekan haberleşmesi için kullanılabilecek en uygun frekans bantları ve belirlenen verici güç değerleri için bu bantlarda alıcıda elde edilebilecek güç değerleri belirlenmiştir.

2 Yöntem

Çalışma iki açıdan ele alınmıştır. Birinci kısımda ITU (International Telecommunication Union) verileri kullanılarak farklı atmosferik koşullar için elde edilen genel atmosferik zayıflama grafiği terahertz haberleşme bölgesi için elde edilmiştir. Zayıflamanın tepe noktaya ulaştığı 10 farklı frekans belirlenmiştir. Ancak bunlardan 2 tanesinin değişimi diğerlerine göre daha düşük olduğundan 8 farklı tepe frekans ve buna bağlı olarak da 7 farklı iletim penceresi olduğu değerlendirilmiştir. Daha sonra atmosferik zayıflamanın 0.15 dB ve 0.2 dB olduğu muhtemel örnek durumlar için 0.275 THz ile 1 THz aralığındaki iletim pencerelerinin bant genişlikleri hesaplanmış ve tablo halinde sunulmuştur. Atmosferik zayıflamanın en fazla olduğu THz frekanslarında sinyal zayıflaması bant durduran bir filtre karakteristiğine de benzetilebilir.

İkinci kısımda ise farklı atmosferik şartlarda alıcıda alınan sinyal gücünün hesabı farklı frekanslar için Friis iletim denklemi kullanılarak elde edilmiştir. Genellikle mikrodalga haberleşme linklerinde alıcıdaki güç hesabı için Friis iletim denklemi kullanılmaktadır. Terahertz frekanslarda ise ek olarak atmosferik kayıplar da dikkate alınmalıdır. Bu durum Friis iletim denklemindeki kayıplar kısmına uyarlanmış ve sonuçlar buna göre hesaplanmıştır. Ayrıca sınırlı güçlerdeki ve düşük verimlilikteki terahertz sinyal üreticilerinin olumsuz etkilerini gidermekte anten seçiminin önemine vurgu yapılmış ve değişik anten kazançları için link hesabı gerçekleştirilmiştir. Belirtmek gerekir ki link hesabında, yüksek veri hızlarına ulaşmak için sinyal gücünün yanında gürültü gücünün de dikkate alınması gerekmektedir. Ancak bu çalışmada sadece alıcıdaki sinyal gücünün değişimi incelenmiştir. Çalışmada ek olarak farklı atmosferik koşullar ve sağlanan bant genişliği parametreleri dikkate alınarak hangi terahertz bandının iç mekan ya da dış mekan haberleşme için daha iyi bir çözüm olabileceği konusu da değerlendirilmiştir.

Friis iletim denklemine göre alıcıda alınan güç nümerik ve dBm cinsinden sırasıyla Denklem (1) ve (2) ile hesaplanabilir. Alıcıdaki işaret gürültü oranı (SNR) ise Denklem (3) ile hesaplanabilir. Burada P_t ve P_r sırasıyla verici ve alıcıdaki güçleri, λ dalga boyunu, G_t ve G_r sırasıyla θ ve φ açılarına göre verici ve alıcı anten kazançlarını, Γ_t ve Γ_r sırasıyla verici ve alıcı anten yansıma katsayılarını, ρ_t ve ρ_r sırasıyla verici ve alıcı polarizasyon uyumsuzluklarını ifade etmektedir. Grafiklerde dB/m cinsinden verilen atmosferik zayıflama sabiti α , denklemler için Np/m birimine dönüştürülmüştür. NF gürültü faktörünü, k Boltzman sabitini, T Kelvin cinsinden sıcaklığı ve B ise Bant genişliğini ifade etmektedir. Ayrıca η_{LT} ve η_{LR} sırasıyla verici ve alıcı anten verimlerini, R ise verici ve alıcı anten arasındaki mesafeyi göstermektedir.

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t(\theta, \varphi) G_r(\theta, \varphi) (1 - |\Gamma_t|^2) (1 - |\Gamma_r|^2) (\rho_t \rho_r)^2 (e^{-2\alpha R}) (\eta_{LT} \eta_{LR}) \quad (1)$$

$$P_r [dBm] = 10 \log \left(\frac{P_r [mW]}{1mW} \right) \quad (2)$$

$$SNR [dB] = P_r [dBm] - (10 \log(kTB) + NF) \quad (3)$$

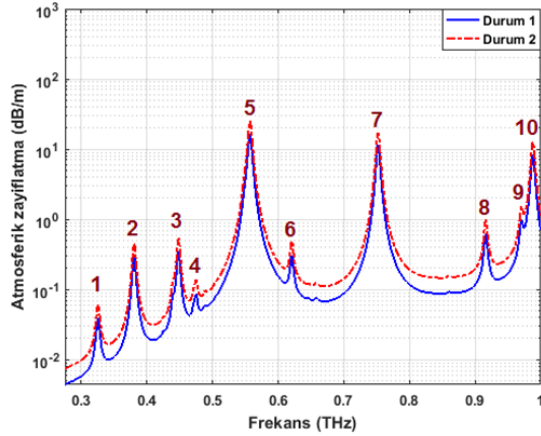
Yüksek frekanslarda yol kaybının artması terahertz haberleşme için bir dezavantaj olarak görülse de yüksek kazançlı antenlerin kullanılma potansiyeli nedeniyle bu durum kısmen elimine edilebilmektedir. Ayrıca sonraki kısımlarda da açıklanacağı gibi terahertz haberleşmenin sağladığı bant genişliği düşük frekanslı haberleşme sistemlerine göre çok daha fazladır.

3 Bulgular ve tartışma

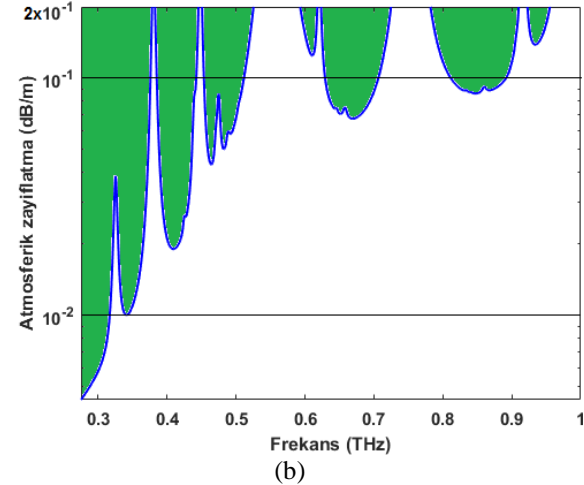
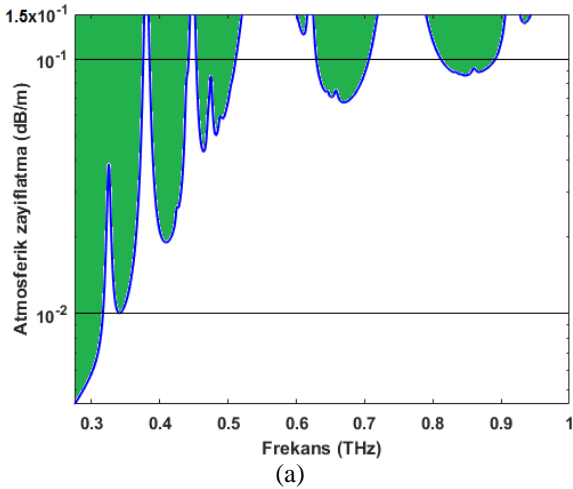
Atmosfer, barındırdığı gazlar nedeniyle elektromanyetik dalgaların absorbe edilmesine neden olmaktadır. Bu durum sadece terahertz bandında değil, spektrumun farklı bölgelerinde de geçerlidir. Ayrıca, genel olarak frekans yükseldikçe zayıflama etkisi de artmaktadır. Ancak bunun yanında bazı istisnalar da görülmektedir. 200 GHz altı için örnek olarak 60 GHz ve 180 GHz frekans bölgesinde atmosferik zayıflamanın en yüksek değerlere ulaştığı bilinmektedir [26]. Özellikle dış mekan haberleşmesinde bu etki daha da önemli hale gelmektedir. 200 GHz ve üzerindeki frekans bölgelerinde ise atmosferik zayıflama daha fazla etkili olsa da haberleşme sistemlerinin iletim hızı açısından çok önemli bir parametre olan bant genişliği artmaktadır. ITU verileri dikkate alınarak elde edilen atmosferik zayıflama grafiği 1 THz ve altı için Şekil 1'de çizdirilmiştir. Daha yüksek frekanslarda zayıflama etkisinin artmasının yanında zayıflama dalgalanması da artış göstermekte ve bu durum bandın kullanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca 1 THz ve üzerindeki frekans bölgesinde atmosferik zayıflamanın 30 THz bölgesine kadar artış eğiliminde olduğu da bilinmektedir [26]. Bu nedenlerden dolayı 1 THz değerine kadar olan kısımların kablosuz haberleşme için daha uygun olacağı değerlendirilmiştir. Tablo 1 ile verilen iki farklı atmosferik durum için atmosferik zayıflamanın değişimi ve zayıflamanın maksimum olduğu 10 frekans Şekil 1 ile verilmiştir. Bu frekanslar değer olarak Tablo 2'de de verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü gibi zayıflama değerinin ortamın nem ve sıcaklık gibi parametrelere göre değişiklik gösterdiği gözlenmiştir. Link hesabı ve yapılan benzetim çalışmalarında Durum 1 ile verilen değerler dikkate alınmıştır. Ayrıca olası haberleşme frekans aralıkları da maksimum zayıflama (α_{max}) değerleri $\alpha_{max} = 0.15$ dB/m ve $\alpha_{max} = 0.2$ dB/m için Şekil 2'de ve Tablo 3'te verilmiştir. Terahertz haberleşme için literatürde de yer alan en düşük 0.275 THz bandı alt limit olarak alınmıştır. α_{max} limiti daha da azaltılırsa Bant 4 ve Bant 7 yüksek zayıflama değerleri nedeniyle kullanılamamaktadır.

Tablo 1. Atmosferik koşullar için benzetimde kullanılan iki farklı durum

Parametreler	Durum1	Durum 2
Sıcaklık (C)	15	20
Atmosfer nemlilik (g/m ³)	7.5	12
Atmosfer basıncı (mmHg)	760	760



Şekil 1. Frekansa göre atmosferik zayıflamanın değişimi [26].



Şekil 2. Atmosferik zayıflama değerine göre bant genişliğinin değişimi; $\alpha_{\max}=0.15$ dB (a), $\alpha_{\max}=0.2$ dB (b)

Şekil 2-a incelendiğinde yeşil boyalı bölgeler atmosferik zayıflamanın 0.15 dB/m'den az olduğu frekansları göstermektedir. Bu bölgeler terahertz haberleşme için iletim pencereleri olarak değerlendirilmektedir. Şekil 2-b incelendiğinde ise yeşil boyalı bölgeler atmosferik zayıflamanın 0.2 dB/m'den az olduğu frekansları göstermektedir.

Denklem (1) ile verilen Friis iletim denkleminin farklı koşullar için MATLAB ortamında benzetimi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 2, 3 ve 4 ile verilmiştir. Terahertz bandında atmosferik zayıflama etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için verilen sonuçlarda atmosferik etkinin olduğu ve olmadığı durumlarda, alıcıda elde edilen güç değerleri karşılaştırmalı olarak farklı haberleşme sistem parametreleri için verilmiştir. Şekil 3' de verici ve alıcı antenlerin 0 dBi kazançları olduğu varsayılmış ve 100 m link mesafesi için alıcıdaki güç değerleri elde edilmiştir. Verici gücü 20 dBm (0.1 W) alındığı durumda, atmosferik etkinin Bant 1 için bu mesafede çok az etkili olduğu görülmektedir. Alıcıdaki güçler, belirlenen bantlar içerisinde minimum zayıflamaya sahip frekanslara göre hesaplanmış ve çizdirilmiştir. Örnek olarak Bant 1 merkez frekansı 0.33 THz olmasına rağmen 0.275 THz'de daha düşük zayıflama görüldüğünden link hesabında Bant 1 için 0.275 THz için atmosferik zayıflama değeri hesaba katılmıştır. Alıcıdaki güç değerlerinin atmosferik etki olduğunda ve olmadığı durumda yaklaşık 7.53×10^{-5} nW civarında ve dBm cinsinden de -101.23 dBm olduğu görülmektedir. Bu güç değeri Denklem (2) kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$P_r[\text{dBm}] = 10 \log \left(\frac{P_r[\text{mW}]}{1 \text{mW}} \right) = 10 \log \left(\frac{7.53 \times 10^{-11}}{1} \right) = -101.23 \text{ dBm}$$

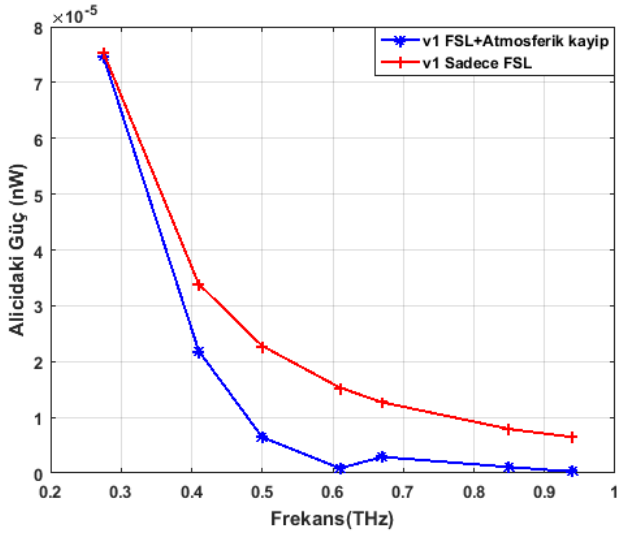
Bant 2 için atmosferik etki varlığında 2.19×10^{-5} nW (-106.59 dBm) güç alıcıya ulaşırken atmosferik etki olmadığında bu güç 3.39×10^{-5} nW (-104.69 dBm) olarak gözlenmiştir. Bant 3 ile Bant 7 arasında atmosferik etki daha da belirgin hale gelmektedir. Bant 4 için atmosferik etkinin olduğu durumda Bant 5 ve Bant 6'ya göre alıcıda daha az güç alındığı görülmektedir. Bunun nedeni o frekans için atmosferin daha fazla zayıflama etkisinin olmasıdır. Bu durum ve diğer bantların zayıflama değerleri Tablo 4 ile de kolayca gözlenebilir. Burada FSL, serbest uzay kaybını ifade etmektedir.

Tablo 2. Zayıflamanın tepe yaptığı frekanslar

Zayıflama tepe frekansları	
Frekans 1: 0.32 THz	Frekans 6: 0.62 THz
Frekans 2: 0.38 THz	Frekans 7: 0.75 THz
Frekans 3: 0.45 THz	Frekans 8: 0.92 THz
Frekans 4: 0.47 THz	Frekans 9: 0.97 THz
Frekans 5: 0.56 THz	Frekans 10: 0.99 THz

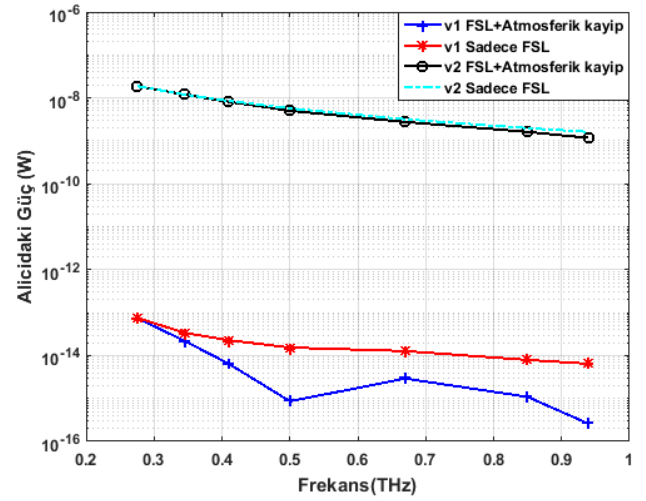
Tablo 3. Durum 1 için farklı zayıflama değerlerinde iletim bant genişliklerinin (B) değişimi

İletim pencereleri merkez frekansları	$\alpha_{\max}=0.15$ dB/m bant genişliği	$\alpha_{\max}=0.2$ dB/m bant genişliği
Bant 1= (0.27+0.38) /2≈0.33 THz	B=377-275=102 GHz	B=378-275=103 GHz
Bant 2= (0.38+0.45) /2≈0.42 THz	B=444-384=60 GHz	B=445-383=62 GHz
Bant 3= (0.45+0.52) /2≈0.49 THz	B=520-452=68 GHz	B=525-452=73 GHz
Bant 4= (0.60+0.62) /2≈0.61 THz	B=615-601=14 GHz	B=618-594=24 GHz
Bant 5= (0.62+0.72) /2≈0.67 THz	B=718-625=93 GHz	B=724-623=101 GHz
Bant 6= (0.79+ 0.90) /2≈0.85 THz	B=906-790=116 GHz	B=910-783=127 GHz
Bant 7= (0.93+0.94) /2≈0.94 THz	B=943-928=15 GHz	B=955-923=32 GHz



Şekil 3. v1; $P_t=0.1W$, $R=100m$ ve $G_t=G_f=0dB$ için alıcısındaki güç değişimi.

Genel olarak değerlendirildiğinde atmosferik etkiden dolayı alıcıya ulaşan güç değerleri arasındaki fark yüksek frekanslara çıkıldıkça artmaktadır. Örneğin Bant 7 için güç farkının Şekil 2’de verilen sonuçlardan 14 dB’ye ulaştığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre atmosfer koşullarının haberleşme için uygun olan nem değerlerinde bile 14 dB fark oluşturması, olası daha nemli ve farklı sıcaklık değerlerinde bu farkın daha da artacağına işaret etmektedir. Yapılacak olan haberleşme link hesabındaki bantların iç ve dış mekan için ayrı ayrı değerlendirilmesi bu yönden önem kazanmaktadır. Bu açıdan bakıldığında 100 m link mesafesi için izotropik antenler ile Bant 1 ve Bant 2’nin dış mekan haberleşmesi için diğer bantlara göre daha uygun olduğu görülmektedir. Terahertz bandındaki sınırlı verici gücü ve düşük verimlilik dikkate alındığında daha iyi link bütçelemesi için uygun link mesafesinin optimize edilmesi ve yönlü (yüksek kazançlı) antenlerin kullanımını kaçınılmaz bir sonuç olarak ortaya çıkmaktadır. Bu veriler ışığında link bütçelemesi, farklı link mesafeleri ve farklı kazançlı antenler için yeniden gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Şekil 4 ile verilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere terahertz haberleşme gibi verici tarafta yüksek güç ve



Şekil 4. v1; $P_t=0.1W$, $R=100m$ ve $G_t=G_f=0dB$, v2; $P_t=0.1W$, $R=10m$ ve $G_t=G_f=17$ dB için alıcısındaki güç değişimi.

verimlilik problemleri [15,16] bulunan sistemlerde, anten kazancının [24] ve güç verimliliğinin önemi artmaktadır [17].

Bu şartlarda ve kısa mesafede Bant 1 kullanıldığında atmosferik etkiler minimuma indirgenebilmektedir. Bant 1, yaklaşık 100 GHz bant genişliği ile günümüzde kullanılan kablosuz haberleşme hızlarına ve mesafelerine göre yine de yüksek hızlı ancak kısa mesafe haberleşmeye olanak sağlayabilecek bir çözüm olarak öngörülmektedir. Ancak iç mekan gibi çok daha kısa mesafeler için atmosferik zayıflama yüksek de olsa Bant 5 ve Bant 6, sağladıkları toplam 220 GHz bant genişliği ile kablosuz haberleşmeyi yüksek hızlara çıkarabilecek en uygun frekanslar olarak ortaya çıkmaktadırlar. Bu durumdaki en önemli kısıt gürültü seviyesindeki artıştır [26]. Bu artışın (3) ile verilen SNR değerindeki etkisi takip edilmelidir. Anten kazançları artırılıp link mesafesi kısaltıldığında alıcısındaki güç değerleri dramatik bir şekilde yükselmektedir. Örnek olarak Bant 1 için 7.46×10^{-5} nW (-101.27 dBm) olan değer 1.88 nW (-47.26 dBm) değerine ulaşmaktadır. Sınırlı güçlerdeki terahertz sinyal kaynakları için anten kazancının ve link mesafesinin önemi açıkça ortaya çıkmaktadır.

Tablo 4. $P_t=0.1W$, $R=100m$ ve $G_t=G_r=0$ dBi anten kazancı için alıcıdaki güç değerleri

Frekanslar	Atmosfer zayıflaması ihmal iken alıcıdaki güç [nW]	Atmosfer zayıflaması ihmal iken alıcıdaki güç [dBm]	Atmosfer zayıflamasında alıcıdaki güç [nW]	Atmosfer zayıflamasında alıcıdaki güç [dBm]
Bant 1	7.53×10^{-5}	-101.23	7.46×10^{-5}	-101.27
Bant 2	3.39×10^{-5}	-104.69	2.19×10^{-5}	-106.59
Bant 3	2.28×10^{-5}	-106.42	6.43×10^{-6}	-111.92
Bant 4	1.53×10^{-5}	-108.15	8.61×10^{-7}	-120.65
Bant 5	1.27×10^{-5}	-108.96	2.91×10^{-6}	-115.36
Bant 6	7.89×10^{-6}	-111.03	1.09×10^{-6}	-119.63
Bant 7	6.45×10^{-6}	-111.90	2.57×10^{-7}	-125.90

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, terahertz haberleşme için oluşturulan link bütçesi ve buna ilişkin sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde atmosferin kablosuz terahertz haberleşmeye belirli frekanslarda olanak sağladığı gözlenmiştir. İncelenen frekans bantlarından Bant 1 ve Bant 2 için zayıflamanın diğer bantlardan daha az olduğu görülmektedir. Bundan dolayı Durum 1 ve 0.15 dB/m zayıflama kriteri altında Bant 1 ve Bant 2 sırasıyla 102 GHz ve 60 GHz bant genişlikleriyle dış mekan haberleşmesi için yüksek veri hızlarına olanak sağlamaktadır. Bant 5 ve Bant 6, Durum 1 ve 0.15 dB/m zayıflama kriteri altında sırasıyla yaklaşık 93 GHz ve 116 GHz' lik bant genişliklerine sahiptir. Toplamda 200 GHz üzeri bant genişliği ile kapalı mekanlarda kısa mesafe haberleşmesi için bu bantlarda yüksek veri hızlarına ulaşılabileceği değerlendirilmiştir.

Simulasyonlar; haberleşme link mesafesi, verici alıcı verimi ihtiyaç duyulan bant genişliği ve anten kazancı gibi parametrelere göre farklı makul α_{max} değerleri ile de koşuturabilir. $\alpha_{max} = 0.1$ dB/m alındığında sadece Bant 4 ve Bant 7 bu zayıflama değerini sağlayamadığı için kullanılamamaktadır. Zayıflama kriteri daha da azaltılıp $\alpha_{max} = 0.05$ dB/m alındığında ise sadece Bant 1, Bant 2 ve Bant 3 bu koşulu sağlayacaktır.

Terahertz kablosuz haberleşme sistemlerindeki verici ve alıcıların düşük güç ve verimlilikte olması, link bütçelemesi açısından anten kazancının önemini daha da artırmaktadır. Bu durum terahertz dalgalarının odaklanması için antenler ile lens kullanımı da avantajlı kılmaktadır. İç mekan haberleşmesinde atmosferik etkilerin daha az olduğu durumda (Durum 1), haberleşme için Bant 5 ve Bant 6 birlikte kullanıldığında, 200 GHz üzeri bant genişliğinde, çok yüksek seviyeli modülasyonlara ve SNR değerlerine ihtiyaç duyulmadan yüksek hızlı haberleşme olanağı bulunmaktadır.

Teşekkür

Çalışma TÜBİTAK 2219- Yurt Dışı Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı ile desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

[1] I. F. Akyildiz, J.M. Jornet and C. Han, Terahertz band: Next frontier for wireless communications. Physical

- Communication, 12, 16-32, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2014.01.006>
- [2] T. K. Ostmann and T. Nagatsuma, A review on terahertz communications research. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 32(2), 143-171, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10762-010-9758-1>
- [3] J. Federici and L. Moeller, Review of terahertz and subterahertz wireless communications. Journal of Applied Physics, 107(111101), 1-22, 2010. <https://doi.org/10.1063/1.3386413>
- [4] P. H. Siegel, Terahertz technology in biology and medicine. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 52(10), 2438-2447, 2004. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.835916>
- [5] P. H. Siegel, Terahertz technology. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 50(3), 910-928, 2002. <https://doi.org/10.1109/22.989974>
- [6] X. C. Zhang, A. Shkurinov and Y. Zhang, Extreme terahertz science. Nature Photonics, 11, 16-18, 2017. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.249>
- [7] M. Tonouchi, Cutting-edge terahertz technology. Nature Photonics, 1, 97-105, 2007. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.3>
- [8] S. Koenig, D. L. Diaz, J. Antes, F. Boes, R. Henneberger, A. Leuther, A. Tessmann, R. Schmogrow, D. Hillerkuss, R. Palmer, T. Zwick, C. Koos, W. Freude, O. Ambacher, J. Leuthold and I. Kallfass, Wireless sub-THz communication system with high data rate. Nature Photonics, 7, 977-981, 2013. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.275>
- [9] A. Q. Zhao, B. S. Yu, The nonlinear designs and experiments on a 0.42-THz second harmonic gyrotron with complex cavity, IEEE Transactions on Electron Devices, 64(2), 564-570, 2017. <https://doi.org/10.1109/TED.2016.2642984>
- [10] X. Yuan, W. Zhu, Y. Zhang, N. Xu, Y. Yan, J. Wu, Y. Shen, J. Chen, J. She and S. Deng, A Fully-sealed carbon-nanotube cold-cathode terahertz gyrotron. Scientific Reports, 6(32936), 1-9, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep32936>
- [11] M. Kim, J. Lee, J. Lee and K. Yang, A 675 GHz differential oscillator based on a resonant tunneling diode. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 6(3), 510-512, 2016. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2016.2554399>
- [12] J. Lee, M. Kim and K. Yang, A 1.52 THz RTD triple-push oscillator with a μW level output power. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology,

- 6(2), 336-340, 2016. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2015.2509358>
- [13] J. Wang, A. A. Khalidi, K. Alharbi, A. Ofiare, H. Zhou, E. Wasige and J. Figueiredo, High performance resonant tunneling diode oscillators as terahertz sources. 46th European Microwave Conference (EuMC), pp. 4-6, London, UK, October 2016. <https://doi.org/10.1109/EuMC.2016.7824348>
- [14] J. Yun, J. Kim and J.S. Rieh, A 280-GHz 10-dBm signal source based on InP HBT technology. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 27(2), 159-161, 2017. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2016.2646928>
- [15] Y. Jiang, K. Vijayraghavan, S. Jung, A. Jiang, J.H. Kim, F. Demmerle, G. Boehm, M. C. Amann and M. A. Belkina, Spectroscopic study of terahertz generation in mid-infrared quantum cascade lasers. Scientific Reports, 6(21169), 1-9, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep21169>
- [16] Y. Irimajiri, M. Kumagai, I. Morohashi, A. Kawakami, S. Nagano, N. Sekine, S. Ochiai, S. Tanaka, Y. Hanado, Y. Uzawa and I. Hosako, Precise evaluation of a phase-locked THz quantum cascade laser. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 6(1), 115-120, 2016. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2015.2504792>
- [17] S. H. Yang, M. R. Hashemi, C. W. Berry and M. Jarrahi, 7.5% optical-to-terahertz conversion efficiency offered by photoconductive emitters with three-dimensional plasmonic contact electrodes. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 4(5), 575-581, 2014. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2014.2342505>
- [18] N. T. Yardimci, S. H. Yang, C. W. Berry and M. Jarrahi, High-power terahertz generation using large-area plasmonic photoconductive emitters. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 5(2), 223-229, 2015. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2015.2395417>
- [19] S. H. Yang and M. Jarrahi, A high-power photomixer with plasmonic contact electrodes. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), pp. 1-2, San Jose, CA, USA, 5-10 June 2016.
- [20] S. Shopov, A. Balteanu, J. Hasch, P. Chevalier, A. Cathelin and S. P. Voinigescu, A 234–261-GHz 55-nm SiGe BiCMOS signal source with 5.4–7.2 dBm output power, 1.3% DC-to-RF efficiency, and 1-GHz divided-down output. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 51(9), 2054-2065, 2016. <https://doi.org/10.1109/JSSC.2016.2560198>
- [21] S. Jameson and E. Socher, A 0.3 THz radiating active x27 frequency multiplier chain with 1 mW radiated power in CMOS 65-nm. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 5(4), 645-648, 2015. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2015.2439056>
- [22] T. Takahashi, Y. Kawano, K. Makiyama, S. Shiba, M. Sato, Y. Nakasha and N. Hara, Enhancement of fmax to 910 GHz by adopting asymmetric gate recess and double-side-doped structure in 75-nm-gate InAlAs/InGaAs HEMTs. IEEE Transactions on Electron Devices, 64(1), 89-95, 2017. <https://doi.org/10.1109/TED.2016.2624899>
- [23] A. Acharyya and J. P. Banerjee, Prospects of IMPATT devices based on wide bandgap semiconductors as potential terahertz sources. Applied Nanoscience, 4(1), 1-14, 2014. <https://doi.org/10.1007/s13204-012-0172-y>
- [24] H. J. Song and T. Nagatsuma, Present and future of terahertz communications, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 1(1), 256-263, 2011. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2011.2159552>
- [25] T. Yilmaz and O. B. Akan, Utilizing terahertz band for local and personal area wireless communication systems. 2014 IEEE 19th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), pp. 330-334, Athens, 2014. <https://doi.org/10.1109/CAMAD.2014.7033260>
- [26] International Telecommunication Union Recommendation P.676-11, Sep. 2016. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676-11-201609-I>. Accessed on: 20.11.2017.





Uçağın trim parametresinin ANFIS kullanılarak tahmin edilmesi Predicting trim parameter of an aircraft using ANFIS

Fatma Yıldırım Dalkıran^{1,*} , Fadiş Rabia Yıldırım¹ 

¹Erciyes Üniversitesi, Havaçılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havaçılık Elektrik-Elektronik Bölümü, 38039, Kayseri, Türkiye

Özet

Uçaklar, hızlı, güvenli ve konforlu olmalarından dolayı ulaşım sektöründe önemli bir yere sahiptir. Uçaklar, en çok kalkış ve iniş esnasında, uçuş konfor ve güvenliğini etkileyen hava olaylarına ve dış etmenlere maruz kalmaktadır. Bu etmenlerin meydana getirdiği sarsıntı ve salınımları önlemek, uçağın denge ve kararlılığını korumak için yatay stabilize ile trim verilir. Bu trim değerinin belirlenmesi, uçuş konforu için önemlidir. Bu çalışmada uçağın trim değerinin uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (Adaptive Network Based Fuzzy Inference System, ANFIS) ile tahmini üzerinde durulmuştur. Oluşturulan ANFIS modellerinde 4 farklı üyelik fonksiyonu kullanılarak, eğitim ve test işlemleri yapılmıştır. Bu eğitim ve test işlemlerinde, Airbus A319 uçağının kara kutusundan alınan gerçek uçuş verileri kullanılmıştır. Bu çalışmada ANFIS kullanılarak yapılan modellemelerin, gerçek trim değerinin tahmininde başarılı olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: ANFIS, Hava aracı, Trim, Denge ve kararlılık

Abstract

Aircrafts have an important role in transportation because they are fast, safe and comfortable. Aircrafts are mostly exposed to weather conditions and external cases affecting flight comfort and safety during take-off and landing. To prevent shocks and oscillations caused by these cases and to maintain the balance and stability of an aircraft, horizontal stabilization is adjusted using trim value. Determination of suitable trim value is important for flight comfort. In this study, the prediction of the trim value of an Airbus A319 using the Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System (ANFIS) is emphasized. Different ANFIS models are trained and tested using four different membership functions. Actual flight data taken from black box of an Airbus A319 are used in these training and test procedures. In this study, it is shown that the models designed using ANFIS have been successful to predict real trim values.

Keywords: ANFIS, Aircraft, Trim, Balance and stability

1 Giriş

Ulaşımında zaman kavramını farklı bir noktaya taşıyan uçaklar, icat edilmişinden bu yana sürekli geliştirilerek, ulaşım sektörüne yön vermektedir. Uçaklar, emniyetli uçuş güvencesi ve bir yerden başka bir yere hızlı bir şekilde seyahat etme imkanı ile hava yolu ulaşımında oldukça fazla tercih edilmektedir [1]. Bir uçak kalkışından inişine kadar, kanatlarda oluşan kaldırma kuvveti ile yerçekimi kuvvetine, motorlar vasıtasıyla elde ettiği itki kuvveti ile sürüklenme kuvvetine karşı koyarak havada yol alır. Bu süreçte, atmosfer şartları ve uçağa etki eden dış etmenler, uçuş konforunu ve kalitesini etkilemektedir. Uçaklarda güvenli ve konforlu bir uçuş için, olumsuz atmosfer şartlarından ve dış etmenlerden kaynaklanan sarsıntıları önlemek için uçuş kumanda yüzeyleri ile trim verilir. Trim değeri, uçuş süresince uçağın denge ve kararlılığını etkileyen bir unsurdur [2, 3]. Trim değeri, uçuş boyunca oto pilot tarafından otomatik olarak verilir. Uçağın iniş fazında, yükseklik, hava hızı, flap pozisyonu ve ağırlık merkezi gibi parametreler, trim değerini etkilemektedir. Bu parametreler ile sıcaklık, hava yoğunluğu ve basınç gibi atmosfer şartları göz önüne alınarak trim değeri takip edilmektedir.

Literatürde zeki sistemler kullanılarak trim değerinin tahminine yönelik bir çalışmaya rastlanmamıştır. Literatürdeki var olan çalışmalar, genellikle uçuş kontrol sistemleri, bu sistemlerin modellenmesi ve tahmini ile alakalıdır. Yapılan çalışmalardan biri Boeing firmasına ait

B737-300 uçağının yakıt ve hız problemlerinin uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (Adaptive Network Based Fuzzy Inference System, ANFIS) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) ile modellenmesi üzerinedir [4]. Bir diğer çalışmada, uçağın iniş sırasında oluşan dikey hız probleminin çözümü için, hem ANFIS hem de YSA kullanılmıştır [5]. Terrell ve Zein-Sabatto'nun çalışmasında ise, ticari uçaklarda önceden tahmin edilen veya edilemeyen uçuş koşullarında, uçuş kontrol yüzeylerinden elevator hücum açısını korumak ve ayarlamak için, ANFIS modeli kullanılmıştır [6]. Liu ve ekibi tarafından yapılan çalışmada ise, uçuş esnasında alınan otopilotlu iniş verileri kullanılarak, uçağın yörünge takibinin ANFIS ile modellenmesi yapılmıştır [7]. Literatürdeki bir diğer çalışmada standart atmosfer koşulları altında, yükseklik bilgisinin daha doğru hesaplanabilmesi için, bulanık mantık sistemine dayalı uyarlanabilir ağ modeli oluşturulmuştur. Bu çalışmada statik basınç ve sıcaklık parametrelerine bağlı olarak yüksekliğin değişimi incelenmiş ve modellemeden elde edilen sonuçlar ile gerçek ölçüm değerlerinin birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür [8]. Singh ve Dahiya tarafından yapılan çalışmada, Bulanık-PID kontrolör ile hava aracının kontrol yüzeylerinden elevator ve aileronun modellenmesi gerçekleştirilmiştir [9]. Diğer bir çalışmada uçağın, uçuş esnasında hava girdaplarıyla karşılaşmasının otomatik olarak tanımlanabilmesi için ANFIS ile modelleme yapılmıştır [10]. Raheema ve Abdullah çalışmalarında radarın takip korelasyonunu gerçekleştirmek için ANFIS kullanmışlardır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail fatmay@erciyes.edu.tr (F. Yıldırım Dalkıran)

Geliş / Received: 28.05.2020 Kabul / Accepted: 07.10.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.743036

Çalışmada ANFIS, kaydedilen verilerden uçağın konum radarının modellenmesinde ve tahmin sisteminin tasarımı için ters kontrol tekniğinde kullanılmıştır [11]. Yingjie ve ekibinin yaptığı çalışmada uçağın otomatik inişinin kontrol sürecinin modellenmesinde ANFIS kullanılmıştır [12]. Uçakların aerodinamik modellenmesi ve parametrelerinin tahmini üzerine yapılan bir çalışmada ise ANFIS-tabanlı parçacık sürü optimizasyon algoritması kullanılmıştır [13]. Diğer bir çalışmada da uçuş verileri kullanılarak ANFIS-DELTA yöntemiyle aerodinamik parametrelerin tahmini yapılmıştır [14]. Konar ve Bağış'ın yaptığı çalışmada ise uçuş kontrol sisteminin hız parametresinin ANFIS ile belirlenmesi üzerinde durulmuştur [15]. Uçağın elektrik güç sistemindeki arızaların tespit edilmesi üzerine yapılan bir çalışmada yine ANFIS kullanılmıştır [16].

Uçaklar, belirli bir yükseklikte ve sabit bir hızla hareket ederken, atmosferdeki hava olayları ve türbülansların etkisi ile sarsıntılar ve ani irtifa kayıpları yaşayabilir. Uçuş güvenliği ve uçuş konforu açısından bu sarsıntı ve irtifa kayıplarının en aza indirilmesi ve uçağın dengede olması gerekmektedir. Uçağın denge konumuna gelebilmesi için yatay stabilize ve kanatlar kullanılır. Uçakların kalkış, düz uçuş ve iniş fazında yatay stabilize, uçağa trim vererek uçağın dengesini korumaktadır. Normal uçuşlarda trim, otomatik olarak verilirken, kötü hava şartlarında pilot tarafından kokpitten kumanda edilir. Bu şekilde yolcuların sarsıntı ve salınımları daha az hissederek daha konforlu yolculuk geçirmelerine olanak sağlar. Bu çalışmada, uçağın flap pozisyonu, uçağın hızı, yüksekliği ve ağırlık merkezi gibi uçuşu etkileyen parametreler ele alınarak trim değerinin ANFIS ile tahmini üzerinde durulmuştur. ANFIS yapısı ile oluşturulan modellemelerde, farklı üyelik fonksiyonları ve farklı kural setleri kullanılarak en iyi sonucu veren model tespit edilmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmada ANFIS yönteminden ve uçağın trim parametresinin ANFIS kullanılarak tahmininden bahsedilmiştir. Son kısımda da elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

2 Materyal ve metod

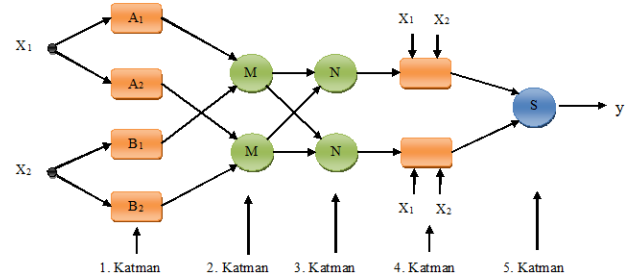
2.1 ANFIS Yöntemi

ANFIS ismi, **A**daptive **N**etwork **B**ased **F**uzzy **I**nference **S**ystem kelimelerinin baş harflerinin bir araya gelmesi ile oluşmuştur ve uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi anlamına gelmektedir. ANFIS yapısı, 1993 yılında Jang tarafından geliştirilmiştir. ANFIS, YSA' larda bulunan paralel hesaplayabilme ve öğrenme yeteneği ile bulanık mantıktaki çıkarım özelliğini birleştirerek kullanılan melez yapay zeka yöntemidir. ANFIS' in temel yapısı, Takagi, Sugeno, Kant tipi bulanık mantık modelinin, sinirsel öğrenme performansına sahip bir ağ yapısına dayanmaktadır. Ayrıca karma sinir ağları olarak da bilinmektedir [4, 15]. ANFIS, 5 katmanlı ileri beslemeli bir yapay sinir ağ yapısına sahiptir. Bu sistem, Şekil 1' de gösterilmiştir. Bu ağ yapısı, katmanlar halinde yerleştirilmiş olan düğümlerden oluşmuştur [15, 17, 18].

Şekil 1' de yer alan ANFIS yapısının 1. katmanı, bulanıklaştırma katmanıdır. Girişe uygulanan değerleri bulanık kümelerle ayırmak için Jang' in ANFIS modelinde,

genelleştirilmiş çan tipi üyelik fonksiyonu kullanılmaktadır. Her bir düğümün çıkışı, giriş değerlerine ve kullanılan üyelik fonksiyonuna ait üyelik derecelerine bağlıdır. ANFIS yapısındaki 2. katman, kural katmanıdır. Bu katmanda bulunan her düğüm, bulanık mantık çıkarım sistemine göre oluşturulan kuralları ve kural sayısını ifade etmektedir. 3. katman ise, normalizasyon katmanıdır. 2. katman düğümlerinden gelen her bir değer, giriş değeri kabul edilip, normalleştirme işlemi yapılmaktadır. 4. katman, arındırma katmanı olarak geçmektedir ve her bir düğümde verilen bir kuralın ağırlıklandırılmış sonuç değerleri hesaplanmaktadır. ANFIS yapısının 5. katmanı, toplam katmanıdır. Bu katmanda tek bir düğüm bulunmaktadır ve 4. katmanın düğüm çıkışlarındaki tüm değerler toplanarak, ANFIS' in gerçek veri değeri elde edilmektedir [15, 18].

Bulanık çıkarım sistemlerinde birçok üyelik fonksiyonu kullanılmaktadır. Üyelik fonksiyonu, bir kümenin elemanlarının o kümeye aitlik derecesini gösteren fonksiyonlar olarak ifade edilebilir ve bu fonksiyon, "0" ile "1" arasında bir üyelik derecesine sahiptir. Üyelik fonksiyonları, gerçek değerleri bulanık değerlere veya bulanık değerleri gerçek değerlere dönüştürür. Yaygın olarak kullanılan üyelik fonksiyonları, çan şekilli (gbellmf) üyelik fonksiyonu, tam simetrik (gaussmf) üyelik fonksiyonu, üçgen (trimf) üyelik fonksiyonu, yamuk (trapmf) üyelik fonksiyonu ve sigmoidal üyelik fonksiyonu olarak sıralanmaktadır [19].



Şekil 1. ANFIS yapısının gösterimi [15].

2.2 Uçağın trim parametresinin ANFIS ile modellenmesi

Bu çalışmada ANFIS kullanılarak uçağın inişi esnasında trim değerini etkileyen parametreler için sistem modellemesi yapılmış ve bu trim değerinin tahmini gerçekleştirilmiştir. Tahmin aşamasında ANFIS yapısında farklı üyelik fonksiyonları kullanılarak, bu fonksiyonlarla gerçek trim değerine en yakın tahminin yapılması hedeflenmiştir. Modellemede, derece cinsinden flap pozisyon bilgisi (d), knots cinsinden uçağın hızı (v), feet cinsinden uçağın yüksekliği (y) ve inç cinsinden uçağın ağırlık merkezi (a), modelin giriş bilgileri olarak seçilmiştir. Bu girişlerin seçilmesindeki amaç, uçak iniş fazında, yeryüzüne yaklaştığı için, uçağa etki eden yerçekimi kuvveti ve basınç değeri artmaktadır. İrtifa azaldıkça uçuş, atmosferde hava olaylarının yaşandığı troposfer katmanında gerçekleşmeye başlar. Bu katmanda, hava akımları, rüzgar, yağış ve türbülansların etkisi artmaktadır. Bu yüzden iniş fazında, uçağın bulunduğu yüksekliğe, hava hızına ve mevcut ağırlık merkezi konumuna göre, uçuş kumanda yüzeyleri ve yatay stabilize ile verilen trim değeri önem arz etmektedir. Bu

nedenle bu çalışmada çıkış bilgisi olarak yatay stabilizenin trim (t) değeri kullanılmıştır. Böylece 4 girişe, 1 çıkışa sahip bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin gösterimi, Şekil 2’ de verilmiştir.



Şekil 2. Trim değerinin tahmini için kullanılan modellemenin blok gösterimi.

Yapılan tahmin çalışmasında, Airbus A319 uçağının kara kutusundan alınan gerçek verilerle çalışılmıştır. Alınan verilerden 839 adet veri, eğitim amaçlı olarak; 152 adet veri, test amaçlı olarak kullanılmıştır. Şekil 2’ de yer alan modellemede kullanılan ve kara kutudan alınan gerçek giriş ve çıkış verilerinin alt ve üst limitleri; flap pozisyonu [0, 40], uçağın hızı [114.87, 449.67], yükseklik [305, 38648], ağırlık merkezi [22.24, 24.16] ve trim [200, 10620] olarak verilmiştir. Bu değerler baz alınarak veri setindeki değerler [0,1] aralığında normalize edilmiştir. Bu şekilde model başarısının artırılması amaçlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan ANFIS yapısında literatürde en çok kullanılan ve genel olarak tahmin problemlerinde başarılı performans sergileyen Generalized Bell (Gbell), Gaussian (Gauss), Trapezoidal (Trap) ve Triangular (Tri) üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Her üyelik fonksiyonu için tek tek (2 2 2 2), (2 2 2 3), (2 2 3 3), (2 3 3 3), (3 3 3 3), (3 3 3 4), (3 3 4 4), (3 4 4 4) ve (4 4 4 4) kural yapıları kullanılmıştır. (2 2 2 2) ifadesi, girişler için sırası ile 2, 2, 2, 2 adet üyelik fonksiyonuna karşılık gelir ve bu, (2x2x2x2=16) adet kural yapısını ifade etmektedir. Yapılan modelleme çalışmasında, eğitilmiş amaçlı 839 adet veri ve test amaçlı olarak 152 adet veri olmak üzere toplam 991 adet veri kullanılmıştır. Bu veri sayıları dikkate alındığında kullanılacak olan kural yapısı en fazla (4, 4, 4, 4)’ dır. Bu çalışmada her bir üyelik fonksiyonuna ait modelin eğitilmesi için 5000 adımlık benzetim çalışması yapılmıştır.

Oluşturulan ANFIS modelindeki hataların hesaplanması için Denklem (1)’ de verilen ortalama karesel hata (Mean Square Error-MSE) denklemi kullanılmıştır [20]. Bu denklem, ANFIS yardımıyla oluşturulan modelin performansını ölçmek için kullanılmıştır.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N (y_r - y_m)^2 \quad (1)$$

Bu çalışmada N, test veri setinin sayısını göstermektedir. Burada y_r , gerçek trim değeri ve y_m ise tahmin edilen trim değeridir.

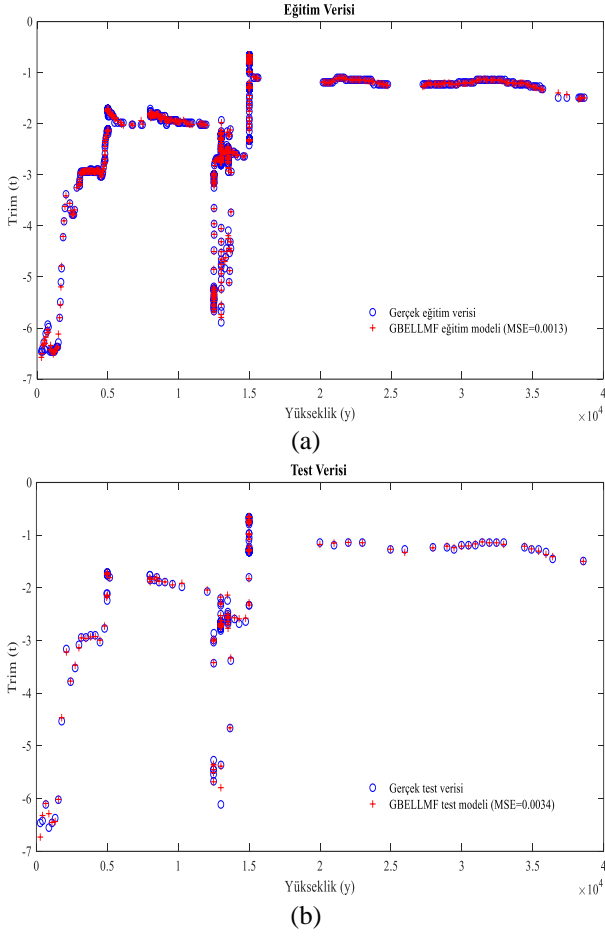
2.3 Uçağın trim parametresinin ANFIS kullanılarak tahmini

Trim değerinin tahmin edilmesi ile ilgili yapılan ANFIS modellemelerinden ilk olarak Generalized Bell (Gbell) üyelik fonksiyonu ile gerçekleştirim ele alınmıştır. Bu fonksiyonla farklı kural setleri oluşturularak eğitim ve test tahminleri yapılmıştır. Model performanslarını kıyaslamak için MSE tercih edilmiştir. Ayrıca modellerin eğitim ve test aşamasında elde edilen ortalama yüzde hata ve maksimum yüzde hata değerleri, Tablo 1’ de verilmiştir.

Bu tablo incelendiğinde en iyi MSE, 0.0013 değerine sahip modelin (4, 4, 4, 4) kural setinde olduğu görülmektedir. Bu kural setine en yakın MSE hatasına sahip (3, 4, 4, 4) kural setidir. Bu en iyi iki MSE değerleri arasında hata değerleri açısından onbinde ikilik fark vardır. Ele alınan Gbell üyelik fonksiyonuna ait her bir eğitim modeli ile elde edilen çıkış değerlerinin, gerçek veri çıkış değerleri ile karşılaştırılması, Şekil 3(a)’ da verilmiştir. Şekil 3(a) incelendiğinde, eğitim model çıkışı ile gerçek veri çıkışının birbiri ile uyumlu olduğu gözlenmektedir. Şekil 3(b)’ de ise aynı modelden elde edilen her bir test veri çıkışları ile gerçek veri çıkışlarının karşılaştırılması gösterilmektedir. Burada da test veri çıkışları ve gerçek veri çıkışları arasında uyum olduğu açıkça görülmektedir. Şekillerde giriş bilgisi olarak yükseklik alınmış olup, çıkış bilgisi olarak trim değeri alınmıştır. Şekil 3(a) ve (b)’ de ‘o’ sembolü, gerçek eğitim değerlerini gösterirken, ‘+’ sembolü, modellemeden elde edilen değerleri göstermektedir. Her bir eğitim verisi ve test verisi için elde edilen yüzde hata değerlerine ait grafikler, sırasıyla Şekil 4 (a) ve (b)’ de verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, eğitim ve test yüzde hata grafiklerinde hata oranının genel olarak %5’ in altında olduğu görülmüştür. Bu hata oranları dikkate alındığında modelin başarılı bir sonuç verdiği görülmektedir.

Tablo 1. Gbell üyelik fonksiyonuna ait farklı model sonuçları.

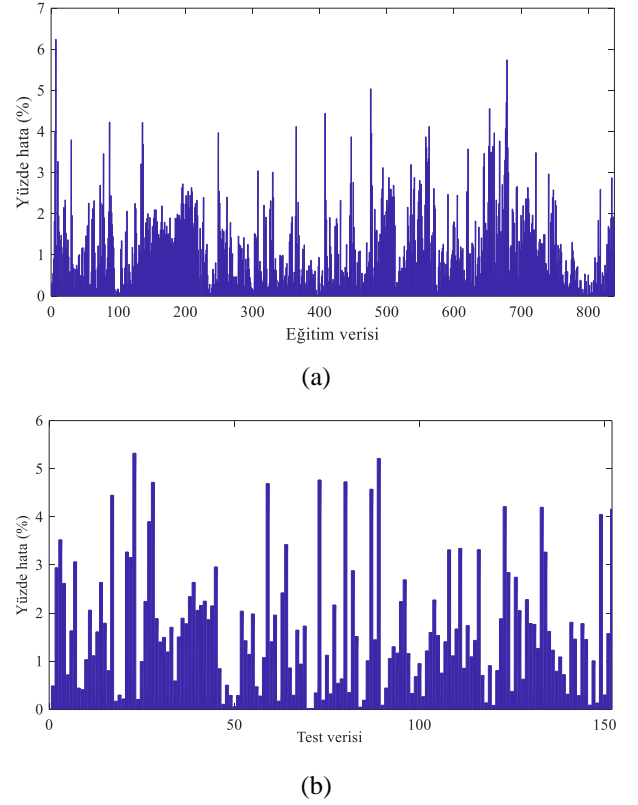
Kural Seti	Veri Seti	MSE	Ortalama % Hata	Maksimum % Hata
[2 2 2 2]	Eğitim	0.0032	1.9250	10.0624
	Test	0.0046	2.1079	7.9404
[2 2 2 3]	Eğitim	0.0032	1.8941	10.2908
	Test	0.0046	2.0641	10.2055
[2 2 3 3]	Eğitim	0.0026	1.6231	7.8927
	Test	0.0043	1.8881	10.2719
[2 3 3 3]	Eğitim	0.0019	1.5108	7.6815
	Test	0.0030	1.7509	5.2963
[3 3 3 3]	Eğitim	0.0020	1.4209	6.4101
	Test	0.0037	1.8425	10.7568
[3 3 3 4]	Eğitim	0.0018	1.2455	6.2734
	Test	0.0035	1.6486	8.9085
[3 3 4 4]	Eğitim	0.0018	1.2056	6.2469
	Test	0.0038	1.7050	8.5999
[3 4 4 4]	Eğitim	0.0015	1.1515	6.2383
	Test	0.0044	1.7199	12.6070
[4 4 4 4]	Eğitim	0.0013	1.1795	6.2438
	Test	0.0034	1.6082	5.3213



Şekil 3. (a) Gerçek eğitim verisi ile Gbell eğitim modelinin karşılaştırılması, (b) Gerçek test verisi ile Gbell test modelinin karşılaştırılması.

Trim değerinin tahmin edilmesi ile ilgili ikinci yapılan ANFIS modellemesi, Gaussian (Gauss) üyelik fonksiyonu ile gerçekleştirilmiştir. Bu modellemede de farklı kural setlerindeki ortalama hata, MSE ve maksimum yüzde hata değerleri hesaplanmıştır ve Tablo 2’ de verilmiştir.

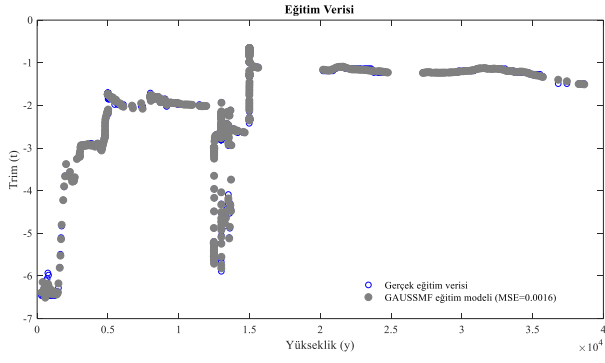
Şekil 5 (a)’ da, Gauss üyelik fonksiyonu ile yapılan modellemenin gerçek veri çıkış değerleri ve en iyi MSE değerinin elde edildiği modellemedeki çıkış değerlerinin karşılaştırılması gösterilmiştir. Test modeline ait çıkışlar ile gerçek veri çıkışlarının kıyaslaması ise Şekil 5 (b)’ de verilmiştir. Şekil 5 (a) ve (b) incelendiğinde, hem eğitim modeli grafiğinde hem de test model grafiğinde gerçek veri değerleri ile modelleme çıkış değerlerinin birbirine yakınsadığı görülmüştür. Şekil 5 (a) ve (b)’ ye bakıldığında, grafiklerdeki ‘o’ sembolü, gerçek eğitim değerlerini gösterirken, ‘•’ sembolü, modelleme sonuç değerlerini göstermektedir. Diğer üyelik fonksiyonunda olduğu gibi bu fonksiyonda da uçağın yüksekliğine göre elde edilen trim değeri, grafiksel olarak gösterilmiştir. Gauss üyelik fonksiyonuna ait eğitim modelinin ve test modelinin yüzde hata grafikleri ise sırasıyla Şekil 6 (a) ve (b)’ de verilmiştir. Şekil 6 (a) ve (b)’ de eğitim ve test için yüzde hata grafikleri incelendiğinde her iki model için yüzde hata değerinin %5-6 civarında olduğu görülmüştür.



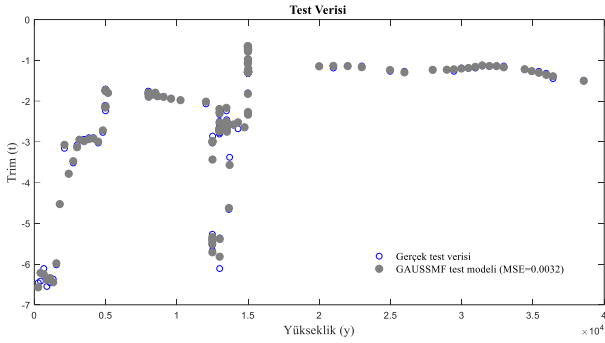
Şekil 4. (a) Gbell eğitim modeli yüzde hata değerinin grafiksel gösterimi, (b) Gbell test modeli yüzde hata değerinin grafiksel gösterimi.

Tablo 2. Gauss üyelik fonksiyonuna ait farklı model sonuçları.

Kural Seti	Veri Seti	MSE	Ortalama % Hata	Maksimum % Hata
[2 2 2 2]	Eğitim	0.0039	2.1533	9.6712
	Test	0.0060	2.2507	8.9786
[2 2 2 3]	Eğitim	0.0033	1.7643	9.8695
	Test	0.0057	1.9114	7.8494
[2 2 3 3]	Eğitim	0.0030	1.5708	9.4523
	Test	0.0053	1.8158	6.8726
[2 3 3 3]	Eğitim	0.0027	1.4762	8.3680
	Test	0.0050	1.7422	7.0415
[3 3 3 3]	Eğitim	0.0025	1.4980	9.5262
	Test	0.0040	1.8605	27.6284
[3 3 3 4]	Eğitim	0.0020	1.4675	8.0240
	Test	0.0033	1.7804	5.4699
[3 3 4 4]	Eğitim	0.0017	1.2209	6.2385
	Test	0.0032	1.5690	5.0152
[3 4 4 4]	Eğitim	0.0016	1.1648	6.1519
	Test	0.0032	1.5762	5.8791
[4 4 4 4]	Eğitim	0.0018	1.1806	6.1539
	Test	0.0036	1.6410	14.3645



(a)



(b)

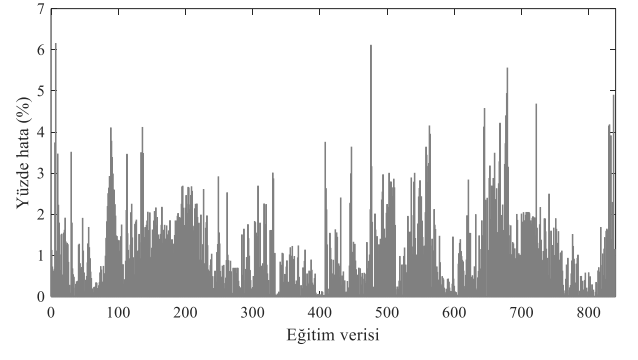
Şekil 5. (a) Gerçek eğitim verisi ile Gauss eğitim modelinin karşılaştırılması, (b) Gerçek test verisi ile Gauss test modelinin karşılaştırılması.

Modellemede kullanılan üçüncü üyelik fonksiyonu, Triangular (Tri) üyelik fonksiyonudur. Bu fonksiyon kullanılarak, farklı kural setleri ile tahminler yapılmış olup, elde edilen sonuçlar, [Tablo 3](#)' de verilmiştir.

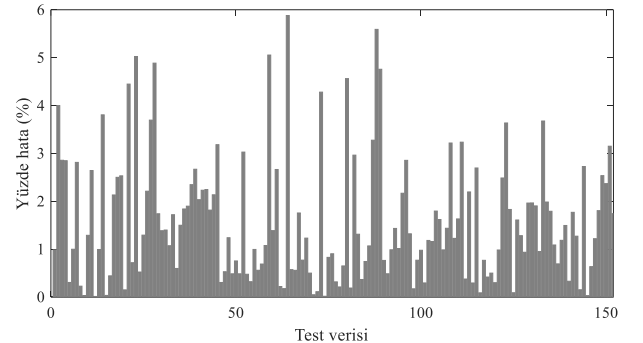
Tri üyelik fonksiyonu ile oluşturulan her bir test ve eğitim modeline ait modelleme çıkış değerleri ile gerçek veri çıkış değerlerinin karşılaştırması, [Şekil 7 \(a\)](#) ve [\(b\)](#)' de gösterilmiştir. Şekillerde eğitim değerleri 'o' sembolü ile model değerleri ise '*' sembolü ile gösterilmektedir. Bu grafikler incelendiğinde, hem eğitim hem test modellerine ait çıkışlar ile gerçek veri çıkışları birbirine yakınlık göstermektedir. Tri üyelik fonksiyonuna ait her bir eğitim ve test modelinin yüzde hata değerleri ise [Şekil 8 \(a\)](#) ve [Şekil 8 \(b\)](#)' de verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde, her iki model grubu için yüzde hata değerinin %8 civarında olduğu gözlenmiştir.

Trim değerinin tahmini ile ilgili olarak yapılan modellemelerden sonucusu Trapezoidal (Trap) üyelik fonksiyonu ile gerçekleştirilmiştir. Bu gerçekleştirimde de 9 farklı kural seti kullanılarak modellemeler yapılmış olup, eğitim ve test sonuçları için ortalama hata, MSE ve maksimum hata değerleri hesaplanmıştır ve [Tablo 4](#)' de sunulmuştur.

Trap üyelik fonksiyonu ile elde edilen eğitim ve test modellerine ait modelleme çıkış değerleri ile gerçek veri çıkış değerlerinin karşılaştırıldığı grafikler, [Şekil 9 \(a\)](#) ve [Şekil 9 \(b\)](#)' de verilmiştir.



(a)

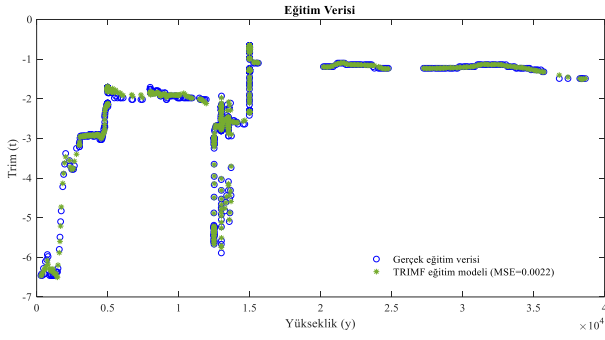


(b)

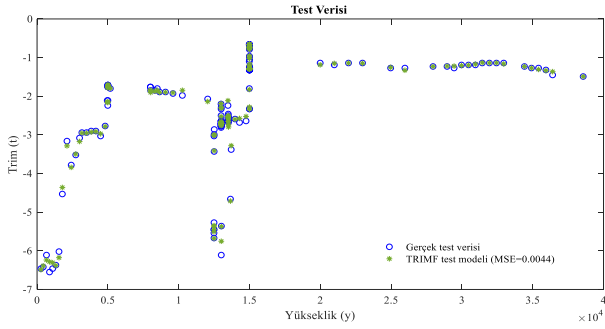
Şekil 6. (a) Gauss eğitim modeli yüzde hata değerinin grafiksel gösterimi, (b) Gauss test modeli yüzde hata değerinin grafiksel gösterimi.

Tablo 3. Tri üyelik fonksiyonuna ait farklı model sonuçları.

Kural Seti	Veri Seti	MSE	Ortalama % Hata	Maksimum % Hata
[2 2 2 2]	Eğitim	0.0063	2.2569	36.6352
	Test	0.0089	2.3714	17.1151
[2 2 2 3]	Eğitim	0.0041	1.7385	26.7960
	Test	0.0057	1.9722	11.7996
[2 2 3 3]	Eğitim	0.0040	1.7730	25.3359
	Test	0.0062	1.9993	12.4618
[2 3 3 3]	Eğitim	0.0034	1.5698	22.7935
	Test	0.0047	1.9095	9.0758
[3 3 3 3]	Eğitim	0.0030	1.5313	14.7528
	Test	0.0043	1.8655	6.7524
[3 3 3 4]	Eğitim	0.0028	1.5306	13.0190
	Test	0.0041	1.8641	6.6208
[3 3 4 4]	Eğitim	0.0029	1.5156	15.7705
	Test	0.0047	1.9550	11.2660
[3 4 4 4]	Eğitim	0.0022	1.4071	8.4690
	Test	0.0044	1.8613	9.9593
[4 4 4 4]	Eğitim	0.0024	1.4442	11.819
	Test	0.0055	1.8821	8.2894



(a)



(b)

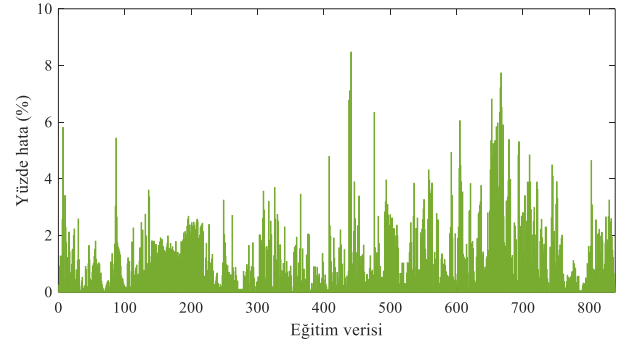
Şekil 7. (a) Gerçek eğitim verisi ile Tri eğitim modelinin karşılaştırılması, (b) Gerçek test verisi ile Tri test modelinin karşılaştırılması.

Şekillerde 'x' sembolü ile modelleme çıkış değerleri, 'o' sembolü ile kullanılan gerçek değerleri gösterilmiştir. Her iki şekilde de yüksekliğe karşılık trim değeri çizdirilmiştir. Hem eğitim modelinin hem de test modelinin yüzde hata değerleri, grafiksel olarak Şekil 10 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Şekile göre, Trap üyelik fonksiyonu modellemesinde eğitim ve test verileri için yüzde hata oranı %7-8 civarında elde edilmiştir.

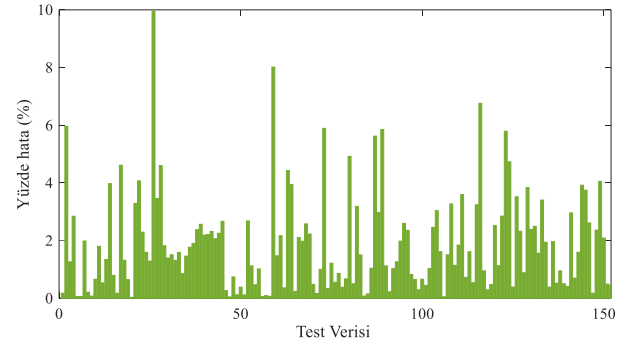
Bulanık mantığa dayalı olarak yapılan, farklı üyelik fonksiyonları ile gerçekleştirilen çalışmalar arasında en iyi performansa ait sonuçlar, Tablo 5' de sunulmuştur. Bu tabloda Gbell, Gauss, Tri ve Trap üyelik fonksiyonları kullanılarak oluşturulan modellemeler içerisinde en iyi olanlar bir araya getirilmiştir. Tablo 5 incelendiğinde, 0.0013 MSE değeri ile en iyi performansı (4, 4, 4, 4) kural seti ile Gbell üyelik fonksiyonunun sergilediği görülmüştür. 0.0016 MSE değeri ile Gauss üyelik fonksiyonunun (3, 4, 4, 4) kural setiyle gerçekleştirilen modellemesi ikinci en iyi model olarak Gbell' i takip etmiştir. Tri üyelik fonksiyonu (3, 4, 4, 4) modeli ve Trap üyelik fonksiyonu (3, 3, 4, 4) modeli, sırasıyla 0.0022 ve 0.0026 MSE değeri ile Gbell ve Gauss' un gerisinde kalmıştır.

3 Sonuçlar ve tartışma

Bu çalışmada, uçağın iniş fazında uçuş kontrol parametrelerinden flap pozisyonunun, uçağın hızının, yüksekliğinin ve ağırlık merkezinin trime etkisi ve bu trim değerinin ANFIS kullanılarak tahmini üzerinde durulmuştur.



(a)

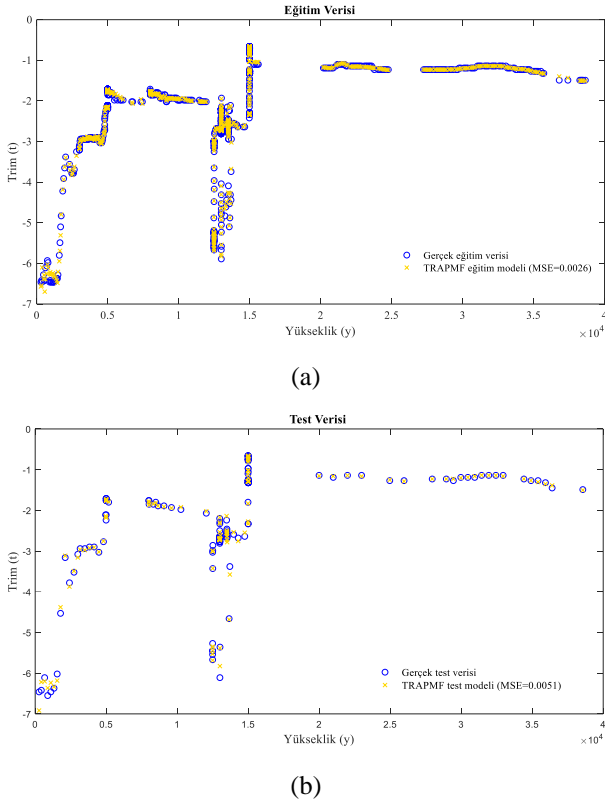


(b)

Şekil 8. (a) Tri eğitim modeli yüzde hata değerinin grafiksel gösterimi, (b) Tri test modeli yüzde hata değerinin grafiksel gösterimi.

Tablo 4. Trap üyelik fonksiyonuna ait farklı model sonuçları.

Kural Seti	Veri Seti	MSE	Ortalama % Hata	Maksimum % Hata
[2 2 2 2]	Eğitim	0.0053	1.8263	24.0558
	Test	0.0073	2.0095	10.6113
[2 2 2 3]	Eğitim	0.0047	1.6973	24.3093
	Test	0.0070	2.1304	22.3611
[2 2 3 3]	Eğitim	0.0037	1.6396	18.1481
	Test	0.0060	1.9643	8.8612
[2 3 3 3]	Eğitim	0.0031	1.5118	16.7117
	Test	0.0059	1.8963	14.2897
[3 3 3 3]	Eğitim	0.0030	1.4916	12.7817
	Test	0.0050	1.8638	11.4294
[3 3 3 4]	Eğitim	0.0032	1.6791	8.1549
	Test	0.0055	1.9086	8.5487
[3 3 4 4]	Eğitim	0.0026	1.4660	7.5581
	Test	0.0051	1.7477	7.0757
[3 4 4 4]	Eğitim	0.0037	1.4327	22.2041
	Test	0.0063	1.8224	9.4307
[4 4 4 4]	Eğitim	0.0031	1.4130	7.9812
	Test	0.0055	1.7729	9.2354



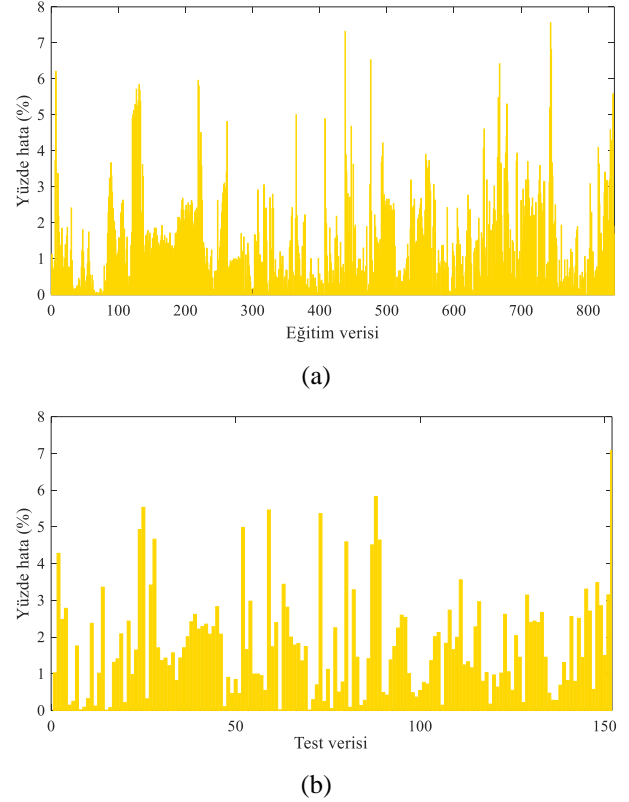
Şekil 9. (a) Gerçek eğitim verisi ile Trap eğitim modelinin karşılaştırılması, (b) Gerçek test verisi ile Trap test modelinin karşılaştırılması.

ANFIS ile oluşturulan eğitim ve test modellemelerinde, Airbus A319 uçağına ait kara kutudan elde edilen gerçek veri setleri kullanılmıştır. Bunun için 839 adet eğitim, 152 adet test verisi olmak üzere toplam 991 adet veri seti ile çalışılmıştır.

Bu çalışmada, ANFIS’ de 4 farklı üyelik fonksiyonu ve 9 farklı kural seti kullanılarak trim değerinin tahmin edilmesi için modellemeler yapılmıştır. Modellemede tercih edilen üyelik fonksiyonları Gbell, Gauss, Tri ve Trap olup, bunlar literatürde en çok kullanılan üyelik fonksiyonlarıdır.

Yapılan modellemelerde her bir üyelik fonksiyondan elde edilen sonuçlar, [Tablo 1](#), [2](#), [3](#) ve [4](#)’ de verilmiştir. En iyi

performansı, 0.0013 MSE değerine sahip olan Gbell üyelik fonksiyonu sergilemiştir. Gbell üyelik fonksiyonuna ait modelleme sonuçlarının yer aldığı [Tablo 1](#) incelendiğinde en iyi sonuç, (4, 4, 4, 4) kural setinde elde edilmiş olup, eğitim modelinde ortalama yüzde hata ve maksimum yüzde hata değerleri sırasıyla 1.1795 ve 6.2438 olarak hesaplanmıştır. Test modelinde ortalama yüzde hata değeri, 1.6082, maksimum yüzde hata değeri ise 5.3213 iken MSE değerinin 0.0034 olduğu görülmüştür.



Şekil 10. (a) Trap eğitim modeli yüzde hata değerinin grafiksel gösterimi, (b) Trap test modeli yüzde hata değerinin grafiksel gösterimi.

Tablo 5. Farklı üyelik fonksiyonlarına ait en iyi model performanslarının gösterimi.

Üyelik Fonksiyonu	Kural Seti	Veri Seti	MSE	Minimum % Hata	Ortalama % Hata	Maksimum % Hata
GBELL	[4 4 4 4]	Eğitim	0.0013	1.1954e-04	1.1795	6.2438
		Test	0.0034	1.2367e-02	1.6082	5.3213
GAUSS	[3 4 4 4]	Eğitim	0.0016	3.4061e-04	1.1648	6.1519
		Test	0.0032	1.1398e-02	1.5762	5.8791
TRI	[3 4 4 4]	Eğitim	0.0022	4.2002e-04	1.4071	8.4690
		Test	0.0044	3.4340e-02	1.8613	9.9593
TRAP	[3 3 4 4]	Eğitim	0.0026	1.9192e-03	1.4660	7.5581
		Test	0.0051	3.0846e-03	1.7477	7.0757

Modellemede Gbell üyelik fonksiyonundan sonra en iyi performansı Gauss üyelik fonksiyonu sergilemiştir. **Tablo 2'** de görüldüğü üzere Gauss üyelik fonksiyonuna ait performans kıyaslamasında en iyi MSE değeri 0.0016 ile (3, 4, 4, 4) kural setinde elde edilmiştir. Tabloya göre ortalama yüzde hata değeri, 1.1648 iken, maksimum yüzde hata değerinin, 6.1519 olduğu görülmüştür. Ayrıca test modeli için bu değerler incelendiğinde, ortalama yüzde hatanın değeri, 1.5762, maksimum yüzde hatanın değeri, 5.8791 ve MSE'nin 0.0032 olduğu görülmüştür.

Tri üyelik fonksiyonu, modellemede en iyi üçüncü performansı veren üyelik fonksiyonudur. Gbell ve Gauss üyelik fonksiyonlarıyla olduğu gibi bu fonksiyonla da 9 farklı kural seti kullanılarak, trim değerinin tahmini gerçekleştirilmeye çalışılmıştır ve elde edilen sonuçlar, **Tablo 3'** de sunulmuştur. Tablo incelendiğinde Tri üyelik fonksiyonu ile oluşturulan en iyi modelleme sonuçlarının (3, 4, 4, 4) kural seti ile elde edildiği görülmüştür. (3, 4, 4, 4) modeli için en iyi eğitim modelinin MSE değeri, 0.0022 iken, test modeli için MSE değeri, 0.0044' dür. Tri üyelik fonksiyonunun en iyi eğitim modeli için ortalama yüzde hata değeri, 1.4071 ve maksimum yüzde hata değeri, 8.4690 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca test modeli için ortalama yüzde hata değeri, 1.8613 ve maksimum yüzde hata değeri, 9.9593 şeklinde elde edilmiştir.

4 farklı üyelik fonksiyonu ile gerçekleştirilen trim değerinin tahmininde en kötü performansı, Trap üyelik fonksiyonu gerçekleştirmiştir. Bu gerçekleştirmeden elde edilen eğitim ve test sonuçları **Tablo 4'** de verilmiştir. Bu üyelik fonksiyonu için (3, 3, 4, 4) kural setine sahip modelin en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Tabloya göre eğitim modelinin MSE değeri, 0.0026 iken, test modeline ait MSE değerinin, 0.0051 olduğu görülmüştür. Yapılan modellemede eğitim modelinin ortalama yüzde hata değeri, 1.4660 ve maksimum yüzde hata değeri, 7.5581 olarak hesaplanmıştır. Test modelinde ise ortalama ve maksimum yüzde hata değerleri, sırasıyla 1.7477 ve 7.0757 olarak verilmiştir.

Ayrıca bu çalışmada yapılan modellemelerde her bir üyelik fonksiyondan elde edilen en başarılı sonuçlar derlenmiş ve **Tablo 5'** de sunulmuştur. Tüm gerçekleştirilen modelleme çalışmasında MSE değerinin yanı sıra çalışma performansını değerlendirmek için ortalama ve maksimum yüzde hata değerleri de incelenmiştir. Kullanılan 4 farklı üyelik fonksiyonunun MSE değeri kıyaslamasında en iyi MSE değerini Gbell sergilerken, ortalama yüzde hata bakımından en iyi değeri Gauss'un sergilediği gözlenmiştir. Gbell eğitim ve test modellerine ait ortalama yüzde hata değerleri, sırasıyla 1.1795 ve 1.6082 olarak verilmiştir. Gauss için ise eğitim modeli ortalama yüzde hata değerinin 1.1648, test modeli ortalama yüzde hata değerinin 1.5762 olduğu gözlenmiştir.

Yapılan bu çalışmada, uçağa ait gerçek veri değerleri ile farklı üyelik fonksiyonlarına sahip modellerin sonuç değerlerinin arasında kabul edilebilir hatalar bulunmaktadır. Bu çalışmada üyelik fonksiyonlarının yanı sıra ANFIS modeline ilişkin kural sayıları da değiştirilerek hata değerinin küçültülmesi hedeflenmiştir. Bununla birlikte

ANFIS modellerinin giriş veri sayısının artırılması veya ANFIS dışında başka yapay zeka modelleri kullanılabilir. Bu şekilde, uçakların daha güvenli ve konforlu uçuşu için farklı tahmin modelleri oluşturulabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] M. Güngör, Cumhuriyetin Kuruluşundan Bugüne Yerli Uçak Üretimi ve Havayolu Taşımacılığı. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2019.
- [2] TTS, Module 13 – Aircraft Aerodynamics, Structures and Systems for EASA Part 66, TTS- Total Training Support Ltd, United Kingdom, 2016.
- [3] ICAT, Module 13- Aircraft Aerodynamics, Structures & Systems, International Centre for Aerospace Training, United Kingdom, 2014.
- [4] M. Konar and A. Bağış, Uçuş kontrol sistemi hız ve yakıt parametrelerinin ANFIS ve yapay sinir ağları kullanılarak eşzamanlı hesaplanması. IEEE 24. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU'2016), 1389-1392, 2016.
- [5] E. Lakovic and D. Lotinac, Aircraft landing control using fuzzy logic and neural networks. Sweden: IRCSE, Mälardalen University, 2010.
- [6] K. Terrell and S. Zein-Sabatto, Intelligent reconfigurable control system for aircraft flight control. IEEE SoutheastCon, pp. 1-7, 2017.
- [7] D. M. Liu, G. Naadimuthu and E. S. Lee, Trajectory tracking in aircraft landing operations management using the adaptive neural fuzzy inference system. Computers & Mathematics with Applications, 56(5), Sep., 1322-1327, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2007.11.052>
- [8] İ. Türkmen and Y. Korkmaz, Uçaklardaki hava veri bilgisayarında basınç irtifasının bulanık mantık sistemine dayalı uyarlanabilir ağ ile hesaplanması. IEEE 19th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU'2011), pp. 1141-1144. 2011. <https://doi.org/10.1109/SIU.2011.5929857>
- [9] A. K. Singh and R. Dahiya, Dynamic modeling and control of aircraft surfaces using hybrid intelligent controllers. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, 12,(6), 21-40, 2017. <https://doi.org/10.9790/1676-1206012140>
- [10] A. Al-Mahadin and F. Bouslama, Neuro-fuzzy techniques for the identification of aircraft wake vortex encounters. Advances in Science and Engineering Technology International Conferences -ASET, pp. 1-6, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICASET.2018.8376808>
- [11] M. N. Raheema and A. S. Abdullah, Design of prediction system for aircraft's position based on inverse control technique using adaptive neuro-fuzzy interference system (ANFIS). Journal of University of

- Babylon, Pure and Applied Sciences, 27(1), 238-247, 2019.<https://doi.org/10.29196/jubpas.v27i1.2117>
- [12] L. Yingjie and W. Baoshu, Study on the control course of ANFIS based aircraft auto-landing. Journal of Systems Engineering and Electronics, 16(3), 583-587, 2005.
- [13] A. G. Roy and N. K. Peyada, Aircraft aerodynamic parameter estimation using ANFIS-PSO method. International Conference on Theoretical, Applied, Computational and Experimental Mechanics (ICTACEM), 2014.
- [14] A. Kumar, and A. K. Ghosh, ANFIS-Delta method for aerodynamic parameter estimation using flight data. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 233(8), 3016-3032, 2019. <https://doi.org/10.1177/2F0954410018791621>
- [15] M. Konar and A. Bağış, Uçuş kontrol sistemi hız parametresinin adaptif ağ yapılı bulanık sonuç çıkarım sistemi kullanılarak belirlenmesi. IEEE 17. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU'2009), Antalya, Türkiye, sayfa.993-996, 2009.
- [16] C. M. Ezhilarasu and I. K. Jennions, A system-level failure propagation detectability using ANFIS for an aircraft electrical power system. Applied Sciences, 10(8), 1-22, 2020.<https://doi.org/10.3390/app10082854>
- [17] A. Bagis and M. Konar, ABC and DE algorithms based fuzzy modeling of flight data for speed and fuel computation. International Journal of Computational Intelligence Systems, 11(1), .790-802, 2018. <https://dx.doi.org/10.2991/ijcis.11.1.60>
- [18] J. S. R. Jang, ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. Transactions on Systems Man and Cybernetics, 23(3), 665-685, 1993.<https://doi.org/10.1109/21.256541>
- [19] O. Doğan, Uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sisteminin (ANFIS) talep tahmini için kullanımı ve bir uygulama. Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 31(1), 257-288, 2016. <https://doi.org/10.24988/deuiibf.2016311513>
- [20] E. L. Lehmann, and G. Casella, Theory of point estimation. New York: Springer, 1998.<https://doi.org/10.1007/b98854>





A modular buck-boost drive system for torque ripple minimization of switched reluctance machines

Anahtarlamalı relüktans makinalarının moment salınımı minimizasyonu için modüler bir yükseltici-alçaltıcı sürücü sistemi

Burak Tekgün^{1,*} 

¹ Abdullah Gül University, Department of Electrical-Electronics Engineering, 38080, Kayseri, Turkey

Abstract

In this paper, a modular three-phase buck-boost switched reluctance machine (SRM) drive system is proposed. In this topology, the three-phase SRM drive is composed of three single-phase modules that are connected in parallel where each single-phase inverter module is formed with a bidirectional buck-boost DC/DC converter and a cascaded H-bridge inverter. The DC/DC converter generates the rectified form of the phase voltage and the H-bridge inverter alternates and controls the polarity of the output voltage. This structure allows one to adjust the phase voltages independently, which provides faster excitation and demagnetization for a wide range of operating conditions. Since the voltage is always regulated dynamically, the need for bulky DC-bus capacitors is eliminated; hence, the size and the cost of the drive system are reduced. To validate the superiority of the proposed system and compare it with the traditional one, a set of simulations are done in MATLAB®/Simulink®. Not only the torque ripple is reduced, but also a higher torque per ampere ratio is achieved with the proposed system.

Keywords: Fast excitation and demagnetization, Modular motor drive, Switched reluctance motor (SRM)

1 Introduction

Switched reluctance machines (SRM) are drawing increasing attention worldwide due to the features that come from their simplicity. SRMs have the simplest geometry to be manufactured, they are cheap, reliable, robust, being suitable to be used in harsh environments, and free of rare earth magnets [1, 2]. In terms of power density and efficiency, they are comparable to the induction machines (IM). On the other hand, their doubly salient structure and highly nonlinear magnetization characteristics make a high torque output ripple inevitable. Due to the high torque ripple and the excitation current's high-frequency harmonic components, SRMs are having acoustic noise and vibration issues [3, 4]. Therefore, parameters that affect the performance measures such as turn-on/off angles (commutation), current regulation, DC bus voltage adjustments should be treated properly [5, 6]. During the last decades, numerous research has been reported on converter topologies and control methods for improving the performance and operating range, as well as the torque ripple and acoustic noise reduction [2, 7, 8].

Özet

Bu makalede modüler yapıda olan üç fazlı bir alçaltıcı yükseltici anahtarlamalı relüktans motoru sürücü (ARM) sistemi önerilmiştir. Bu topolojide üç fazlı ARM sürücü üç adet tek-fazlı modülün paralel bağlanmasıyla oluşturulmuş olup, her tek-fazlı sürücü bir çift yönlü çalışan alçaltıcı-yükseltici DA/DA dönüştürücü ve bunun sonrasında bağlanmış bir H-köprü eviriciden oluşmaktadır. DC/DC dönüştürücü faz geriliminin doğrultulmuş formunu oluşturmada ve H-köprülü evirici de oluşturulan gerilimin yönünü değiştirerek çıkış geriliminin polaritesini kontrol etmektedir. Bu yapı faz gerilimlerinin birbirinden bağımsız olarak ayarlanmasına önayak olarak, hızlı enerjilenmeyi ve demagnetizasyonu mümkün kılmaktadır. Bunun sonucunda komütasyon performansı iyileştirilmiş ve moment salınımı azaltılmıştır. Gerilim dinamik olarak regüle edildiğinden büyük DC-bara kondansatörlerine olan ihtiyaç ortadan kalkmış ve böylece sürücü boyutu ve maliyeti azaltılmıştır. Önerilen sistemin üstünlüğünü doğrulamak ve bu sistemi geleneksel sistemle karşılaştırmak üzere MATLAB®/Simulink® ortamında bir dizi benzetim çalışması yapılmıştır. Önerilen sistem ile sadece moment salınımı azaltılmamış daha yüksek bir amper başına moment oranı da elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hızlı enerjilenme ve demagnetizasyon, Modüler motor sürücü, Anahtarlamalı relüktans motoru (ARM)

Among many SRM converter structures, asymmetric-bridge converter topology is considered as the traditional SRM drive. In this topology, each phase current is controlled with two active switches and two diodes using the hysteresis current regulation technique. Although it provides a flexible operation and high-performance current regulation, the switching frequency is not controlled which results in high switching losses and oversized inverter designs [1]. In order to achieve high performance at a wide range of operating conditions, various DC bus voltage boosting or regulating SRM drive topologies are developed for the grid and battery-powered systems [6, 9–13] which possess the advantages of reduced DC bus capacitor size, reduced voltage variation effects on the control system, improved commutation capability, extended driving range, increased output power [9].

One of the most used topologies is the C-dump converter that improves the turn-on and turn-off characteristics [11], [14, 15]. The C-dump converter charges a capacitor that is connected series to the DC bus during the demagnetization. Later, the additional capacitor voltage is used to excite and/or demagnetize the next phase of the SRM. In [16], a battery-powered electric vehicle (EV) SRM drive system is

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: burak.tekgun@agu.edu.tr (B. Tekgün)
 Geliş / Received: 06.10.2020... Kabul / Accepted: 13.12.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021
 doi: 10.28948/ngmuh.806323

developed with the C-dump converter. In [17], the effect of the voltage boost during the demagnetization is analyzed, and improved performance in terms of average torque and power output is reported. The hybrid excitation where two phases are kept turned on with the help of a C-dump converter is proposed in [12]. The biggest disadvantage of C-dump converters is the additional capacitor voltage level is highly dependent on the operating condition, for instance, if the machine is generating a high torque the voltage boost will be high, and vice versa. Consequently, high power and high-speed operations are limited. Additionally, the reliability of this converter is poor as it does not have a fault-tolerant ability due to its non-isolated structure [10]. It is possible to find other types of approaches in the literature. In [10], a multilevel converter topology is proposed for plug-in hybrid EVs, where the battery bank is used to elevate the DC bus voltage for faster excitation and demagnetization. A voltage boosting converter topology is reported in [9], which is also able to operate during the charging from the grid with power factor correction (PFC) feature. A bidirectional buck-boost topology is used for EV driving and charging operations in [18]. In [19], a four-phase modified Miller converter as an SRM drive is proposed where the elevated DC bus voltage provides a wide range of shifted commutation angle, consequently, high-speed performance is improved. In [11], an SRM drive system that operates in a vehicle-home-grid network, which is formed with a front end bidirectional two-quadrant DC/DC converter and an asymmetric drive is reported. In addition to the above studies, there exist some studies that take battery management issues into consideration, which improved the stability, fault-tolerant ability, and eventually, the reliability [20–22].

Using any aforementioned drive systems does not guarantee maximized efficiency. To maximize the SRM efficiency, the average output torque should be maximized for each given RMS amps, namely torque per ampere ratio, T_{avg}/I_{RMS} , should be maximized [5]. Numerous control schemes are proposed to address this issue such as optimal turn-on, turn-off angle determination [5], hybrid excitation [12], and various torque sharing methods [23], [24]. The success of these methods mostly depends on the successful current regulation. Due to the nonlinear magnetic characteristics of the SRM, it is a challenge to conduct an accurate current regulation. Simple average PI control [14], hysteresis control, DQ control [7], [25], sliding mode control [26], back emf predictive control [27] are some of these structures.

In this paper, a modular buck-boost SRM drive system is proposed, where each phase has its non-inverting buck-boost converter and an H-bridge converter. The system works in torque control mode and reference phase currents are regulated with PI controllers in the hybrid manner where two-phase operated at the same time during the commutation. The output of the PI regulator is the reference voltage to be generated by the DC/DC buck-boost converter, then, the polarity of the generated voltage is controlled with the cascaded H-bridge inverter. The proposed topology is able to step up or down the DC input voltage; hence, a faster

excitation and demagnetization is possible, which leads to a reduced torque ripple, increased output torque and power, and extended speed range. Also, this structure helps to eliminate the large DC bus capacitors, reduces the switching losses as the high frequency switching only occurs at the DC/DC conversion stage, and lengthens the machine lifetime by deducting the current-stress in the machine windings. Moreover, the proposed system is a modular structure that provides great flexibility. Different SRM configurations like three, four, or more-phase SRMs can be driven by just adding a module for each phase; higher power levels can be achieved by adding parallel converters.

This paper is organized as follows: The proposed modular buck-boost SRM drive system is presented and analyzed in Section II, where the SRM drive operating modes, module topology, the control system, and the complete SRM drive system are given in detail. In Section III, the simulation study is explained in detail, the results are provided, and the conclusions are made in Section V.

2 Proposed Modular Buck-Boost SRM Drive System

The single-phase control of a conventional asymmetric SRM drive is presented in Figure 1, where V_{DC} is the DC input voltage, C_{DC} is the DC/DC converter input capacitor, S_L and S_H are the upper and lower switches, L_{phase} , r_L , and emf are the phase inductance, phase resistance and the back emf component of the SRM. The same structure is repeated for each phase. The asymmetric converter has an inherent shoot through fault feature by having an active switch and a diode on each leg [28]. This simple structure allows the circuit operates in three modes namely, excitation, free-wheeling, and demagnetization modes as illustrated in Figure 2. In the excitation mode, both lower and upper switches are turned on to apply the supply voltage; in the free-wheeling mode, either the lower or upper switch is turned to apply zero voltage; and in demagnetization mode, both switches are turned off to force diodes to conduct and apply negative supply voltage to the SRM windings.

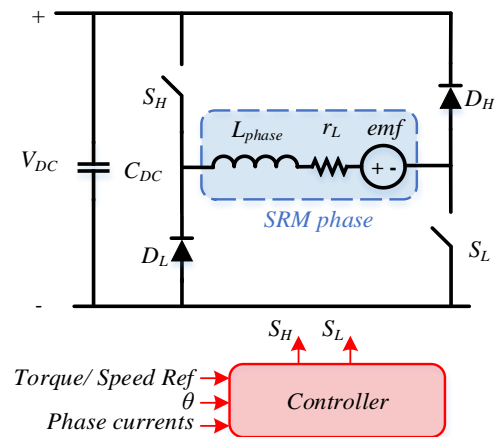


Figure 1. Single-phase control of a conventional asymmetric SRM drive.

In this topology, the current control through hysteresis current regulation or any other PWM technique can be

achieved easily where the machine speed is relatively low. However, it gets harder to regulate the phase currents accurately as the speed and the back emf voltage increase. As mentioned before, various voltage boosting topologies and shifting techniques are proposed to overcome this issue.

The proposed topology is made of a modular structure where all the phases are controlled with separate modules that can step up and down the voltage whenever it is necessary. The following subsections provide details of the module topology, the module control system, and the whole modular SRM drive system.

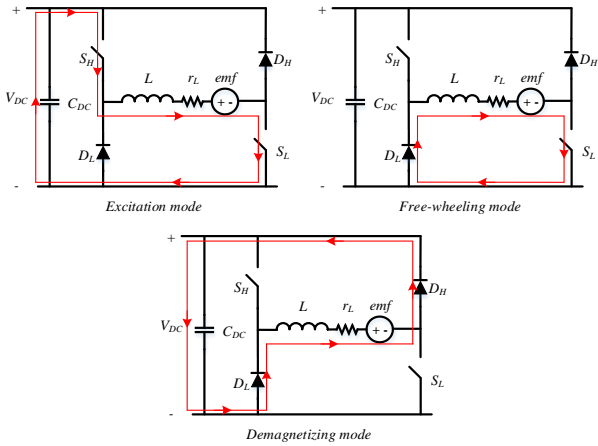


Figure 2. Operating modes of conventional asymmetric SRM drive.

2.1 Module topology

The single-phase modules are made out of a bidirectional non-inverting buck-boost converter that has four switches with body diodes and an H-bridge inverter to alternate the generated voltage as shown in Figure 3, where L and C are the DC/DC converter inductor and the output capacitor, $D_1, D_2, D_3,$ and D_4 are the antiparallel diodes and S_1, S_2, S_3 and S_4 are the switching elements of the DC/DC converter, V_{rAC} is the voltage across the output capacitor, also named as rectified AC voltage, $D_5, D_6, D_7,$ and D_8 are the antiparallel diodes and S_5, S_6, S_7 and S_8 are the switching elements of the H-bridge converter, and V_{out} is the output voltage of the module.

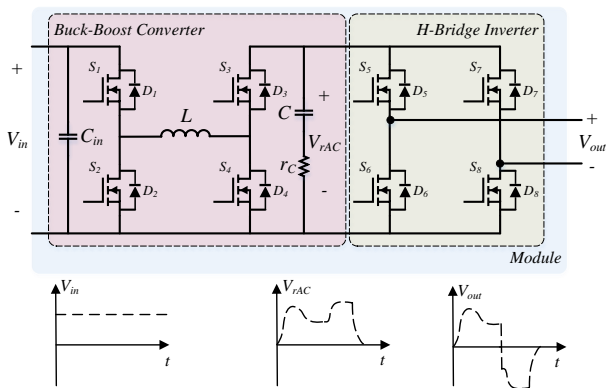


Figure 3. The module structure of the proposed SRM drive.

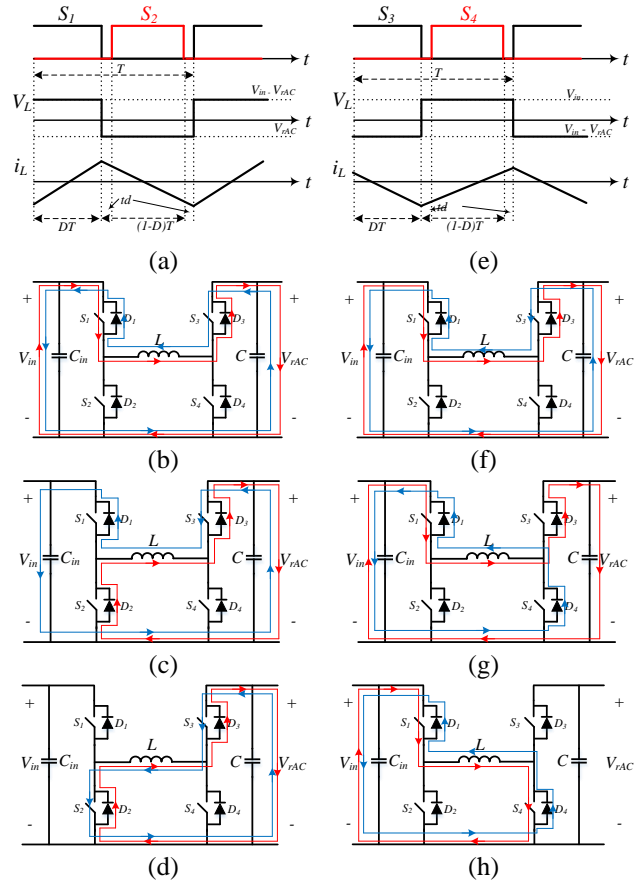


Figure 4. In motoring mode (red lines) (a) buck operation switching pattern and the circuit modes when (b) $0 < t < DT$, (c) $DT < t < DT+td$, and (d) $DT+td < t < T$; (e) boost operation switching pattern, circuit modes when (f) $0 < t < DT$, (g) $DT < t < DT+td$, and (h) $DT+td < t < T$.

The bidirectional buck-boost converter operates in four modes namely, motoring buck/boost, and generating buck/boost modes. In case the converter is operating in motoring mode (shown with red lines in Figure 4) and the buck-boost converter operates in buck mode, the S_3 switch is fully turned on and S_4 is fully turned off; S_1 and S_2 switches alternate and form a synchronous buck converter. The switching pattern, inductor voltage and current are given in Figure 4.a. During this operation the circuit modes at the time intervals of $0 < t < DT$, $DT < t < DT+td$ and $DT+td < t < T$ are presented in Figure 4.b, Figure 4.c, and Figure 4.d, respectively. Here, D is the duty ratio, T is the switching period, and t_d is the dead-time. Similarly, for the case where the converter operates as a boost converter when motoring, the S_1 switch is fully turned on, S_2 is fully turned off, and the S_3 and S_4 switches alternate to form a synchronous boost converter. The switching pattern, inductor voltage, and current are given in Figure 4.e. During this operation the circuit modes at the time intervals of $0 < t < DT$, $DT < t < DT+td$, and $DT+td < t < T$ are shown in Figure 4.f, Figure 4.g, and Figure 4.h, respectively. The synchronous structure is selected intentionally to minimize the converter losses by eliminating the high power loss from the diodes' conduction loss. Due to the symmetrical structure of the non-inverting

buck-boost converter, the modes of operation during the generation mode will be quite similar as shown with blue lines in Figure 4 except the inductor current direction is different. Therefore, a further explanation for the generating case will not be presented in this paper.

2.2 Control system

The proposed buck-boost inverter has an open-loop structure. Switches $S_5, S_6, S_7,$ and S_8 are triggered according to the voltage reference polarity, S_5 and S_8 are turned on if the reference voltage is positive, and S_6 and S_7 are turned on if it is negative.

After normalizing the reference waveform based on the input voltage, the reference is clamped between 0 and 3 for limiting the drive output voltage for stable and safe operation. S_1 and S_2 are controlled with further clamping of this signal between 0 and 1 while S_3 and S_4 are controlled with linearized boost converter duty ratio using a one-dimensional lookup table (LUT). The control system block diagram is presented in Figure 5, the duty ratios versus the normalized reference voltage when it varies between zero and three are shown in Figure 6. This simple control structure allows the power to flow in either direction as this feature is required to drive an SRM considering the power is flowing from the machine to the source and vice versa during the excitation and demagnetization.

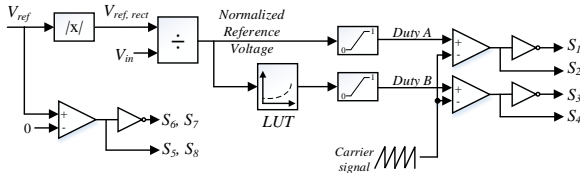


Figure 5. The open-loop control structure of the proposed buck-boost inverter.

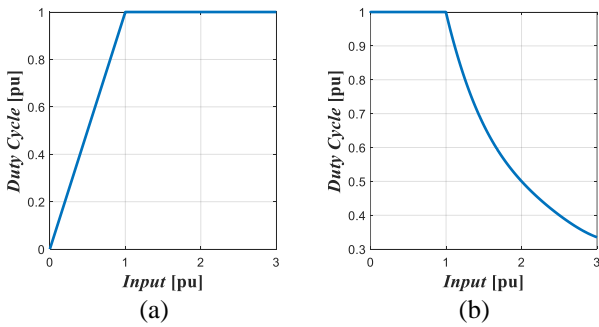


Figure 6. (a) Duty cycle of the S_1 (S_2 alternates) switch vs. the normalized input voltage reference; (b) duty cycle of the S_3 (S_4 alternates) switch vs. the normalized input voltage reference.

2.3 SRM drive system

The proposed three-phase SRM drive system consists of three individual single-phase modules for each SRM phase as shown in Figure 7. This modular structure provides great flexibility, it is possible to drive SRMs having a lower or higher number of phases and having a higher power rating by simply adding more modules to the drive system

The SRM drive system is operated with the torque control structure. This structure can easily be extended to the speed and position control structures by cascading additional controllers. The control structure is given in Figure 8, where the reference torque and optimized turn on and turn off angles along with the rotor position are fed back to the current reference generation block. This block generates the reference currents with a simple structure, where the required current waveform is simply a square waveform whose amplitude is taken from pre-generated torque vs current and position lookup table. Later, these current references go into a PI current regulator that generates the voltage reference. Calculated voltage references fed to the modules and generated voltages by modules are applied to the SRM windings. Modules are acting as a controlled voltage source during the operation.

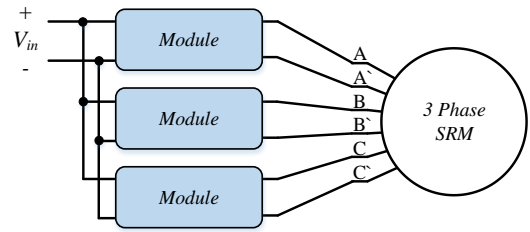


Figure 7. The proposed modular three-phase SRM drive system.

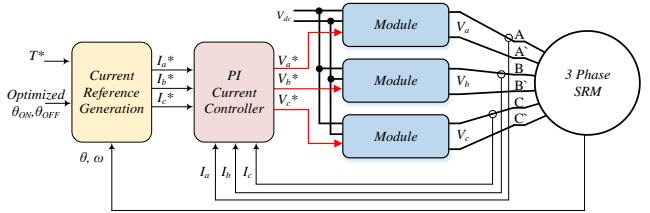


Figure 8. SRM torque control block diagram with the proposed drive system.

3 Simulations and Results

The SRM used in this work is modeled with two LUTs which are flux linkage vs current vs position and torque vs current vs position. These LUTs are generated using a finite element analysis software, ANSYS/Maxwell. Motor control and modular drive simulation studies are performed in MATLAB®/Simulink®.

The parameters of the SRM used in this study are given in Table 1.

Table 1. The Parameters of the SRM used in simulations.

Parameter	Value
Power	2 kW
Base speed	1000 rpm
Rated peak current	21 A
Rated voltage	200 Vdc
Stator/Rotor pole configuration	24/16
Phase resistance	0.24 Ω

The flux linkage vs position vs current, and torque vs position vs current plots are presented in Figure 9a and Figure 9b, respectively.

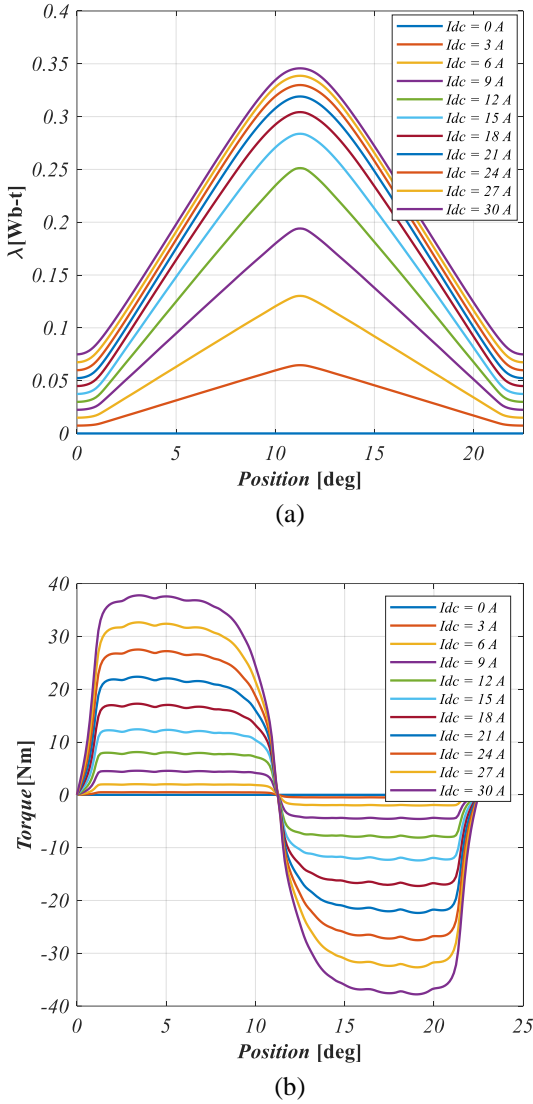


Figure 9. (a) Flux linkage vs position vs current, and (b) torque vs position vs current plots.

The SRM model built in MATLAB®/Simulink® executes the basic terminal equation as following:

$$V = RI + \frac{d\lambda}{dt} \quad (1)$$

where, V is the terminal voltage, R is the phase resistance, I is the phase current, and λ is the flux linkage. The phase current is calculated using (1) and the torque is calculated using the torque vs position vs current LUT. This process is done for each phase to calculate the total torque.

The buck-boost converter of the modules is operated at 100 kHz switching frequency and it has a 100 μH inductor and 10 μF output capacitor. The modules are able to step up

the voltage to 600 V dynamically; however, the voltage is limited to 400 for safe operation.

Two simulations were performed to compare the conventional and the proposed SRM drive systems. At 1000 rpm speed the full torque of 20 Nm is tried to be generated. It should be kept in mind that 1000 rpm is the base speed, i.e. at this speed and full torque, the machine is operating at the voltage limit. 200 V input voltage will not be enough for the drive to be able to regulate the phase currents if the machine speeds up or output torque increases.

Firstly, the conventional drive system with hysteresis current control is simulated. The optimized turn-on and turn-off angles are determined as 6.6 and 14.6 degrees by manually sweeping these angles with a series of simulations and the phase currents are generated as shown in Figure 10a. The average steady-state torque is determined as 20 Nm while the peak-to-peak torque variation is 9.37 Nm, which is 46.8% of the average steady-state torque as shown in Figure 10b.

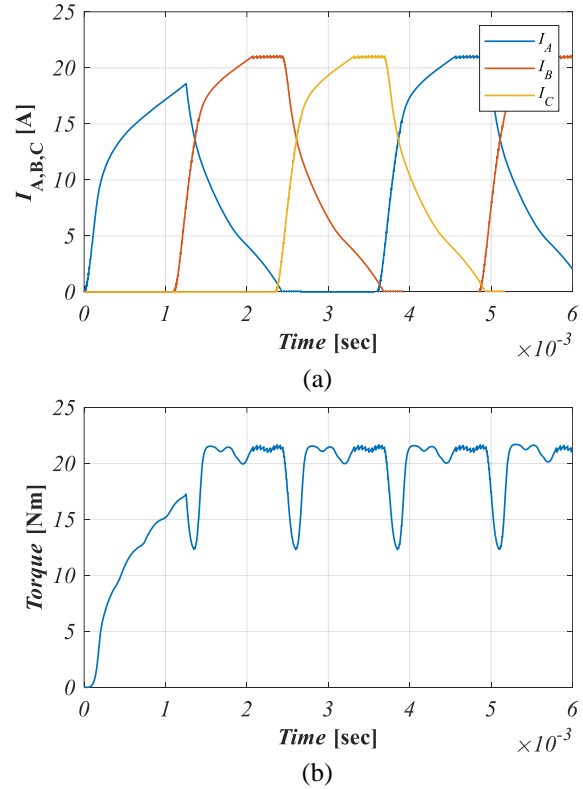


Figure 10. (a) Phase currents and (b) output torque waveforms of the conventional SRM drive system.

The second simulation is done with the proposed SRM drive system. Similar to the conventional system simulation, the input voltage is kept as 200 V but in this case, the voltage can be boosted up to 400 V. The turn on and turn of angles are again determined through a set of simulations as 7.35 and 15.45 degrees. The proposed system generated the phase currents in the hybrid form, where the two phases are kept on for a brief time, hence the torque production is maintained during the commutation. The phase currents are presented in Figure 11a. It is observed that the average steady-state torque

is 21.5 Nm, peak-to-peak torque variation is 1.36 Nm that is 6.3 % of the average torque as shown in Figure 11b.

To regulate the currents in the desired waveforms the current regulators adjusted the phase voltages as given in Figure 12. The hybrid excitation is more obvious in the voltage waveforms. This scheme provides a more balanced excitation and helps reduce the abrupt excitation variations resulting in a lower torque ripple, lower acoustic noise, and vibration.

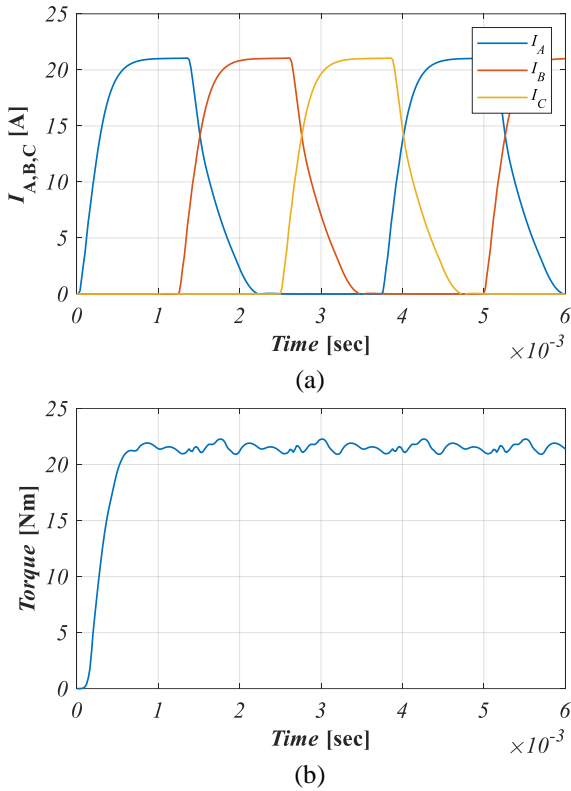


Figure 11. (a) Phase currents and (b) output torque waveforms of the proposed SRM drive system.

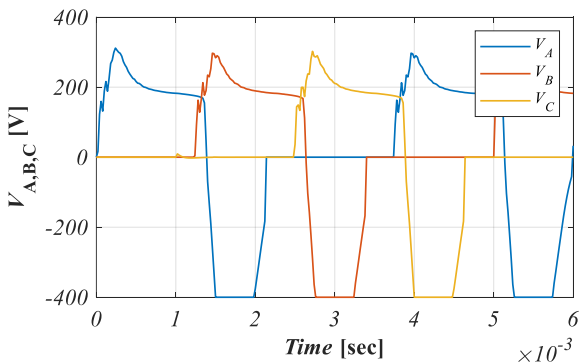


Figure 12. Phase voltages of the proposed SRM drive system.

This simulation study is extended to a wider operation range and performance improvements are recorded and presented in Figure 13. The capability curve, percent torque ripple, maximum torque per ampere, and maximum power output for both conventional and proposed drive systems are

plotted and compared in Figure 13a, 13b, 13c and 13d, respectively.

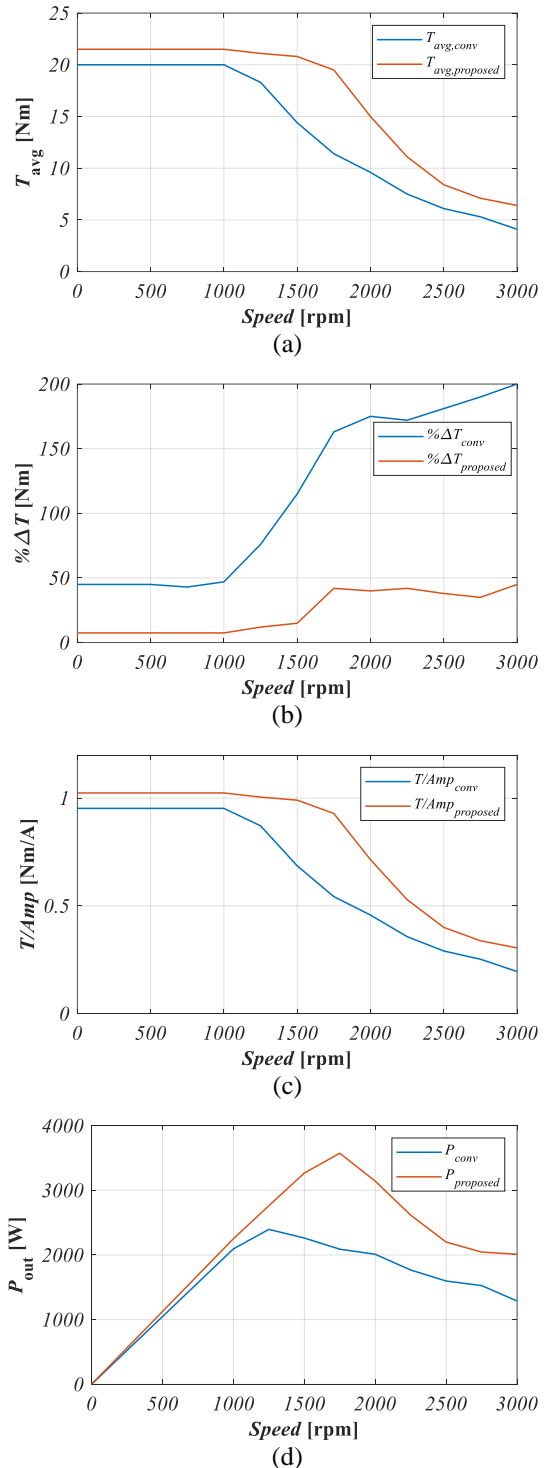


Figure 13. (a) The capability curve, (b) percent torque ripple, (c) maximum torque per ampere, and (d) maximum power output curves of conventional and proposed SRM drive systems.

It can be clearly seen from the results that the proposed system greatly reduces the torque ripple, extends the speed range, and improves the torque per ampere performance and

the power output. This work can be extended to a proper torque sharing function development study for even achieving a very low torque ripple at a wide operating range, which would make SRMs a viable and cost-effective option for a variety of applications including domestic and automotive applications.

4 Conclusions

In this paper, a modular three-phase buck-boost switched reluctance machine (SRM) drive system is proposed, where a three-phase SRM drive that is composed of three single-phase modules connected in parallel. The single-phase inverter modules are formed with a bidirectional buck-boost DC/DC converter and a cascaded H-bridge inverter. The DC/DC converter generates the rectified form of the desired phase voltage and the H-bridge inverter alternates and controls the polarity of the output voltage. With the help of this topology phase voltages are independently adjusted, resulting in a faster excitation and demagnetization; hence, a high-performance current regulation is achieved even with a longer dwell angle and two-phase excitation for a wide range of operating conditions. Therefore, the commutation performance is improved, a more balanced excitation than the traditional method is achieved. As a result, torque ripple is reduced and the average torque production is improved. Moreover, since the voltage is always regulated dynamically, large DC bus capacitors are no longer needed and the cost and the size of the drive system are reduced, as well as the capacitor induced losses are reduced. The comparative simulation studies performed in MATLAB®/Simulink® validated the superiority of the proposed system. The proposed SRM drive system reduced the torque ripple from 46.8 % to 6.3 %, increased the average torque from 20 Nm to 21.5 Nm at the rated speed and peak phase current condition. Extended simulation results for a wider speed range validated the proposed system's superiority in terms of torque ripple reduction, torque per ampere ratio, and output power improvements. A future study may focus on a torque distribution study to enhance the proposed drive system's performance at even higher levels.

Acknowledgment

This research is supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under Grant 118E172.

Conflict of Interest

The author has no conflicts of interest to declare.

Similarity (iThenticate): % 12

References

- [1] R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications. CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 2001.
- [2] B. Bilgin, J. W. Jiang, and A. Emadi, Switched Reluctance Motor Drives. CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 2019.
- [3] Y. Yasa, D. Tekgun, Y. Sozer, J. Kutz, and J. Tylanda, Effect of distributed airgap in the stator for acoustic

- noise reduction in switched reluctance motors, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), page 633-639, Tampa, FL, USA, 26-30 March 2017.
- [4] T. Husain, Y. Sozer, and I. Husain, DC-Assisted bipolar switched reluctance machine, IEEE Trans. Ind. Appl., 53 (3), 2098–2109, 2017, <https://doi.org/10.1109/tia.2017.2675363>.
- [5] Y. Sozer and D. A. Torrey, Optimal turn-off angle control in the face of automatic turn-on angle control for switched-reluctance motors, IET Electr. Power Appl., 1 (3), 395, 2007, <https://doi.org/10.1049/iet-epa:20060412>.
- [6] H.-N. Huang, K.-W. Hu, and C.-M. Liaw, Switch-mode rectifier fed switched-reluctance motor drive with dynamic commutation shifting using DC-link current, IET Electr. Power Appl., 11 (4), 640–652, 2017, <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2016.0783>.
- [7] T. Husain, A. Elrayyah, Y. Sozer, and I. Husain, Unified control for switched reluctance motors for wide speed operation. IEEE Trans. Ind. Electron., 66 (5), 3401–3411, 2019, <https://doi.org/10.1109/tie.2018.2849993>.
- [8] T. Husain, A. Elrayyah, Y. Sozer, and I. Husain, Flux-weakening control of switched reluctance machines in rotating reference frame. IEEE Trans. Ind. Appl., 52 (1), 267–277, 2016, <https://doi.org/10.1109/tia.2015.2469778>.
- [9] H. C. Chang and C. M. Liaw, Development of a compact switched-reluctance motor drive for EV propulsion with voltage-boosting and PFC charging capabilities. IEEE Trans. Veh. Technol., 58 (7), 3198–3215, 2009, <https://doi.org/10.1109/TVT.2009.2017546>.
- [10] C. Gan, J. Wu, Y. Hu, S. Yang, W. Cao, and J. M. Guerrero, New integrated multilevel converter for switched reluctance motor drives in plug-in hybrid electric vehicles with flexible energy conversion. IEEE Trans. Power Electron., 32 (5), 3754–3766, 2017, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2583467>.
- [11] K. W. Hu, P. H. Yi, and C. M. Liaw, An EV SRM Drive powered by battery/supercapacitor with G2V and V2H/V2G capabilities. IEEE Trans. Ind. Electron., 62 (8), 4714–4727, 2015, <https://doi.org/10.1109/tie.2015.2396873>.
- [12] J. W. Ahn, S. J. Park, and D. H. Lee, Hybrid excitation of SRM for reduction of vibration and acoustic noise. IEEE Trans. Ind. Electron., 51 (2), 374–380, 2004, <https://doi.org/10.1109/tie.2004.825227>.
- [13] A. K. Jain and N. Mohan, SRM power converter for operation with high demagnetization voltage. IEEE Trans. Ind. Appl., 41 (5), 1224–1231, 2005, <https://doi.org/10.1109/TIA.2005.853390>.
- [14] K. Tomczewski and K. Wrobel, Improved C-dump converter for switched reluctance motor drives, IET Power Electron., 7 (10), 2628–2635, 2014, <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2013.0738>.
- [15] K.-W. Hu, J.-C. Wang, T.-S. Lin, and C.-M. Liaw, A switched-reluctance generator with interleaved

- interface DC–DC converter. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 30 (1), 273–284, 2015, <https://doi.org/10.1109/tec.2014.2333585>.
- [16] Y. H. Yoon, S. H. Song, T. W. Lee, C. Y. Won, and Y. R. Kim, High performance switched reluctance motor drive for automobiles using C-dump converters. *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, 2, 969–974, 2004, <https://doi.org/10.1109/isie.2004.1571945>.
- [17] A. K. Jain and N. Mohan, SRM power converter for operation with high demagnetization voltage, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 41 (5), 1224–1231, 2005, <https://doi.org/10.1109/tia.2005.853390>.
- [18] R. Krishnan, S. Y. Park, and K. Ha, Theory and operation of a four-quadrant switched reluctance motor drive with a single controllable switch - The lowest cost four-quadrant brushless motor drive. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 41 (4), 1047–1055, 2005, <https://doi.org/10.1109/tia.2005.851019>.
- [19] H. Chang and C. Liaw, An integrated driving/charging switched reluctance motor drive using three-phase power module. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 58 (5), 1763–1775, 2011, <https://doi.org/10.1109/tie.2010.2051938>.
- [20] Q. Sun, J. Wu, C. Gan, J. Si, J. Guo, and Y. Hu, Cascaded multiport converter for SRM-based hybrid electrical vehicle applications, *IEEE Trans. Power Electron.*, 34 (12), 11940–11951, 2019, <https://doi.org/10.1109/tpel.2019.2909187>.
- [21] T. Kim, W. Qiao, and L. Qu, Power electronics-enabled self-X multicell batteries: A design toward smart batteries, *IEEE Trans. Power Electron.*, 27 (11), 4723–4733, 2012, <https://doi.org/10.1109/tpel.2012.2183618>.
- [22] L. Liu, H. Li, S.-H. Hwang, and J.-M. Kim, An energy-efficient motor drive with autonomous power regenerative control system based on cascaded multilevel inverters and segmented energy storage, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 49 (1), 178–188, 2013, <https://doi.org/10.1109/tia.2012.2229687>.
- [23] H. Li, B. Bilgin, and A. Emadi, An improved torque sharing function for torque ripple reduction in switched reluctance machines. *IEEE Trans. Power Electron.*, 34 (2), 1635–1644, 2019, <https://doi.org/10.1109/tpel.2018.2835773>.
- [24] J. Ye, B. Bilgin, and A. Emadi, An offline torque sharing function for torque ripple reduction in switched reluctance motor drives. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 30 (2), 726–735, 2015, <https://doi.org/10.1109/tec.2014.2383991>.
- [25] T. Husain, A. Elrayyah, Y. Sozer, and I. Husain, Flux-weakening control of switched reluctance machines in rotating reference frame. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 52 (1), 267–277, 2016, <https://doi.org/10.1109/tia.2015.2469778>.
- [26] J. Sun, G.-Z. Cao, S.-D. Huang, Y. Peng, J. He, and Q.-Q. Qian, Sliding-mode-observer-based position estimation for sensorless control of the planar switched reluctance motor. *IEEE Access*, 7, 61034–61045, 2019, <https://doi.org/10.1109/access.2019.2913702>.
- [27] H. N. Huang, K. W. Hu, Y. W. Wu, T. L. Jong, and C. M. Liaw, A current control scheme with back emf cancellation and tracking error adapted commutation shift for switched-reluctance motor drive. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 63 (12), 7381–7392, 2016, <https://doi.org/10.1109/tie.2016.2594168>.
- [28] M. Pittermann, J. Fort, J. Diesl, and V. Pavlicek, Converters for switched reluctance motor - topology comparison, Proc. 2018 18th Int. Conf. Mechatronics - Mechatronika, Brno, Czech Republic, 5-7 Dec. 2018.





Yer altına gömülü üç boyutlu cisimlerin bozulmuş born iteratif yöntemi ile tespit edilmesi

Reconstruction of three dimensional objects buried underground by distorted born iterative method

Rıza Erhan Akdoğan^{1,*} , Kamil Fatih Dilaver¹ , Tülün Durukan¹ ,
Yasemin Altuncu¹ 

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

Özet

Bu çalışmada, yer altında gömülü üç boyutlu (3B) cisimlerin geometrik ve elektriksel özelliklerinin yer üstünden yapılan ölçümlerle belirlenmesine yönelik bir elektromanyetik ters saçılma problemi ele alınmıştır. Problemin çözümü bozulmuş born iteratif yöntemi (Distorted Born Iterative Method - DBIM) kullanılarak yapılmıştır. Hava ve toprak ortamlarını birbirinden ayıran ara yüzey yukarıdan bir elektromanyetik dalga kaynağı ile aydınlatılmış ve yine yukarıdaki bir bölge boyunca elektrik alan ölçümleri yapılmıştır. Elektromanyetik dalga kaynağı olarak peş peşe farklı geliş açılarıyla gönderilen düzlem dalgalar kullanılırken ölçümler bir düzlem boyunca birden fazla noktada alınmıştır. İlgilenilen hacimsel bir bölgede bulunan cisimlerin geometrik ve elektriksel özellikleri, bu bölgenin kompleks dielektrik sabitinin belirlenmesi sonucu ortaya çıkarılmaktadır. Sumulan yöntemin, yer altındaki rastgele geometri üç boyutlu nesnelerin tespitindeki başarısını göstermek için çeşitli sayısal sonuçlar sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, bozulmuş born iteratif yönteminin düşük ve orta düzeyde kontrasta sahip cisimlerin hem geometrik hem de dielektrik özelliklerinin belirlenmesinde oldukça başarılı olduğunu ortaya koymaktadır. Yüksek kontrastlı cisimlerin ise yeri ve geometrik özellikleri başarıyla bulunurken bağıl dielektrik sabiti ve iletkenlikleri gerçek değerlerinden daha düşük seviyelerde bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Ters saçılma, Gömülü cisim, Bozulmuş born iteratif yöntemi

1 Giriş

Toprak altına gömülü cisimlerin geometrik ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesine yönelik ters elektromanyetik saçılma problemleri, yer altındaki madenlerin, fay hatlarının, arkeolojik kalıntıların, tünellerin ve mayınların tespit edilmesi gibi çok geniş uygulama alanlarına sahiptir. Yanına yaklaşılabilen bir cismin, geometrik ve elektriksel özelliklerinin uzaktan yapılan ölçüm verileri kullanılarak belirlenmesi yeniden yapılandırma (rekonstrüksiyon) olarak ifade edilir.

Bir ters saçılma uygulamasında ele alınan problem geometrisinin ve elektriksel özelliklerinin belirli bir eksen boyunca değişmediği durumlarda problem iki boyutlu skaler probleme indirgenebilmekte ve çözüm hem matematiksel hem de hesaplama açısından nispeten basitleşebilmektedir [1,2]. İki boyutlu yaklaşımların geçerli olduğu pek çok başarılı çalışma olmakla birlikte gerçek hayat problemlerini

Abstract

In this study, an electromagnetic inverse scattering problem to reveal the geometric and dielectric properties of three-dimensional (3D) objects buried underground by measuring from above is discussed. The solution of the problem is achieved by using the distorted born iterative method (DBIM). The interface separating the air and soil media is illuminated from above with an electromagnetic wave source and electric field measurements are conducted across a region above. While plane waves are used as an electromagnetic wave source, which are sent consecutively with different arrival angles, measurements are taken at more than one point along a plane. The geometric and electrical properties of objects in a volumetric region of interest are revealed by determining the complex dielectric constant of this region. Various numerical results are presented to show the success of the presented method in detecting three-dimensional objects with arbitrary geometry buried into earth. The results show that the distorted born iterative method is very successful in determining both geometric and dielectric properties of objects with low and medium contrast. While the location and geometric properties of high contrast objects are successfully found, the relative dielectric constants and conductivities are found to be lower than their real values.

Keywords: Inverse scattering, Buried object, Distorted Born Iterative Method

daha iyi modellemek adına problemleri üç boyutlu (3B) olarak ele almak daha gerçekçi bir yaklaşım olacaktır [3,4]. Tespit edilmeye çalışılan cismin özelliklerinin yanında cismin içinde bulunduğu ortamın özellikleri de ters problemlerin zorluk derecesini belirleyen önemli kriterlerden biridir. Örneğin sınırsız, homojen ortamdaki cisim ile tabakalı ortamdaki cismin tespit edilmesi arasında büyük bir fark söz konusudur. Birincisinde özellikleri belirlenmeye çalışılan cismin etrafında dolanarak her yönden aydınlatılabilme ve elektrik alanı her yönden ölçülebilme imkânı varken [5-7] ikincisinde hem uyarma hem de ölçme yalnızca üst tabakadan yapılabilmektedir. Böyle bir durumda, ölçüm verilerindeki yetersizlik veya küçük hatalar ters problemin çözümünde belirsizlik ve büyük hatalara yol açabilmekte ve tek çözüm bulmayı zorlaştırmaktadır [8-10]. Bu tür problemler kötü kurulmuş (ill-posed) problemler olarak adlandırılır ve ters saçılma problemleri çoğunlukla bu sınıfa girerler [11].

* Sorumlu yazar / Corresponding author: Rıza Erhan Akdoğan, e-posta / e-mail: ariza@ohu.edu.tr (R.E. Akdoğan)
Geliş / Received: 20.11.2020 Kabul / Accepted: 23.12.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021
doi: 10.28948/ngmuh.828944

Literatürde ters saçılma problemlerinin çözümü için geliştirilmiş çok sayıda başarılı yöntem bulunmaktadır. Bunlar arasında Born yaklaşımı (Born Approximation-BA) ve Rythov yaklaşımı (Rythov Approximation-RA) gibi doğrusal yöntemler çoklu saçılma etkilerini göz ardı ettiğinden yalnızca zayıf saçıcı cisimlere ilişkin ters saçılma problemlerinin çözümünde etkindirler [12]. Oysaki ters saçılma problemleri yapısı gereği çoğunlukla doğrusal değildir (nonlineerdir). Bu özellikleri ters saçılma problemlerinde güvenilir, kararlı ve hesaplama açısından etkin çözümler bulmayı zorlaştırmaktadır. Bir cismin saçıcılık derecesi, cisim ile içinde bulunduğu ortam arasındaki dielektrik özellikler bakımından var olan farka yani kontrasta bağlıdır. Dolayısıyla yüksek kontrastlı bir cisim yüksek saçıcılık özelliğine sahiptir ve böyle cisimlerin doğru ve hassas bir şekilde yeniden yapılandırılması için doğrusal olmayan yöntemler kullanılmak zorundadır. Genel olarak, doğrusal olmayan yöntemler, yinelemeli (iteratif) yöntemler olup uygun şekilde tanımlanan bir hata fonksiyonunun iteratif minimizasyonuna dayanırlar. [13].

Born iteratif yöntemi (Born Iterative Method-BIM) ve bozulmuş BIM (Distorted Born Iterative Method-DBIM) yaygın olarak kullanılan doğrusal olmayan ters saçılma yöntemleridir [14-16]. BIM'de, integral denklem içinde yer alan Green fonksiyonu her iterasyon adımında sabit tutulurken arka plan alanı için born yaklaşımı kullanılır. Buna karşın DBIM'de saçıcı cisim homojen olmayan zemin uzayında bir bozucu olarak kabul edilerek bağlı dielektrik sabitindeki fark ve Green fonksiyonu her iterasyon adımında güncellenir [17]. Bunlara ilaveten kontrast kaynak inversiyon (Contrast Source Inversion - CSI) [18] ve alt uzay optimizasyon yöntemi (Subspace Optimization Method - SOM)'de [19] sıklıkla kullanılan ve iyi sonuç veren yöntemlerdendir.

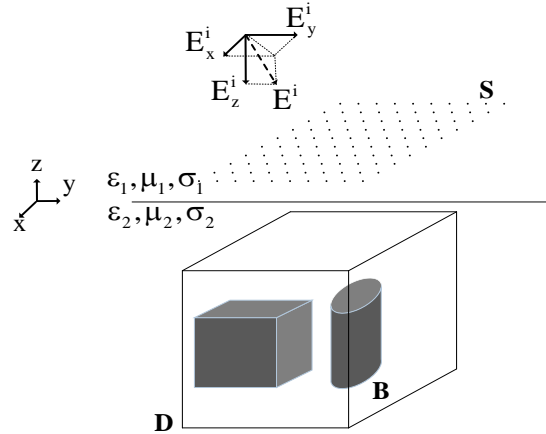
Bu çalışmada, yer altında gömülü 3B cisimlerin geometrik ve elektriksel özelliklerinin yer üstünden yapılan ölçümlerle belirlenmesine yönelik bir elektromanyetik ters saçılma problemi çözülmüştür. Problemin çözümü doğrusal olmayan bir ters saçılma algoritması olan DBIM algoritması kullanılarak yapılmıştır. Tüm formülasyonlarda zaman faktörü $e^{-i\omega t}$ olarak alınmıştır. Makalenin kalan kısmının organizasyonu şu şekildedir. 2. Bölümde problem tanımlanmış ve ters problemin DBIM yöntemi ile sayısal olarak çözümünden bahsedilmiştir. 3. Bölümde farklı konfigürasyonlar için sayısal sonuçlar sunulmuştur. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2 Materyal ve metod

Problemin geometrisi Şekil 1'de verilmiştir. Ele alınan geometride uzay, $z = 0$ düzlemi ile elektriksel özellikleri birbirinden farklı iki yarı sonsuz uzaya ayrılmış durumdadır. Üst yarı uzay, $\epsilon_1 = \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ [F/m] dielektrik sabiti ve $\sigma_1=0$ öz iletkenlik katsayısı ile karakterize edilen hava, alt yarı uzay ise $\epsilon_2 = \epsilon_{r2}\epsilon_0$ dielektrik sabiti ve σ_2 öz iletkenlik katsayısı ile karakterize edilen kuru toprak olarak alınmıştır. Hem hava hem de kuru toprak manyetik olmayan ortamlar olup manyetik geçirgenlikleri boş uzayın manyetik geçirgenliği olan $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]'a eşittir.

Burada ele alınan problem, arka plan olarak adlandıracağımız bu geometrinin alt yarı uzayında bulunan olası cisimlerin geometrik ve elektriksel özelliklerini ortaya çıkartmaktır. Bu amaç doğrultusunda, bir görüntüleme bölgesi belirlenir ve bu bölge boyunca kompleks dielektrik sabitini belirlemek için bir ters saçılma algoritması uygulanır. Şekil üzerinde D ile gösterilen bu hacimsel bölge yeniden yapılandırma bölgesi olarak da adlandırılır. Çünkü, ters problem çözümünde bu bölgenin kompleks dielektrik sabiti değeri için bir başlangıç değeri belirlenir ve iteratif olarak bu değer güncellenir yani bölge yeniden yapılandırılır.

D bölgesi bir elektromanyetik dalga kaynağı ile aydınlatılır ve ölçüm bölgesi olarak adlandırılan ve şekil üzerinde S ile gösterilen bir bölgede elektromanyetik alan ölçümleri yapılır. D içerisinde herhangi bir cisim yoksa bu bölge elektriksel olarak alt yarı uzaya yani toprağa eşdeğer olacak ve S bölgesinde ölçülen toplam alan \mathbf{E}^{top} , elektromanyetik dalga kaynağından doğrudan gelen alan ile $z = 0$ düzlemindeki hava-toprak ara yüzeyinden yansıyan alanların toplamına eşit olacaktır. Herhangi bir gömülü cismin mevcut olmadığı durumdaki bu alan, arka plan alanı olarak adlandırılacak ve \mathbf{E}^b ile gösterilecektir.



Şekil 1. Problemin geometrisi

Buna karşın, D içerisinde alt yarı uzayınkinden farklı elektriksel özelliklere sahip cisimler bulunuyorsa bu durumda toplam alana, bu cisimlerden saçılan alan da katkı sağlayacaktır. Gömülü cisimlerden saçılan alan \mathbf{E}^s ile gösterilecek olursa bu durumda toplam elektrik alan $\mathbf{E}^{top}(\mathbf{r})$,

$$\mathbf{E}^{top}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}^b(\mathbf{r}) + \mathbf{E}^s(\mathbf{r}) \quad (1)$$

olacaktır. O halde en genel halde herhangi bir $\mathbf{r}(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$ noktasındaki toplam alan için

$$\mathbf{E}^{top}(\mathbf{r}) = \begin{cases} \mathbf{E}^b(\mathbf{r}); D \text{ içinde cisim yoksa} \\ \mathbf{E}^b(\mathbf{r}) + \mathbf{E}^s(\mathbf{r}); D \text{ içinde cisim varsa} \end{cases} \quad (2)$$

yazmak uygun olacaktır. Hem $\mathbf{E}^{top}(\mathbf{r})$ ve hem de $\mathbf{E}^b(\mathbf{r})$ homojen Helmholtz denklemini sağlayacaktır.

$$\nabla^2 \mathbf{E}^{top}(\mathbf{r}) + k^2(\mathbf{r})\mathbf{E}^{top}(\mathbf{r}) = 0 \quad (3)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E}^b(\mathbf{r}) + k_b^2(\mathbf{r})\mathbf{E}^b(\mathbf{r}) = 0 \quad (4)$$

Denklem (1) göz önünde bulundurularak bu iki denklemden saçılan alan için

$$\nabla^2 \mathbf{E}^s(\mathbf{r}) + k_b^2 \mathbf{E}^s(\mathbf{r}) = -k_b^2 \left(\frac{k^2(\mathbf{r}) - k_b^2}{k_b^2} \right) \mathbf{E}^{top}(\mathbf{r}) \quad (5)$$

denklemleri türetilir. Burada $\omega=2\pi f$ açısal frekans olmak üzere $k_b^2 = \omega^2 \varepsilon_{rb} \varepsilon_0 \mu_0 + \sigma_b \mu_0$ arka plandaki dalga sayısının karesi, $k^2(\mathbf{r}) = \omega^2 \varepsilon_r(\mathbf{r}) \varepsilon_0 \mu_0 + \sigma(\mathbf{r}) \mu_0$ ise en genel durumda herhangi bir $\mathbf{r}(x, y, z)$ noktasındaki dalga sayısının karesidir. Denklem (5)'te eşitliğin sağ tarafında görülen parantez içindeki ifade kontrast fonksiyonu olarak adlandırılır ve \mathbf{r} noktasının elektriksel olarak arka plandan ne kadar farklı olduğunun bir ölçütüdür. $\chi(\mathbf{r})$ ile gösterilecek olan kontrast fonksiyonu,

$$\chi(\mathbf{r}) = \left(\frac{k^2(\mathbf{r})}{k_b^2} - 1 \right) = \left(\frac{\varepsilon(\mathbf{r})}{\varepsilon_b} - 1 \right) \quad (6)$$

ters problemin çözümüyle açığa çıkartılmak istenen büyüklüktür. Şekil 1'den de görüleceği üzere gömülü cisimlerin dışında kalan noktalarda $k(\mathbf{r}) = k_b$ olacağından kontrast fonksiyonu sıfır olacaktır. Yani $\chi(\mathbf{r})$, sadece $\mathbf{r} \in B$ 'de sıfırdan farklıdır. O halde, yeniden yapılandırma sonucu elde edilen $\chi(\mathbf{r})$ 'nin D 'deki dağılımı çizdirildiğinde, sıfırdan farklı gözükten yerlerin cisimlerin geometrisini belirleyeceği açıktır. Denklem (5)'teki eşitliğin sağında kaynak terimi olarak nokta kaynak fonksiyonu (Dirac delta) kullanılırsa elde edilen

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') + k_b^2 \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \bar{\mathbf{I}} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \quad (7)$$

biçimindeki dalga denkleminin uygun sınır koşulları altında çözümü probleme 3B Green fonksiyonunu verecektir. 3B problemler söz konusu olduğunda Green fonksiyonları diyadik formda yani tensör formunda olurlar. Diyadik form, keyfi kutuplu bir kaynağın oluşturduğu tüm alan bileşenlerini yazmanın en uygun ve pratik yoludur. Denklem (7)'de verilen dalga denkleminin çözümünden elde edilecek Green fonksiyonu $\bar{\mathbf{G}} = G_{xx} \hat{x}\hat{x} + G_{xy} \hat{x}\hat{y} + G_{xz} \hat{x}\hat{z} + G_{yx} \hat{y}\hat{x} + G_{yy} \hat{y}\hat{y} + G_{yz} \hat{y}\hat{z} + G_{zx} \hat{z}\hat{x} + G_{zy} \hat{z}\hat{y} + G_{zz} \hat{z}\hat{z}$ formunda olup elektrik alan diyadik Green fonksiyonudur [20, 21]. Burada $\bar{\mathbf{I}} = \hat{x}\hat{x} + \hat{y}\hat{y} + \hat{z}\hat{z}$ birim diyadik veya birim tensör olarak adlandırılır ve δ , Dirac delta fonksiyonunu göstermektedir. Buna göre, Green fonksiyonunun nokta kaynağın oluşturduğu elektrik alana eşit olduğunu söyleyebiliriz. Denklem (5)'teki asıl kaynak fonksiyonu için çözüm, nokta kaynak çözümlerinin süperpozisyonu cinsinden ifade edilebilir.

Yukarıda verilen vektörel dalga denkleminin çözümünden Green fonksiyonun türetilmesi hem matematiksel ve hem de hesaplama bakımından oldukça uzun ve yorucu işlemleri gerektirir. Denklem analitik

çözümü olmayıp Green fonksiyonunun diyadik bileşenlerinin bulunması yavaş yakınsayan Sommerfeld integrallerinin sayısal çözümünü gerektir. Bu çalışmanın esas konusu olmadığından burada diyadik Green fonksiyonun türetilmesine yer verilmeyecektir. İki parçalı uzay diyadik Green fonksiyonun detaylı çıkarımı [22]'de verilmiştir. Denklem (5) ve (7) kullanılarak saçılan alan için

$$\mathbf{E}^s(\mathbf{r}) = k_b^2 \int_D \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \chi(\mathbf{r}') \mathbf{E}^{top}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (8)$$

integral denklemi türetilir. $\mathbf{E}^s(\mathbf{r})$, D bölgesinin bir elektromanyetik dalga ile aydınlatılması durumunda D içindeki cisimlerin \mathbf{r} noktasında oluşturacağı saçılan alandır. İntegralin içinde görülen $\mathbf{E}^{top}(\mathbf{r}')$ ise D içindeki toplam alandır ve bu alan

$$\mathbf{E}^{top}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}^b(\mathbf{r}) + k_b^2 \int_D \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \chi(\mathbf{r}') \mathbf{E}^{top}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (9)$$

integral denkleminde bulunur. Denklem (8) ve (9) ters saçılma probleminin çözümünde kullanılan iki temel denklemdir. Bu iki denklemin sayısal çözümünden görüntüleme bölgesindeki bilinmeyen kontrast fonksiyonu belirlenir. Sayısal çözüm için D bölgesi N_D adet kübik hücreye bölünerek ayrıklaştırılır. Ölçüm bölgesinde (S) toplam N_S noktada elektrik alan ölçümü yapıldığı varsayılırsa yukarıdaki integraller ayrık formda,

$$\sum_{i=1}^{N_S} \mathbf{E}^s(\mathbf{r}_i) = k_b^2 \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=1}^{N_D} \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \chi(\mathbf{r}_j) \mathbf{E}^{top}(\mathbf{r}_j) \Delta v_j; \quad (10)$$

$\mathbf{r}_i \in S; \mathbf{r}_j \in D; i=1,2,\dots,N_S; j=1,2,\dots,N_D$

ve

$$\sum_{i=1}^{N_D} \mathbf{E}^{top}(\mathbf{r}_i) - k_b^2 \sum_{i=1}^{N_D} \sum_{j=1}^{N_D} \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \chi(\mathbf{r}_j) \mathbf{E}^{top}(\mathbf{r}_j) \Delta v_j = \sum_{i=1}^{N_D} \mathbf{E}^b(\mathbf{r}_i) \quad (11)$$

$\mathbf{r}_i \in D; \mathbf{r}_j \in D; i=1,2,\dots,N_D; j=1,2,\dots,N_D$

olarak yazılabilir. Matris denkleme dönüştürülmüş bu denklemler daha kompakt bir formda,

$$\bar{\mathbf{E}}^s = \bar{\mathbf{G}}^s \text{diag}(\bar{\mathbf{X}}) \bar{\mathbf{E}}^{top} \quad (12)$$

ve

$$\bar{\mathbf{E}}^{top} = \left(\bar{\mathbf{I}} - \bar{\mathbf{G}}^D \text{diag}(\bar{\mathbf{X}}) \right)^{-1} \bar{\mathbf{E}}^b \quad (13)$$

olarak yazılabilir. Burada $\bar{\mathbf{I}}$, $3N_D \times 3N_D$ boyutunda birim matristir. $\bar{\mathbf{E}}^s$, $3N_S \times 1$ boyutunda bir vektör $\bar{\mathbf{E}}^{top}$ ve $\bar{\mathbf{E}}^b$ ise $3N_D \times 1$ boyutunda vektörlerdir. $\bar{\mathbf{G}}^S$, D içindeki her bir noktadan ölçüm bölgesi S 'deki noktalara tanımlı Green

fonksiyonu katsayılarından oluşan $3N_S \times 3N_D$ boyutunda bir matristir. $\bar{\mathbf{G}}^D$ ise D 'deki noktaların kendi içinde tanımlı Green katsayılarından oluşan $3N_D \times 3N_D$ boyutunda bir matristir. Bu matrisler,

$$\bar{\mathbf{G}}^S \text{ veya } \bar{\mathbf{G}}^D = k_b^2 \int_D \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}'; \mathbf{r} \in S \text{ veya } D \quad (14)$$

integralinin sayısal hesabından bulunurlar. $diag(\cdot)$ bir vektörü diyagonal bir matrise dönüştüren operatördür.

S 'de ölçülen saçılan verilerini kullanarak D 'deki kontrast fonksiyonu dağılımını belirlemekten ibaret olan ters saçılma problemi kötü kurulmuş bir problem olup [Denklem \(12\)](#)'den $\bar{\mathbf{X}}$ için uygun bir çözümünün bulunabilmesi için regülerizasyon gereklidir. Bu amaçla Tikhonov regülerizasyonu uygulanmıştır. Tikhonov regülerizasyon yönteminde,

$$f(\bar{\mathbf{X}}) = \|(\bar{\mathbf{G}}^S \bar{\mathbf{E}}) - \bar{\mathbf{E}}^s\|^2 + \alpha \|\bar{\mathbf{X}}\|^2 \quad (15)$$

fonksiyonunu minimize edecek $\bar{\mathbf{X}}$ aranır. Bu ifadede görülen α yeterince küçük pozitif bir sayı olup regülerizasyon parametresi olarak adlandırılır. Buradan $\bar{\mathbf{X}}$ için

$$\bar{\mathbf{X}} = [(\bar{\mathbf{G}}^S)^H \bar{\mathbf{G}}^S + \alpha \mathbf{I}]^{-1} (\bar{\mathbf{G}}^S)^H \bar{\mathbf{E}}^s \quad (16)$$

çözümü elde edilir. Denklemde görülen H Hermisyen anlamına gelmektedir. Bir sonraki bölümde burada tanımlanan ters saçılma probleminin bozulmuş born iteratif yöntemi ile çözümünden bahsedilecektir.

2.1 Bozulmuş born iteratif yöntemi (DBIM)

Bu yöntemde saçılan alan verisinden kontrast fonksiyonu $\bar{\mathbf{X}}$ 'yı elde etmek için iteratif (yinelemeli) bir ters saçılma algoritması kullanılır. Kontrast fonksiyonunun başlangıç değeri $\bar{\mathbf{X}}^0$, Born yaklaşımı kullanılarak elde edilir. Bu yaklaşımında cisimlerden saçılan alan ihmal edilerek toplam alanın arka plan alanına eşit olduğu yani $\mathbf{E}_q^{top}(\mathbf{r}') \approx \mathbf{E}_q^b(\mathbf{r}')$ kabul edilir. Bu kabul, yeniden yapılandırma bölgesinin başlangıç dielektrik özelliklerinin arka plan ile aynı alınması anlamına gelir. Buna göre $\bar{\mathbf{X}}^0$,

$$\bar{\mathbf{E}}^s = \bar{\mathbf{G}}^S diag(\bar{\mathbf{X}}^0) \bar{\mathbf{E}}^b \quad (17)$$

denkleminde [Denklem \(16\)](#)'da verilen Tikhonov regülerizasyonu uygulanarak hesaplanır. Bulunan cisim fonksiyonu, [Denklem \(13\)](#)'te yerine yazılır ve böylece yeniden yapılandırma bölgesindeki toplam alan düz problem çözümünden bulunarak güncellenir.

DBIM algoritmasında iterasyonun başlangıcında görüntüleme bölgesinin dielektrik geçirgenliği arka planı ile aynı kabul edilmekte ve her iterasyonda güncellenmektedir. Benzer olarak, Green fonksiyonu da başlangıçta arka plan Green fonksiyonu $\bar{\mathbf{G}}$ ile aynı alınmakta ve her iterasyonda güncellenmektedir. $\bar{\mathbf{G}}^g$ ile gösterilecek olan güncellenen Green fonksiyonu,

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{G}}^g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \\ = \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') + k_b^2 \int_D \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'') \chi(\mathbf{r}'') \bar{\mathbf{G}}^g(\mathbf{r}'', \mathbf{r}') d\mathbf{r}''; \quad (18) \\ \mathbf{r} \in S, \mathbf{r}' \in D, \mathbf{r}'' \in D \end{aligned}$$

integral denkleminin çözümünden bulunacaktır. Green fonksiyonunu güncellemek için gözlem noktalarına konumlandırılmış noktasal kaynağın yeniden yapılandırma bölgesinde meydana getirdiği toplam alan hesaplanır. Bu denklem kompakt formda

$$\bar{\mathbf{G}}^{Sg} = \left[(\mathbf{I} - \bar{\mathbf{G}}^D diag(\bar{\mathbf{X}}))^{-1} (\bar{\mathbf{G}}^S)^T \right]^T \quad (19)$$

biçiminde yazılabilir. Burada T transpozunu göstermektedir ve $\bar{\mathbf{G}}^{Sg}$ ayrık formdaki güncel Green fonksiyonu matrisidir.

Yöntemin bir sonraki adımında güncel kontrast fonksiyonu, toplam alan ve Green fonksiyonu [Denklem \(8\)](#)'de kullanılarak,

$$\mathbf{E}^{sh}(\mathbf{r}) = k_b^2 \int_D \bar{\mathbf{G}}^{Sg}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \chi(\mathbf{r}') \mathbf{E}^{top}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (20)$$

ölçüm noktalarındaki saçılan alan hesaplanır. Hesaplama sonucu elde edilen saçılan alan \mathbf{E}^{sh} ile gösterilmektedir. Ölçülerek elde edilen gerçek saçılan alan verisi ile hesap yoluyla elde edilen saçılan alan arasındaki fark saçılan alan,

$$\partial \mathbf{E}^s(\mathbf{r}) = \mathbf{E}^s(\mathbf{r}) - \mathbf{E}^{sh}(\mathbf{r}) \quad (21)$$

[Denklem \(8\)](#)'de kullanılırsa fark saçılan alan için

$$\partial \mathbf{E}^s(\mathbf{r}) = k_b^2 \int_D \bar{\mathbf{G}}^{Sg}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \partial \chi(\mathbf{r}') \mathbf{E}^{top}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (22)$$

integral denklemini elde edilir. Bu denklem ise kompakt formda,

$$\partial \bar{\mathbf{E}}^s = \bar{\mathbf{G}}^{Sg} diag(\partial \bar{\mathbf{X}}) \bar{\mathbf{E}}^{top} \quad (23)$$

olarak yazılır. Buradan hesaplanan fark cisim fonksiyonu bir önceki iterasyon adımıdaki cisim fonksiyonuna eklenerek

$$\bar{\mathbf{X}}_{n+1} = \bar{\mathbf{X}}_n + \partial \bar{\mathbf{X}}_n \quad (24)$$

şeklinde kontrast fonksiyonu güncellenir ve

$$Hata = \frac{\sum_{m=1}^{N_s} |\mathbf{E}^s(\mathbf{r}_m) - \mathbf{E}_n^{sh}(\mathbf{r}_m)|^2}{\sum_{m=1}^{N_s} |\mathbf{E}^s(\mathbf{r}_m)|^2} \leq \epsilon \quad (25)$$

ile tanımlanan bağıl hata değeri önceden belirlenen küçük bir ϵ değerine veya iterasyon sayısı n başlangıçta belirlenen bir maksimum iterasyon sayısı N_{max} 'a ulaşmaya kadar iterasyona devam edilir. Bu ifadede görülen $\mathbf{E}^s(\mathbf{r}_m)$, ölçüm bölgesi üzerindeki \mathbf{r}_m noktasında ölçülen saçılan alan değeri,

$\mathbf{E}_n^{sh}(\mathbf{r}_m)$ ise n 'yinci iterasyon adımında ölçüm bölgesi üzerindeki \mathbf{r}_m noktasında hesaplanan saçılan alan değeridir. $q = 1, 2, \dots, N_q$ geliş açısı sayısını göstermek üzere toplam N_q farklı geliş açısı için aynı prosedür uygulanır ve her bir açı için elde edilen kontrast fonksiyonlarının ortalaması alınarak sonuç kontrast fonksiyonu,

$$\bar{\mathbf{X}} = \frac{\sum_{q=1}^{N_q} \bar{\mathbf{X}}_q}{N_q} \quad (26)$$

ifadesinden elde edilir. Herhangi bir geliş açısı için DBIM algoritmasına ait işlem adımları şu şekilde özetlenebilir.

DBIM algoritması:

- 1: Hata toleransı ϵ 'u belirle
- 2: Maksimum iterasyon sayısı N_{max} 'ı belirle
- 3: $n = 0$
- 4: **while 1 do**
- 5: Başlangıç değerlerini seç: Denklem (17)'de $\mathbf{E}_q^{top} \approx \mathbf{E}_q^b$ kullanarak $\bar{\mathbf{X}}^0$ 'ı bul
- 6: $\bar{\mathbf{X}}^0$ 'ı Denklem (13)'te kullanarak $\bar{\mathbf{E}}^{top}$ 'u hesapla
- 7: Denklem (20)'yi kullanarak $\bar{\mathbf{E}}^{sh}$ 'i hesapla
- 8: $\partial \bar{\mathbf{E}}^s = \bar{\mathbf{E}}^s - \bar{\mathbf{E}}^{sh}$ 'i Denklem (23)'te kullanarak $\partial \bar{\mathbf{X}}_n$ 'yi hesapla
- 9: $\bar{\mathbf{X}}_{n+1} = \bar{\mathbf{X}}_n + \partial \bar{\mathbf{X}}_n$ 'yi hesapla
- 10: Denklem (25)'ten Hata'yı hesapla,
- 11: $n = n + 1$
- 12: **if Hata $\leq \epsilon$ or $n \geq N_{max}$ then**
- 13: **break**
- 14: **end if**
- 15: **end while**

3 Bulgular ve tartışma

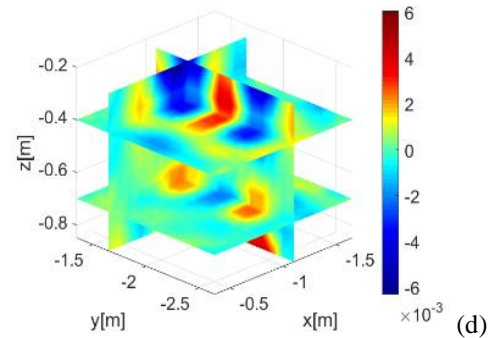
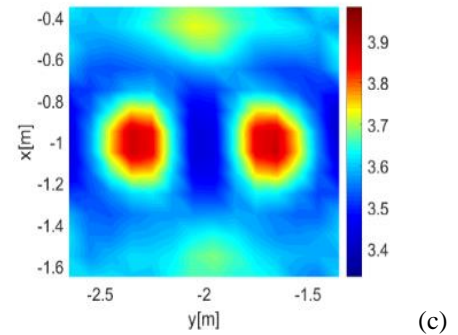
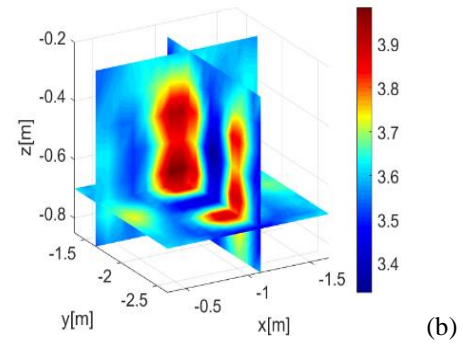
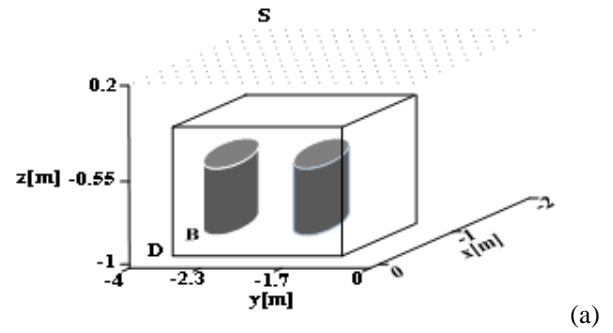
Bu bölümde DBIM kullanılarak yer altına gömülü 3B cisimlerin yeniden yapılandırmasına ilişkin sayısal örnekler sunulmuştur. Tüm örneklerde çalışma frekansı 300 MHz olarak alınmıştır. Üst yarı uzay hava ($\epsilon_1 = \epsilon_{r1}, \sigma_1 = 0$), alt yarı uzay ise parametreleri ise $\epsilon_2 = (2 \sim 4)\epsilon_0$ ve $\sigma_2 = 10^{-4} \sim 10^{-6} [S/m]$ [23] civarında olan kuru toprak olarak belirlenmiştir. Yeniden yapılandırma bölgesi 100 farklı geliş açısında düzlem dalgı ile ardışık olarak aydınlatılmış ve saçılan alanlar ara yüzeyden 0,2m yukarıda, 200 farklı noktada, ardışık iki nokta arası 0.1m olacak şekilde düzlemsel bir bölgede ölçülmüştür. İterasyon durdurma kriteri $\epsilon = 10^{-6}$ alınmıştır. Elektrik alan ölçüm verileri düz problemin moment yöntemi ile çözümünden elde edilen sentetik verilerdir. D bölgesindeki düzlemsel kesitler boyunca bağıl dielektrik geçirgenlik $\epsilon_r(\mathbf{r})$ ve iletkenlik $\sigma(\mathbf{r})$ dağılımları çizdirilmiştir. Ters problem çözümüyle yeniden yapılandırma bölgesindeki $\chi(\mathbf{r})$ dağılımı elde edildikten sonra bu bölgedeki bağıl dielektrik geçirgenlik ve iletkenlik değişimi Denklem (6) kullanılarak sırasıyla,

$$\epsilon_r(\mathbf{r}) = \text{real}[(\chi(\mathbf{r}) + 1)\epsilon_{rb}] \quad (27)$$

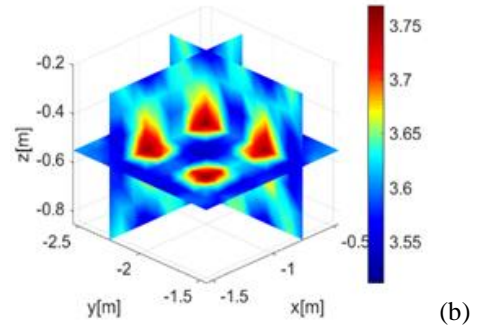
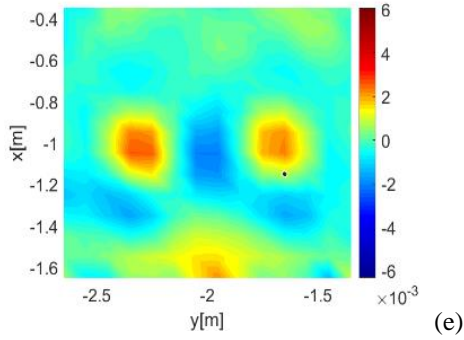
ve

$$\sigma(\mathbf{r}) = \text{imag}[(\chi(\mathbf{r}) + 1)\epsilon_b] \omega \quad (28)$$

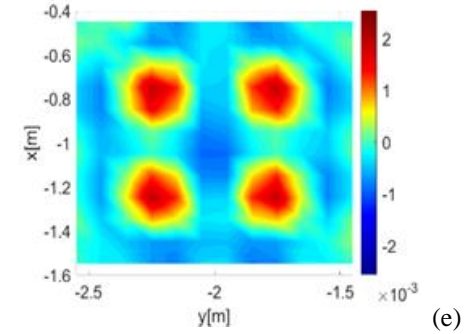
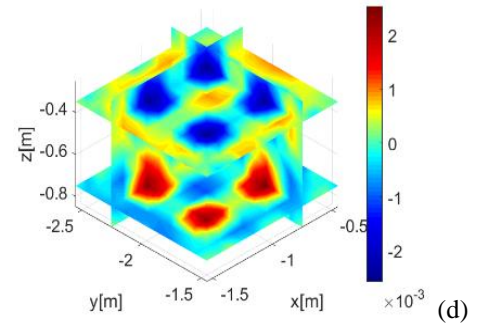
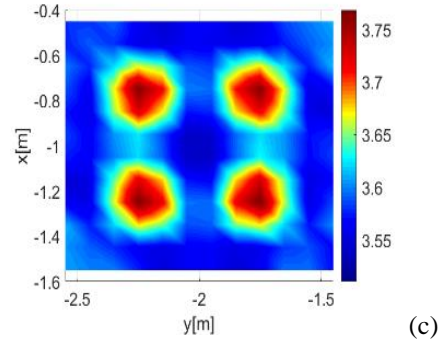
denklemlerinden bulunur.



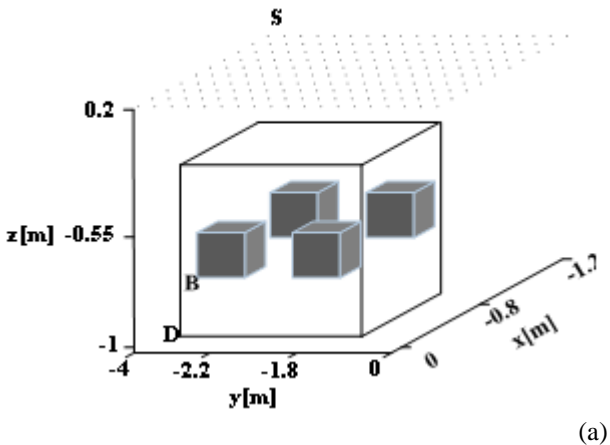
Şekil 2. $\epsilon_{rB} = 4.5$, iletkenliği $\sigma_B = 10^{-3} (S/m)$ olan iki silindirik cismin yeniden yapılandırması (a) orijinal geometri (b) $x = -1.1$, $y = -1.3$, $z = -0.7$ düzlemlerindeki $\epsilon_r(\mathbf{r})$ dağılımı (c) $y = -0.7$ düzlemindeki $\epsilon_r(\mathbf{r})$ dağılımı (d) $x = -1.1$, $y = -1.3$, $z = -0.7$ düzlemlerindeki $\sigma(\mathbf{r})$ dağılımı (e) $y = -0.7$ düzlemindeki $\sigma(\mathbf{r})$ dağılımı



Şekil 2.(devam) $\epsilon_{rB} = 4.5$, iletkenliği $\sigma_B = 10^{-3}$ (S/m) olan iki silindirik cismin yeniden yapılandırması (a) orijinal geometri (b) $x = -1.1, y = -1.3, z = -0.7$ düzlemlerindeki $\epsilon_r(r)$ dağılımı (c) $y = -0.7$ düzlemindeki $\epsilon_r(r)$ dağılımı (d) $x = -1.1, y = -1.3, z = -0.7$ düzlemlerindeki $\sigma(r)$ dağılımı (e) $y = -0.7$ düzlemindeki $\sigma(r)$ dağılımı



İlk örnekte kuru toprağın elektriksel parametreleri $\epsilon_2 = 3,3\epsilon_0$ ve $\sigma_2 = 10^{-6}$ (S/m) olarak alınmış ve yükseklikleri $0.7m$ ve yarıçapları $0.2m$ olan iki silindirik cismin bu ortama gömülü olduğu varsayılmıştır. Silindirik cisimlerin merkez koordinatları $(-1, -1.7, -0.55)$ ve $(-1.2, 3, -0.55)$ 'dir. Cisimlerin her ikisinin de bağıl dielektrik geçirgenliği $\epsilon_B = 4.5\epsilon_0$, iletkenlik katsayısı $\sigma_B = 10^{-3}$ (S/m)'dir. Yeniden yapılandırma bölgesinin merkezi $(-1, -2, -0.55)$ ve boyutları $1.4m \times 1.4m \times 0.7m$ olarak alınmıştır. Bu konfigürasyon için DBIM algoritması kullanılarak elde edilen yeniden yapılandırma sonuçları Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2a'da ele alınan örneğe ait orijinal geometri verilmiştir. Şekil 2b ve c'de yeniden yapılandırma bölgesindeki elde edilen bağıl dielektrik geçirgenlik dağılımının farklı kesit düzlemlerindeki çizimleri görülmektedir. Şekil 2d ve e'de ise aynı düzlemlerdeki iletkenlik dağılımı görülmektedir. Bu şekillerden hem cismin geometrisi hem de dielektrik özelliklerinin yüksek doğrulukla elde edildiği görülmektedir.

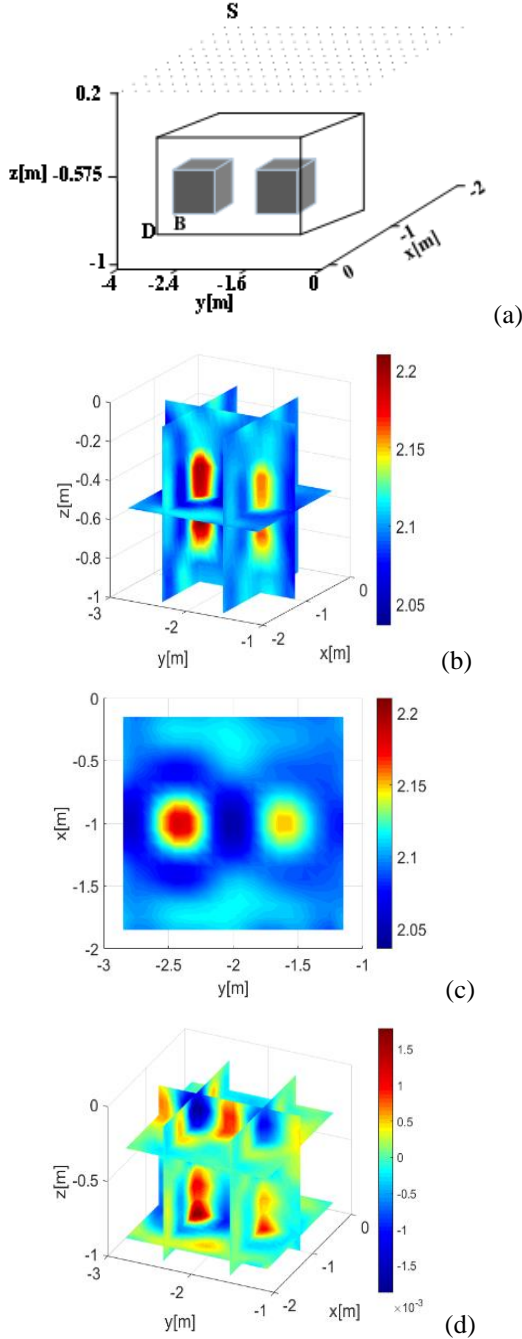


Şekil 3.(devam) $\epsilon_{rB} = 4.5$, $\sigma_B = 10^{-3}$ (S/m) olan dört kübik cisim yeniden yapılandırması (a) orijinal geometri (b) $x = -0.7, y = -2.2, z = -0.55$ düzlemlerindeki $\epsilon_r(r)$ dağılımı (c) $y = -0.55$ düzlemindeki $\epsilon_r(r)$ dağılımı (d) $x = -0.7, y = -2.2, z = -0.7$ düzlemlerindeki $\sigma(r)$ dağılımı (e) $y = -0.55$ düzlemindeki $\sigma(r)$ dağılımı

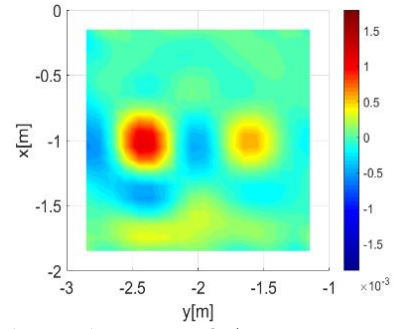
Şekil 3. $\epsilon_{rB} = 4.5$, $\sigma_B = 10^{-3}$ (S/m) olan dört kübik cisim yeniden yapılandırması (a) orijinal geometri (b) $x = -0.7, y = -2.2, z = -0.55$ düzlemlerindeki $\epsilon_r(r)$ dağılımı (c) $y = -0.55$ düzlemindeki $\epsilon_r(r)$ dağılımı (d) $x = -0.7, y = -2.2, z = -0.7$ düzlemlerindeki $\sigma(r)$ dağılımı (e) $y = -0.55$ düzlemindeki $\sigma(r)$ dağılımı

İkinci örnekte de kuru toprağın elektriksel parametreleri ve gömülü cisimlerin elektriksel parametreleri bir önceki örnekle aynı alınmıştır. Ancak bu kez gömülü cisimler bir ayrıtının uzunluğu $0.2m$ olan dört tane küpten oluşmaktadır. Cisimlerin merkez noktaları $(-1.2, -1.8, -0.55)$,

$(-1.2, -2.2, -0.55)$, $(-0.8, -1.8, -0.55)$ ve $(-0.8, -2.2, -0.55)$ 'dir. Merkezi $(-1, -2, -0.55)$ noktasında bulunan $1.2m \times 1.2m \times 0.7m$ 'lik hacimsel bir bölge yeniden yapılandırma bölgesi olarak kullanılmıştır. Elde edilen yeniden yapılandırma sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Yine bu örnek için elde edilen sonuçlar incelendiğinde hem cisimlerin bağıl geçirgenlik hem de iletkenlik değerlerinin başarılı bir şekilde elde edilebildiği görülmektedir.



Şekil 4. $\epsilon_{rB1} = 2.5$ ve $\epsilon_{rB2} = 2.3$, $\sigma_B = 10^{-3}$ (S/m) olan iki kübik cismin yeniden yapılandırması (a) orijinal geometri (b) farklı kesitlerdeki $\epsilon_r(\mathbf{r})$ dağılımı (c) $y = -0.5$ düzlemindeki $\epsilon_r(\mathbf{r})$ dağılımı (d) farklı kesitlerdeki $\sigma(\mathbf{r})$ dağılımı (e) $y = -0.7$ düzlemindeki $\sigma(\mathbf{r})$ dağılımı



Şekil 4.(devam) $\epsilon_{rB1} = 2.5$ ve $\epsilon_{rB2} = 2.3$, $\sigma_B = 10^{-3}$ (S/m) olan iki kübik cismin yeniden yapılandırması (a) orijinal geometri (b) farklı kesitlerdeki $\epsilon_r(\mathbf{r})$ dağılımı (c) $y = -0.5$ düzlemindeki $\epsilon_r(\mathbf{r})$ dağılımı (d) farklı kesitlerdeki $\sigma(\mathbf{r})$ dağılımı (e) $y = -0.7$ düzlemindeki $\sigma(\mathbf{r})$ dağılımı

Son örnekte elektriksel özellikleri birbirinden farklı iki cismin yeniden yapılandırması ele alınmıştır. Gömülü cisimlerin her ikisi de geometrik olarak birbirine özdeş olup bir ayrıtının uzunluğu $0.4 m$ olan küp biçimindedirler. Buna karşın, birinci cismin dielektrik geçirgenliği $\epsilon_{B1} = 2.5\epsilon_0$ iken ikinci cisminki $\epsilon_{B2} = 2.3\epsilon_0$ 'dir. Her iki cismin, öz iletkenlik katsayısı eşit olup $\sigma_{B1} = \sigma_{B2} = 10^{-3}$ S/m'dir. Örneğe ait yeniden yapılandırma sonuçları Şekil 4'te sunulmuştur. Şekil 4b ve c yeniden yapılandırma bölgesinde farklı kesitlerde çizdirilen bağıl dielektrik geçirgenliği göstermektedir. Yeniden yapılandırma sonuçlarına bakıldığında beklenildiği üzere, yüksek dielektrik geçirgenlikli soldaki cisim sağdakine göre daha belirgin ve daha yüksek dielektrik geçirgenlik değerine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Aynı kesitlerde çizdirilen iletkenlik değişimleri ise Şekil 4d ve e'de verilmiştir. Cisimlerin iletkenlik değerleri eşit olmasına karşın yeniden yapılandırma sonuçlarında dielektrik geçirgenlik değeri yüksek olan cismin iletkenlik değerinin de yüksek değerde elde edildiği görülmektedir. Bunun nedeni, bağıl dielektrik geçirgenlik ve iletkenliğin ters problem çözümüyle doğrudan elde edilen büyüklükler olmamasıdır. Bu parametreler yeniden yapılandırılan $\chi(\mathbf{r})$ 'nin Denklem (27) ve (28) kullanılmasıyla elde edilirler. Dolayısıyla, cisimlerin orijinal ϵ_{rB} değerleri sadece yeniden yapılandırılan $\epsilon_r(\mathbf{r})$ değerlerini değil $\sigma(\mathbf{r})$ değerlerini de etkilemektedir.

3 Sonuçlar

Bu çalışmada, yer altına gömülü üç boyutlu cisimlerin yeniden yapılandırması yani geometrik ve elektriksel özelliklerinin dışarıdan yapılan ölçümlerle ortaya çıkartılması için bozulmuş born iteratif yöntemi (Distorted Born Iterative Method-DBIM) kullanılmıştır. Problem, cisimlerin üç boyutlu ve yer altına gömülü olması nedeniyle matematiksel ve hesaplama açısından zor bir problemdir. Elde edilen sayısal sonuçlar, DBIM yönteminin düşük ve orta kontrasta sahip gömülü cisimlerin yeniden yapılandırmasında oldukça başarılı olduğunu göstermektedir. Yüksek kontrastlı cisimlerin konumları ve geometrileri başarıyla bulunurken elektriksel parametreleri olması gerekenden daha düşük değerlerde elde edilmiştir.

Çoklu frekans tekniği ve/veya orijinal DBIM algoritmasında yapılacak değişim ve iyileştirmelerle yöntemin başarısının artırılacağı öngörülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] T. Durukan, R. E. Akdoğan ve Y. Altuncu, Varyasyonel Born İteratif yöntemi ile gömülü silindirik cisimlerin tespit edilmesi.2018 ELECO 2018 Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, pp 414-418 Bursa, 2018.
- [2] Y. Altuncu, T. Durukan ve R. E. Akdoğan, Reconstruction of two-dimensional objects buried into three-part space with locally rough interfaces via Distorted Born Iterative method. PIER, 23-41, 2019, doi: [10.2528/PIER19072203](https://doi.org/10.2528/PIER19072203).
- [3] Y. Altuncu, A numerical method of electromagnetic scattering by 3-D dielectric objects buried under 2-D locally rough surfaces, IEEE Trans Antennas Propagat., 3634-3643, 2015. doi: [10.1109/TAP.2015.2438859](https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2438859)
- [4] R. E. Akdoğan and Y. Altuncu, Reconstruction of 3D objects buried under into half-space by using Variational Born Iterative method. 2019 23rd International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECOM), pp 1-4, Dubrovnik, Croatia, 2019.
- [5] R. Pierri and G. Leone, Inverse scattering of dielectric cylinders by a second-order Born approximation, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 37, 1, 374-382, 1999. doi: [10.1109/36.739072](https://doi.org/10.1109/36.739072).
- [6] R. Lavarello and M. Oelze, A study on the reconstruction of moderate contrast targets using the distorted born iterative method, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., 55, 1, 112-124, 2008. doi: [10.1109/TUFFC.2008.621](https://doi.org/10.1109/TUFFC.2008.621).
- [7] A. J. Hesford and W. C. Chew, Fast inverse scattering solutions using the distorted Born iterative method and the multilevel fast multipole algorithm, The Journal of the Acoustical Society of America, 128, 2, 679-690, 2010. doi: [10.1121/1.3458856](https://doi.org/10.1121/1.3458856).
- [8] H. Tu, W. Chien, C. C. Chiu and T. M. Hu, Comparison of two different shape descriptions in the half-space inverse problem, SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics, pp 158-161 2005. Brasil, 2005. doi: [10.1109/IMOC.2005.1579985](https://doi.org/10.1109/IMOC.2005.1579985).
- [9] S. F. Mahmoud, S. M. Ali and J. R. Wait, Electromagnetic scattering from a buried cylindrical inhomogeneity inside a lossy earth, Radio Sci., 16, 6, 1285-1298, 1981. doi: [10.1029/RS016i006p01285](https://doi.org/10.1029/RS016i006p01285).
- [10] F. Delbary, K. Erhard, R. Kress, R. Potthast ve J. Schulz, Inverse electromagnetic scattering in a two-layered medium with an application to mine detection. Inverse Problems, 24, 1, 015002, 2008. doi: [10.1088/0266-5611/24/1/015002](https://doi.org/10.1088/0266-5611/24/1/015002).
- [11] J. Hadamard, Lectures on chauchy's Problem in linear Partial Differential Equations, Yale University Press, New Haven, 1923.
- [12] Y. Liu and L. R. Ciric, An improved iterative method for inverse scattering, Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and URSI National Radio Science Meeting, pp 1656-1659 Seattle, USA, 1994. doi: [10.1109/APS.1994.408133](https://doi.org/10.1109/APS.1994.408133).
- [13] X. Chen, Computational methods for electromagnetic inverse scattering, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. 2018.
- [14] W. C. Chew and Y. M. Wang, Reconstruction of two-dimensional permittivity distribution using the distorted Born iterative method. IEEE Trans. Med. Imaging, 9, 218-225, 1990. doi: [10.1109/42.56334](https://doi.org/10.1109/42.56334).
- [15] F. Li, Q. H. Liu and L.-P. Song, Three-dimensional reconstruction of objects buried in layered media using Born and Distorted Born Iterative Methods, IEEE Geosci. Remote Sensing Lett., 1, 2, 107-111, 2004. doi: [10.1109/LGRS.2004.826562](https://doi.org/10.1109/LGRS.2004.826562).
- [16] Y. Altuncu, F. Akleman, O. Semerci and C. Ozlem, Imaging of dielectric objects buried under a rough surface via distorted born iterative method, J. Phys.: Conf. Ser., 2008, doi: [10.1088/1742-6596/135/1/012006](https://doi.org/10.1088/1742-6596/135/1/012006).
- [17] N. Zaiping, Y. Feng, Z. Yanwen and Z. Yerong, Variational Born iteration method and its applications to hybrid inversion, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 38, 1709-1715, 2000. doi: [10.1109/36.851969](https://doi.org/10.1109/36.851969).
- [18] P. Berg and A. Abubakar, Contrast source inversion method: State of art, PIER, 189-218,2001. doi: [10.2528/PIER01061103](https://doi.org/10.2528/PIER01061103).
- [19] X. Ye and X. Chen, Subspace-based Distorted Born iterative method for solving Inverse scattering problems, IEEE Trans. Antennas Propagat., 7224-7232, 2017. doi: [10.1109/TAP.2017.2766658](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2766658).
- [20] N. Kinayman and M. I. Aksun, Modern Microwave Circuits, Artech House, 2005
- [21] W. C. Chew., Waves and fields in inhomogenous media, IEEE Press Series on Electromagnetic Waves, 1990.
- [22] R. E. Akdoğan., İki parçalı uzaya gömülü üç boyutlu cisimlere ilişkin ters saçılma probleminin Born yaklaşımı tabanlı ve kontrast kaynak tabanlı yöntemlerle çözümü. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2020.
- [23] W.E. Patitz, B.C. Brock, E. G. Powell., "Measurement of Dielectric and Magnetic Properties of Soil", Sandla report sand95-2419,UC-706 Unlimited Release 1995





Easy detection of chloroform in drinking water by quartz crystal microbalance sensor

İçme sularındaki kloroformun kuvars kristal mikroterazi sensör ile kolay tespiti

Mehmet Çağrı Soylu^{1,*} 

¹ Biological and Medical Diagnostic Sensors Laboratory (BioMeD Sensors Lab), Biomedical Engineering, Erciyes University, 38039 Kayseri, Turkey

Abstract

In this study, two different surface modification methods have been tested for easy detection of chloroform, which is harmful to human health in case of excess in the mains water, with a Quartz Crystal Microbalance (QCM) sensor. In the first coating method, acidic and basic solutions of 3-mercaptopropyltrimethoxysilane (MPS) in ethyl alcohol were applied respectively. In the second coating method; Acidic MPS was applied in the first step and then surface modification was completed using 2-mercaptoproethanol (ME). In Coating-1, average frequency shifts of $-180(\pm 30)$ Hz, $-200(\pm 40)$ Hz and $+40(\pm 10)$ Hz were recorded for acidic MPS, basic MPS and 10 ng/mL chloroform, respectively. In Coating-2, chloroform molecules formed covalent bonds with thiol groups and the mean frequency shifts obtained for acidic MPS, ME and 10 ng/mL chloroform were $-180(\pm 30)$ Hz, $-80(\pm 15)$ Hz, and $-70(\pm 8)$ Hz, respectively. According to empirical results, coating-2 method provided a better surface modification than coating-1 method. Resonance frequency shifts of $-2.5(\pm 1)$, $-12(\pm 4)$, $-70(\pm 8)$ and $-356(\pm 87)$ Hz respectively were obtained at chloroform concentrations of 0.1, 1, 10, and 100 ng/mL by using QCM sensor modified with MPS + ME.

Keywords: Chloroform, Quartz crystal Microbalance, Surface modification, Drinking water, Biosensor

1 Introduction

Chlorine is the most preferred disinfectant for water sources. Unfortunately, such unwanted chemicals, typically known as disinfection byproducts (DBPs), pollute drinking water. Trihalomethanes (THMs), a group of four organic chemicals, are a product of the reaction of disinfectants (such as chlorine) with inorganic and organic matter in water. The constituents of THM are bromodichloromethane (BDCM), tribromomethane (bromoform), trichloromethane (chloroform) and dibromochloromethane (DBCM) [1]. THM, the most common form of chloroform, is formed when chlorine that was initially meant for water treatment reacts with the organic compounds present in a water sample.

Since chloroform is known to be poisonous, genetic mutation and cancer causing, significant health problems are produced by municipal waters over-treated with this agent. There are both temporal and persistent adverse effects of chloroform. Damages associated with the reproductive and nervous system have been reported for high exposure to chloroform. The carcinogenic effects of chloroform have been shown in several studies, including human lesions, skin and lung diseases, when exposed to chloroform through drinking water or inhalation [2-4]. It is critical to make a specific measurement and quantify it quickly and easily.

Özet

Bu çalışmada, şebeke suyunda fazla bulunması halinde insan sağlığına zararlı olan kloroformun Kuvars Kristal Mikroterazi (QCM) sensör ile kolay tespiti için iki farklı yüzey modifikasyonu yöntemi denenmiştir. İlk kaplama yönteminde, 3-Merkaptopropiltrimetoksilan'ın (MPS) etil alkol içerisinde sırasıyla asidik ve bazik solüsyonları uygulanmıştır. İkinci kaplama yönteminde ise; ilk aşamada asidik MPS uygulanmış ve daha sonra 2-Merkaptoetanol (ME) kullanılarak yüzey modifikasyonu tamamlanmıştır. Kaplama-1'de, asidik MPS, bazik MPS ve 10 ng/mL kloroform için sırasıyla $-180(\pm 30)$ Hz, $-200(\pm 40)$ Hz ve $+40(\pm 10)$ Hz ortalama frekans kaymaları kaydedilmiştir. Kaplama-2'de, kloroform molekülleri tiyol grupları ile kovalent bağlar oluşturmuş ve asidik MPS, ME ve 10 ng/mL kloroform için elde edilen ortalama frekans kaymaları sırasıyla $-180(\pm 30)$ Hz, $-80(\pm 15)$ Hz ve $-70(\pm 8)$ Hz olmuştur. Ampirik sonuçlara göre, kaplama-2 yöntemi, kaplama-1 yönteminden daha iyi bir yüzey modifikasyonu sunmuştur. MPS + ME ile modifiye edilmiş QCM sensör kullanılarak, 0.1, 1, 10 ve 100 ng/mL kloroform konsantrasyonlarında, sırasıyla $-2.5(\pm 1)$, $-12(\pm 4)$, $-70(\pm 8)$ ve $-356(\pm 87)$ Hz rezonans frekansı kaymaları elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kloroform, Kuvars kristal mikroterazi, Yüzey modifikasyonu, İçme suyu, Biyosensör

The Environmental Protection Agency (EPA) listed the cancerogenic chemical as Group B2 in 2003 and recorded the maximum appropriate amount of 22 ng/mL. The most chosen techniques for the qualitative and quantitative evaluation of chloroform within detection limits of 0.1-0.002 µg/L, 0.23-0.45 µg/L, 0.02 µg/L are gas chromatography, solvent extraction [5], membrane isolation and electrolytic conductivity detector techniques [6]. Nevertheless, in order to improve sensitivity and avoid interference, these methods require sophisticated planning and the use of additional chemical agents.

Different analytical approaches are currently also available, such as high-pressure liquid chromatography (HPLC) with 1 to 100 ng/mL of detection range [7], and gas chromatography / electron capture detectors (GC / ECD) with 0.02 [8] - 0.1 ng/mL of detection limits [9]. However, these approaches require highly trained professionals, complicated systems, and costly instrumentation. The application of these approaches to a quick and systematic field study is therefore considerably difficult [10, 11].

The most readily available high-precision under-development approaches relative to commercial methods are electro-chemical analysis [12], optic techniques [13], surface plasmon resonance (SPR) sensor [14] and nanoparticle-based sensors [15]. Among the several detection methods

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mcsoylu@erciyes.edu.tr (M. Ç. Soylu)
Geliş / Received: 17.10.2020 Kabul / Accepted: 02.12.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021
doi: 10.28948/ngmuh.811606

published, Quartz Crystal Microbalance (QCM), which is a piezoelectric mass sensor, was chosen to determine the most optimal surface functionalization technique for the detection of chloroform in drinking water.

QCM is one of the most suitable sensor systems for the real-time, rapid and early identification of chloroform in municipal water treatment facilities with high precision, lower price and sensitive detection in the ng/mL range employing promising surface modification techniques.

A commercially available procedure, such as QCM, which is commonly recognized as an efficient method of detection for the detection of chloroform at very low concentrations in drinking water samples, may indicate the most suitable surface alteration for the determination of chloroform. It also has the ability to eventually enable the development of an electrochemical in situ detection sensor.

As a consequence, the fact that chloroform is a world-class carcinogen that impacts the wellbeing of hundreds of millions of people around the world makes the high-level exposure of chloroform in drinking water an immediate concern to the public health. This study uses the QCM sensor to assess chloroform levels, an appropriate candidate with fast, real-time, specific and early sensing properties because of the long-term cancer causing properties associated with health and long-term health effects. It is also aimed at evaluating the most effective approach for surface alteration. In parallel, morbidity and mortality rates due to acute and chronic chloroform toxicity will decrease dramatically due to the fast and precise detection potential of chloroform.

2 Materials and method

Two different methods were used for coating (Table 1.). Surface functionalization for chloroform detection on the gold surface is carried out in an acidic medium using 3-Mercaptopropyl trimethoxysilane (MPS - 95%, Sigma-Aldrich) while MPS (95%, Sigma-Aldrich), 2-Mercaptoethanol (ME-99%, Merck) were applied in basic medium; and all the steps of surface modification and chloroform (99,5%, Merck) detections were electrically monitored. Measurements were taken using the Gamry eQCM 10M instrument (Gamry Instruments, Warminster, United States). Circular, symmetrical quartz crystals of equal diameter (4mm) on both surfaces with AT-cut, gold-plated with a basic resonance frequency of 5 MHz are used.

In the pre-preparation step, chemicals were added in the ratio of 33 % DIW (V/V) + 33 % Sulphuric acid (V/V) (97 %, Sigma Aldrich) + 33 % Hydrogen Peroxide (V/V) (35 %, Merck) to prepare a piranha solution.

Table 1. Tested surface modification methods

Coating #	First Modification	Second Modification	Analyte
1	Acidic MPS	Basic MPS	Chloroform
2	Acidic MPS	ME	Chloroform

The prepared piranha solution was taken into a 5 mL beaker, and the surface of the sensor was organically cleaned

in a beaker for 5 minutes. Next, the sensor was then passed through deionized water and ethyl alcohol, respectively.

Coating-I step was carried out after completion of the cleaning step. This stage initially involved the application of 3-Mercaptopropyltrimethoxysilane (MPS) in an acidic medium. MPS was subsequently applied in a basic medium. Afterwards, surface modification was carried using 2-Mercaptoethanol (ME). In both coating methods, the sensor surface was activated using MPS hydrolysis at pH=4.5 and condensation at pH=9.0.

The thiol groups of MPS in acidic ethanol solution are bonded onto the QCM gold surface through the thiol-gold interaction. The methoxy groups on the captured MPS molecules and free MPS molecules are hydrolyzed (exchange of a silane group with a silanol) in aqueous ethanol solution with a pH of 9.0. The hydroxyl groups condense among themselves in the coating process to form a layer on the gold surface. The condensation of hydroxyl groups on free MPS molecules and hydroxyl groups on this layer continues and an upper layer of thiol groups is formed on the surface (Figure 1.a). The sensor surface was exposed to chloroform molecules in both experiments.

In Coating-II a combination of acidic MPS coating and ME connection was used. The hydroxyl groups on the surface MPS molecules begin to condense with the hydroxyl group of the next bonding ME molecule and this condensation forms a tight coating on the surface of the gold (Figure 1.b).

The prepared solution was applied to the sensor surface for 30 min using a closed loop flow with a peristaltic pump at a flow rate of 200 µL/min. Each experiment was carried out repeatedly for a minimum of 3 times to obtain the average and standard deviations of the frequency shift. The experimental setup and block diagram of the coating stages are given in Figure 1.c and 1.d, respectively.

As a target, 0.1, 1, 10, and 100 ng/mL of Chloroform sample solutions were prepared by using a 500 mL drinking water brand from Turkish bottled drinking water market. The experiments for investigating the coating quality were carried out by using 10 ng/mL Chloroform samples. In the dose-response experiments after the determination of the best coating, four different concentrations of Chloroform were used in at least 3 repetitive trials for each concentration.

3 Results and Discussion

The most commonly used methods for functionalization of sensor surfaces include covalent bonding and adsorption. There severally demonstrated practical application of detection with adsorption for numerous sensors [16, 17].

In the study, it is aimed to produce chloroform determination in drinking water On-site, reliable, sensitive solution suitable for surface modification and produces results within a short detection time (30 minutes) under non-specific binding for chloroform determination in drinking water. For this purpose, the studies are divided into two parts. The first part consists of conducting experiments and recording the results; the second part is the processing of the data. The processing of the data for Coating-I and Coating-II was performed separately

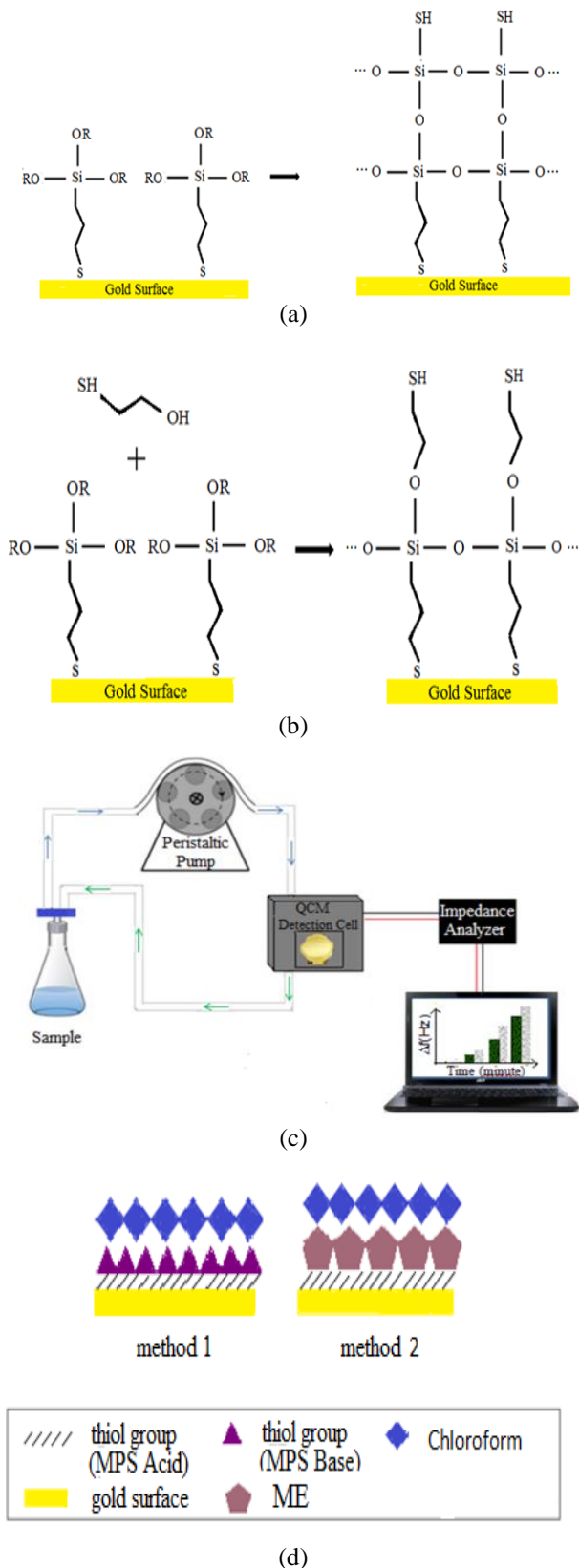


Figure 1. Illustrations of a) coating-1, b) coating-2, c) the detection setup, and d) the surface modification methods

Coating-1 is dependent on the acidic and basic MPS coating of the gold surface. In this study, the development of

thiol groups after basic MPS coating for the capture of chloroform was taken as a basis. In the basic coating solution, the hydrolyzed MPS molecules form a solid, self-assembled monolayer and end up with sideways compact OH groups and vertical non-compact OH groups on the gold surface [18]. Due to the pH sensitivity of MPS, if the appropriate pH can not be balanced, it can form a mobile surface structure, resulting in less surface thiol groups [19]. To remove irregularities due to the higher pH and temperature sensitivity of MPS, acidic MPS immobilization was carried out in Coating-2 as a monolayer on the floor. Then, easy ME at pH = 9.0 was used to form properly oriented thiol groups on the sensor surface.

The test results of the coatings are given in Figure 2 and Figure 3, respectively. The coating-I procedure, which recorded the average frequency shifts of 180 (± 30) Hz, 200 (± 40) Hz and 40 (± 10) Hz for acidic MPS, basic MPS and chloroform, respectively. Also, it was observed that the chloroform molecules failed to bond with the thiol groups leading to an inverse and undesirable shift. For the coating-II experiments, the chloroform molecules formed covalent bonds with the thiols groups, and the recorded average frequency shifts for acidic MPS, ME and chloroform were 180 (± 30) Hz, 80 (± 15) Hz and 70 (± 8) Hz, respectively. It was confirmed that these numerical values observed when the resonance frequencies for both coatings were calculated using the Sauerbrey Equation, yielded very concordant results. Additionally, from our experimental results, coating-II method offered a better gold surface modification than coating-I method for the QCM sensor.

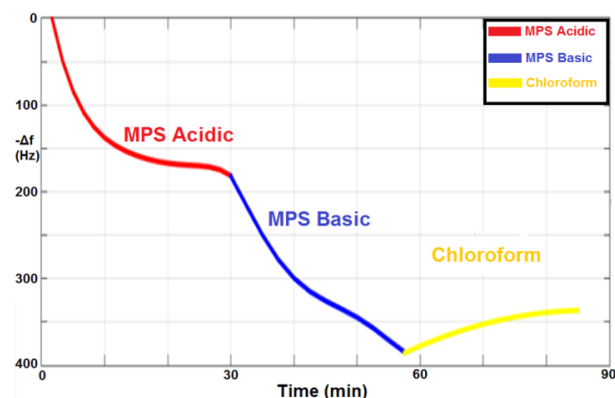


Figure 2. Frequency changes of Coating-I steps and Chloroform detection

The influence of receptors on chloroform detection during the control and detection process in erratic and fluctuating frequency changes was examined by surface modification assays (Coating 1, 2). Chloroform binding to the surface has improved the efficacy of identification. With sufficient receptor orientation, ME provides a higher detection sensitivity level. When unpaired two-tailed t-Test was applied to the results of chloroform detections, Coating 2 indicated a significant preference for chloroform detection ($M = 70$, $SD = 8$) than Coating 1 ($M = 40$, $SD = 10$), $t(4) = 4.0575$, $p < .001$

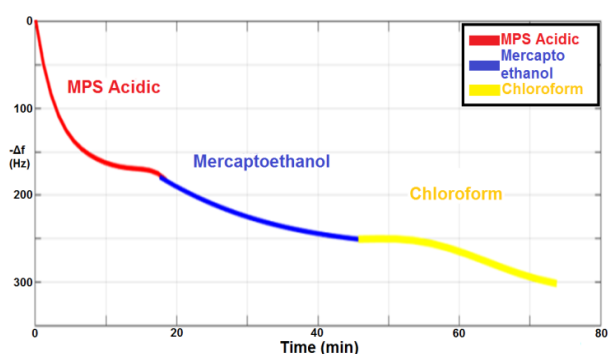


Figure 3. Frequency changes of Coating-II steps and Chloroform detection

In Figure 4, it has been reported that 0,1 (± 0.02) Hz frequency shift for the absence of chloroform, 2,5 (± 1) Hz frequency shift for 0,1 ng/mL of chloroform, 12 (± 4) Hz frequency shift for 1 ng/mL of chloroform, 70 (± 8) Hz frequency shift for 10 ng/mL of chloroform, and 356 (± 87) Hz frequency shift for 100 ng/mL of chloroform were observed in the dose response experiments in drinking water. When unpaired two-tailed t-Test was applied to the dose-response results of chloroform detections for the negative control and the lowest concentration, the result of 0.1 ng/mL chloroform indicated a significant preference for chloroform detection ($M = 2.5$, $SD = 1$) than the negative control ($M = 0.1$, $SD = 0.02$), $t(4) = 4.1561$, $p < .001$.

The other approaches, with the exception of Nie et al. (2015) [20], include complicated, tricky, and time-consuming chemical surface alteration procedures. In light of the performance of our surface modification technique, the limit of detection and linear range of this analysis can be further strengthened by using a sensor platform with a wider detection range.

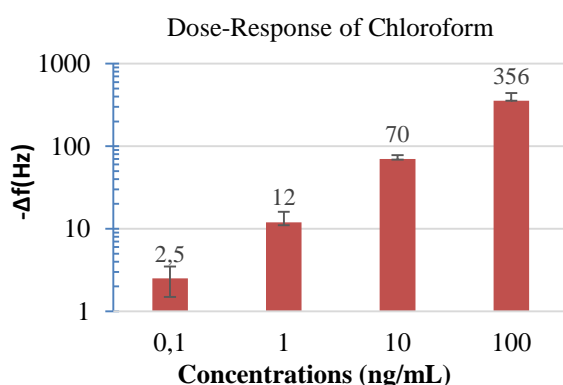


Figure 4. Dose-response results with average resonance frequency changes of Chloroform detection with Coating 2

4 Conclusion

In summary, for sensitive chloroform detection in the detection limit range between 0.1 and 100 ng / mL, we have created a new methodology for gold surface functionalization that is simple, fast and durable. Coating-2

exhibited superlative quality and sensitivity in drinking water among the two distinct coating processes studied.

Since MPS is pH sensitive, if the required pH can not be set, it builds an elastic surface morphology, which results in far less surface thiol groups after coating-1. Few changes in resonance frequency confirm that chloroform molecules are not easily bound by acidic MPS and simple MPS coating, whereas frequency shifts indicate surface bonding. In contrast with the other method, coating-1, the ME technique with higher reliability and response was found to be the most efficient method for the precise determination of chloroform in drinking water samples. Therefore, a novel chloroform determination approach that sensitively detects in a much shorter period can be established for field analysis by the combination of the surface functionalization technique reported in this study and a sensing technology with a broad linear range. Furthermore, this chloroform assessment method may be used for studies in the future from different water supplies exposed to excess amounts of chloroform.

Similarity score (iThenticate): % 19

References

- [1] G. C. Cao, K. Huang, A. Whelton, A. Shah, Formation and sorption of trihalomethanes from cross-linked polyethylene pipes following chlorinated water exposure. *Environmental Science: Water Research & Technology*, Environ. Sci.: Water Res. Technol., 6, 2479-2491, 2020. <https://doi.org/10.1039/D0E W00262C>
- [2] I. Zimoch, and E. Łobos, Evaluation of health risk caused by chloroform in drinking water. *Desalination and Water Treatment*, 57.3: 1027-1033, 2016. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1033134>
- [3] Y. Fakhri, A. Mohseni-Bandpei, G. Oliveri Conti, H. Keramati, Y. Zandsalimi, N. Amanidaz, and Z. Baninameh, Health risk assessment induced by chloroform content of the drinking water in Iran: systematic review. *Toxin reviews*, 36(4), 342-351, 2017. <https://doi.org/10.1080/15569543.2017.1370601>
- [4] R. Kujlu, M. Mahdavianpour and F. Ghanbari, Multi-route human health risk assessment from trihalomethanes in drinking and non-drinking water in Abadan, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-10, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09990-9>
- [5] E. Aneheim, S. Palm, H. Jensen, C. Ekberg, P. Albertsson and S. Lindegren, Towards elucidating the radiochemistry of astatine—Behavior in chloroform. *Scientific reports*, 9(1), 1-9, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52365-5>
- [6] J.L.P. Pavón, S.H. Martín, C.G. Pinto and B.M. Cordero, Determination of trihalomethanes in water samples: a review. *Analytica chimica acta*, 629(1-2), 6-23, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.09.042>
- [7] M. Villar-Navarro, M. Ramos-Payán, J.L. Pérez-Bernal, R. Fernández-Torres, M. Callejón-Mochón and M.Á. Bello-López, Application of three phase hollow fiber based liquid phase microextraction (HF-LPME) for the simultaneous HPLC determination of phenol

- substituting compounds (alkyl-, chloro- and nitrophenols). *Talanta*, 99, 55-61, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2012.05.020>
- [8] L. Wolska, C. Olszewska, M. Turska, B. Zygmunt and J. Namieśnik, Volatile and semivolatile organohalogen trace analysis in surface water by direct aqueous injection GC-ECD. *Chemosphere*, 37(13), 2645-2651, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(98\)00163-5](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(98)00163-5)
- [9] M. Biziuk, J. Namieśnik, J. Czerwiński, D. Gorlo, B. Makuch, W. Janicki, and L. Wolska, Occurrence and determination of organic pollutants in tap and surface waters of the Gdańsk district. *Journal of Chromatography A*, 733(1-2), 171-183, 1996. [https://doi.org/10.1016/0021-9673\(95\)00905-1](https://doi.org/10.1016/0021-9673(95)00905-1)
- [10] M. Shariati-Rad and F. Fattahi, A simple equipment and colorimetric method for determination of chloroform in water. *Analytica Chimica Acta*, 1100, 208-214, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.11.066>
- [11] P. Ncube, R.W. Krause and B.B. Mamba, Detection of chloroform in water using an azo dye-modified β -cyclodextrin-Epichlorohydrin copolymer as a fluorescent probe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 67, 79-85, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.10.009>
- [12] E.R. Carvalho, A.A. Correa, O.N. Oliveira, H.L. Gomes, L.H.C. Mattoso and L. Martin-Neto, Detection of chloroform with a sensor array consisting of electrochemically deposited polythiophenes films: Processes governing the electrical response. *Sensor Letters*, 5(2), 374-379, 2007. <https://doi.org/10.1166/sl.2007.204>
- [13] I.Z.M. Ahad, S.W. Harun, S.N. Gan and S.W. Phang, Polyaniline (PANI) optical sensor in chloroform detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 261, 97-105, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.01.082>
- [14] W. Ma, J. Luo, W. Ling and W. Wang, Chloroform-sensing properties of plasmonic nanostructures using poly (methyl methacrylate) transduction layer. *Micro & Nano Letters*, 8(2), 111-114, 2013. <https://doi.org/10.1049/mnl.2012.0824>
- [15] M.M. Rahman, A. Jamal, S.B. Khan and M. Faisal, Fabrication of chloroform sensor based on hydrothermally prepared low-dimensional β -Fe₂O₃ nanoparticles. *Superlattices and Microstructures*, 50(4), 369-376, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2011.07.016>
- [16] M.M. Rahman, H.B. Balkhoyor, A.M. Asiri and T.R. Sobahi, Development of selective chloroform sensor with transition metal oxide nanoparticle/multi-walled carbon nanotube nanocomposites by modified glassy carbon electrode. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 66, 336-346, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.06.004>
- [17] H. Mahmud, J. Minnery, Y. Fang, V.A. Pham, R.M. Narbaitz, J.P. Santerre and T. Matsuura, Evaluation of membranes containing surface modifying macromolecules: determination of the chloroform separation from aqueous mixtures via pervaporation. *Journal of applied polymer science*, 79(1), 183-189, 2001. [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20010103\)79:1%3C183::AID-APP210%3E3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20010103)79:1%3C183::AID-APP210%3E3.0.CO;2-E)
- [18] M.C. Soylu, W.H. Shih and W.Y. Shih, Insulation by solution 3-mercaptopropyltrimethoxysilane (mps) coating: Effect of ph, water, and mps content. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(7), 2590-2597, 2013. <https://doi.org/10.1021/ie302231g>
- [19] K. Keser, H. Mıhçioğur and M.Ç. Soylu, Simple, rapid and sensitive detection of phenylarsine oxide in drinking water using quartz crystal microbalance: a novel surface functionalization Technique. *ChemistrySelect*, 5(6), 2057-2062, 2020. <https://doi.org/10.1002/slct.201904821>
- [20] M.X. Nie, X.Z. Li, S.R. Liu and Y. Guo, ZnO/CuO/Al₂O₃ composites for chloroform detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 210, 211-217, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.12.099>



Alternatif Rician sönümlenmesi için genelleştirilmiş Gauss gürültüsünün hata analizi

Error analyse of generalized Gaussian noise for alternate Rician fading

Mehmet Bilim^{1,*} 

¹ Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38090, Kayseri Türkiye

Özet

Bu çalışmada bir tek-giriş tek-çıkışlı sistemin alternatif Rician sönümlenmesi durumunda genelleştirilmiş Gauss gürültüsü ile birlikte hata olasılığı analizi sunulmaktadır. Yapılan analizlerde olasılık yoğunluk fonksiyonu temelli yaklaşım kullanılmıştır. Önerilen analitik ifadelerin, literatürdeki matematiksel çalışmalarda gibi asimptotik analiz de sunulmuştur. Bu sayede ele alınan sistem modelinin orta ve yüksek ortalama işaret gürültü oranı şartlarındaki davranışları gösterilmiştir. Yapılan performans çalışmalarında farklı modülasyon türlerinin, gölgeleme parametre değerlerinin, Rician faktörü değerlerinin ve gürültü tiplerinin etkileri gözlemlenmiştir. Son olarak, yapılan analitik çalışmaların doğruluğu tam nümerik simülasyon sonuçları ile kıyaslanarak onaylanmıştır.

Anahtar kelimeler: Alternatif Rician sönümlenmesi, Genelleştirilmiş Gauss gürültüsü, Hata olasılığı analizi

1 Giriş

Kablosuz haberleşme sistemlerinde sönümlenme ve gürültü etkisi çok önemli bir yere sahiptir. İletilmek istenilen işaretin sönümlenmeye ve gürültüye maruz kalması kaçınılmazdır. Bu nedenle, kablosuz ortamlar için çeşitli deneysel ölçümler yapılarak kanal ortamının anlık işaret gürültü oranına (signal noise ratio, SNR) bağlı temel istatistikî formülasyonlar geliştirilmiştir [1]. Önerilen matematiksel modeller sayesinde kablosuz ortamlarının gerçek tasarımları yapılmadan teorik hesaplamaları ve simülasyon çalışmaları kolaylıkla yapılabilmekte, maliyet açısından oldukça verimli çalışmalar oluşturulabilmektedir. Böylelikle, gerçek uygulamalar yapılmadan önce tasarlanan sistemlerin performansları ölçülebilmektedir. Önerilen kanal modelleri incelendiğinde genel olarak bina-dışı ortamları ele alan ve gölgeleme etkisini de barındıran gölgelemeli Rician sönümlenmesi dikkati çekmektedir. Bu amaçla, gölgelemeli Rician sönümlenmesinde çeşitli sistem modellerini analiz eden çalışmalar [2-9]’da sunulmaktadır

Gölgelemeli Rician sönümlenmesine ait anlık SNR’nin birikimli dağılım fonksiyonu (cumulative distribution function, CDF) ifadesi için kapalı formda bazı yeni türetmeler [2]’de sunulmaktadır. Yapılan türetimler sonucunda elde edilen CDF ifadesini kullanarak servis-dışı kalma analizi de bir uygulama olarak aynı çalışmada yer almaktadır. [3]’te verilen çalışmada ise gölgelemeli Rician sönümlenmesi göz önünde bulundurularak, en büyük oranlı birleştirme (maximal ratio combining, MRC) tekniği için hata ifadesi anlık SNR’nin olasılık yoğunluk fonksiyonunu

Abstract

In this study, error probability analysis of a single-input single-output system with generalized Gaussian noise over alternative Rician fading channels is presented. The proposed analytical study is based on the probability density function approach. In addition to the proposed analytical expressions, asymptotic analysis is also presented, as in mathematical studies in the literature. In this way, the behavior of the considered system model in medium and high average signal to noise ratio conditions is shown. In the error performance studies, the effects of different modulation types, shadowing parameter values, Rician factor values, and noise types are observed. Finally, the accuracy of the analytical studies performed was confirmed by comparing it with the exact numerical simulation results.

Keywords: Alternate Rician fading, Generalized Gaussian noise, Error probability analysis

(probability density function, PDF) temel olarak önerilmiştir. Öte yandan, [4]’teki çalışmada da MRC tekniği ile anlık SNR’nin CDF’si için yeni bir önerme yapılmış ve servis-dışı kalma analizi sunulmuştur. [5]’te ise uydu haberleşmesi için gölgelemeli Rician sönümlenmesinin uygunluğu araştırılmış, bir uydu rölesine sahip iki atlamalı sistem analizi gerçekleştirilmiştir. Ele alınan sistemde alıcı ve vericide çoklu anten yapısının olduğu, kanal durum bilgisinin bilinip bilinmediği durumları ayrı ayrı inceleyerek hem servis-dışı kalma analizi hem de ortalama hata analizleri yapılmıştır. Bir diğer taraftan ise [6]’daki çalışmada, çok-girişli çok-çıkışlı (multiple-input multiple-output, MIMO) kanalların gölgelemeli Rician sönümlenmesine uyarlaması gerçekleştirilmiştir. Bu sayede kanal etkisinin MIMO durumlarındaki tepkileri detaylı olarak sunulmuştur. [7]’de verilen çalışmada ise gölgelemeli Rician sönümlenmesi için iki değişkenli (bivariate) durum analizi yapılmış ve iki değişkenli gölgelemeli Rician sönümlenmesi ilk kez bu çalışmada ortaya atılmıştır. Yapılan çalışmalardan [8]’de ise gölgeleme etkisinin artırılması ile iki gölgelemeli (double shadowed) Rician kanal modeli önerilmiştir. Önerilen modelin anlık SNR’sinin CDF ifadesinden faydalanarak servis-dışı kalma analizi gerçekleştirilmiştir. Bir diğer çalışma olan [9], kablosuz bağlantılı haberleşme (wireless powered communications) tekniğini gölgelemeli Rician sönümlenmesinde gerçekleştirmiştir. Bu [2-9] çalışmalarında ele alınan gölgelemeli Rician sönümlenmesi için kullanılan matematiksel ifadelerin pek de kullanışlı olmadığı [10-13]’te verilen çalışmalarda detaylıca izah edilmiştir. Bu nedenle, [10-13]’te farklı matematiksel

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mbilim@nny.edu.tr (M. Bilim)

Geliş / Received: 07.07.2020 Kabul / Accepted: 01.12.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.765657

modellerin önerildiği görülmektedir. Bu çalışmalardan [13]'te önerilen ve alternatif Rician sönümlenmesi diye adlandırılan matematiksel modelin esnekliği ve gölgeleme etkisinin yanısıra vücut merkezli haberleşme modellemesinde de oldukça başarılı olduğu detaylıca gösterilmiştir. Buna ilaveten aynı çalışmada, servis-dışı kalma, hata ve ergodik kapasite analizleri verilmiştir. [14] ve [15]'teki çalışmalarda ise efektif kanal kapasitesi ifadesi ve farklı karasel genlik modülasyonu ifadeleri alternatif Rician sönümlü kanal modelleri için türetilmiştir. Yapılan bütün çalışmalarda [2-15] gürültünün eklenebilir beyaz Gauss gürültüsü (additive White Gaussian noise, AWGN) olduğu tespit edilmiştir. Oysaki bu gürültünün sensör ağları, spektrum algılama ve su altı haberleşmesi gibi sistemler için gürültüyü doğru ve yeterli olarak tanımlamadığı bilinmektedir [16-18]. Bunun için geliştirilmiş AWGN (AWGGN) gürültüsünün daha uygun olduğu yine aynı çalışmalarda belirtilmektedir.

Bütün bu açıklamalar doğrultusunda bu çalışmada, alternatif Rician sönümlenmesi için AWGGN etkisinde tek-girişli tek-çıkışlı (single-input single-output, SISO) bir sistemin performans analizi yapılmıştır. Yapılan analizde anlık SNR'nin PDF ifadesinden faydalanarak hata ifadeleri türetilmiştir. AWGGN etkisi için koşullu hata ifadesinin analitik çözüme müsaade etmemesinden dolayı literatürde sıklıkla kullanılan yaklaşıklık yöntemi uygulanmıştır. Performans analizleri gerçekleştirilirken farklı modülasyon türleri, alternatif Rician parametrelerinin alındığı durumlar gibi çeşitli senaryolar gözetilmiştir.

2 Sistem ve kanal modeli

Bu çalışmada tipik bir SISO iletimi gözönüne alındığından alınan sinyal şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$r = hx + z \quad (1)$$

Burada r alınan sinyali, x iletilen sinyali, h kanal katsayısını ve z ise 0 ortalamalı ve σ^2 varyansına sahip AWGGN gürültüsünü belirtmektedir. Ele alınan sistem modeli için h alternatif Rician sönümlenme dağılımına sahip olduğu varsayılmıştır. [13]'teki çalışmada bu kanal modelinin matematiksel kullanımının kolaylığından ve bu sayede teorik analizlere imkan sağlayabileceğinden detaylıca bahsedilmiştir.

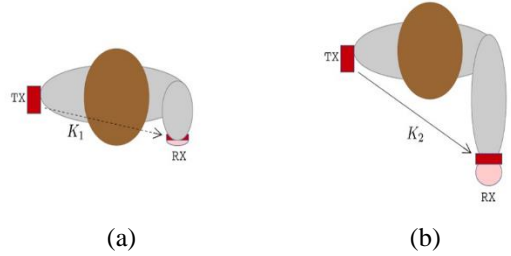
Ele alınan SISO sistemin iletim yapmış olduğu kanal daha öncede belirtildiği gibi alternatif Rician sönümlenmesi olarak düşünülmüştür. Buna göre alıcıdaki anlık SNR'nin, γ , PDF ifadesi şu şekildedir [13]:

$$f_{\gamma}(\gamma) = p \sum_{n=0}^{m-1} \binom{m-1}{n} \left[\frac{m}{K_1+m} \right]^n \left[\frac{K_1}{K_1+m} \right]^{m-n-1} \frac{(m-n)^{m-n}}{\left(\left[\frac{K_1+m}{m(1+\bar{K})} \right] \bar{\gamma} \right)^{m-n}} \gamma^{m-n-1} \exp(-a_1 \gamma) \Gamma(m-n) \\ + q \sum_{n=0}^{m-1} \binom{m-1}{n} \left[\frac{m}{K_2+m} \right]^n \left[\frac{K_2}{K_2+m} \right]^{m-n-1} \frac{(m-n)^{m-n}}{\left(\left[\frac{K_2+m}{m(1+\bar{K})} \right] \bar{\gamma} \right)^{m-n}} \gamma^{m-n-1} \exp(-a_2 \gamma) \Gamma(m-n) \quad (2)$$

Burada

$$\alpha_1 = \frac{m-n}{\left(\left[\frac{K_1+m}{m(1+\bar{K})} \right] \bar{\gamma} \right)^{m-n}}, \quad \alpha_2 = \frac{m-n}{\left(\left[\frac{K_2+m}{m(1+\bar{K})} \right] \bar{\gamma} \right)^{m-n}} \quad (3)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada p , gölgelemeli Rician sönümlenmesinin K_1 ve m parametrelerine sahip olma olasılığı; $q=1-p$, gölgelemeli Rician sönümlenmesinin K_2 ve m parametrelerine sahip olma olasılığı olarak tanımlanmaktadır. K_1 , birinci grup gölgelemeye ait Rician faktörü iken K_2 ikinci grup gölgelemeye ait Rician faktördür. m gölgeleme parametresini, $\bar{\gamma}$ ortalama SNR'yi temsil etmektedir. Ayrıca $\bar{K} = pK_1 + qK_2$ şeklindedir. Şekil 1'de p ve q olasılıkları ve bu durumda alıcı ile vericinin konumları temsili olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. (a) p olasılığındaki senaryo (alıcı-vericinin birbirine göre konumları), (b) q olasılığındaki senaryo (alıcı-vericinin birbirine göre konumları) [13]

3 Hata olasılığı analizi

Alıcıdaki anlık SNR'nin PDF'sini temel alan genel hata formülü

$$P_{hata} = \int_0^{\infty} P(e|\gamma) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (4)$$

olarak belirtilmektedir. Burada $P(e|\gamma)$ koşullu hata ifadesi ve $f_{\gamma}(\gamma)$ PDF ifadesidir. Ele alınan alternatif Rician sönümlenmesi için PDF ifadesi Denklem (2)'de verildiği gibidir. AWGGN için koşullu hata ifadesi ise

$$P(e|\gamma) = \beta Q_a(\sqrt{\phi\gamma}) \quad (5)$$

şeklindedir. $Q_a(\cdot)$ genelleştirilmiş Gauss fonksiyonudur ve

$$Q_a(t) = \frac{a\Lambda_0^{2/a}}{2\Gamma(1/a)} \int_t^{\infty} e^{-\Lambda_0^a y^a} dy \quad (6)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada $\Gamma(\cdot)$ Gama fonksiyonudur. $\Lambda_0 = \sqrt{\Gamma(3/\Delta)/\Gamma(1/\Delta)}$ ve a ise gürültünün çeşidi belirleyen parametredir. a 'nın aldığı

değerlere göre gürültü çeşitleri **Tablo 1**'de verilmektedir. Ayrıca β ve ϕ modülasyon parametreleridir. Farklı modülasyon çeşitleri için bu parametrelerin alacağı değerler **Tablo 2**'de verilmektedir.

Tablo 1. a değerlerine göre gürültü çeşitleri [19]

a değeri	Gürültü Çeşidi
0	Dürtüsel
0.5	Gama
1.0	Laplacian
2.0	Gauss
∞	Düzgün

Tablo 2. β ve ϕ değerlerine göre modülasyon çeşitleri

Modülasyon	β	ϕ
BFSK	1	1
BPSK	1	2
QPSK	2	1
M -PAM	$\frac{2(M-1)}{M}$	$\frac{6}{M^2-1}$
M -PSK	2	$2 \sin^2\left(\frac{\pi}{M}\right)$
Dikdörtgensel M -QAM	$\frac{4(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}}$	$\frac{3}{M-1}$
Dikdörtgensel olmayan M -QAM	4	$\frac{3}{M-1}$

Denklem (5)'deki koşullu hata ifadesi ile **Denklem (2)**'de verilen ele alınan sistemin anlık SNR'sinin PDF ifadesi **Denklem (4)**'te yerine konulursa

Tablo 3. a değerlerine göre κ_k ve V_k alacağı değerler

a	κ_1	κ_2	κ_3	κ_4	V_1	V_2	V_3	V_4
0.5	44.920	126.460	389.400	96.540	0.130	2.311	12.520	0.629
1	0.068	0.202	0.182	0.255	0.217	2.185	0.657	12.640
1.5	0.065	0.149	0.136	0.125	0.341	0.712	10.570	1.945
2	0.099	0.157	0.124	0.119	1.981	0.534	0.852	10.268
2.5	0.126	1.104	-1.125	0.442	9.395	0.833	0.994	1.292

$$P_{hata} = \int_0^{\infty} \beta Q_a(\sqrt{\phi\gamma}) \left[p \sum_{n=0}^{m-1} \binom{m-1}{n} \left[\frac{m}{K_1+m} \right]^n \left[\frac{K_1}{K_1+m} \right]^{m-n-1} \frac{(m-n)^{m-n}}{\left(\left[\frac{K_1+m}{m(1+\bar{K})} \right] \bar{\gamma}(m-n) \right)^{m-n} \Gamma(m-n)} \gamma^{m-n-1} \exp(-a_1\gamma) + q \sum_{n=0}^{m-1} \binom{m-1}{n} \left[\frac{m}{K_2+m} \right]^n \left[\frac{K_2}{K_2+m} \right]^{m-n-1} \frac{(m-n)^{m-n}}{\left(\left[\frac{K_2+m}{m(1+\bar{K})} \right] \bar{\gamma}(m-n) \right)^{m-n} \Gamma(m-n)} \gamma^{m-n-1} \exp(-a_2\gamma) \right] d\gamma \quad (7)$$

elde edilir. Burada verilen ifade, bilindiği kadarıyla, matematiksel olarak çözülememektedir. Bu sebeple **Denklem (5)**'te verilen koşullu hata ifadesinin yaklaşıklık ifadesi kullanılacaktır. Buna göre **Denklem (5)** ile verilen ifade, [19]'da verilen yaklaşıklık kullanılarak

$$P(e|\gamma) = \beta Q_a(\sqrt{\phi\gamma}) \approx \beta \sum_{k=1}^4 \kappa_k e^{-\nu_k \phi\gamma} \quad (8)$$

şeklinde elde edilir. Burada κ_k ve ν_k yaklaşıklığın parametreleridir ve **Tablo 3**'te alacağı değerler verilmektedir. Ayrıca **Denklem (8)**'de verilen yaklaşıklığın göreceli mutlak hata grafiği ise [19], (**Şekil 2**)'de verildiği gibidir. Bu şekil incelendiğinde, **Denklem (8)**'de önerilen yaklaşıklığın göreceli mutlak hatalarının farklı a değerlerine göre değiştiği görülmektedir. **Denklem (8)**'deki yaklaşıklık **Denklem (7)**'de yerine konur ve bazı matematiksel düzenlemeler yapılırsa **Denklem (9)** elde edilir. Burada I_1 ve I_2 olarak adlandırılan ve aynı formatta olan iki tane integral bulunmaktadır. Bu integraller [20, **Denklem (3.381.4)**] bağıntısı yardımıyla çözümlenerek yerine yazılırsa

$$P_{hata} \approx \beta p \sum_{n=0}^{m-1} \binom{m-1}{n} \left[\frac{m}{K_1+m} \right]^n \left[\frac{K_1}{K_1+m} \right]^{m-n-1} \frac{(m-n)^{m-n}}{\left(\left[\frac{K_1+m}{m(1+\bar{K})} \right] \bar{\gamma}(m-n) \right)^{m-n} \Gamma(m-n)} \sum_{k=1}^4 \kappa_k \int_0^{\infty} \underbrace{e^{-\gamma(\nu_k \phi + a_1)} \gamma^{m-n-1} d\gamma}_{I_1} + \beta q \sum_{n=0}^{m-1} \binom{m-1}{n} \left[\frac{m}{K_2+m} \right]^n \left[\frac{K_2}{K_2+m} \right]^{m-n-1} \frac{(m-n)^{m-n}}{\left(\left[\frac{K_2+m}{m(1+\bar{K})} \right] \bar{\gamma}(m-n) \right)^{m-n} \Gamma(m-n)} \sum_{k=1}^4 \kappa_k \int_0^{\infty} \underbrace{e^{-\gamma(\nu_k \phi + a_2)} \gamma^{m-n-1} d\gamma}_{I_2} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 P_{hata} \approx & \beta p \sum_{n=0}^{m-1} \binom{m-1}{n} \left[\frac{m}{K_1+m} \right]^n \left[\frac{K_1}{K_1+m} \right]^{m-n-1} \frac{(m-n)^{m-n}}{\left(\left[\frac{K_1+m}{m(1+\bar{K})} \right] \bar{\gamma}(m-n) \right)^{m-n} \Gamma(m-n)} \sum_{k=1}^4 \kappa_k (v_k \phi + \alpha_1)^{-(m-n)} \Gamma(m-n) \\
 & + \beta q \sum_{n=0}^{m-1} \binom{m-1}{n} \left[\frac{m}{K_2+m} \right]^n \left[\frac{K_2}{K_2+m} \right]^{m-n-1} \frac{(m-n)^{m-n}}{\left(\left[\frac{K_2+m}{m(1+\bar{K})} \right] \bar{\gamma}(m-n) \right)^{m-n} \Gamma(m-n)} \sum_{k=1}^4 \kappa_k (v_k \phi + \alpha_2)^{-(m-n)} \Gamma(m-n)
 \end{aligned} \tag{10}$$

olarak bulunur. Bu ifade kullanılarak sistemin yüksek SNR'deki davranışını incelemek için asimptotik yaklaşım yapılabilir. Bu sebeple, $\bar{\gamma} \rightarrow \infty$ iken $\alpha_1 \rightarrow 0$ ve $\alpha_2 \rightarrow 0$

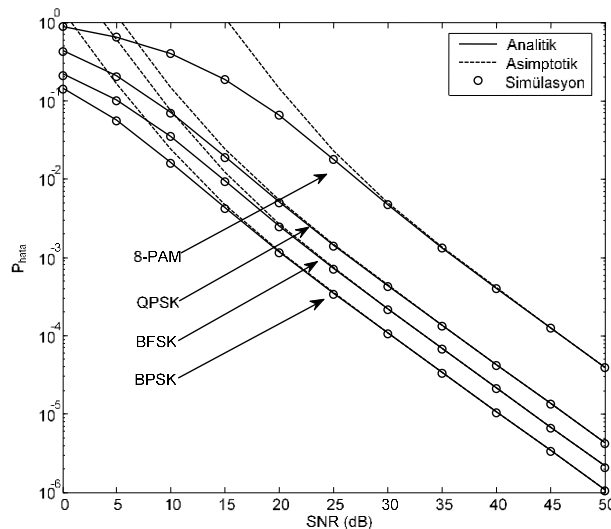
olmaktadır. Buna göre [Denklem \(10\)](#)'daki ifade şu şekle dönüşmektedir:

$$\begin{aligned}
 P_{hata}^\infty \approx & \beta p \sum_{n=0}^{m-1} \binom{m-1}{n} \left[\frac{m}{K_1+m} \right]^n \left[\frac{K_1}{K_1+m} \right]^{m-n-1} \frac{(m-n)^{m-n}}{\left(\left[\frac{K_1+m}{m(1+\bar{K})} \right] \bar{\gamma}(m-n) \right)^{m-n} \Gamma(m-n)} \sum_{k=1}^4 \kappa_k (v_k \phi)^{-(m-n)} \Gamma(m-n) \\
 & + \beta q \sum_{n=0}^{m-1} \binom{m-1}{n} \left[\frac{m}{K_2+m} \right]^n \left[\frac{K_2}{K_2+m} \right]^{m-n-1} \frac{(m-n)^{m-n}}{\left(\left[\frac{K_2+m}{m(1+\bar{K})} \right] \bar{\gamma}(m-n) \right)^{m-n} \Gamma(m-n)} \sum_{k=1}^4 \kappa_k (v_k \phi)^{-(m-n)} \Gamma(m-n)
 \end{aligned} \tag{11}$$

4 Nümerik sonuçlar

Bu bölümde analiz sonucunda elde edilen [Denklem \(10\)](#)'daki yaklaşık hata ile [Denklem \(11\)](#)'deki asimptotik ifadeler yardımıyla teorik sonuçlar elde edilmiştir. Buna ilaveten, tam nümerik (simülasyon) sonuçları verilerek yapılan analizlerin doğruluğu gösterilmiştir. [Şekil 2](#)'de Laplacian gürültüsü koşullarında, $m=2$, $K_1 = K_2 = 10$ ve $p = q = 0.5$ iken farklı modülasyon seviyeleri için hata performansı değerlendirmeleri sunulmuştur. Sunulan sonuçlarda, 8'li darbe genlik modülasyonu (pulse amplitude

modulation, PAM), faz kaydırmalı anahtarlama (phase shift keying, PSK) ve frekans kaydırmalı anahtarlama (frequency shift keying, FSK) modülasyon türleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, en iyi hata performansının beklenildiği gibi ikili PSK (binary PSK) ile elde edildiği, buna karşın en kötü performansın ise 8-PAM ile meydana geldiği görülmektedir. Buna ilaveten, elde edilen asimptotik sonuçlarının literatüre uygun bir şekilde orta SNR seviyesinden sonra analitik ve simülasyon sonuçları ile uyum sağladığı gözlemlenmektedir.

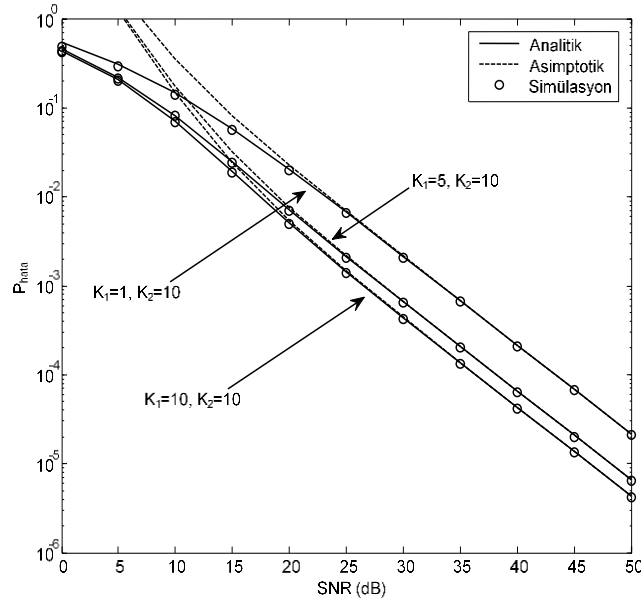


Şekil 2. Farklı modülasyon türleri için hata performansı kıyaslaması

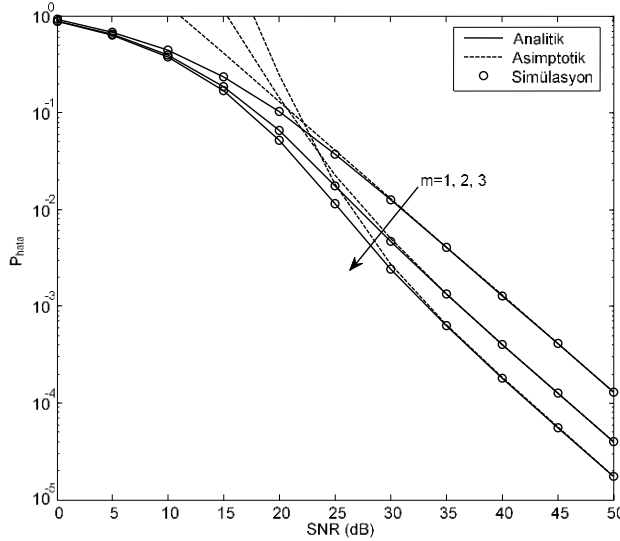
QPSK modülasyonu kullanan sistemin Laplacian gürültü koşullarında, $m=2$, $p=q=0.5$ iken farklı K_1 ve K_2 konfigürasyonları için elde edilen hata sonuçları Şekil 3'te verilmektedir. Burada 3 farklı konfigürasyon irdelenmiştir. Bunlar; $K_1=1$ $K_2=10$, $K_1=5$ $K_2=10$ ve $K_1=10$ $K_2=10$ şeklindedir. Görüldüğü üzere, K_1 değeri arttıkça hata performansı artmaktadır. Bunun da sebebi, sistemdeki ilk direk görüş hattı (line of sight, LOS) bileşenin etkisinin artmasından dolayı kanal koşulları iyileşmekte bununla birlikte hata performansı artmaktadır. Bu sonuçlarda da görülmektedir ki, sunulan analitik sonuçlar ile simülasyonlar iyi bir şekilde örtüşmektedir. Bu da yapılan analizin doğrulunu ispatlamaktadır.

Öte yandan m gölgeleme parametresinin değerinde yapılan değişimlerin hata performansına olan etkisi Şekil

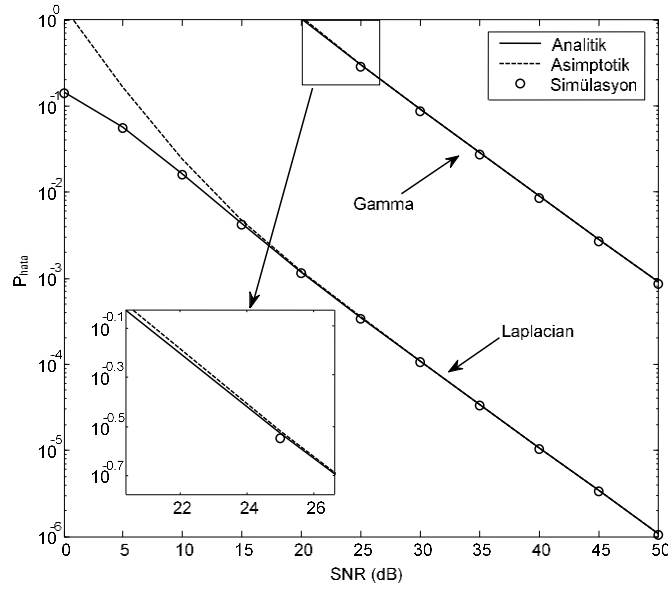
4'te sunulmuştur. Burada ise, yine Laplacian gürültüsü koşullarında, $K_1=K_2=10$, $p=q=0.5$ ve 8-PAM modülasyonu kullanılmıştır. Gölgeleme parametresinin değeri arttıkça ele alınan kanalın matematiksel modeline göre gölgeleme etkisi azalmaktadır. Diğer bir ifade ile kanal koşulları sinyal iletimi için daha uygun hale gelmektedir. Bu duruma göre, m değerinin artması hata performansını olumlu olarak etkilemekte ve daha iyi sonuçların elde edilmesine sebep olmaktadır. Sayısal bir örnek ile bu durumu açıklarsak: bu senaryoda 10^{-3} 'lük bir hata performansı için $m=1$ iken yaklaşık 40 dB gerekli, $m=3$ iken yaklaşık 32 dB gerekli olmaktadır. Bu da m gölgeleme parametresinin değerinin 1'den 3'e geçtiğinde 10^{-3} 'lük bir hata performansı için yaklaşık 8 dB'lik bir kazanç sağladığını göstermektedir.



Şekil 3. Farklı K_1 ve K_2 konfigürasyonları için hata performansı kıyaslaması



Şekil 4. Farklı gölgeleme parametre değerleri için hata performansı kıyaslaması



Şekil 5. Farklı gürültü türleri için hata performansı kıyaslaması

Şekil 2, 3 ve 4'te verilen sonuçların hepsinde Laplacian gürültü koşulları düşünülmektedir. Oysaki Şekil 5'te verilen sonuçlarda farklı iki gürültü tipinin kıyaslaması verilmektedir. $K_1 = K_2 = 10$, $p = q = 0.5$, $m=2$ ve BPSK modülasyonu kullanıldığında Gama ve Laplacian gürültülerinin hata performanslarına olan etkisi Şekil 5'te sunulmuştur. Bu sonuçlarda da yine sunulan analitik ve asimptotik sonuçların simülasyonlarla uyum içerisinde olduğu dikkati çekmektedir. Buna ilaveten, Gama gürültü koşullarının Laplacian gürültü koşullarına göre hata performansı açısından sistemi oldukça olumsuz etkilediği açıkça görülmektedir.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, SISO bir sistemin alternatif Rician sönümlenmesinde geliştirilmiş Gauss gürültüsü için hata performansı araştırılmıştır. Performans analizleri gerçekleştirilirken ele alınan kanal modelinin PDF ifadesinden faydalanılmıştır. Gerçekleştirilen analizlerde matematiksel çözümleme için geliştirilmiş Gauss fonksiyonuna üstel terimlerin toplamı şeklinde olan bir yaklaşım kullanılmıştır. Buna ilaveten yapılan analitik ifadeleri kolaylaştırmak için asimptotik analiz de sunulmuştur. Yapılan analizlerin geçerliliğini göstermek için farklı farklı senaryolar oluşturulmuş, hata performans değişimleri gösterilmiştir. Ayrıca bu senaryolarda farklı modülasyon, gürültü, gölgeleme ve konfigürasyonlar ele alınarak literatüre uygun bir şekilde hata performansının değiştiği gösterilmiştir. Son olarak, yapılan analizlerin doğruluğunun gösterilmesi için simülasyon sonuçları ile kıyaslamalı olarak tüm senaryolar sunulmuştur. Bütün sonuçlarda, simülasyonlar ile elde edilen analitik ifadelerin kullanıldığı analitik ve asimptotik sonuçların iyi bir uyum gösterdiği gözlemlenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 14

Kaynaklar

- [1] M. K. Simon and M-S. Alouini, Digital Communication Over Fading Channels, 2nd ed. Hoboken, New Jersey, USA: IEEE: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [2] J. F. Paris, Closed-form expressions for Rician shadowed cumulative distribution function. IET Electronics Letters, 46 (13), 952-3, 2010.
- [3] M. R. Bhatnagar and A. M.K., On the closed-form performance analysis of maximal ratio combining in shadowed-Rician fading LMS channels, IEEE Communications Letters, 18 (1), 54-7, 2014. <https://doi.org/10.1109/lcomm.2013.111313.131963>
- [4] M. C. Clemente and J. F. Paris, Closed-form statistics for sum of squared Rician shadowed variates and its application, IET Electronics Letters, 50 (2), 120-1, 2014.
- [5] N. I. Miridakis, D. D. Vergados and A. Michalas, Dual-hop communication over a satellite relay and shadowed Rician channels, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 64 (9), 4031-40, 2015. <https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2361832>
- [6] L. Moreno-Pozas and E. Martos-Naya, On some unifications arising from the MIMO Rician shadowed model, IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Nanjing, pp. 1-5, 2016. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2016.7504374>
- [7] J. Lopez-Fernandez, J. F. Paris and E. Martos-Naya, Bivariate Rician shadowed fading model, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 67 (1), 378-84, 2018. <https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2744800>
- [8] N. Simmons, C. R. N. da Silva, S. L. Cotton, P. C. Sofotasios and M. D. Yacoub, Double shadowing the Rician fading model, IEEE Wireless Communications

- Letters, 8 (2), 344-7, 2019. <https://doi.org/10.1109/LWC.2018.2871677>
- [9] F. J. Lopez-Martinez, L. Moreno-Pozas, U. Fernandez-Plazaola, J. F. Paris, E. Martos-Naya and J. M. Romero-Jerez, A tractable line-of-sight product channel model: application to wireless powered communications, 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), Lisbon, pp. 1-5, 2018. <https://doi.org/10.1109/ISWCS.2018.8491254>
- [10] S. L. Cotton, A statistical model for shadowed body-centric communications channels: theory and validation, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 62 (3), 1416-24, 2014. <https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2295211>
- [11] T. Mavridis, L. Petrillo, J. Sarrazin, A. Benlarbi-Delaï and P. De Doncker, Near-body shadowing analysis at 60 GHz, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 63 (10), 4505-11, 2015. <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2456984>
- [12] S. K. Yoo, S. L. Cotton, P. C. Sofotasios and S. Freear, Shadowed Fading in indoor off-body communication channels: a statistical characterization using the κ - μ /Gamma composite fading model, IEEE Transactions on Wireless Communications, 15 (8), 5231-44, 2016. <https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2555795>
- [13] U. F. Plazaola, J. L. Fernandez, J. F. Paris and E. M. Naya, A tractable fading channel model with two-sided bimodality, IEEE Access, 7, 99928-36, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2930811>
- [14] M. Bilim, Effective throughput of alternate rician shadowed fading links, IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 15 (6), 928-30, 2020. <https://doi.org/10.1002/tee.23135>
- [15] M. Bilim, Different QAM schemes analyses for ARS fading channels, Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, e4119, 2020. (Accepted for publication) <https://doi.org/10.1002/ett.4119>
- [16] H. Soury, F. Yilmaz and M. Alouini, Average bit error probability of binary coherent signaling over generalized fading channels subject to additive generalized Gaussian noise, IEEE Communications Letters, 16 (6), 785-8, 2012. <https://doi.org/10.1109/lcomm.2012.040912.112612>
- [17] O. S. Badarneh, Error rate analysis of M-ary phase shift keying in α - η - μ fading channels subject to additive Laplacian noise, IEEE Communications Letters, 19 (7), 1253-56, 2015. <https://doi.org/10.1109/lcomm.2015.2423277>
- [18] M. Bilim, Uplink communications with AWGGN over non-homogeneous fading channels, Physical Communication, 39, 101047, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2020.101047>
- [19] E. Salahat and A. Hakam, Novel unified expressions for error rates and ergodic channel capacity analysis over generalized fading subject to AWGGN, 2014 IEEE Global Communications Conference, Austin, TX, pp. 3976-3982, 2014. <https://doi.org/10.1109/glocom.2014.7037429>
- [20] I. Gradshteyn and I. Ryzhik, Table of Integrals, Series and Products. 6th ed. New York, NY, USA: Academic, 2000.





Tedarik zincirinde değer katmayan faaliyetlerin ortadan kaldırılması: İmalat sektöründe bir değer akış haritalama uygulaması

Eliminating non value-added activities in supply chain: A value stream mapping case study in manufacturing sector

Nuri Özgür Doğan¹ , Aycan Kama^{2,*} 

¹Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, 50300, Nevşehir, Türkiye

²Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, 50300, Nevşehir, Türkiye

Özet

Günümüzdeki artan rekabet ortamında işletmeler arasındaki rekabet artık işletmelerin yer aldığı tedarik zincirlerine genişlemiştir. Hammadde tedarikçisinden nihai ürünün müşteriye ulaşmasına kadar uzayan bir tedarik zincirinde yer alan tüm aktörler birbirlerine entegre bir şekilde faaliyet göstermelidir. Yani zincirde sadece bir işletmenin etkin ve etkili olması yeterli değildir. Tedarik zinciri boyunca ilk tedarikçiden son müşteriye kadarki süreçte meydana gelen ürün ve/veya hizmet akışı ile bilgi akışı kesintiye uğramadan akıcı bir şekilde gerçekleşmelidir. Bunun için de süreçlerde israf olarak nitelendirilebilecek değer katmayan faaliyetler yer almamalıdır. Süreç içerisindeki israfın görünür hale gelmesinde kullanılan yöntemler vardır. Yalın üretim yöntemlerinden olan değer akış haritalama (DAH) da bunlardan birisidir. Bu çalışmada bu yöntem tek bir işletme yerine işletmenin yer aldığı bir tedarik zincirine odaklanarak kullanılmıştır. Bu doğrultuda çalışmanın amacı imalat sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin tedarik zincirinde DAH yöntemi kullanılarak israf ve israf kaynaklarının tespit edilmesidir. Bu kapsamda ilk olarak mevcut durum haritası çizilmiş ve zincir boyunca gerçekleşen akışta yer alan israf ve israf kaynakları belirlenmiştir. Bu israf kaynaklarının ortadan kaldırıldığı ya da en aza indirildiği yalın akış ise gelecek durum haritası çizilerek gösterilmiştir. Çalışmada son olarak araştırmanın kısıtları ile ileriye dönük önerilere yer verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Değer akış haritalama, Tedarik zinciri yönetimi, Yalın üretim.

1 Giriş

Küresel piyasa ve artan rekabet koşulları nedeniyle, ürün veya hizmetin, hammadde tedarik sürecinden alıcıya ulaşmasına kadar geçen süre içerisinde israf olarak değerlendirilen ve değer katmayan faaliyetlerin ortadan kaldırılması ve bu sayede maliyetlerin minimuma düşürülmesi işletmeler açısından oldukça önemli hale gelmiştir [1]. Yalın üretim sistemi bu süreçte oluşan israf ve değeri birbirinden ayıran, insan kaynağı israfından ve kullanılmayan stok fazlası malzemelerden kurtulmayı hedefleyen, minimum maliyetle daha kısa zamanda, daha kaliteli mal veya hizmet üreterek, ürünün müşterilere daha hızlı ve güvenli bir şekilde ulaşmasını sağlayan ve bu işlemleri en yalın şekilde gerçekleştirmeyi hedefleyen bir üretim şeklidir [2]. Yalın üretim tekniklerinden en önemlilerinden birisi olan Değer Akış Haritalama (DAH) tekniği ile işletmenin mevcut durum değerlendirmesi yapılarak, süreç içerisinde görülen israf ve israf kaynaklarının belirlenmesi sağlanmaktadır. Yalın uygulamanın işletmeye ne gibi faydalar sağlayacağı ise

Abstract

In today's increased competitive environment, competition between enterprises has expanded to supply chains. All actors in a supply chain extending from the raw material supplier to final product reaching the customer must operate in an integrated manner. In other words, it is not enough that only one enterprise in the chain is effective and efficient. Throughout the supply chain, the flow of products and / or services from the first supplier to the end customer must flow smoothly without interrupting the flow of information. For this purpose, activities that do not add value that can be considered as waste should not be included in the processes. There are methods used to make the waste in the process visible. Value stream mapping (VSM), one of the lean manufacturing methods, is one of them. In this study, this method is used instead of a single enterprise by focusing on a supply chain with the enterprise. In this direction, the aim of the study is to determine the waste and resources of waste by using the VSM method in the supply chain of an enterprise operating in the manufacturing sector. In this context, the current state map was drawn and the waste and resources of waste in the flow along the chain were determined. Lean flow, where these waste sources are eliminated or minimized, is shown by drawing a future state map. In the study, the recommendations of the study are given as a result of the limitations of the research.

Keywords: Value stream mapping, Supply chain management, Lean manufacturing.

mevcut durum değerlendirmesi sonrası yapılacak olan gelecek durum haritası ile belirlenmektedir.

İmalat sektörü içerisinde birçok alan vardır ve tekstil sektörü de bunlardan birisidir. Tekstil sektörü uluslararası ticarete oldukça önemli bir sanayi dalıdır. Tekstil sektörünün en önemli alt kalemlerinden olan iplik üretimi, pamuk, elyaf ve polyesterin açılması, temizlenmesi vb. işlemlerden geçerek oluşmaktadır. Avrupa'da iplik üretiminin en fazla olduğu ülkenin Türkiye olduğu bilinmektedir ve 2014 yılı verilerine bakılarak Türkiye'de iplik üretimi yapan 500 iplik fabrikası olduğu bilinmektedir. Bu fabrikaların yoğun olduğu illerden birisi de Kahramanmaraş'tır [3].

Literatür taraması bilgileri ışığında DAH tekniği ile yapılan çalışmaların daha çok işletme içerisindeki faaliyetlere odaklandığı ve işletmenin tedarik zincirine odaklanılarak yapılmış DAH tekniği uygulamalarının yeterli olmadığı gözlemlenmiştir, bu nedenle bu çalışmada Kahramanmaraş ilinde iplik üretimi alanında faaliyet gösteren 690 personel ile çalışan büyük çaplı bir fabrika ele

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kamaaycan@hotmail.com (A. Kama)

Geliş / Received: 11.07.2019 Kabul / Accepted: 18.11.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngmuh.590637

*Bu çalışma 25-27 Nisan 2019 tarihlerinde düzenlenen 8. Ulusal Lojistik ve Tedarik Zinciri Kongresinde sunulan "Tedarik Zincirinde Değer Akış Haritalama: İmalat Sektöründe Bir Uygulama" başlıklı bildirden genişletilerek türetilmiştir.

alınmış ve bu fabrikanın yer aldığı tedarik zinciri üzerine odaklanılmıştır. Söz konusu işletmenin üst yönetimi ile yapılan görüşmeler sonucunda birtakım değerlendirmeler yapılmıştır. Bu kapsamda fabrikanın tedarik zincirine bakılarak hammadde alımından, mamulün alıcıya ulaşmasına kadar geçen süre içerisinde, israf olarak nitelendiren tüm faaliyetlerin değerlendirilmesi ve müdahale edilebilir faaliyetlerde yalın uygulamalar yapılarak değer katmayan faaliyetlerin belirlenmesi ve bunların ortadan kaldırılması ya da en aza indirilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda çalışmanın ‘teorik çerçeve’ başlıklı ikinci kısmında yalın üretim ve tedarik zinciri yönetimi kavramlarına yer verilmiştir. Çalışmanın üçüncü kısmında DAH tekniği ile yapılmış olan çalışmalar incelenerek bir literatür taraması yapılmıştır. Dördüncü kısımda çalışmanın yöntemi olan DAH tekniği yer verilmiştir ve çalışmada ele alınan tedarik zincirine ilişkin olarak çizilen mevcut durum haritası ve gelecek durum haritasına yer verilmiştir. Son olarak sonuç kısmında elde edilen bulgular ışığında birtakım değerlendirmeler yapılarak gelecekte gerçekleştirilecek olan çalışmalara öneriler sunulmuştur.

2 Kavramsal çerçeve

Çalışmanın bu kısmında öncelikli olarak yalın üretim kavramına değinilerek, yalın üretimde israfı önlemeye yönelik kullanılan yalın üretim tekniklerine değinilecektir. Son olarak tedarik zinciri yönetimi konusu üzerinde durulacaktır.

2.1 Yalın üretim

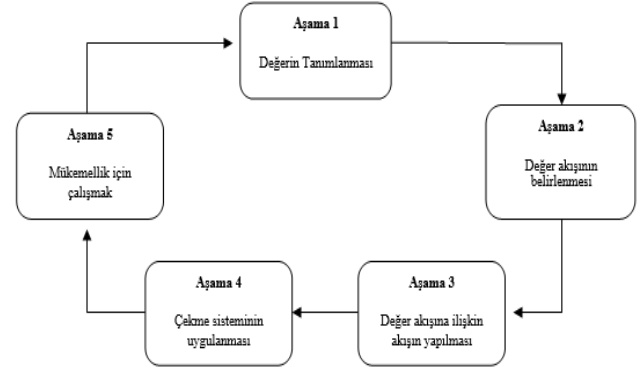
Yalın üretim, Toyota Motor İşletmesi’nde ortaya çıkan bir Japon iş organizasyonu yöntemidir. 1980’li yıllara kadar “Toyota Üretim Sistemi” olarak bilinen, alternatif üretim felsefesi olarak bütün dünyaya yayılma döneminde çeşitli ülkelerde ve işletmelerde birbirlerine yakın özelliklerde ama farklı şekillerde tanımlanmıştır [4].

Yalın Üretim, süreç içerisindeki hata, işçilik, maliyet, üretim alanı, stok ve fire gibi unsurları en aza indirgeyen bir üretim sistemi felsefesidir. Bunların yanı sıra yalın üretim pazar hedeflerini en kısa sürede karşılayabilmek amacıyla, süreçte yer alan herkesin çalışmasını bir bütün olarak ele almaktadır [5]. Yalın üretimin temeli yalın düşünceden geçer. Yalın düşünce israflardan arındırılmış süreçlerin etkinlik ve verimlilik analizleri ile maliyetleri minimuma indirmek ve müşteriye mükemmel değerler sunarak, imalat sistemindeki tüm israfları ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır [2].

Yalın sistemler, işletmenin temel ve destek süreçleri arasındaki mevcut iç bağlantıları ve müşteriler ve tedarikçilerle arasındaki dış bağlantıları da etkilemektedir. Yalın sistemlerin kullanımı tedarik zincirinin tasarımı, organizasyon bünyesinde bulunan çeşitli bölümler ve işlevsel alanlar için büyük öneme sahiptir [6].

Yalın üretimde gereğinden fazla işlem, üretim, stok, hareket, taşıma, makinelerin ve çalışanların beklemeleri ve hatalı üretim olmak üzere yedi tip israf belirlenmiştir. Bunlara ek olarak Ohno bir israf türü daha olduğunu belirterek ve sekizinci israf türünü beşeri kaynak israfı oluşturmaktadır [7].

Aşağıdaki şekilde işletmelerin kendi süreçlerini uyumlu duruma getirdikleri yalın üretim sisteminde gerekli olan yalın düşünce modeli yer almaktadır [2].



Şekil 1 Yalın düşünce modeli [8]

Bir işletmeyi yalın işletme yapan temel ilkeler şunlardır [5];

- Değer: Yalın üretim değer kavramının tanımı ile başlar. Değer, müşterinin ödemeye istekli olduğu ve istediği ürün veya hizmet özelliklerinin tümünü kapsamaktadır. Değer, hizmet veya ürünün dinamik, içsel ve önemli bir ögesidir [2].

- Değer Akışı: Bir ürünün ortaya çıkarılmasında ihtiyaç duyulan, katma değer yaratan ve yaratmayan faaliyetlerden oluşmaktadır [8].

- Sürekli Akış: Sürekli akışın sağlanabilmesi için her işçi ve makinenin istediği anda çalışmaya başlaması ve üretilen ürünlerin kesinlikle kusurlu olmaması gerekmektedir. Sistem bu şekilde tasarlanmıştır [5].

- Çekme: İstasyonların kendilerinden sonra gelen istasyonun anında işleme başlatabileceği miktarda parçayı tam zamanlı olarak üretmesi anlamına gelmektedir [9].

- Mükemmellik: İşletmenin sıfır stok ile çalışması ve aynı anda tüketicinin talebini de karşılayabilmesi bir mükemmellik göstergesidir. Mükemmellik tanımında sadece ürünün kalitesi düşünülemez, maliyetlerin düşürülmesi, verimlilik artışı, stokların neredeyse sıfıra inmesi, depolama maliyetlerinin ve israfın minimuma indirilmesi de sağlanmalıdır [10].

Yalın üretim teknikleri kapsamında kullanılan çok sayıda teknik vardır, bu çalışmada önemli bazı tekniklere kısaca değinilmiştir.

Tam zamanında üretim (JIT): Müşteri istek ve ihtiyaçlarını en az işgücü, ekipman ve malzeme kullanarak ihtiyaç duyulduğu miktarda ve ihtiyaç duyulduğu anda üretmeyi amaçlayan ve böylece israfı en aza indiren bir yalın üretim tekniğidir [11]. Tam zamanında üretim, tüm işlemlerin gerekli zamanda gerekli parçaları üretmesini ve sadece süreçleri tutmak için gerekli minimum stokla çalışmasını sağlayarak, üretim süresinin büyük ölçüde kısaltıldığı bir yöntemdir [12].

Tek parça akışı: Yalın üretim gereğinden fazla zaman kaybını önlemeye yönelik bulunduğu çözümlerden biriside tek parça akışı tekniğidir. Bu teknik, herhangi bir atölye içinde

bir parçanın nihai ürün halini alması için kullanılan tüm makine ve parçaların işleme sırasına göre birbirlerinin ardi sıra yerleştirilmeleri ve parçanın hiç beklemeden bir sonraki makineye geçmesi şeklindedir [13].

Kanban sistemi: Yalın sistemlerin en önemli öğelerinden birisi de kanban sistemidir. Japonca'da kelime anlamı olarak "kart" ve "görünür kayıt" anlamına gelmektedir, fabrika içerisinde üretim sürecinde akışın kontrolünün sağlanabilmesi için kullanılan kartları temsil etmektedir [6].

Otonomasyon-JIDOKA: Üretimde herhangi bir problemle karşılaşıldığında hatalı parçaların üretim akışına karışıp ilerleyen süreçlerde üretimi kesintiye uğratmaması ve daha fazla israf oluşmaması için üretim hattının durdurulma yetkisinin operatöre verilmesidir [13, 14].

Tekli dakikalarda kalıp değiştirme (SMED): 1950'li yıllarda Shigeo Shingo stoksuz üretim yapılabilmesinde en birinci koşulun makinelerin hazırlık aşamalarında harcanan sürenin kısaltılması olduğunu ileri sürmüştür. Bu nedenle JIDOKA tekniği ile bir makine, bir parçadan başka bir parçaya bir dakikanın altında geçmesini sağlamayı amaçlamaktadır, böylece makinelerin esneklik kazanarak stoksuz üretimin yapılmasına uygunluğu sağlanmış olacaktır [15].

5S Sistemi: Bu teknik 'S' ile başlayan 5 Japonca kelimenin baş harfleri ile ifade edilmektedir, bu kelimeler Sınıflandırma (Seiri), Sırala-Düzenle (Seiton), Sil-Temizle (Seiso), Standartlaştır (Seiketsu) ve Sahiplen-Sistemi Koru-Disiplin (Shitsuke) [11]. Bu teknik oldukça basit özelliktedir, bu nedenle kolay bir şekilde uygulama alanı bulabilir ve böylelikle işyeri iyileştirmede öncelik taşımaktadır. 5S sistemi uygulanarak çalışma ortamında düşük maliyetlerle değişiklikler yapılabilir ve çalışanların kendilerine ve çalıştıkları kuruma saygısı artabilir bunun yanı sıra stok ve malzeme maliyetleri de düşürülebilir [16].

Sınıflandırma; çalışma ortamındaki gerekli ve gereksiz malzemelerin birbirlerinden ayrıştırılması, düzenleme; her malzeme için ayrılmış bir alan olmalı ve malzemeler oradan alınıp tekrar oraya bırakılması, temizlik; çalışma ortamının temiz olmaması hatalı ürüne ve iş kazalarına neden olabilir bu nedenle çalışma ortamı sürekli olarak temizlenmesi, standartlaştırma; diğer aşamalarda elde edilen düzenin sürekliliğinin sağlanması, disiplin;tüm personelin bu tekniği benimsemesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesini kapsamaktadır [17].

Kaizen: Kaizen süreklilik arz eden bir süreç iyileştirmeyi öngörmektedir. Bu teknik mevcut üretim sisteminde birtakım iyileştirmeler yapmayı ve ortaya çıkan sorunlara çözümler geliştirmek için farklı disiplinlerden çalışanlar bir araya getirerek israfları tanımlamayı ve diğer israfların önüne geçebilmek için birtakım girişimlerde bulunmayı amaçlamaktadır [16].

Toplam üretken bakım: Bir fabrikada kullanılan makine ve teçhizatların etkinlik ve verimliliklerini artırmak ve oluşabilecek hataların önüne geçebilmek amacıyla gerçekleştirilen çalışmaların tümünü kapsamaktadır. Bu teknik diğer tekniklere destek bir teknik niteliğindedir [15].

Poka yoke: Bu teknik dalgınlık, dikkatsizlik, yanlış anlama, tecrübesizlik, konsantrasyon eksikliği, standartların eksikliği vb. faktörlerden dolayı oluşabilecek hataları önlemeye yönelik yardımcı araç ve stratejileri kullanarak fakat daha fazla kontrol elemanına gerek duymadan sıfır hatalı üretimin yapılmasını amaçlamaktadır. Bu nedenle tezgâh üzerinde ilave mekanizmaların kullanımına gidilebilir [5].

2.2 Tedarik zinciri yönetimi

Tedarik, dar anlamda üretim girdisi olarak düşünülmektedir, daha geniş bir tanımı yapılacak olursa tedarik, üretimin belirli aşamalarına entegrasyonu mümkün olan başka mal ve hizmetlerinde devreye sokulması şeklinde yapılabilmektedir [18].

Tedarik Zinciri Yönetimi (TZY), işletmelerin pazar paylarını yükseltmek amacıyla rekabet güçlerini artırmaya ve bununla birlikte ürün ve hizmetlerini sürekli geliştirerek müşteri memnuniyetini sağlamaları için geliştirilmiş olan modern bir yönetim anlayışı olmaktadır [19]. Tedarik zinciri yönetimi, tek bir şirket gibi faaliyet yaparak süreç, insan, teknoloji, performans gibi kaynakların ortak kullanımını sağlayarak bir sinerji oluşturmayı amaçlamaktadır, bu sayede ürün ve hizmetler, düşük maliyette ve yüksek kalitede, müşteri memnuniyeti sağlanarak piyasaya hızlı bir şekilde sunulabilecektir [20].

Tedarik zinciri yönetimi; üretim, pazarlama, tedarik, satın alma ve lojistik faaliyetlerin bir bütün olarak ele alınmasını ve zincirde yer alan işletmeler arasındaki faaliyetlerin uyumlu hale getirilmesini gerekli kılmaktadır. Bunun yanı sıra TZY; tedarikçilerin karşılıklı ilişkilerinin geliştirilmesini ve tedarikçileri stratejik ortak şeklinde değerlendirilmesini, işletmelerin üretim, yönetim ve organizasyon yapılarını değiştirmeyi gerektiren çok yönlü bir yönetim anlayışıdır [21]. Tedarik zinciri yönetimi, müşterilere ürün sunma dışında kalan kısımları yönetebilmek için çaba sarf etmediği süreç iyi bir tedarik zinciri yönetimini oluşturamaz [22]. Bu nedenle tedarik zinciri yönetiminin etkin olabilmesi için sürecin bir bütün olarak ele alınması ve tüm faaliyetlerin bu zincirin her aşamasının ayrı ayrı etkinliklerinin sağlanması göz önünde bulundurularak yapılması gerekmektedir.

3 Literatür taraması

Bu bölümde imalat ve hizmet sektöründe DAH konusunda yapılmış olan yerli ve yabancı literatürde yapılan çalışmalara değinilmiştir.

Dağ (2009), çalışmasında düzlemsel güneş enerjisi kolektörleri üreten bir işletmede yalın üretim tekniklerinden DAH tekniği kullanarak, tedarik zincirindeki değer akışının haritalandırılmasını ve israfların belirlenmesi ile bu israfların ortadan kaldırılmasını amaçlamıştır [23].

Alaca (2010), çalışmasında beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren bir firmada değer DAH araçları kullanılarak değer zinciri analizi yapmayı amaçlamıştır. Değer zinciri analizi yapılırken üç ayrı haritalama aracı kullanarak, katma değer yaratmayan faaliyetlerin elimine edilmesi için birtakım öneriler geliştirilmiştir [24].

Efe (2011), çalışmasında yalın düşüncenin hizmet sektörüne uygulanabilirliği üzerine araştırmalar yapmıştır.

Bu amaç doğrultusunda Ankara Numune ve Araştırma Hastanesi Acil servisinde birtakım çalışmalar yapılmıştır. Bu doğrultuda DAH tekniği kullanılarak mevcut durum analizi yapılarak israf türleri belirlenmiş ve iyileştirmeler yapılarak gelecek durum haritası oluşturulmuştur. Son olarak mevcut ve gelecek durum haritaları kıyaslanarak hizmet sektöründe yalın sistemlerin uygulanabilirliği değerlendirilmiştir [25].

Morlock ve Meier (2015), çalışmalarında hizmetler için DAH'nın bir uyarılmasını temsil ederek, bunun bir performans yönetimine nasıl entegre edilebileceğini göstermeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla literatür taraması yapıldıktan sonra yeni yöntem sunulmuş ve birtakım öneriler geliştirilmiştir [26].

Adalı vd. (2016), çalışmalarında Sakarya'da faaliyet gösteren bir traktör fabrikasında yalın uygulamalardan DAH uygulaması yapmayı amaçlamışlardır. Mevcut durum analizi yapılarak süreç içerisindeki israflar ve boşa geçen süreler belirlenmiş ve daha sonra gelecek durum analizi yapılarak bu israfların önlenmesine yönelik çalışmalar yapılarak %8 oranında iyileştirme elde edilmiştir [27].

Bulut ve Altunay (2016), çalışmalarında, Kayseri ilinde faaliyet gösteren mobilya sektöründe lider konumdaki bir firmanın israfını en aza indirerek, süreç verimliliğini arttırmayı ve yalın üretim felsefesine ulaşabilmeyi amaçlamışlardır. Çalışmanın sonucunda, üretim sistemini yeniden değerlendirebilmek ve israf kaynakları ile israfın temel sebeplerini görebilmek amacıyla DAH tekniği kullanılmıştır [1].

Doğan ve Unutulmaz (2016), çalışmalarında bir sağlık kuruluşunun DAH tekniği ile yalınlaşma öncesinde nasıl olduğunun görülmesini ve daha etkin olunabilmesi için neler yapılması gerektiğinin belirlenmesini amaçlamışlardır. Türkiye'de sağlık sektöründe az sayıda çalışma olması nedeni ile sağlık sektörü seçilmiş olup, bir kamu hastanesinin fizik tedavi ve rehabilitasyon bölümüne simülasyon bazlı DAH yöntemi uygulanmıştır. Bölümün mevcut ve gelecekteki durumları DAH yöntemi kullanılarak haritalanmış ve simülasyon daha sonra mevcut ve gelecekteki durum haritalarını dinamik hale getirmek için kullanılmıştır [28].

Doğan ve Ersoy (2016), çalışmalarında laboratuvar analizleri hizmeti sağlayan bir üniversite araştırma ve uygulama merkezinde DAH yöntemini kullanarak değer katan ve katmayan faaliyetlerin belirlenmesini, değer katmayan faaliyetlerin ortadan kaldırılması için birtakım öneriler geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada mevcut durumda görülen israfları elimine edebilecek bir gelecek durum haritası oluşturulmuş ve gelecek durum için öneri olacak bir yalın hizmet akışı gösterilmiştir [29].

Maraşlı, Akça ve Kama (2016), çalışmalarında DAH tekniği kullanılarak bir dondurma üretim sürecini, aşamalarını, üretimin nasıl ilerlediğini, üretim süresini öğrenmeyi ve çalışmanın yapıldığı şirketin üretim sistemini incelemek, kalıp değişiminin ne kadar sürdüğünü ve stokların azaltılmasında şirkete en uygun yalın tekniğin ne olduğunun belirlenmesi amaçlanmıştır [2].

Güner Gören (2016), bu çalışmasında israfın çok olduğu mobilya sektöründe DAH ve simülasyon tekniğini birleştirerek bir endüstriyel uygulama örneği sunmuştur.

Belirli bir ürün ailesine yönelik iyileştirme önerileri ile mevcut durum ve gelecek durum haritaları DAH kullanılarak açıklanmıştır. Bir simülasyon modeli oluşturularak önce ve sonra senaryoları analiz edilmiştir [30].

Romero ve Arce (2017), çalışmalarında sistematik bir yaklaşıma dayanarak, hakemli dergilerde yayınlanan literatürü analiz etmeyi, akademisyenlere ve araştırmacılara, DAH'nın evrimi, uygulaması ve performansı ile ilgili olarak imalat sektörü bağlamında değerli bulgular sağlayan bir literatür taraması yapmayı amaçlamıştır [31].

Antonelli ve Stadnicka (2018), çalışmalarında DAH kullanarak otomotiv sektöründe üretim akışının analiz edilmesini ve mevcut sorunların tespit edilmesini amaçlamışlardır. Analiz sonucunda süreçte birtakım değişiklikler yapılması önerilmiştir ve önerilen değişiklikler simülasyon tekniği ile onaylanmıştır [32].

Literatür taraması sonucunda görüldüğü üzere yalın üretim tekniklerinden DAH ile yapılmış çalışmaların olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada literatürde yer alan diğer çalışmalardan farklı olarak DAH, imalat sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin tedarik zincirine uygulanmıştır.

4 Yöntem ve veri seti

Çalışmanın bu kısmında yalın üretimde israfların belirlenmesi ve giderilmesi konusunda kullanılan en etkili tekniklerden birisi olan DAH tekniğinden bahsedilmiştir ve çalışmada ele alınan fabrika için oluşturulan mevcut durum haritası ve gelecek durum haritasına yer verilmiştir.

4.1 Değer akış haritalama

Yalın düşünce temelinde, değer, değer akışı, akış, çekme ve mükemmellik ilkelerinden oluşmaktadır. Değer akışı, her mamul veya hizmetin oluşmasında ihtiyaç duyulan değer yaratan ya da yaratmayan faaliyetlerdir. Akış ise, mamul veya hizmetlerin müşterilere ulaşabilmesi için değer yaratan faaliyetlerin bir süreç şeklinde dizilmesidir [33, 34].

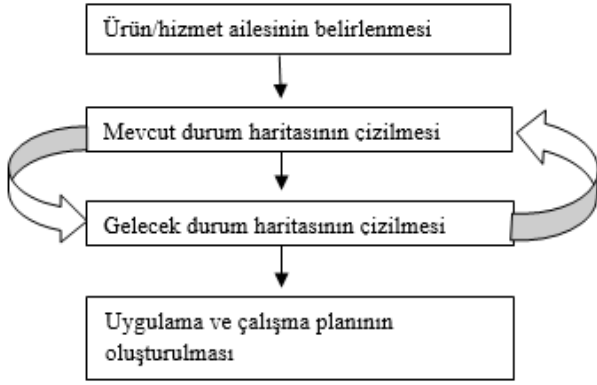
Yalın üretim felsefesinde kullanılan en önemli tekniklerden birisi DAH'dır. Bu teknik hem imalat hem de hizmet sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. DAH; bir ürün oluşumun, hammadde olarak işletmeye gelişinden nihai ürün şeklinde müşteriye ulaşmasına kadar gerçekleşen süreçleri içermektedir [27].

Yalın üretim çalışmalarında, mevcut sistemin durumunu tasvir eden "Mevcut Durum Haritası" ve yapılan iyileştirmeler neticesinde sistemin gelecekte ulaşılacak durumunu gösteren "Gelecek Durum Haritası" olmak üzere iki ayrı değer akışı diyagramı kullanılmaktadır [1]. DAH yöntemi uygulanırken izlenen adımlar Şekil 2'deki gibidir

Süreçte israfı en az seviyeye düşürebilmek için mamul veya hizmetin müşteri tarafından talep edildiği aşamadan başlayarak tekrar müşteriye ulaşmaya kadar oluşabilecek hataları yok etmek gerekmektedir [34].

4.2 Mevcut durumun analizi

Bu bölümde iplik üretimi yapan fabrikanın tedarik zinciri hakkında birtakım değerlendirmeler yapılmıştır ve söz konusu fabrikanın mevcut durumu değerlendirilmiştir.



Şekil 2. DAH yöntemi uygulama adımları

Öncelikle Kahramanmaraş ili coğrafi konumu ve iklim yapısından dolayı tarım önceliklidir, Cumhuriyetin kurulmasından 1980’li yıllara kadar tarım dışında el sanatları ve hayvancılığa bağlı gelişim göstermiştir. 1984 yılı sonrasında ise Kahramanmaraş ili, kalkınma alanında öncelikli iller arasına girmiştir ve çeşitli teşvikler verilmesi ile tekstil sektörüne önemli yatırımlar yapılmıştır [36].

2016 yılı istatistiklerine bakılarak, tekstil alanında yüzde 31,5 ile İstanbul birinci sırada, yüzde 19,6 ile Gaziantep ikinci sırada, yüzde 14 ile Bursa üçüncü sırada ve yüzde 8 ile Kahramanmaraş’ın dördüncü sırada yer aldığı gözlemlenmiştir. Kahramanmaraş ilinde bulunan büyük çaplı fabrikalar tekstil ürünleri üretiminden önce çırçır fabrikaları olarak faaliyet göstermişlerdir ve daha sonra büyük entegre tesislere dönmüşlerdir [37].

Çalışmada ele alınan fabrikanın hammadde tedarik sürecinden mamulün alıcıya ulaştığı ana kadarki süreci incelediğimizde şu bulgular elde edilmiştir.

İlk olarak fabrika hammadde alımlarını yurtiçi ve yurtdışından yapmaktadır, yurtiçinden çoğunlukla pamuk ve çok sık olmasa da polyester alımı yapmaktadır, yurtiçi alımlarını anlaşmalı oldukları Adana, Şanlıurfa, İzmir ve Aydın illerinde bulunan firmalardan sağlamaktadır. Yurtdışında ise sıklıkla Endonezya, Avusturya ve nadiren de olsa Malezya’dan uzun süreli anlaşmalı oldukları firmalardan hammadde alımı yapmaktadırlar. Bu ülkelerden viskon ve polyester alımı yapılmaktadır. Bu çalışmada fabrikanın en uzun hammadde tedarik süreci olan Endonezya tedarik süreci değerlendirilmesine alınmıştır.

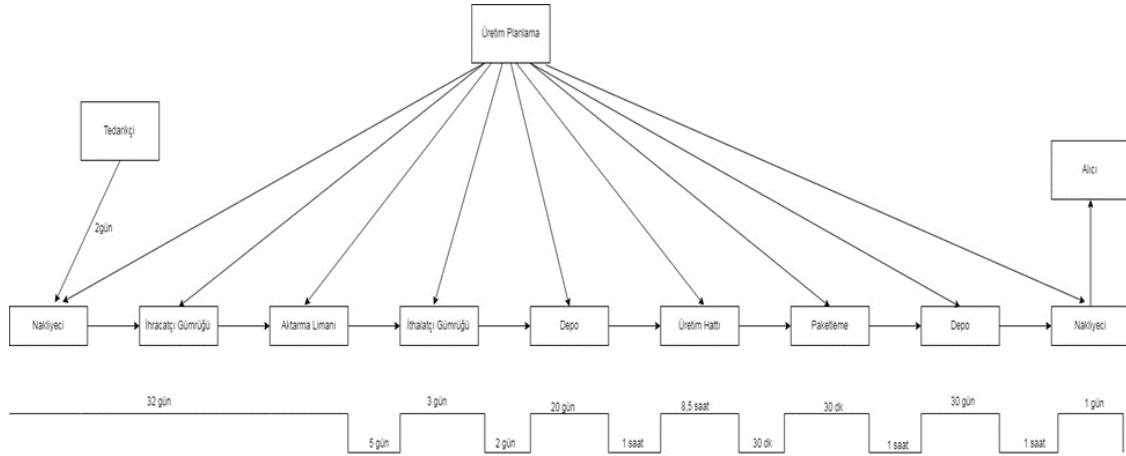
Fabrika üst yönetimi ile yapılan görüşmeler sonucunda tedarik zincirinin bazı aşamalarına müdahale edemediklerini, ipliğin hammaddesi olan pamuk, polyester ve viskonun bozulma payının çok düşük olduğu ve ekonomik dalgalanmaların yanı sıra yurtdışından alınan hammaddelerin ithalatçı gümrüğüne ulaşma süresinin bazı elde olmayan nedenlerden dolayı uzayabilme ihtimallerinin de olması nedeniyle çoğu zaman bir belirsizlik yaşanmaktadır. Bu nedenle özellikle yurtdışı alımlarında stoklu çalışmanın daha uygun olduğu belirtilmiştir. Hammadde stokunun yanı sıra ipliğinde bozulma veya çürüme payının düşük olması nedeniyle mamul stoklarının da yoğun olarak yapıldığı gözlemlenmiştir.

Üretim aşamasında minimum düzeyde hatalı üretim yapıldığı, makine ve teçhizatların hataya duyarlı oldukları ve bakımlarının düzenli olarak yapıldığı belirtilmiştir, bu nedenle israf olarak değerlendirilebilecek büyük çaplı hatalı üretimin yapılmadığı gözlemlenmiştir.

Tedarik zincirinde en büyük israf depo içerisindeki düzensizlikten kaynaklanmaktadır. Özellikle mamul depolarındaki düzensizlik nedeniyle gereğinden fazla işlem yapılmak zorunda kalınmaktadır. Tıra yüklenecek ürünlerin en arkalarda olması ve ön kısımdaki mamullerin sürekli olarak indirilip tekrar yerleştirilmesi söz konusudur, bu durum zaman kaybına ve indir-bindir işlemini yapan makine ve insan kaynağı içinde israf olarak değerlendirilmektedir. Depo fabrikanın içerisinde olmasına rağmen üç farklı yerde düzensizdir, bu durum depolar arasında ve depo ile üretim hattı arasında da gereksiz taşımaya neden olmaktadır.

Yurtdışı alımlarında en sık görülen israflardan birisi de gümrük işlemleridir. İhracatta gümrük işlemleri içerisinde yer alan dört hat mevcuttur. Bu hatlar; “kırmızı hat; eşyanın fiziki muayenesi ile birlikte belge kontrolünün de yapıldığı hattır. Sarı hat; fiziki muayeneye gerek görülmezsizin eşyaya ait beyanname ve eklerinin doğruluğunun ve birbiriyle uygunluğunun kontrol edildiği hattır. Mavi hat; eşyanın veya buna ilişkin yazılı beyan ve ilgili belgelerin veya ticari belge ve verilerin sonradan kontrol edildiği hattır. Yeşil hat; eşyanın belge kontrolüne veya fiziki muayeneye tabi tutulmadığı hattır”[38]. Konteynırın bu hatlardan hangisine düşeceği öngörülemez bir durumdur ve bir belirsizlik söz konusudur. Kırmızı hatta düşen konteynırın gümrükten çıkma işlemleri oldukça uzun sürmektedir ve bu durum için herhangi bir önlem alınmadığı belirtilmiştir.

Bunun yanı sıra gümrük işlemleri içerisinde “iç boşaltım” ve “geçici kabul” şeklinde iki ayrı durum söz konusudur. İç boşaltım “konteynırdaki eşyanın, gümrük ve liman prosedürlerinin tamamlanmasına müteakip müşteri veya temsilcileri (gümrük müşavirleri) nezaretinde içindeki eşyanın işçi veya forklift kullanılarak boşaltılması ve araca yüklenmesi operasyonudur” [39]. İç boşaltım işlemi yapıldığı takdirde malın gümrükten çıkması minimum bir günü bulmaktadır, bu durumda firmalar için zaman kaybı, gereksiz bekleme ve gereksiz işlem gibi israflar oluşturmaktadır. Birçok firmanın deniz yolu ile gelen ürünlerinin konteynırlardan boşaltılması ve gümrük işlemleri bitimi sonrasında tekrar yüklenmesi ve bu esnada ürünlerde hasarların meydana gelmesi gibi problemler yaşanabilmektedir ve en önemlisi zaman kaybı söz konusu olmaktadır. Bu durumda yapılması gereken şey geçici kabuldür. Geçici kabul deniz yolu ile gelen yüklerin konteynırdan indirilmesine gerek kalmadan, gümrük işlemleri bittikten sonra depoya konteynırlarla sevkinin yapılmasıdır. Bu işlem, yükün varış ihbarının gelmesi ile konteynır taşımacılığı yapan firmaya geçici kabul talimatının verilmesi ile gerçekleşir. Geçici kabul işlemi için firmaların ek bir ücret ödemeleri gerekmektedir [40]. Bir başka tanıma göre geçici kabul “Türkiye’deki gümrük mevzuatı gereği konteynırlar gümrüğe tabi mal statüsündedirler. Bu nedenle bir konteynırın limandaki gümrüklü sahadan çıkarılması veya tekrar limana getirilmesi halinde ortaya çıkan gümrükleme masrafıdır” [41]



Şekil 3. Mevcut durum haritası

Fabrika nakliye aşamasında outsourcing yapmaktadır. Anlaşmalı oldukları nakliye firması ile mamul alıcının eline ulaşmaktadır. Bu durumda fabrika için bir israf olarak değerlendirilmektedir.

Aşağıda mevcut durum haritası ile ilgili bilgiler verilmiştir;

- Hammadde tedarikçisinin konteynırları hazırlaması ortalama 2 gün,
- Armatörün (gemi sahibi) sevk edilecek konteynırları yüklemesinden gemi yüklemeye kadar ki geçen süre ortalama 10 gün,
- Gemiye yükleme ile aktarma limanı arasında geçen süre 15 gün,
- Konteynırlar aktarma limanında bir hafta ile iki hafta arasında bekliyor (7-14 gün),
- Konteynırların aktarma limanından ithalatçı gümrüğüne ulaşması 5 gün ve bazen bir haftayı bulmaktadır,
- İthalatçı gümrüğünde 3 güne kadar evrak işlemleri sürdüğü için bekleme olmaktadır,
- Evrak işlemler halledildikten sonra konteynırlar 2 gün içerisinde depoya ulaşıyor,
- Depoda bekleme süresi değişkenlik gösteriyor, hammaddenin bekleme süresi 20 gün sürmektedir,
- Hammaddenin üretim aşamasına sevk 1 saat,
- Mamul üretimi toplamda 8,5 saat,
- Mamul üretimi sonrasında ürün paketlemesi yine teknolojiye dayalı yapılmaktadır, paketlemeye sevk ortalama 30 dk sürmektedir, paketleme işlemi de ortalama 30dk sürmektedir, paketlenmiş mamullerin depoya sevk 1 saat sürmektedir,
- Stoklu çalışma nedeniyle mamullerin depoda bekleme süresi talebe göre değişkenlik göstermektedir, bu nedenle mamulün ortalama bekleme süresinin 30 gün olmaktadır.
- Mamulün depodan nakliyeciyi tırına yüklenmesi işlemi 1 saat sürmektedir, yükleme aşamasında forkliftlerden faydalanılmaktadır.
- Son olarak nakliye sürecinin 1 gün sürmesi ile mamul alıcıya ulaşmaktadır.

4.3 Gelecek Durumun Analizi

Fabrika üst yönetimi hammaddenin ithalatçı gümrüğüne gelişine kadarki sürece müdahale edemediklerini

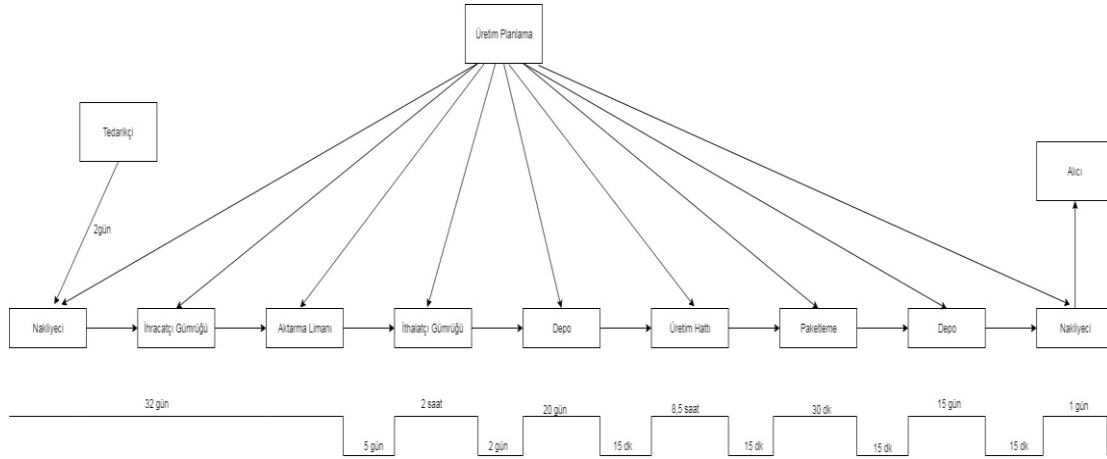
belirtmişlerdir, bu nedenle o süreç hakkında pek bilgi sahibi olmadıklarını da belirtmişlerdir. Bu nedenle bu çalışmada ithalatçı gümrüğünden sonraki aşama değerlendirilerek bu durum çalışmanın kısıtını oluşturmaktadır.

Söz konusu gelecek durumu yansıtan harita Şekil 4'te gösterilmektedir.

Hammadde ithalatçı gümrüğüne ulaştıktan sonra müdahale edilebilir durumlar yer almaktadır, mevcut durumda bahsedildiği üzere gümrükte gereksiz beklemeye neden olan bazı durumlar söz konusudur, eğer üst yönetim gümrükte geçici kabul işlemlerini konteynır limana ulaşmadan halledebilirse ve tabii ki önceden tahmin edilemeyen 4 hattan (kırmızı, sarı, mavi ve yeşil hat) en uzun işlem süresi olan kırmızı hatta düşmediği sürece aynı gün limandan çıkabilmektedir. Geçici kabul işleminin yanı sıra Kahramanmaraş ilinin uygun olması Konteynırların kırmızı hatta düşmediği varsayılarak, geçici kabul yapılırsa ürün limana geldikten 2 saat sonra yola çıkacaktır ve ortalama 3 gün süren gümrük bekleme süresi 2 saate indirilmiş olacaktır. Karayolu ile yapılan hammadde alımlarında ithalatçı gümrüklemenin Kahramanmaraş ilinde supalan gümrükleme şeklinde yapılması durumunda bu süre daha da azalacaktır, bu süre zarfının azalmasına etken olan durum hammaddenin alım miktarıdır, eğer hammadde alımı bir tırın dolacağı miktarda olursa ithalatçı gümrüklemenin Kahramanmaraş'ta supalan gümrükleme yapılması daha kolay olacaktır. Firmanın bir tırı doldurmayacak miktarda hammadde alımlarında parsiyel yükleme söz konusu olacaktır.

Türkiye'de faaliyet gösteren nakliye firmaları, birtakım zorluklar nedeniyle ithalatçı gümrüklerini İstanbul, Adana, Mersin gibi merkezlerde yapılmasını istemektedir. Bu nedenle gümrük işlemlerinde bu süre uzayabiliyor. 'Supalan gümrükleme' ile antrepoya boşaltılmaksızın ürünlerin bulunduğu aracın üzerinde muayene edilerek sahibine teslim edilmesi sağlanabilir, supalan gümrükleme yapıldığı takdirde ürünlerde herhangi bir kırılma kayıp olma vs. durumları yaşanmayacaktır.

Öncelikli olarak stoklamının ekonomik nedenlerden dolayı ortadan kaldırılamayacağı, stoklu hammadde ve mamulde herhangi bir bozulma olmaması nedeniyle depo



Şekil 4: Gelecek durum haritası

maliyeti dışında herhangi bir israfın olmadığı belirtilmiştir. Fakat depoların fabrika içerisinde olduğu halde birbirlerinden uzak konumlandırılması depolar arası ve depo ile üretim hattı arası sürekli yaşanan bir zaman kaybı olduğu bilinmektedir. Fakat gereğinden fazla mamul stokunun yapılması depolarda boş alanın kalmamasına ve bitmiş ürün deposu dolduğu takdirde sığmayan mamullerin hammadde depolarında bekletildiği ve bu durumun karışıklığa neden olduğu bilinmektedir. Bu nedenle gereğinden fazla mamul stokunun minimuma indirilmesinin daha az zaman kaybına neden olacağı bilinmektedir. Böylelikle pazarlama alanında çalışmaların artırılması ile stoktaki mamuller satılabilir ve tam zamanında üretim yapılamıyor olsa da stoktaki mamullerin minimuma indirilmesi ile 15 güne kadar düşürecektir, böylece depoda yaşanan bekleme problemi azaltılmış olacaktır ve mevcut durumda 30 gün kadar süren mamul depo israfı yarıya indirilmiş olacaktır. Depoların birbirlerine yakın konumlandırılması bu israfın minimuma indirilebileceğini ve gereksiz makine teçhizat kullanımını (forklift vb.), gereksiz insan kaynağı kullanımını minimum düzeye indirebilir ve zamandan tasarruf edilmesini sağlayabilir. Ayrıca hammadde ve mamul depolarının üretim hattına yakın olmasının fabrika açısından daha doğru bir karar olduğu sonucuna ulaşılmıştır, üç ayrı depo yerine bir depo içerisinde farklı ürün gruplarına ayrılmış raflar ve bölümlerin yer alması çok daha doğru olacaktır. Bunların yanı sıra depo içerisindeki düzensizlikten kaynaklı zaman, makine ve insan kaynağı israfını gidermeye yönelik yalın tekniklerden 5S kullanımıyla, depo içerisinde gereksiz işlem ve gereksiz harekete neden olan düzensizlik giderilebilir. Böylece depodan üretim hattına, paketlemeden depoya ve depodan nakliyeye mamul taşınmasında geçen toplamda ortalama 3'lik süre 45dk'ya indirilmiş olacaktır. Üst yönetimin belirttiği üzere, müdahale edilebilir en çok zaman kaybı bu aşamada gerçekleşmektedir, bu nedenle depo içerisinde aynı hammadde ve mamul gruplarına ayrılmış rafların yerleştirilmesi ve her mamulün bırakılacağı rafın sabit olması gereksiz işlemi ortadan kaldıracaktır. Bunların yanı sıra alanlar işlem sırasına göre birbirlerine en yakın konumda olacak biçimde sıralandığı takdirde üretim hattından paketleme işlemine geçen mamullerin

taşınmasında da zaman ve insan kaynağı israfının önüne geçilmiş olacaktır. Bu uygulama ile de üretim ve paketleme arasında geçen taşıma süresi 30dk'dan ortalama 15dk'ya indirilmiş olacaktır.

5 Sonuç ve öneriler

Tedarik zinciri mevcut durum değerlendirmesi yapıldığında Endonezya'dan sipariş edilen hammaddenin fabrika üretim aşamasına ulaşması ve işlem gördükten sonra mamulün alıcıya ulaşmasına kadar geçen sürenin 95 gün 12,5 saat olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Hammaddenin ithalatçı gümrüğüne ulaşmasına kadarki süreçle Endonezya firması ilgilendiği için bu sürece herhangi bir müdahale edilememektedir. Fakat yurtdışı firması bu süreyi hesaplayarak fabrika üst yönetimi ile anlaşmaları tarihte hammaddeyi ithalatçı gümrüğüne ulaştırmak zorundadır. Bu nedenle bu süreç hakkında herhangi bir değerlendirme yapılamamıştır. İthalatçı gümrüğünden konteynırların çıkma süresini uzatan işlemler belirlenerek en uygun yolun geçici kabul gümrükleme olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Gümrük işlemlerinin yanı sıra gereksiz işleme neden olan depo içi düzensizlik için 5S tekniğinin uygulanması ve yanlış depo konumlandırmasından oluşan zaman ve insan kaynağı israfının giderilmesi ile bu israflar minimuma inecektir.

Dağ (2009) yapmış olduğu çalışmada, düzlemsel güneş enerjisi kolektörleri üreten bir işletmede tedarik zincirindeki değer akışının haritalandırılmasına odaklanmıştır. Bu bağlamda akış süresindeki kısalmanın yanında, malzeme taşıma maliyetlerinde azalma, stok alan ihtiyaçlarında azalma ve malzeme akışlarında düzelmeler olduğu gözlenmiştir ve sonuç olarak gelecek durumda % 80,8 oranında bir iyileştirme sağlanmıştır. Bu çalışmada ise mamul stokunun tamamen ortadan kaldırılamayacağı bilinmektedir, fakat pazarlama departmanının stoktaki mamullerin satışını artırması ile stok fazlası ürünlerin minimuma inmesi ve depoda yaşanan yığılmalardan oluşan gereksiz zaman ve insan kaynağı kullanımının minimum düzeyde yapılabileceği söz konusudur. Bunun yanı sıra depo içerisinde hammadde ve mamul çeşidine göre düzenlemeler yapılarak, her ürün grubuna ait sabit raf ve bölümler oluşturularak, yükleme esnasında oluşabilecek problemlerin

önüne geçilecektir. Bu düzenleme taşımada kullanılan makinelerin ve insan kaynağının gereğinden fazla çalışmasını minimum düzeye indirecektir. Bu değerlendirmeler sonucunda yapılan gelecek durum haritasında hammadde tedarik sürecinden mamulün alıcıya ulaşmasına kadar geçen sürenin 75 gün 12 saat olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Fabrikanın tedarik zincirinde yaklaşık olarak %21 oranında yalınlaştırma olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bütün bu değerlendirmeler ışığında işletmelerin depo içerisinde 5S gibi yalın tekniklerin uygulanması, depolar arası konumlandırmayı daha uygun şekilde yapılması ve gümrükleme işlem süresini kısaltmaya odaklanılması gerektiği gibi önerilerde bulunmaktadır. Literatür incelendiğinde DAH tekniğinin işletme tedarik zincirine odaklı yapılan çalışmaların yeterli olmadığı gözlemlenmiştir, bu nedenle gelecekte yapılacak olan çalışmalarda, yalın uygulamaların imalat sektörü dışında farklı sektörlerde ve farklı alanlarda gerçekleştirilmesi ve ayrıca başka alanlarda DAH tekniğinin farklı yöntemlerle entegre edilerek kullanılması önerilebilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %18

Kaynaklar

- [1] K. Bulut ve H. Altunay, Değer akışı haritalandırma yöntemi: mobilya sektöründe bir uygulama. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 8(1), 48-55,2016. doi: 10.5505/ pajes. 2016. 59251
- [2] H. Maraşlı, C. Akça & A. Kama, Yalın düşünce ve değer akış haritalamasının dondurma üretim işletmesinde uygulanması. International Journal of Academic Value Studies, 2(5), 106-120, 2016. <http://dx.doi.org/10.23929/javs.75>
- [3] G. Dincel, Tekstil-iplik, Tskb Ekonomik Araştırmalar, Temmuz, pp. 1-7, 2014.
- [4] Ö. U. Türkan, Üretimde yalın dönüşümün temel performans kriterleri. Baü Fen Bilimleri Enstitüsü. Dergisi, 12(2), 28-41, 2010.
- [5] İ. Gökçe, Mevcut üretim sürecinin yalın üretim yaklaşımıyla yeniden yapılandırılması ve bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, 2006.
- [6] L. J. Krajewski, L. P. Ritzman ve M. K. Malhotra, Çeviren: S. Birgün, Üretim Yönetimi Süreçleri ve Tedarik Zincirleri. (Çev.) Birgün, S., Nobel Yayıncılık, İstanbul, 2013.
- [7] J. Adams, Stop Wasting Time, Effort, Money. Supply House Tims, 48(11):26, 2006.
- [8] J. Womack ve D. Jones, Yalın Düşünce. Sistem Yayıncılık, İstanbul, 1998.
- [9] K. Altun, ve A. Göleç, Üretim kontrol sistemlerini kıyaslayıcı bir benzetim çalışması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 27(2), 200-207, 2011.
- [10] H. C. Koh, K. L. Sım and L. N. Killough, The interaction effects of lean production manufacturing practices, compensation and information systems on production costs: a recursive partitioning model. Advances in Management Accounting, 12, pp. 115-135, 2004. [https://doi.org/10.1016 / S1474-7871 \(04\) 12005-4](https://doi.org/10.1016 / S1474-7871 (04) 12005-4)
- [11] S. Bulut, Beyaz eşya yan sanayi sektöründe erp ve yalın üretim olgunluğu analizi ve otomotiv yan sanayi ile kıyaslama. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
- [12] Y. Sugimori, K. Kusunoki, F. Cho and S. Uchikawa, Toyota production system and kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human system. The International Journal of Production Research, 15(6), 553-564, 1977. <https://doi.org/10.1080/00207547708943149>
- [13] S. Kanat ve M. Güner, Tam zamanında üretim sisteminin tekstil ve konfeksiyon sanayine uygulanabilirliği. Tekstil ve Konfeksiyon, 16, pp. 274-278, 2006.
- [14] T. Ö. Özçelik ve F. Cinoğlu, Yalın felsefe ve bir otomotiv yan sanayi uygulaması. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 12(23), 79-101, 2013.
- [15] A. Ersoy, Yalın üretim tekniklerinden hızlı kalıp değişimi ve bir imalat işletmesi uygulaması. Tezsiz Yüksek Lisans Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, 2007.
- [16] N. Ö. Doğan ve B. Şimşek Yağlı. Value stream mapping: a method that makes the waste in the process visible, <https://www.intechopen.com/Online-First/Value-Stream-Mapping-A-Method-That-Makes-The-Waste-In-The-Process-Visible> Adresinden Alındı, Erişim Tarihi: 30.05.2019.
- [17] Z. Ayaç, Hastanelerde yalın yönetim sistemleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
- [18] M. Türker, F. Balyemez ve A. A. Biçer, Üretim sürecinde tedarik zincirinin önemi ve maliyet yönetimi. V. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, İstanbul Ticaret Üniversitesi, 2005.
- [19] K. Baynal ve E. Yüzüğüllü, Tedarik zinciri yönetiminde analitik ağ süreci ile tedarikçi seçimi ve bir uygulama. İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi, 42(1), 77-92, 2013.
- [20] V. Çağlıyan, Küresel rekabet ortamında tedarik zinciri yönetimi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Ana Bilim Dalı, Konya, 2002.
- [21] İ. Elagöz, Tedarik zinciri yönetimi yaklaşımının maliyet hesaplama çalışmalarına etkisi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, 2006.
- [22] T. Davis, Effective Supply Chain Management, Sloan Management Review, Summer, 1993.
- [23] H. İ. Dağ, Yalın üretime geçişte değer akışı analizi ve haritalandırma ile israf kaynaklarının belirlenmesi: güneş enerjisi kolektörleri üreten bir işletmede uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2009.

- [24] H. Alaca, Değer akış haritalama araçları ile değer zinciri analizi: beyaz eşya sektöründe bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- [25] Ö. F. Efe., Yalın hizmet/ değer akışı haritalama: bir acil serviste uygulanabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2011.
- [26] F. Morlock ve H. Meier, Service value stream mapping in industrial product-service system performance management. *Procedia Cirp*, 30, 457-461, 2015.
- [27] M. R. Adalı, A. Kiraz, U. Akyüz ve B. Halk, Yalın üretime geçiş sürecinde değer akışı haritalama tekniğinin kullanılması: büyük ölçekli bir traktör işletmesinde uygulama, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 242-251, 2016. [10.16984 / saufenbilder.283787](https://doi.org/10.16984/ saufenbilder.283787)
- [28] N. Ö. Doğan ve O. Unutulmaz, Lean production in healthcare: A simulation-based value stream mapping in the physical therapy and rehabilitation department of a public hospital. *Total Quality Management & Business Excellence*, 27(1-2), 64-80,2016.<https://doi.org/10.1080/14783363.2014.94532>
- [29] N. Ö. Doğan ve Y. Ersoy, Hizmet sektöründe değer akış haritalama uygulaması: bir üniversite araştırma ve uygulama merkezi örneği. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (48), 103-116, 2016.
- [30] H. G. Gören, Yalın üretim için değer akış haritalandırma ve simülasyon: mobilya sektöründe bir uygulama. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(4), 462-469, 2016. [10.5505/pajes.2016.59251](https://doi.org/10.5505/pajes.2016.59251)
- [31] L. F. Romero ve A. Arce, Applying value stream mapping in manufacturing: a systematic literature review, *Ifac-Papersonline*, 50(1), 1075-1086, 2017.<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.385>
- [32] D. Antonelli and D. Stadnicka, Combining factory simulation with value stream mapping: A critical discussion. *Procedia Cirp*, 67, 30-35, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.171>
- [33] R. Aktaş, ve M. Karğın, Yalın muhasebe: yalın üretim ortamında yeni bir yönetim muhasebesi yaklaşımı. *Muhasebe ve Öğretim Üyeleri Bilim ve Dayanışma Vakfı Dergisi*, 3, 91-128, 2011.
- [34] A. Deran ve B. Beller, Hastanelerde yalın yönetimin bir aracı olarak değer akış maliyetleme ve kamu hastanesinde bir uygulama. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 32, 161-174, 2014.
- [35] M. Rother and J. Shook, Learning to see: value stream mapping to add value and eliminate muda, Brookline, Ma. Lean Enterprise Institute, 1999.
- [36] Doğaka, Kahramanmaraş İl Yatırım Destek ve Tanıtım Stratejisi, Şubat, 22, 2017.
- [37] <http://www.hurriyet.com.tr/kahramanmaraş-tekstilde-ilk-dortte-37222261> Adresinden Alındı, Erişim Tarihi: 11.02.2019.
- [38] <http://www.tesk.org.tr/tr/calisma/ihracat/8.html> Adresinden Alınmıştır. Erişim Tarihi: 11.02.2019.
- [39] <http://www.kumport.com.tr/tr-tr/yararli-linkler--sik-sorulan-sorular-liman-hizmetlerinizde-verilen-cfs-hizmet-aciklamalari-nelerdir/627568> Adresinden Alındı. Erişim Tarihi: 11.02.2019.
- [40] Dış Ticaret İlanı. <http://blog.disticaretilani.com/gecici-kabul-nedir/> Adresinden Alındı. Erişim Tarihi: 11.02.2019.
- [41] Deniz Taşımacılığı Terimleri. [http:// www. armen shipping.com/Evraklar/Armen_Shipping_Deniz_Nakliye_Terimleri.Pdf](http://www.armen-shipping.com/Evraklar/Armen_Shipping_Deniz_Nakliye_Terimleri.Pdf) Adresinden Alındı. Erişim Tarihi: 11.02.2019.





Tahmin performansını arttırmak için kolektif öğrenme yaklaşımı: Engelli bireylere yönelik deneysel çalışma

Ensemble learning approach for enhancing performance prediction: Experimental study for disabled people

Melda Kokoç^{1,*} , Fatih Kokoç² 

¹ Gazi Üniversitesi, Eğitim-Öğretim ve Dış İlişkiler Kurum Koordinatörlüğü, 06560, Ankara, Türkiye

² Gazi Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, 06680, Ankara, Türkiye

Özet

Fazla değişken söz konusu olduğunda elle sınıflama yapmak zaman ve emek isteyen bir süreç haline gelmektedir. Böyle bir duruma örnek olan engelli bireylerin öz bakım aktivitelerinde yaşadıkları sorunlara göre sınıflandırılması, uzman terapistler için zaman alıcı bir süreçtir. Bu çalışmanın amacı uzman terapistlere zaman kazandırması açısından fiziksel ve motor engelli bireylerin öz bakım aktivitelerinde yaşadıkları sorunları tahmin edebilecek bir modelin geliştirilmesidir. Tahmin sürecinde yedi farklı (destek vektör makineleri, yapay sinir ağları, C5.0, CART, QUEST, CHAID, bayes ağları) veri madenciliği algoritmasından yararlanılmıştır. Söz konusu algoritmalar, tek olarak ve farklı kolektif modeller oluşturularak uygulanmıştır. Tek ve kolektif olarak uygulanan modellerin deneysel sonuçları kıyaslandığında, iki veya daha fazla algoritmanın birleştirilmesi ile uygulanan kolektif öğrenme tekniğinin tahmin performansını yükselttiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Fiziksel ve motor engel, Medikal veri, Öz bakım, ICF-CY, Veri madenciliği

Abstract

In the case of too many variables, manual classification becomes a time- and labor-intensive process. For instance, classifying people with disabilities according to the problems they experience in self-care activities is a time-consuming process for specialist therapists. The aim of this study is to develop a model that can predict the problems experienced by physically and motor disabled individuals in self-care activities in order to reduce time spent by specialist therapist. Seven different data mining algorithms (support vector machines, artificial neural networks, C5.0, CART, QUEST, CHAID, bayesian networks) have been used in the estimation process. These algorithms have been applied individually and by forming different ensemble models. When experimental results of single and ensemble models were compared, it was seen that ensemble learning technique combined with two or more algorithms increased predictive performance.

Keywords: Data mining, Physical and motor disability, Medical data, Self-care, ICF-CY

1 Giriş

Engel, kişinin günlük faaliyetlerini gerçekleştirme kabiliyetini kısıtlayan çeşitli fiziksel ve zihinsel bozuklukları içermektedir. Dünya Sağlık Örgütü'ne göre engel, faaliyet ve katılım kısıtlamalarını kapsayan bir şemsiye terimdir. Faaliyet kısıtlaması, bir bireyin bir görevi veya eylemi yerine getirmesinde karşılaştığı bir zorluk; katılım kısıtlaması ise bireyin yaşam koşullarına katılımı ile ilgili yaşadığı bir problemdir [1]. Dünya Sağlık Örgütü'nün 2011 Dünya Engellilik Raporunda 18 yaş üzerindeki nüfusun %15,6'sının engelli olduğu, Türkiye İstatistik Kurumu'nun 2011 Nüfus ve Konut Araştırması sonuçlarında ise 3 yaş ve üzeri nüfusun %6,9'sının engelli olduğu belirtilmiştir [2, 3]. Oranlar, nüfusun dikkate değer bir kısmının engele sahip olduğunu göstermektedir.

Engellilik, farklı bakış açıları ile literatürde yer edinmiş bir konudur. Engelliliğin toplumsal yaşamdaki etkilerinin analiz edildiği çalışmalarda, genellikle motor ve sosyal iletişim becerilerin, çocukların günlük aktivitelerine katılımları ile düşük fonksiyonlu otizm spektrum bozukluğu olan çocuklar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca otizm bozuklukları ile duygusal rahatsızlığın bir arada olduğu özgül öğrenme bozukluğuna sahip bireyler üzerinde analizler yapıldığı da görülmüştür [4, 5]. Bir başka bakış açısı engelliliği sınıflandırmak ve ölçmek için kullanılan

İşlevsellik, Yetiyitimi ve Sağlığın Uluslararası Sınıflandırması (International Classification of Functioning, Disability and Health -ICF) çerçevesinin değerlendirilmesi üzerine odaklanmıştır [6, 7]. Bunlara ek olarak bu çalışmanın konusu olan engelli bireylere ait verilerden yararlanılarak bireylerin sınıflandırılması veya tanı teşhisi için farklı örüntü ve bilgilerin keşfedilmesine olanak sağlayan çeşitli veri madenciliği tekniklerini kullanan çalışmalar da literatürde yer almaktadır [8-10].

Toplumsal refahın artırılması hususunda engelli bireylerin yaşam koşullarının iyileştirilmesi önem arz etmektedir. Engelli bireyler için uygulanan tedavi ve rehabilitasyonlar engele neden olan hastalığı ya da genetik durumu düzeltmese de bu durumun neden olduğu semptomları ve yeti yitimini azaltabilmektedir [11]. Bu sayede söz konusu bireylerin topluma kazandırılabilmesi mümkün olmaktadır. Bu nedenle, bu bireylerin engellilik düzeyleri ve sınıfları belirlenerek gereken eğitimi almaları, sosyal ve eğitim haklarından yararlanabilmeleri için yönlendirilmeleri gerekmektedir [12]. Engel teşhisi ve sınıflandırması, uzman terapistler tarafından gerçekleştirilen karmaşık bir süreçtir. Bilimsel ve politik bağlamlarda, engellilik tanıları, genellikle sağlık koşullarının, tanıların veya etiyolojik faktörlerin örtüşmesiyle karakterize edilmektedir [7]. Engel sınıflandırması için çeşitli çerçeveler bulunmakla birlikte ICF uluslararası çerçeve olarak kabul

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: meldakokoc@gazi.edu.tr (M. Kokoç)

Geliş / Received: 26.02.2020 Kabul / Accepted: 07.09.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.693303

edilmektedir [2]. ICF'nin, alt fonksiyonu olan ICF-CY, çocuk ve gençlerin zihinsel ve fiziksel çeşitli fonksiyonel sorunlarını belirlemek için ayrıntılı ve kapsamlı bir sınıflandırma çerçevesi sunmaktadır. ICF-CY, dört seviyeyi göz önünde bulundurarak her bir sağlık bileşenini kodlamaktadır. Seviye-1, vücut fonksiyonları, vücut yapıları, faaliyetler ve katılım ile çevresel faktörler olarak adlandırılmış dört kategoriden oluşan genel faaliyetleri içermektedir. Seviye-1 kodları, rakamların ve harflerin bir kombinasyonu olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmanın konusu olan öz bakım, ICF-CY'de, seviye 1'deki faaliyetler ve katılım bileşeninin bir alt bölümüdür ve "d5" bileşen kodu ile başlamaktadır. Sonraki seviyeler; seviye 2 (10 ile 99 arasında bir değere sahip), seviye 3 (0 ile 9 arasında bir değere sahip) ve seviye 4 (0 ile 9 arasında bir değere sahip) bir önceki seviyeyi daha ayrıntılı olarak açıklamak için kullanılmaktadır [13].

Öz bakım sorunlarının sınıflandırılması, uygun tedavi yaklaşımlarının seçilmesinde önemli bir faktördür. Öz bakım problemlerinin çeşitliliği, karmaşıklığı ve mesleki terapistlerin eksikliği, mevcut terapistlere ICF-CY kriterlerine uygun sınıflandırmada destek sağlayacak bir modelin geliştirilmesini gerektirmiştir. Bu çalışmanın amacı, fiziksel ve motor engelli bireylerin öz bakım sorunlarının yüksek doğruluk ile tahmin edilmesi için kolektif öğrenme yöntemine dayanan sınıflandırıcı geliştirilmesidir. Kolektif yöntemleri kullanma eğiliminin artması, kolektif yaklaşımların bireysel veri madenciliği tekniklerinin performansını geliştirdiğini göstermektedir [14]. Kolektif yöntemler günümüzde yaygın olarak kullanılmasına rağmen, bu tarz bir çalışmaya öz bakım aktivitelerinin ICF-CY'ye göre sınıflandırılmasında rastlanmamıştır.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde kullanılan veri madenciliği algoritmaları kısaca açıklanmış, algoritmaların performansının ölçülmesi için kullanılan veri seti tanıtılarak analiz edilmiştir. Tanıtılan veri setine ilişkin çeşitli veri madenciliği algoritmaları bireysel ve kolektif olarak uygulanarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonuç bölümünde ise yapılan uygulama özetlenerek gelecek çalışmalarda yapılması hedeflenen uygulamalar sunulmuştur.

2 Materyal ve metot

Verinin bilgiye dönüştürülmesi ve büyük miktarda heterojen verinin yönetimi, veri madenciliği gibi önemli bir araştırma alanının gelişmesine neden olmuştur [15]. Veri madenciliği, tahmin edilemeyen ilişkiyi ve verilerde saklı kalıpları keşfetmek için, çok sayıda gözlemsel veri setinden bilginin çıkarılması ve kullanıcılar için anlaşılabilir, kullanışlı hale getirilmesi için verilerin özetlenmesidir [16, 17].

Veri madenciliği teknikleri, denetimsiz ve denetimli öğrenme teknikleri olarak sınıflandırılabilir. Denetimsiz öğrenme tekniği, değişken tarafından yönlendirilmeyen ve analizden önce bir hipotez oluşturmayan tekniklerdir. Bu tekniklerde, modeller elde edilen sonuçlara dayanarak üretilmektedir. Literatürde sıklıkla karşılaşılan denetimsiz tekniklerden birisi kümelemedir. Denetimli öğrenme tekniği, algoritmanın veri

setindeki alana özgü etiketler ile eğitilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Hem tıbbi hem de klinik araştırmalarda kullanılan denetimli öğrenme teknikleri genellikle sınıflandırma, regresyon ve birliktelik kurallarıdır [15]. Bu çalışmada engelli bireylerin öz bakım aktivitelerinin ICF-CY'ye göre sınıflandırılabilmesi için denetimli öğrenme tekniklerinden olan C5.0, CART, QUEST, CHAID, Destek Vektör Makineleri (DVM), Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Bayes Ağları (BA) kullanılmıştır. Kullanılan yöntemler ile ilgili kısa bilgilere ve gerçekleştirilen deneysel uygulamalara bu bölümde yer verilmiştir.

2.1 Tahmin modelleri

2.1.1 C5.0

Ross Quinlan, 1970'li yılların sonlarına doğru karar ağaçlarına dayalı olarak işlem yapan ID3 algoritmasını tanıtmıştır [18, 19]. ID3 metodunun eksikliklerinin giderilmesi amacıyla 1993 yılında algoritma genişletilmiş ve ID3 prensiplerine dayanan C4.5 algoritması geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, C4.5 algoritmasının ID3'e göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür [20, 21]. C4.5 algoritmasının da iyileştirilmesi ile temel olarak karar ağacı ve kural seti olmak üzere iki tip model üretme becerisine sahip olan C5.0 algoritması elde edilmiştir. Karar ağacı, algoritma tarafından bulunan budamaların basit ve düz bir tanımlamasıdır. Kural seti ise karar ağacından elde edilen mevcut bilginin basitleştirilmiş bir versiyonunu ifade etmektedir [22].

C5.0 algoritması sınıflama işlemini gerçekleştirirken entropi ve bilgi kazancından faydalanmaktadır. Hesaplanan ölçütler ile her değişken için belirli değerler dallara ayrılmakta olup bölümlene yapılabilecek herhangi bir düğüm kalmayınca kadar bu süreç sürmektedir. Bu doğrultuda, seçilen değişkenin her bir değeri dallara çevrilmekte ve diğer değişkenlerin de sürecin devamında dikkate alınması ile aynı işlem devam etmektedir [23].

C5.0 algoritmasının güçlü yanlarından bazıları; çok amaçlı bir sınıflandırıcı olarak çeşitli problemlerle çalışabilmesi, mevcut yöntemlere nazaran daha üretken olması, sadece en önemli ve anlamlı özelliklerden faydalanması, eğitim için hem nispeten küçük hem de çok büyük örneklerle çalışabilmesidir. Algoritmanın dezavantajlarından bazıları ise; özelliklerin çok sayıda seviyeye sahip olduğu bölümlere ayrılması sürecinde yanlış davranabilmesi, modelde aşırı uyum veya az uyum gibi problemlerin oluşabilmesi, karar mantığındaki büyük değişikliklerin eğitim verisinde küçük değişiklikler olarak çıktı verebilmesidir [24].

C5.0'ın en önemli özelliği boosting tekniğini kullanmasıdır. Boosting tekniği ile doğruluğun artırılması amaçlanmaktadır. Her ne kadar boosting tekniği kullanıldığında algoritmanın çalışma süresinin artma ihtimali bulunsun da birçok örnekte tahmin doğruluğunu artırdığı görülmektedir. C5.0 algoritması, veri madenciliğindeki en önemli zorluklardan biri olan ve bir sınıftaki veri sayısının diğer sınıflardakinden daha yüksek olmasını ifade eden veri dengesizliği ile başa çıkabilen etkili bir çözümdür.

Boosting tekniğinin algoritma adımları Pang ve Gong tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [25]. Burada N toplam örnek sayısını, S örnek kümesini ve i ele alınan örneğin numarasını temsil etmek üzere;

$$i=1,2,\dots,N,$$

$$T = \text{karar ağaçlarının sayısı, } t=1,2,\dots,T,$$

$C^t = t$ denemesinde öğrenme sisteminin oluşturduğu karar ağacı,

$$C^* = \text{nihai karar ağacı,}$$

$$p^t = w_i^t \text{ nin normalize faktörü,}$$

$$\beta^t = \text{ağırlık ayarlama faktörü,}$$

$$\theta_i^t = i \text{ örneği yanlış sınıflandırılmış ise 1 aksi takdirde 0.}$$

Adım 1: Değişkenlere ilk değerleri ata; $T=10$ (T değeri genellikle 10'dur) ve $t = 1$, bu durumda $w_i^1 = \frac{1}{n}$

Adım 2: $\sum_{i=0}^n(p_i^t) = 1$ kabul edildiğinde Denklem (1) değerini hesapla.

$$p_i^t = w_i^t / \sum_{i=0}^n(w_i^t) \quad (1)$$

Adım 3: Her bir örnek için ağırlık olarak p_i^t 'yi kullan ve bu dağılım altında C^t yi oluştur.

Adım 4: C^t 'nin hata oranını hesaplarken Denklem (2)'yi kullan.

$$\varepsilon^t = \sum_{i=0}^n(p_i^t \theta_i^t) \quad (2)$$

Adım 5: $\varepsilon^t < 0.5$ ise deneyi bitir, $T = t + 1$

$$\varepsilon^t = 0 \text{ ise deneyi bitir, } T = t$$

$$0 < \varepsilon^t < 0.5 \text{ ise adım 6'dan devam et.}$$

Adım 6: β^t 'yi Denklem (3) ile hesapla,

$$\beta^t = \varepsilon^t / (1 - \varepsilon^t) \quad (3)$$

Adım 7: Hata oranını dikkate alarak ağırlık ayarlamalarını aşağıdaki gibi hesapla.

$$\text{Örnek yanlış sınıflandırıldıysa } w_i^{t+1} = w_i^t \beta^t,$$

$$\text{Örnek doğru sınıflandırıldıysa } w_i^t$$

Adım 8: $t = T$ ise deneyi bitir.

Aksi durumda, $t = T + 1$ ve Adım 2'ye git ve bir sonraki deneyi başla.

2.1.2 CART (classification and regression trees)

Beirman vd. [26] tarafından 1984 yılında geliştirilen CART algoritması, hedef değişkenin sürekli veya kategorik olma durumuna bağlı olarak regresyon modeli veya sınıflandırma modeli üretmektedir. Yani hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde bir çözüm olarak kullanılabilir. Hedef değişken sürekli ise regresyon modeli üretilmektedir. Hedef değişkenin değerini tahmin etmek için regresyon modeli kullanıldığında, ağacın yaprak düğümüne düşen satırın ortalama hedef değişken değeri, tahmin edilen değerdir. Hedef değişken kategorik ise bir sınıflandırma modeli üretilmektedir. Hedef değişkenin değerini tahmin etmek için yaprak düğümüne ulaşana kadar

tahmin edici değişken değeri kullanılarak ağaç üzerinde ilerlenmekte ve bu düğüm için gösterilen kategori tahmin edilmektedir [27].

CART algoritması, bağımsız değişkenlere dayanarak homojenliği artan alt kümeleri bulabilmek için veriyi tekrar tekrar parçalara ayırmaktadır. Bağımlı veri, sonradan gelen bir dizi sağ ve sol alt düğümlere ayrıştırılmaktadır [27]. CART algoritması, Gini indeksini dallanma kriteri olarak kabul etmekte olup kuruluş süresince herhangi bir durma kuralı olmadan sürekli bölünerek büyümektedir. Yeni bir bölünmenin mümkün olmadığı durumda ise bu defa uçlardan köklere doğru giden bir budama süreci başlamaktadır. Her bir budama sonrasında bağımsız bir test verisi kullanılarak analiz yapılmakta ve en başarılı karar ağacı tespit edilmektedir [28].

2.1.3 Quest (quick, unbiased, and efficient statistical tree)

QUEST, Wei-Yin Loh (Wisconsin-Madison Üniversitesi, ABD) ve Yu-Shan Shih (National Chung Chend Üniversitesi) tarafından 1997 yılında geliştirilen ikili karar ağacı yapısı kullanan bir sınıflandırma algoritmasıdır [29]. Bu algoritma, tek değişkenli ve doğrusal kombinasyonlu bölünmeleri desteklemektedir. Her bir bölünme sürecinde girdi değişkeni ile hedef değişken arasındaki ilişki, değişken türüne bağlı olarak Anova F-testi, Levene'nin testi veya Pearson'ın Ki-Kare testi ile hesaplanmaktadır [30]. CHAID ve CART algoritmalarından farklı olarak ağacın oluşturulma sürecinde değişken seçimi ile bölünmeyi aynı anda yapmamakta, her bir süreç ile ayrı ayrı ilgilenmektedir. Geliştirilmesinin temel amacı dallanma sürecindeki yanlış seçimin daha genel bir hale getirilmesi ve hesaplama maliyetlerinin minimize edilmesidir [31].

2.1.4 CHAID (chi-square automatic interaction detector)

CHAID 1980'li yıllarda Kass [32] tarafından geliştirilmiş sınıflandırma ve tahmin için kullanılabilen bir karar ağacı algoritmasıdır. Bu algoritma tarafından kategorik girdi ve hedefler kullanıldığından, hedef özellik ile her bir mevcut tahmin edici arasında ki-kare testi hesaplanmakta ve sonucunda örneklerin parçalara ayrılmasında en iyi tahmin ediciden faydalanılmaktadır. Süreç, herhangi bir anlamlı bölme işlemi kalmayınca kadar devam etmektedir [33], [34]. CHAID algoritmasının adımları aşağıda sunulmuştur:

Adım 1: Her bir sürekli tahmin edici için kategorik tahmin ediciler oluşturulur.

Adım 2: İki den çok satır ile satır kategorileri kombine edilerek en uygun form elde edilir.

Adım 3: Kombine edilen kategoriler daha küçük parçalara bölünür.

Adım 4: Optimal kombinasyon tamamlanır ve açıklayıcı değişkenler ile kombine edilir. Her bir açıklayıcı değişkenin tablosunu azaltmak için ki-kare testini uyarlayabilmek için "Bonferroni" hesaplanır.

Adım 5: Adım 4'te hesaplanan en anlamlı değerler, düğümü kategorilere göre ayırmak için kullanılır.

CHAID algoritması veri yönetiminde iki farklı istatistiksel test kullanılmaktadır [35].

(i) Eğer bağımlı değişken kategorik ise Pearson ki-kare testi aşağıdaki gibi uygulanır.

n_{ij} = gözlemlenen hücre sıklığını,

m_{ij} = tahmin edilen beklenen hücre sıklığını ($x_n = i$,

$y_n = j$ için),

f_n = duruma bağlı sıklık ağırlığını,

x_n ve y_n = eğitim örneğini,

I = bağımsızlık derecesini,

D = ilgili veriyi temsil etmektedir.

Bu durumda X^2 , n_{ij} ve P-değeri sırasıyla Denklem (4), (5) ve (6) kullanılarak hesaplanır.

$$X^2 = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \left(\frac{(n_{ij} - m_{ij})^2}{m_{ij}} \right) \quad (4)$$

$$n_{ij} = \sum_{n \in D} f_n I(x_n = i \cap y_n = j) \quad (5)$$

$$P = \Pr(x_d^e > x^2) \quad (6)$$

(ii) Ölçek bağımlı değişkenler için ise F testi kullanılır. F-değeri ve F-değeri için gerekli olan y_n , \bar{y} , N_f değerleri sırasıyla Denklem (7), (8), (9), (10) ile hesaplanır.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{n \in D} w_n f_n I(x_n = i) (\bar{y} - y)^2 / (I-1)}{\sum_{i=1}^I \sum_{n \in D} w_n f_n I(x_n = i) (y_n - \bar{y}_i)^2 / (N_f - I)} \quad (7)$$

$$y_n = \frac{\sum_{n \in D} w_n f_n y_n I(x_n = i)}{\sum_{n \in D} w_n f_n I(x_n = i)} \quad (8)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{n \in D} w_n f_n y_n I}{\sum_{n \in D} w_n f_n I} \quad (9)$$

$$N_f = \sum_{n \in D} f_n \quad (10)$$

$$P = P(F(I-1, N_f-1) > F) \quad (11)$$

2.1.5 Destek vektör makineleri

Destek Vektör Makineleri (DVM), Vapnik ve Chervonenkis [36] tarafından optimal ayırma hiper düzlemi kullanılarak geliştirilen makine öğrenmesinin yeni bir türü olarak ortaya çıkmıştır. DVM ile sınıflandırmanın amacı, eğitim verisi ile elde edilen bir karar fonksiyonu yardımıyla, genellikle $\{-1, +1\}$ gibi sınıf etiketleri ile gösterilen iki örnek sınıfını birbirinden ayırmaktır. Bununla birlikte, DVM'nin hedefi, en yakın noktalar arasındaki mesafeyi en üst seviyeye çıkararak hiper düzlemi bulmaktır. Hiper düzlemin iki tarafında Denklem (12) ve (13)'ü sağlayan noktalar

arasındaki düz mesafelerin toplamına sınır olarak isimlendirilmektedir. Burada $x \in \mathbb{R}^n$ boyutlu bir uzayı, w ağırlık vektörünü (hiper düzlemin normali) ve b eğilim değerini belirtmektedir. Bu limiti maksimum yapan hiper düzlem, optimum hiper düzlemi vermektedir. Optimum hiper düzlemi belirlemek için, bu düzleme paralel olan ve sınırları oluşturan iki hiper düzlem belirlenmelidir [37, 38].

$$w \times x_i - b = -1 \quad (12)$$

$$w \times x_i - b = +1 \quad (13)$$

Optimum hiper düzlem sınırını maksimize etmek için, ağırlık vektörünün minimize edilmesi gerekmektedir. Bu durumda, en uygun hiper düzlemin belirlenmesi aşağıdaki sınırlı optimizasyon probleminin çözümünü gerektirmektedir [39]. Buna bağlı olan sınırlamalar, eşitsizlikte gösterildiği şekilde ifade edilmektedir. Bu optimizasyon problemi Lagrange Eşitlikleri kullanılarak çözülebilmektedir. Lagrange Eşitlikleri kullanıldığında Denklem (16) elde edilmekte ve doğrusal olarak ayrılabilen iki sınıflı bir problem için karar fonksiyonu Denklem (17)'deki gibi yazılabilmektedir [40].

$$\min \left[\frac{1}{2} \|w\|^2 \right] \quad (14)$$

$$y_i(w \cdot x_i + b) - 1 \geq 0 \text{ ve } y_i \in \{1, -1\} \quad (15)$$

$$L(w, b, a) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^k a_i y_i (w \cdot x_i + b) + \sum_{i=1}^k a_i \quad (16)$$

$$f(x) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^k \lambda_i y_i (x \cdot x_i) + b \right) \quad (17)$$

Verilerin doğrusal olarak ayrılabilmesi durumunda, DVM, orijinal verileri bir haritalama yöntemiyle daha yüksek bir boyuta taşımaktadır. Burada, verileri sınıflandırmak için uygun olabilecek lineer ayırıcı hiper düzlem bulunmaya çalışılmaktadır. Sınırı maksimize etmek ve yanlış sınıflandırma hatalarını minimize etmek arasındaki denge, pozitif değerler alan ve C ile temsil edilen bir regresyon parametresi ($0 < C < \infty$) tanımlanarak kontrol edilebilmektedir [39]. Regresyon parametresi ve yapay değişken (ξ_i) kullanılarak doğrusal olmayan ayrılabilir veriler için optimizasyon problemi ve yapay değişken aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [39-41]:

$$\min \left[\frac{1}{2} \|w\|^2 + C \cdot \sum_{i=1}^r \zeta_i \right] \quad (18)$$

$$y_i(w \cdot \varphi(x_i) + b) - 1 \geq 1 - \zeta_i \text{ ve } \zeta_i \geq 0 \text{ ve } i=1, \dots, n \quad (19)$$

Optimizasyon probleminin çözümü için giriş alanındaki veriler, özellik alanı olarak tanımlanan yüksek boyutlu bir

alanda görüntülenmektedir. Böylece, veriler doğrusal olarak ayrılabilen ve sınıflar arasındaki hiper düzlem belirlenebilmektedir. Destek vektör makineleri, Denklem (20)'deki gibi ifade edilen bir çekirdek fonksiyonunun yardımıyla doğrusal olmayan dönüşümleri matematiksel olarak yapabilmektedir. Böylece verilerin yüksek boyutta doğrusal olarak ayrılması sağlanmakta ve çekirdek fonksiyonu kullanılarak doğrusal olarak ayrılamayan iki sınıflı bir problemin çözülmesi için karar fonksiyonu Denklem (21)'deki gibi yazılabilmektedir.

$$K(x_i, x_j) = \varphi(x) \cdot \varphi(x_j) \quad (20)$$

$$f(x) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^k a_i y_i \varphi(x) + \varphi(x_i) + b \right) \quad (21)$$

DVM tarafından yapılacak sınıflandırma işleminde kullanılacak çekirdek fonksiyonunun ve bu fonksiyonun optimum parametrelerinin belirlenmesi esastır. Parametrelerin kesin bir değeri yoktur ve her veri seti birbirinden farklı olduğu için istenen sınıflandırma doğruluğuna ulaşana kadar farklı değerler denenmektedir. Çekirdek fonksiyonları, doğrusal (Denklem (22)), polinom (Denklem (23)), radyal (Denklem (24)) ve sigmoid (Denklem (25)) olarak farklı temel fonksiyonlara sahiptir. Literatürde en sık kullanılan çekirdek fonksiyonları polinom ve radyal temel fonksiyonlardır [42]. Eşitliklerde yer alan γ , r ve d çekirdek parametreleridir.

$$K(x_i, x_j) = x_i^T \cdot x_j \quad (22)$$

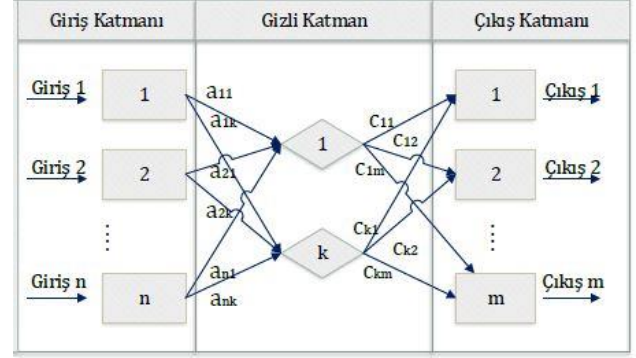
$$K(x_i, x_j) = (\gamma x_i^T \cdot x_j + r)^d, \gamma > 0 \quad (23)$$

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2), \gamma > 0 \quad (24)$$

$$K(x_i, x_j) = \tanh(\gamma x_i^T \cdot x_j + r) \quad (25)$$

2.1.6 Yapay sinir ağları

İnsan beyindeki sinir sisteminin çalışma prensiplerinden esinlenen YSA ile ilgili ilk çalışma 1943 yılında McCulloch ve arkadaşları [43] tarafından yapılmış, elektrik devreleri üzerinde temel seviyede denemeler gerçekleştirilmiş ve basit bir yapay sinir ağı oluşturulmuştur. Sonraki süreçte, Rosenblatt [44]'in tek katmanlı ve eğitilebilen perceptron ağı modelini geliştirmesiyle YSA ile ilgili çalışmalar gittikçe artmış ve çeşitli modeller önerilmiştir [45]. İnsan beyinin bir simülasyonu olarak düşünülebilen YSA modelleri, sınıflandırma, optimizasyon, ilişki kurabilme, eksik veri ile çalışabilme, örnek veriler sayesinde öğrenme becerisi kazanabilme gibi çeşitli fonksiyonları gerçekleştirebilmektedir [46]. Bu sebeple, YSA birçok problemin çözümünde araştırmacılar tarafından başvurulan yöntemlerden biri olmuştur. Bir YSA modeli girdi katmanı, gizli katman ve çıkış katmanından oluşmaktadır. Çok katmanlı bir YSA örneği Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Çok katmanlı YSA'nın genel yapısı

Giriş katmanında vektör olarak tanımlanmış ağırlık girdileri yer almaktadır. Gizli katmanda aktivasyon olarak isimlendirilen bir işlemci bulunmakta olup hücrelerdeki net girdi değeri karşılığında çıktı olarak elde edilebilecek değerin hesaplanmasını sağlamaktadır. Bazı YSA modellerinde aktivasyon fonksiyonunun türevlenebilir olması zorunluluğu bulunmaktadır.

YSA'da ağırlık istenen performansı ve çıktıyı verebilmesi için ağırlık eğitilmesi ve test edilmesi gerekmektedir. Ağırlık eğitilmesindeki en önemli amaç kullanılan öğrenme algoritmaları ile girdi ve çıktı verileri arasındaki en uygun ilişkinin elde edilebilmesi ve bunu sağlayacak ağırlıkların ortaya çıkarılmasıdır.

YSA'da bir öğrenme kuralı esas alınarak eşik fonksiyonu yardımıyla "w" ağırlık vektörünü, istenilen performansı sağlayacak şekilde ayarlayabilmek çok önemlidir. Bu noktada, performans ölçütü en küçükleme veya en büyükleme açısından ele alınmakta ve çoğunlukla karesel hata en küçüklenmesi amacıyla Denklem (26) kullanılarak araştırılmaktadır [46]:

$$\min F(w) = \int_A |f(x) - G(x, w)|^2 p(x) dv(x) \quad (26)$$

$G(x, w)$: Giriş ve çıkış fonksiyonu,

y : Çıkış vektörü,

x : Giriş vektörü,

w : Ağırlık vektörü,

$p(x)$: Olasılık yoğunluk fonksiyonu.

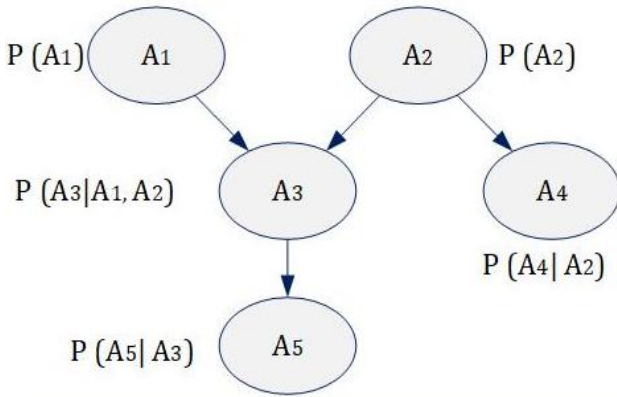
YSA modelleri, yapılarına göre ileri beslemeli ve geri beslemeli olmak üzere iki farklı şekilde tasarlanabilmektedir. Öğrenme algoritmalarına göre sınıflandırıldığında ise danışmanlı, danışmansız ve takviyeli olmak üzere üçe ayrılmaktadır. İleri beslemeli ağlar örüntü tanıma, geri beslemeli ağlar ise optimizasyon problemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir [47].

2.1.7 Bayes ağları

Bayes ağları veri modelleme yöntemlerinden biri olup, olasılık hesaplamalarına dayanmaktadır. Bayes ağları, bayes teoremi esas alınarak ortaya çıkarılmıştır ve bayes olasılık kurallarını kullanan grafiksel modellemeye dayalı bir yöntemdir [48]. Bir bayes ağı, olasılıksal parametreler ile grafiksel yapılardan oluşmaktadır. Grafiksel yapısı,

düğümlemlerden ve oklardan oluşan tek yönlü çevrimsiz grafiğdir. Düğümler, değişkenleri temsil ederken oklar değişkenler arasındaki nedensel ilişkileri ifade etmektedir. İki değişken birbirine bağlandığında okun ucundaki değişken çocuk (child) değişken, okun başlangıcındaki değişken ise ebeveyn (parent) değişken olarak adlandırılmaktadır [49]. Bayes ağında yer alacak değişkenlerin sahip olabileceği ebeveyn veya çocuk sayısı için herhangi bir kısıtlama bulunmamaktadır.

Şekil 2’de A1, A2, A3, A4, A5 değişkenlerinden oluşan bir Bayes ağı örnek olarak sunulmuştur. Şekil 2, çocuk ve ebeveyn değişkenleri açısından incelendiğinde; A1 ve A2 değişkenlerinin A3 değişkeninin ebeveyni, A3 değişkeninin A5 değişkeninin ebeveyni, A4 değişkeninin ise A2 değişkeninin çocuk değişkeni olduğu görülmektedir. Ayrıca şekilde söz konusu değişkenlerin sahip oldukları koşullu olasılık dağılımları da $P(A1)$, $P(A2)$, $P(A3|A1A2)$, $P(A4|A2)$, $P(A5|A3)$ olarak belirtilmiştir. Ağda yer alan herhangi bir değişken ile başka bir değişken arasında bir ok bulunmaması bu iki değişken arasında olasılıksal bir ilişki bulunmadığını yani ağda marjinal olasılık dağılımı ile yer aldığı anlaşılmaktadır [50].



Şekil 2. Bayes ağı örneği

Bir bayes ağında bulunan değişkenlerin sahip oldukları koşullu olasılıkların çarpımı, ağın birleşik olasılık dağılımını göstermekte olup Denklem (27) ile hesaplanmaktadır. Burada N, ağda bulunan değişkenlerin toplam sayısını ifade etmektedir [50].

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^N P(X_i | Ebeveyn(X_i)) \quad (27)$$

Tablo 1. Teşhis kategorileri [13].

Teşhis kategorisi	N	Teşhis kategorisi	N
Serebral Palsi		Pompe hastalığı	1
-Dipleji	26	Kafa travması	1
-Kuatripleji	12	Mukopolisakkaritler	1
-Hemipleji	4	Akçaağaç şurubu idrar hastalığı	1
Miyelomeningosel	8	Cam kemik hastalığı	1
Kas distrofisi	7	Konjenital el anomalisi	1
Çarpık ayak	3	Beyin sapı tümörü	1
Cücelik	2	Hidrocefali	1

“N” kategoride yer alan birey sayısını ifade etmektedir.

Bayes ağında çıkarım süreci, gözlem yapıldıkça ağın güncellenmesi, yani Bayes teoreminin art arda uygulanması olarak ifade edilebilmektedir.

2.2 Kolektif (ensemble) öğrenme

Kolektif öğrenme, aynı sınıflandırıcının farklı eğitim setleri ile eğitilmesi veya aynı eğitim verisinin farklı sınıflandırma algoritmaları ile değerlendirilmesi sonucunda elde edilen doğruluk oranlarının birleştirilmesidir. Kolektif öğrenme, genelleme yeteneğini geliştiren ve her birinin aşırı yüklenme riskini azaltan kombine bir model elde etmek için bireysel veya heterojen modellerin bir araya getirilmesi ile oluşmaktadır [51].

Dietterich [52]’in çalışmasında bir kolektif sınıflandırıcının tek bir sınıflandırıcıdan daha iyi olduğunu gösteren üç temel özellik şu şekilde sunulmuştur: (i) Sadece tek bir sınıflandırıcı seçildiğinde, kötü olanı seçme riski üstlenilmiş olmaktadır. (ii) Birçok öğrenme algoritması, yerel aramayı kullandığı için algoritma en uygun sonucu bulamayabilmektedir. Bu yüzden öğrenme algoritmasının birkaç kez çalıştırılması ve elde edilen modellerin birleştirilmesi, algoritmaların herhangi birinden daha iyi sonuç elde edilmesini sağlayabilmektedir. (iii) Çoğu veri madenciliği probleminde uygun bir sınıflandırıcı bulunamadığında çeşitli sınıflandırıcıları birleştirerek en uygun sınıflandırıcıya ulaşılabilmektedir

2.3 Veri seti

Bu çalışmada SCADI olarak isimlendirilen ve ICF-CY çerçevesine göre oluşturulan, fiziksel ve motor engelli çocukların ve genç bireylerin öz bakım aktivitelerini içeren veri seti kullanılmıştır. Veri seti, 14 Nisan 2018 tarihinde İran’daki İslam Azad Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü’nden Dr. Fatemi Bushehri tarafından araştırmacıların kullanması için çevrimiçi ortamda sunulmuştur [53]. SCADI, eğitim ve sağlık merkezlerinde 15 yıldan fazla iş deneyimi olan iki meslek terapisti tarafından toplanmıştır. SCADI kayıtlarının toplanması için 2016’dan 2017’ye kadar İran’ın Yazd şehrindeki üç eğitim ve sağlık merkezinde 70 çocuk ve genç birey incelenmiştir.

SCADI analiz edildiğinde, terapistler tarafından incelenen bireylerin yaşının 6 ile 22 arasında değiştiği ve 41’inin kadın, 29’unun erkek olduğu görülmüştür. Söz konusu bireylerin sahip olduğu hastalıklara yönelik uzman terapist teşhisleri Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 2. Öz bakım aktiviteleri.

Kategori	Aktiviteler (Kodlar)
Yıkama	Vücut parçalarını yıkama (d5100), Tüm vücudu yıkama (d5101), Kurulanma (d 5102)
Vücut parçalarının bakımı	Cilt bakımı (d5200), Diş bakımı (d5201), Saç bakımı (d5202), El tırnak bakımı (d5203), Ayak tırnak bakımı (d5204), Burun bakımı (d5205)
Tuvalet ihtiyacını karşılama	İdrar ihtiyacının belirtilmesi (d53000), İdrarın uygun şekilde yapılması (d53001), Defekasyon ihtiyacının belirtilmesi (d53010), Defekasyonun uygun şekilde yapılması (d53011), Regl bakımı (d5302)
Giyinme	Giysi giyme (d5400), Giysiyi çıkartma (d5401), Ayakkabı giyme (d5402), Ayakkabı çıkartma (d5403), Uygun kıyafeti seçme (d5404),
Yeme	Yemek ihtiyacını belirtme (d5500), Uygun şekilde yemek yeme (d5501)
İçme	İçme ihtiyacını belirtme (d5600), Biberon ile beslenme (d5602)
Sağlığın gözetimi	Fiziksel rahatlığın sağlanması (d5700), Diyet ve fitness yönetimi (d5701), İlaçları yönetmek ve sağlık tavsiyelerinin izlenmesi (d57020), Bakıcılar veya profesyonellerden tavsiye veya yardım isteme (d57021), Uyuşturucu veya alkolün kötüye kullanılmasıyla ilgili risklerden kaçınma (d57022)
Güvenliğini gözetme	Kişisel güvenliğinin gözetilmesi (d 571)

SCADI'de ICF-CY'ye dayalı öz bakım için 29 aktivite yer almaktadır. Her kategoride yer alan faaliyetler ve bu faaliyetlerin kodları Tablo 2'de sunulmuştur. SCADI oluşturulurken 29 aktivite için binary veri tipi kullanılmıştır. Yani, kişinin söz konusu öz bakım aktivitesinde engel varsa, veri setindeki ilişkili hücreye 1, aksi takdirde 0 değeri işlenmiştir.

SCADI oluşturulurken faaliyet ve katılım bileşenlerindeki bozulma derecesini açıklamak için Tablo 3'te yer alan 7 kod kullanılmıştır. Her bir öz bakım aktivitesi, sunulan 7 bozukluk türünden birine sahip olabilmektedir. Bu durumdan dolayı SCADI, 203 (29*7) tane öz bakım aktivitesine yaş ve cinsiyet değişkenlerinin de eklenmesiyle 205 değişken olarak hazırlanmıştır.

Tablo 3. Bozukluk derecesi

Kod	Açıklama	Değer (%)
xxx.0	Bozukluk yok	0-4
xxx.1	Hafif bozukluk	5-24
xxx.2	Orta dereceli bozukluk	25-49
xxx.3	Şiddetli bozukluk	50-95
xxx.4	Tam bozukluk	96-100
xxx.8	Belirtilmemiş	
xxx.9	Uygulanamaz	

SCADI'de tahmin edilmesi beklenen "sınıf" değişkeni, fiziksel ve motor engelli çocukların ve genç bireylerin öz bakım sorunlarıdır. Meslek terapistleri, Tablo 1'de belirtilen hastalıklara sahip olan bireyleri inceledikten sonra bireylerde teşhis edilen Tablo 2'deki öz bakım aktivitelerini, 7 kategoriye ayırarak inceledikleri bireyleri uygun sınıfa atamışlardır (Tablo 4).

Tablo 4. Hedef değişken (sınıflar).

Hedef	Açıklama	Sayı
Sınıf 1	Vücut parçalarına bakım sorunu	2
Sınıf 2	Tuvalet sorunu	7
Sınıf 3	Giyinme sorunu	1
Sınıf 4	Yıkama, vücut parçalarına bakım ve giyinme sorunu	12
Sınıf 5	Yıkama, vücut parçalarına bakım, tuvalet ve giyinme sorunu	3
Sınıf 6	Yeme, içme, yıkama, vücut parçalarına bakım, tuvalet, giyinme, birinin güvenliği ve sağlığı ile ilgilenebilme sorunu	29
Sınıf 7	Sorun yok	16

2.4 Deneysel çalışma

Engelli bireylerin öz bakım aktivitelerindeki problemlere ilişkin sınıf tahmini uygulamasının, yüksek doğruluk oranı ile gerçekleştirilebilmesi için çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır. Söz konusu deneysel çalışmaların uygulanma sürecinde, kullanıcının istatistiksel ve veri madenciliği algoritmalarından faydalanmasını sağlayan ve görsel ara yüze sahip olan IBM SPSS Clementine modelleyiciden yararlanılmıştır. Teorik çerçevesi Şekil 3'te sunulan deneysel çalışma, veri setinin tanımlanması, özellik seçimi, eğitim ve test verisinin oluşturulması, algoritmaların uygulanması ve bulguların değerlendirilmesi olmak üzere temelde beş aşamadan oluşmaktadır.

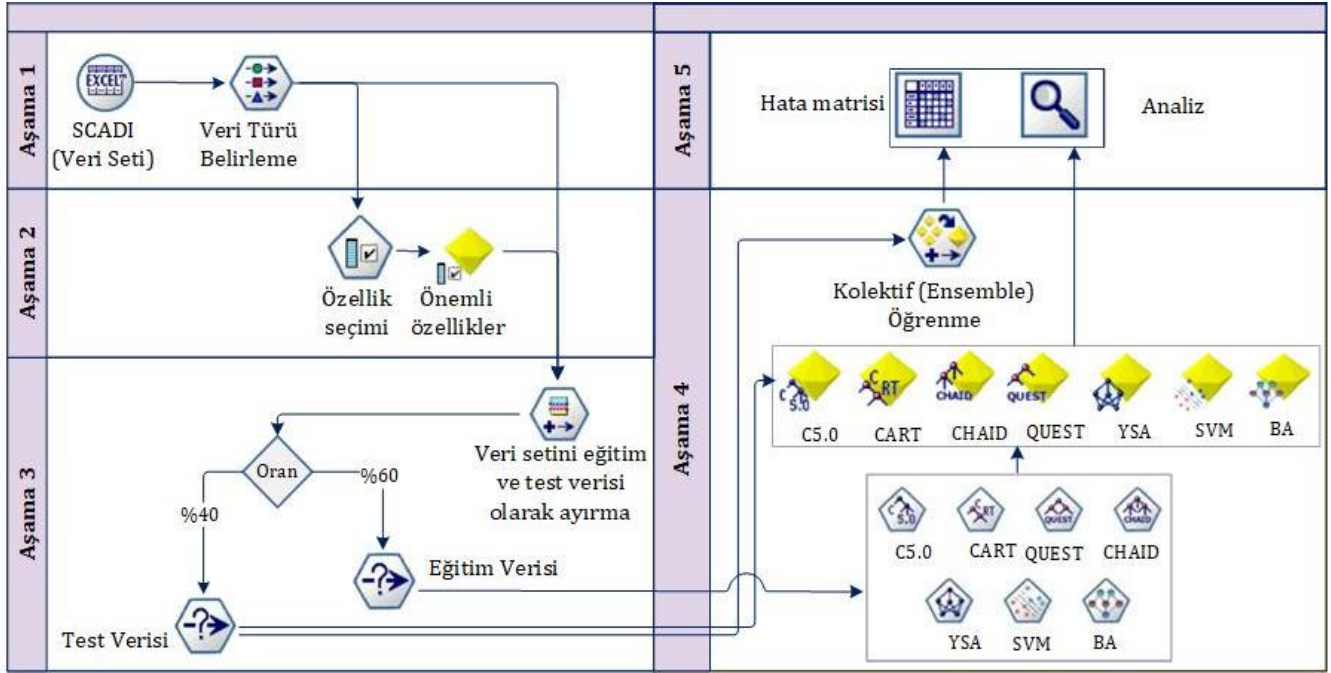
2.4.1 Veri setinin tanımlanması

SCADI'ye veri madenciliği algoritmasının uygulanması için veriler uygun formata dönüştürülerek modelleyiciye yüklenmiştir. Daha sonra veri setinde yer alan değişkenlerin tipleri (cinsiyet: flag, yaş: range, sınıf: flag ve d5 kodu ile başlayan öz bakım aktivitesi değişkenleri: flag) tanımlanmıştır.

2.4.2 Özellik seçimi

Sınıflandırma tahmininin yüksek doğruluk oranı ile gerçekleştirilebilmesi amacıyla ihtiyaç duyulan güvenilir modelleri oluşturmak için, özelliklerin mümkün olduğunca yararlı bilgi içermesi beklenmektedir. Bununla birlikte, veri seti hakkında genellikle çok az ön bilgi sahibi olunduğu için, hangi özelliklerin uygun veya birbirinden farklı olduğunu ayırt etmek zordur. Özellik seçimi, veri madenciliği yöntemlerinin uygulanmasında önemli bir aşamadır. Veri setleri genellikle verimli model yapısı için çok fazla değişkenle belirtilmektedir. Ancak ilgisiz ve gereksiz özellikler, sadece eğitim verimliliğini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda boyut laneti/belası olarak adlandırılan probleme neden olarak modelin performansını da olumsuz yönde etkilemektedir [54, 55]. Bu nedenle mümkün olan en iyi sınıflandırma sonucunu verebilecek minimal özellik setinin belirlenmesi gerekmektedir.

SCADI analiz edildiğinde 19 değişkenin sadece 0 değerine sahip veri içerdiği belirlenmiştir. Bu durum veri setinde sonucu yanıtlanabilecek gereksiz verinin olduğunu ve veri madenciliği analizi yapılmadan önce özellik seçiminin



Şekil 3. Teorik çerçeve

yapılmasını gerektiğini göstermektedir. SPSS Clementine modelleyicide yer alan özellik seçimi düğümü (feature selection node) aracılığı ile gerçekleştirilen özellik seçimi sonucunda, değişkenlerin sınıf ile ilişkileri analiz edildiğinde 205 değişken içerisinde 80 değişken önemli, 4 değişken marjinal yani düşük önemli, 15 değişken ise önemsiz olarak belirlenmiştir. Geri kalan 106 değişken ise fazla sayıda tek değişken içerdiği için sınıflandırmada ayırt edici bir etkiye

neden olmayacağından veri setinden çıkartılmıştır. Diğer değişkenler, eğitim ve test verisi oluşturmak üzere ayrılmıştır. Önemli bulunan değişkenlerin sırası ve önem değeri Tablo 5'te sunulmuştur. Özellik seçiminin sınıf tahmini sonuçları üzerindeki etkisinin analiz edilmesi için deneysel çalışmalar özellik seçimi yapılmış ve yapılmamış veriler için ayrı olarak uygulanmıştır.

Tablo 5. Önemli değişkenler.

Sıra	Değişken	Değer	Sıra	Değişken	Değer	Sıra	Değişken	Değer	Sıra	Değişken	Değer
1	d 5400-4	100.00%	21	d 5100-4	100.00%	41	d 53011-1	100.00%	61	d 5602-0	99.88%
2	d 5402-4	100.00%	22	d 5602-2	100.00%	42	d 5201-1	99.99%	62	d 5403-1	99.85%
3	d 5101-4	100.00%	23	d 53001-2	100.00%	43	d 5401-2	99.99%	63	d 5700-3	99.79%
4	d 5102-4	100.00%	24	d 53011-2	100.00%	44	d 5501-1	99.99%	64	d 571-1	99.74%
5	d 5203-4	100.00%	25	d 5102-3	100.00%	45	d 5202-1	99.99%	65	d 5501-0	99.59%
6	d 5204-4	100.00%	26	d 5201-3	100.00%	46	d 5203-2	99.99%	66	d 5101-1	99.55%
7	d 53001-4	100.00%	27	d 5202-3	100.00%	47	d 5204-2	99.99%	67	d 5200-1	99.55%
8	d 53011-4	100.00%	28	d 5205-3	100.00%	48	d 5205-1	99.99%	68	d 5403-0	99.55%
9	d 5401-4	100.00%	29	d 5401-3	100.00%	49	d 5100-1	99.98%	69	d 5404-1	99.44%
10	d 5403-4	100.00%	30	d 5101-3	100.00%	50	d 5701-1	99.98%	70	d 5701-3	99.41%
11	d 5201-4	100.00%	31	d 5200-4	100.00%	51	d 5700-1	99.98%	71	d 5205-2	99.39%
12	d 5202-4	100.00%	32	d 5203-3	100.00%	52	d 5501-3	99.98%	72	d 5404-0	99.23%
13	d 5501-4	100.00%	33	d 5204-3	100.00%	53	d 53000-0	99.93%	73	d 5501-2	98.75%
14	d 5205-4	100.00%	34	d 5102-2	100.00%	54	d 53010-0	99.92%	74	d 57021-0	98.51%
15	d 5602-4	100.00%	35	d 5101-2	100.00%	55	d 571-0	99.91%	75	d 57020-3	98.32%
16	d 53000-4	100.00%	36	d 5100-2	100.00%	56	d 53000-1	99.90%	76	d 5700-4	97.64%
17	d 53010-4	100.00%	37	d 5200-3	100.00%	57	d 53010-1	99.90%	77	d 5500-0	96.54%
18	d 5400-3	100.00%	38	d 5400-2	100.00%	58	d 5602-1	99.89%	78	d 57020-1	96.27%
19	d 5402-3	100.00%	39	d 5402-2	100.00%	59	d 5200-2	99.89%	79	d 5701-2	95.50%
20	d 5403-2	100.00%	40	d 53001-1	100.00%	60	d 5202-2	99.89%	80	d 5404-4	95.32%

2.4.3 Eğitim ve test verisinin oluşturulması

Algoritmaların eğitilmesi ve eğitim performansının değerlendirilmesi için veri seti, eğitim ve test verisi olarak ikiye ayrılmıştır. Eğitim ve test verisinin, veri setinin ne kadarını kapsayacağına ilişkin kesin bir oran yoktur. Bu oran veri setinin büyüklüğüne ve değişken sayısına bağlı olarak değişmektedir. Kullanıcının farklı oranları deneyerek en uygun değere ulaşması gerekmektedir. SCADI için yapılan denemelerde, veri setinin %65 ve üzerindeki oranlara sahip olan eğitim setleri ile algoritmalarda aşırı uyum (overfitting), %60'ın altındaki oranlarda ise uyumsuzluk (underfitting) sorunları ile karşılaşmıştır. Yapılan denemeler sonucunda en iyi performansın %60 oranındaki eğitim setiyle sağlandığı görülmüştür.

Kolektif öğrenme yönteminin hem farklı algoritmalar ile hem de farklı eğitim verileri ile desteklenmesi için beş farklı eğitim verisi oluşturulmuştur. Eğitim verilerinin birbirinden farklı olabilmesi için rasgele sayı üreticini başlatmak için kullanılan sayıların birbirinden farklı olmasına dikkat edilmiştir.

2.4.4 Modelin uygulanması

Sınıf tahmini için yapılan deneysel çalışmalarda yedi farklı algoritma (C5.0, CART, CHAID, QUEST, YSA, SVM, BA) kullanılmıştır. En iyi sınıflandırma performansının belirlenebilmesi için söz konusu algoritmalar tek olarak ve kolektif olarak uygulanmıştır. Kolektif modeller oluşturulurken yüksek doğruluk oranına sahip olan algoritmalar farklı birliktelikler ile deneyerek kolektif olarak çalıştırılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Literatürde sınıflandırma tahmini yapılan çalışmaların performansını ölçmek için farklı parametrelerin kullanıldığı görülmüştür. Bu bölümde yedi tahmin algoritmasının ve kolektif modellerin performansını ölçmek için literatürde sıklıkla kullanılan doğruluk oranı **Denklem (28)** ve hata oranı **Denklem (29)** kullanılmıştır. Sınıflandırma doğruluğu, doğru tahmin sayısının toplam tahmin sayısına bölünmesiyle elde edilmektedir. Hata oranı ise 1 eksi hedef değişkenin tahmininde yapılan hatayı üreten doğruluk oranıdır [57].

$$\text{Doğruluk Oranı (DO)} = \frac{GP + GN}{GP + GN + YP + YN} \quad (28)$$

$$\text{Hata Oranı (HO)} = 1 - DO \quad (29)$$

Doğruluk oranı hesaplanırken kullanılan parametreler **Şekil 4**'teki hata matrisinde sunulmuştur. Oranın hesaplanmasında kullanılan eşitliğin pay kısmı doğru sınıflandırılan örnek sayısını, payda kısmı ise sınıflandırılan tüm örnek sayısını kapsamaktadır.

		Tahmin Edilen	
		Pozitif	Negatif
Gerçekleşen	Pozitif	Gerçek Pozitif (GP)	Yanlış Pozitif (YP)
	Negatif	Yanlış Negatif (YN)	Gerçek Negatif (GN)

Şekil 4. Hata matrisi.

SCADI veri setini kullanarak sınıflandırma tahmini yapan çalışmaların [13,56,58] doğruluk oranları **Tablo 6**'da sunulmuştur. Bu çalışmalar arasında en yüksek doğruluk oranına (%88,57) Keleş ve Kılıç [56], K-En Yakın Komşu algoritmasını kullanarak ulaşmıştır.

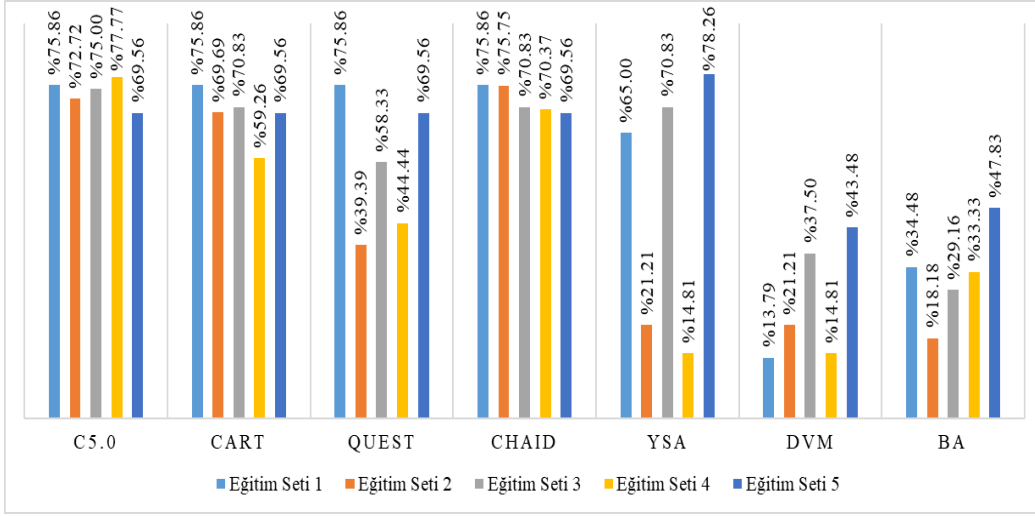
Tablo 6. SCADI ile tahmin analizi yapan çalışmalar.

	Zarchi vd. [13]	Keleş ve Kılıç [56]	Choudhury ve Greene [58]
Yapay Sinir Ağları	%83.10		
K- En Yakın Komşu		%88.57	
Rastgele Orman		%85.71	%87.75
Sıralı Minimal Optimizasyon		%87.14	
Karar Tablosu		%87.14	
Naïve Bayes		%87.14	%83.00
Destek Vektör Makineleri			%82.43
Lazy LWL			%78.57
Hoeffding Tree			%80.71

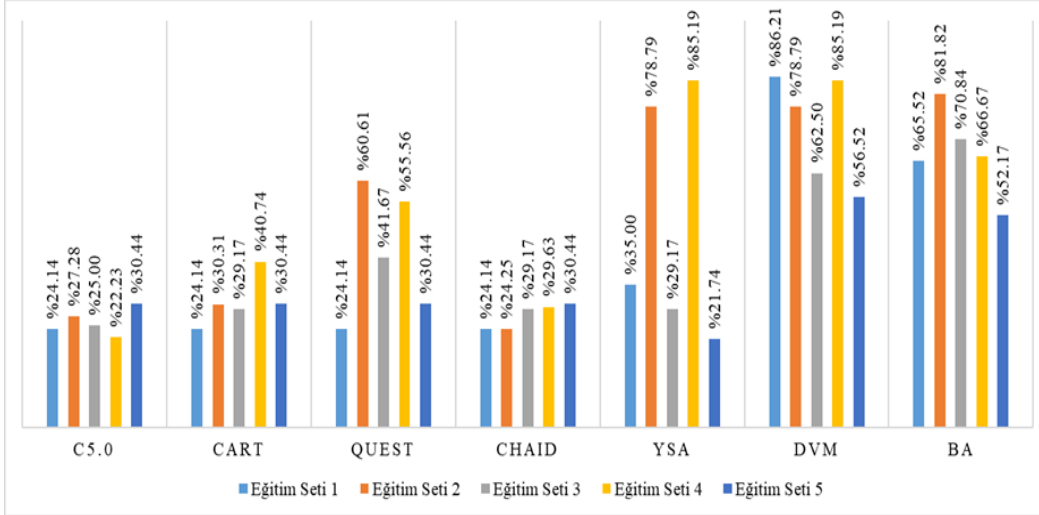
Yapılan ilk deneyde, özellik seçiminin tahmin doğruluğu üzerindeki etkisinin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla özellik seçimi uygulanmadan önce veri setinden, rastgele sayılar kullanılarak birbirinden farklı beş eğitim seti elde edilmiştir. Çalışma kapsamında analiz edilecek algoritmaların her biri bireysel olarak söz konusu beş eğitim setine uygulanmıştır. **Şekil 5**'te sunulan doğruluk oranları incelendiğinde en yüksek doğruluk oranlarına eğitim seti 1 için C5.0 (%75.86), CART (%75.86), QUEST (%75.86), CHAID (%75.86) algoritmaları, eğitim seti 2 için CHAID (%75.75), eğitim seti 3 için C5.0 (%75.00), eğitim seti 4 için C5.0 (%77.77) ve eğitim seti 5 için YSA (%78.26) algoritmaları ile ulaşıldığı görülmüştür.

Daha sonra veri setine özellik seçimi uygulandıktan sonra beş farklı eğitim seti oluşturulmuş ve her bir algoritma bireysel olarak bu eğitim verilerine uygulanmıştır. En yüksek doğruluk oranlarına eğitim seti 1 için YSA (%86.20), eğitim seti 2 için CART (%85.71), eğitim seti 3 için C5.0 (%81.48), CART (%81.48), CHAID (%81.48), eğitim seti 4 için YSA (%85.71) ve eğitim seti 5 için C5.0 (%89.66), CART (%89.66), CHAID (%89.66) algoritmaları ile ulaşılmıştır. Özellik seçimi yapılmış veri seti için uygulanan bireysel algoritmaların performansları **Tablo 6**'da sunulan literatürdeki çalışmaların doğruluk oranları ile kıyaslandığında eğitim seti 5 için gerçekleştirilen deneyde daha yüksek doğruluk oranı elde edildiği görülmekle birlikte diğer eğitim setleri ile yapılan deneylerin performansı düşük çıkmıştır.

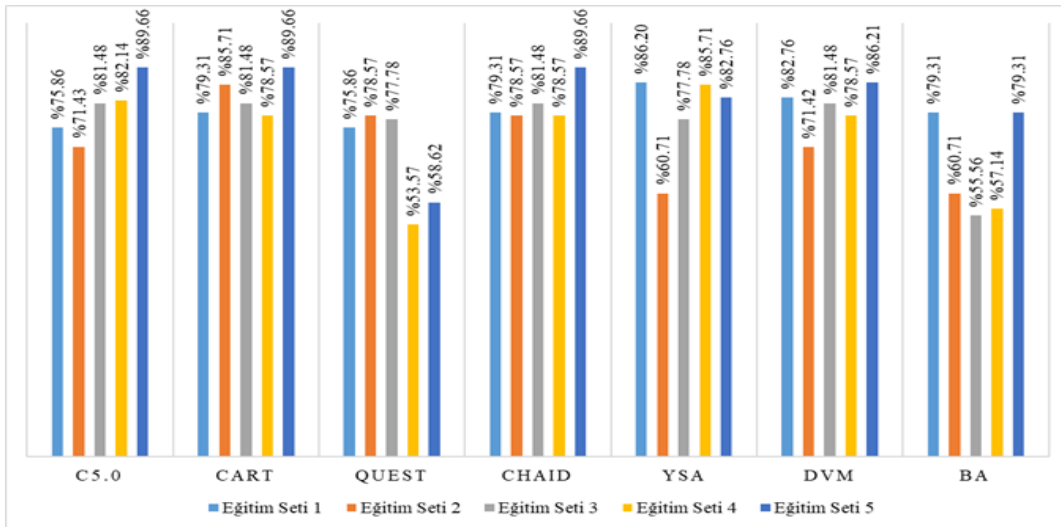
SCADI üzerinde özellik seçimi uygulanmasının deneysel sonuçlara etkisinin analiz edilmesi için her bir veri setine uygulanan yedi farklı algoritmanın doğruluk oranlarının aritmetik ortalaması alınarak **Şekil 7**'de sunulan grafik oluşturulmuştur. Grafik analiz edildiğinde özellik seçiminin eğitim setlerinin hepsi için %17.79 ile %28.50 arasında performans artışı sağladığı görülmüştür.



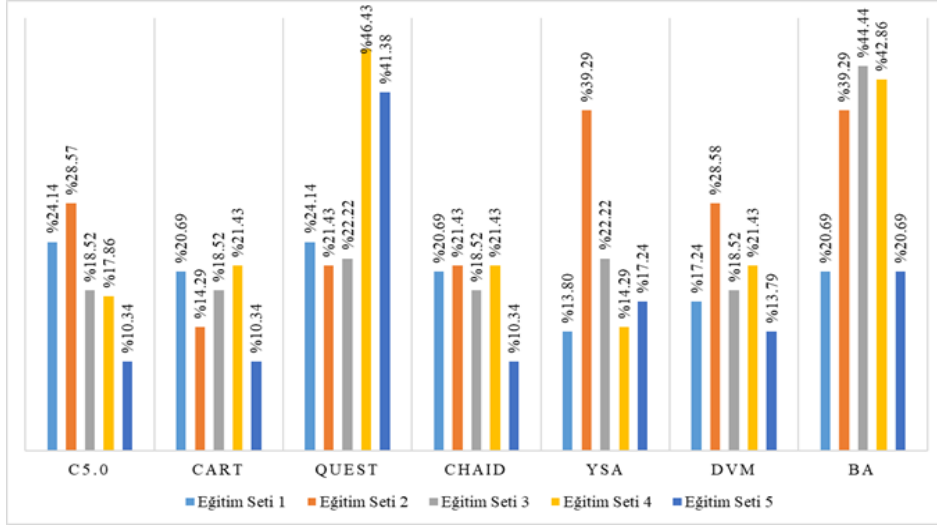
Şekil 5. Özellik seçimi yapılmadan hesaplanan doğruluk oranları.



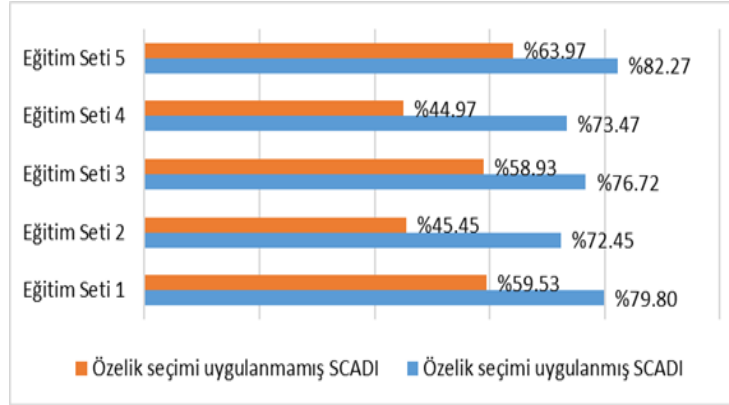
Şekil 6. Özellik seçimi yapılmadan hesaplanan hata oranları.



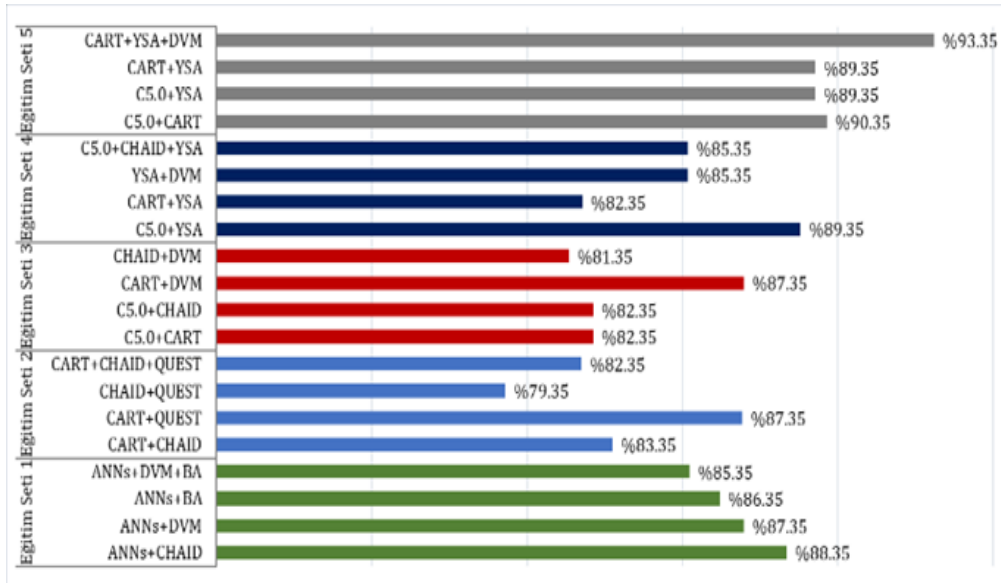
Şekil 7. Bireysel modellerin farklı eğitim verisine göre doğruluk oranları.



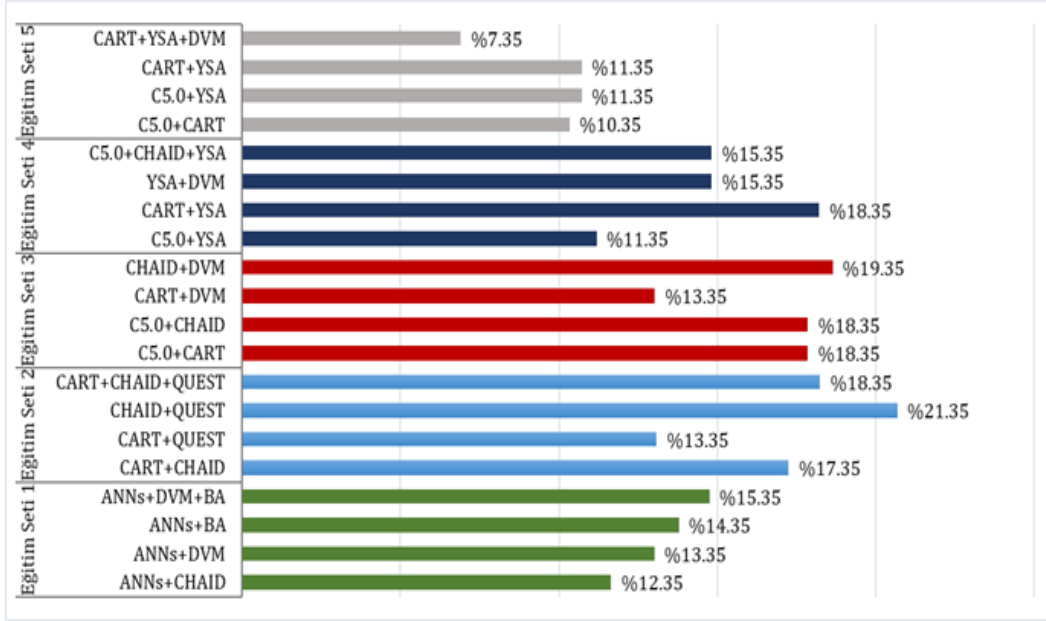
Şekil 8. Bireysel modellerin farklı eğitim verisine göre hata oranları.



Şekil 9. Özellik seçiminin sonuçlara etkisi.



Şekil 10. Kolektif modellerin farklı eğitim verisine göre doğruluk oranları.



Şekil 11. Kolektif modellerin farklı eğitim verisine göre hata oranları.

İkinci deneyde, kolektif öğrenme yönteminin algoritmaların performansını arttırıp arttırmadığı analiz edilmiştir. Bu amaçla, bireysel olarak uygulanan algoritmalar, çeşitli kombinasyonlar ile birlikte uygulanarak deneyler yapılmış ve performansları test edilmiştir. Yapılan deneyler arasında her bir veri seti için en iyi performansı gösteren dört kolektif modelin doğruluk oranları Şekil 10'da ve hata oranları Şekil 11'de sunulmuştur. Şekil 10'da sunulan doğruluk oranı grafiği analiz edildiğinde bütün eğitim setleri için doğruluk oranının, bireysel algoritmalar ile elde edilen doğruluk oranlarına göre arttığı görülmüştür. Doğruluk oranı artışları incelendiğinde en yüksek artış (%5.49) sağlayan kolektif model, eğitim seti 3 için hazırlanan CART+DVM modelidir. En yüksek doğruluk oranına (%93.10) sahip olan model ise eğitim seti 5 için geliştirilen CART+YSA+DVM modelidir

4 Sonuçlar

Teknolojinin gelişmesiyle bilgi oluşturma ve büyük miktarlarda heterojen verinin yönetimi veri madenciliğini önemli bir araştırma alanı haline getirmiştir. Verilerin yönetilerek kullanışlı bilgiler haline dönüştürülmesi için yaygın olarak veri madenciliği algoritmalarına başvurulmaktadır. Özellikle sağlık sektöründe yaygın olarak kullanılan sınıflandırma algoritması mevcut veriler ışığında eğitilerek, yeni veriler için öğrenilmek istenen bilgileri kısa sürede ve maliyetsiz olarak sunmaktadır.

Öz-bakım aktivitelerinin belirli bir standarda göre sınıflandırılması ve engelli bireylerin yaşadıkları sorunları teşhis ederek hangi sınıfa ait olduklarının belirlenmesi zahmetli bir süreçtir. Bu nedenle bu çalışmada uzman terapistlere bireylerin ICF-CY standartlarına göre yüksek doğrulukla sınıf tahmini yapan kolektif model önerilmiştir. Model önerilmeden önce beş farklı eğitim verisi üzerinden çeşitli deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek kıyaslanmıştır.

SCADI veri setindeki örnek sayısı (70), değişken sayısına (205) göre oldukça az olması ve veri setinin çok sınıflı probleme yönelik oluşturulmasına rağmen her sınıf için örnek sayısının yeterli miktarda olmaması (örneğin; sınıf 1 için 2, sınıf 3 için 1 örnek, sınıf 5 için 3 örnek bulunmaktadır), sınıflandırma algoritmasının her sınıf için yüksek doğrulukla tahmin yapmasını zorlaştırmıştır ve yetersiz uyum problemi ile karşı karşıya kalınmasına neden olmuştur. Ancak bu zorluklara rağmen geliştirilen kolektif öğrenme modelleri ile gerçekleştirilen deneylerin ortalama doğruluk oranı (DO_{ort}) (%88.83) literatürde SCADI için yapılan çalışmalardan daha yüksek çıkmıştır (Denklem (30)).

$$DO = \frac{\%93,10 + \%88,80 + \%86,79 + \%86,92 + \%88,35}{5} = \%88,83 \quad (30)$$

Algoritmaların gösterdikleri performanslar analiz edildiğinde;

- Değişen eğitim verilerine göre modellerin öğrenme kapasitesinin de değiştiği,
- Veri seti üzerinde yapılan özellik seçiminin tahmin performansını arttırdığı,
- Veri madenciliği algoritmalarının kolektif olarak uygulanmasının bireysel olarak uygulanmasına kıyasla sonuçlarda iyileşme sağladığı görülmüştür.

Gelecek çalışmalarda bulanık mantık tekniğinden yararlanılarak öz bakım sorunlarının daha hassas sınıflandırmasını sağlayan algoritma geliştirilmesi planlanmaktadır. Ek olarak elde edilen karar kurallarının uzman görüşleri ile desteklenerek karar destek sistemine dönüştürülmesi ve bir web servis ile desteklenerek çevrimiçi ortamda kullanıma sunulması hedeflenmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] World Health Organization, Disabilities, Accessed 20 November 2019. <https://www.who.int/topics/disabilities/en/>
- [2] World Health Organization (WHO). World report on disability, https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/nbk304079/pdf/bookshelf_nbk304079.pdf Accessed: 12 December 2019.
- [3] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). Nüfus ve konut araştırması, Erişim 31 Ocak 2013. <https://tuikweb.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=15843>
- [4] J. Ditterline, D. Banner, T. Oakland, and D. Becton, Adaptive behavior profiles of students with disabilities., Journal of Applied School Psychology, 24(2), 191-208, 2008. <https://doi.org/10.1080/15377900802089973>
- [5] L. Rosenberg, A. Moran and O. Bart, The associations among motor ability, social-communication skills, and participation in daily life activities in children with low-functioning autism spectrum disorder, Journal of Occupational Therapy, Schools, & Early Intervention, 10(2), 137-46, 2017. <https://doi.org/10.1080/19411243.2017.1304842>
- [6] E. Björck-Åkesson et al., The International Classification of Functioning, Disability and Health and the version for children and youth as a tool in child habilitation/early childhood intervention–feasibility and usefulness as a common language and frame of reference for practice, Disability and Rehabilitation, 32 (1), 125-38, 2010.
- [7] R. J. Simeonsson et al., Applying the International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF) to measure childhood disability, Disability and Rehabilitation, 25(11-12), 602-10, 2003. <https://doi.org/10.1080/0963828031000137117>
- [8] T.K. Wu, S.C. Huang, and Y.R. Meng, Evaluation of ANN and SVM classifiers as predictors to the diagnosis of students with learning disabilities, Expert Systems with Applications, 34(3), 1846-56, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.02.026>
- [9] T.K. Wu, Y.R. Meng, and S.C. Huang, Application of Artificial Neural Network to the Identification of Students with Learning Disabilities, in IC-AI , pp. 162-168, 2006.
- [10] N. Muangnak, W. Pukdee, and T. Hengsanunkun, Classification students with learning disabilities using Naïve Bayes Classifier and Decision Tree, in The 6th International Conference on Networked Computing and Advanced Information Management, pp. 189-192, 2010.
- [11] B. B. Ertürk, İşlevsellik, yetiyitimi ve sağlığın uluslararası sınıflandırılması, Erişim 20 Mayıs 2019. http://www.sosyalsiyaset.net/documents/yeti_yitimi_islevsellik.htm
- [12] N. Şahin, H. Altun, ve K. Bilge, Özürlü çocuk sağlık kurulu raporlarının değerlendirilmesi, Kocatepe Tıp Dergisi, 15(1), 48-53, 2014.
- [13] M. Zarchi, S. F. Bushehri, and M. Dehghanizadeh, SCADI: A standard dataset for self-care problems classification of children with physical and motor disability, International Journal of Medical Informatics, 114, 81-7, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2018.03.003>
- [14] J. S. Chou and A.D. Pham Enhanced artificial intelligence for ensemble approach to predicting high performance concrete compressive strength, Construction and Building Materials, 49, 554-63, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.078>
- [15] L. Jena and N. K. Kamila Distributed data mining classification algorithms for prediction of chronic-kidney-disease, Int. J. Emerg. Res. Manag. & Technology, 4(11), 110-8, 2015.
- [16] İ. Ertuğrul, A. Organ, ve A. Şavlı, Veri madenciliği uygulamasına ilişkin PAÜ hastanesinde hasta profilinin belirlenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(2), 97-103, 2013. <https://doi.org/10.5505/pajes.2013.68077>
- [17] D. A. Adeniyi, Z. Wei and Y. Yongquan Automated web usage data mining and recommendation system using K-Nearest Neighbor (KNN) classification method, Applied Computing and Informatics, 12(1), 90-108, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.aci.2014.10.001>
- [18] J. R. Quinlan, Discovering rules by induction from large collections of examples, Editör: Donald, M. Expert systems in The Micro Electronic Age, 168–201, Edinburgh, İskoçya, Edinburgh University Press, 1979.
- [19] J. R. Quinlan, Induction of decision trees, Machine Learning, 1(1), 81-106, 1986. <https://doi.org/10.1007/bf00116251>
- [20] J. R. Quinlan, Bagging, boosting, and C4. 5, in AAAI/IAAI, 1,725-30, 1996.
- [21] J. R. Quinlan, C4.5: Programs for Machine Learning San Francisco, CA, USA, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993.
- [22] V. Figueiredo, F. Rodrigues, Z. Vale, and J. B. Gouveia, An electric energy consumer characterization framework based on data mining techniques, IEEE Transactions on Power Systems, 20(2), 596-602, 2005. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.846234>
- [23] M. B. Kılıçalan, Hanehalkı işgücü araştırma verileri ile veri madenciliği yöntemlerinin uygulanması ve modellerin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2018.
- [24] B. Lantz, Machine learning with R. Packt Publishing Ltd, Birmingham, İngiltere, 2013.
- [25] S. L. Pang, and J. Z. Gong, C5. 0 classification algorithm and application on individual credit evaluation of banks, Systems Engineering-Theory & Practice, 29(12), 94-104, 2009. [https://doi.org/10.1016/S1874-8651\(10\)60092-0](https://doi.org/10.1016/S1874-8651(10)60092-0)
- [26] L. Breiman, J. H. Friedman and R.A. Olshen, and C.J. Stone Classification and regression trees. Belmont, CA: Wadsworth. International Group, 432, 151-66, 1984. <https://doi.org/10.1002/widm.8>

- [27] A. M. Elsayad and H. A. Elsalamony, Diagnosis of breast cancer using decision tree models and SVM, *International Journal of Computer Applications*, 83(5), 19-29, 2013.
- [28] E. Şatir, F. Azboy, A. Aydın, H. Arslan ve Ş. Hacıfendioğlu Veri indirgeme ve sınıflandırma teknikleri ile glokom hastalığı teşhisi, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 3(3), 485-97, 2016.
- [29] W. Y. Loh and Y. S. Shih, Split selection methods for classification trees, *Statistica Sinica*, pp. 815-40, 1997.
- [30] M. Coşkun and H. İ. Bülbül, Hane halkı internet hizmeti sahipliğini etkileyen faktörlerin karar ağaçları ile incelenmesi. *Türk Bilim Araştırma Vakfı*, 12(2), 1-17, 2019.
- [31] E. Ekici, Farklı sınıflandırma yöntemlerinin karşılaştırılması ve bir uygulama/An application on the comparison of various classification methods, *Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, Türkiye*, 2012.
- [32] G. V. Kass, An exploratory technique for investigating large quantities of categorical data, *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 29(2), 119-127, 1980. <https://doi.org/10.2307/2986296>
- [33] O. F. Althuwaynee, B. Pradhan, and S. Lee, A novel integrated model for assessing landslide susceptibility mapping using CHAID and AHP pair-wise comparison, *International Journal of Remote Sensing*, 37(5), 1190-209, 2016. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1148282>
- [34] M. Chambers and T. W. Dinsmore, *Advanced Analytics Methodologies: Driving Business Value with Analytics*, Londra, Pearson Education, 2014.
- [35] M. Abdar, M. Zomorodi-Moghadam, R. Das, and I.H. Ting, Performance analysis of classification algorithms on early detection of liver disease, *Expert Systems with Applications*, 67, 239-51, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.08.065>
- [36] V. Vapnik and A. Chervonenkis, *Theory of pattern recognition*, ed: Nauka, Moscow, 1974.
- [37] C. J. Burges A tutorial on support vector machines for pattern recognition, *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(2), 121-67, 1998. <https://doi.org/10.1023/A:1009715923555>
- [38] W. S. Noble, What is a support vector machine? *Nature Biotechnology*, 24(12), 1565-7, 2006. <https://doi.org/10.1038/nbt1206-1565>
- [39] C. Cortes and V. Vapnik, Support-vector networks, *Machine Learning*, 20(3), 273-97, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00994018>
- [40] E. Osuna, R. Freund, and F. Girosit, Training support vector machines: an application to face detection, in *Proceedings of IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 130-6, 1997. <https://doi.org/10.1109/CVPR1997.609310>
- [41] C.C. Yeh, D.J. Chi, and M.F. Hsu, A hybrid approach of DEA, rough set and support vector machines for business failure prediction, *Expert Systems with Applications*, 37(2), 1535-41, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.06.088>
- [42] C.W. Hsu, C.C. Chang, and C.J. Lin, *A practical guide to support vector classification*, ed: Taipei, 2003.
- [43] W. S. McCulloch and W. Pitts, A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, *Bull. Math. Biophys*, 5(4), 115-33, 1943. <https://doi.org/10.1007/bf02478259>
- [44] F. Rosenblatt, *The perceptron, a perceiving and recognizing automaton Project Para*, Cornell Aeronautical Laboratory, 1957.
- [45] H. Erdal, Makine öğrenmesi yöntemlerinin inşaat sektörüne katkısı: basınç dayanımı tahminlemesi, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 21(3), 109-14, 2015. <https://doi.org/10.5505/pajes.2014.26121>
- [46] E. Aydemir, M. Karaatlı, G. Yılmaz, ve S. Aksoy, 112 Acil çağrı merkezine gelen çağrı sayılarını belirleyebilmek için bir yapay sinir ağı tahminleme modeli geliştirilmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(5), 145-9, 2014. <https://doi.org/10.5505/pajes.2014.98608>
- [47] Ş. Hacıfendioğlu, Makine öğrenmesi yöntemleri ile glokom hastalığının teşhisi, *Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*, 2012.
- [48] H. B. Kartal, Envanter sınıflandırmada yapay öğrenme yöntemlerinin kullanımı ve destek vektör makineleri ile bir uygulama, *Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul*, 2012.
- [49] M. Karabıyık ve B. Yet, Bayes ağları ile futbol analitiği: FutBA modeli, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(1), 121-31, 2019.
- [50] E. N. Çinicioğlu, M. Atalay, ve H. Yorulmaz, Trafik kazaları analizi için bayes ağları modeli, *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 6(2), 41, 2013.
- [51] J. M. Moyano, E. L. Gibaja, K. J. Cios, and S. Ventura, Review of ensembles of multi-label classifiers: models, experimental study and prospects, *Information Fusion*, 44, 33-45, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2017.12.001>
- [52] T. G. Dietterich, Ensemble methods in machine learning, in *International Workshop On Multiple Classifier Systems*, 2000, Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-45014-9_1
- [53] UCI Machine Learning Repository. SCADI Data Set, <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/SCADI> Accessed: 06 December 2018.
- [54] I. A. Gheyas and L. S. Smith, Feature subset selection in large dimensionality domains, *Pattern Recognition*, 43(1), 5-13, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2009.06.009>
- [55] S. Gu, R. Cheng, and Y. Jin, Feature selection for high-dimensional classification using a competitive swarm optimizer, *Soft Computing*, 22(3), 811-22, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00500-016-2385-6>
- [56] M. K. Keleş and Ü. Kılıç, Artificial bee colony algorithm for feature selection on scadi dataset, in *2018 3rd International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*, pp. 463-6, 2018. <https://doi.org/10.1109/UBMK.2018.8566287>

- [57] H. B. F. David, H. B. F. and A. Suruliandi, Performance evaluation of ensemble classifiers on benchmark datasets, *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 6(2), 926-30, 2019.
- [58] A. Choudhury, Classification of functioning, disability, and health: ICF-CY self care (SCADI dataset) using

predictive analytics, in Choudhury A., *Classification of Functioning, Disability, and Health: ICF-CY Self Care.(SCADI DATASET) Using Predictive Analytics*. In: *Proceedings of the 2019 IISE Annual Conference*. Edited by HE Romeijn AS, R. Thomas. Orlando: IISE, 2019. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3307719>





AHP ve ANP yöntemleri kullanılarak tehlikeli madde depo yeri seçimi: Kırıkkale ilinde bir uygulama

Selection of the warehouse location for hazardous materials using AHP and ANP methods: a case study in Kırıkkale

Nursena Oral¹ , Rabia Yumuşak² , Tamer Eren^{3,*} 

^{1,2,3} Kırıkkale University, Industrial Engineering Department, 71450, Kırıkkale, Turkey

Özet

Depolar, ürünlerin muhafaza edildiği ve lojistik açıdan stratejik noktalara kurulması gereken yapılardır. Faaliyetlerine göre sınıflandırılan depo çeşitlerinden biri tehlikeli madde depolarıdır. Tehlikeli maddeler, yapıları itibari ile insan sağlığına, emniyetine ve doğal hayata zarar verme tehlikesi taşırlar. Bu tehlike göz önüne alındığında maddelerin uygun yerlerde muhafaza edilmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada ise problemin öneminden hareketle tehlikeli madde için depo yeri seçimi yapılmıştır. Tehlikeli madde depo yeri seçimini etkileyen birçok kriter olması ve bu kriterlerin birbiri ile çelişmesi dolayısıyla çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılmıştır. Stratejik konumu itibari ile Kırıkkale ilindeki 4 bölge, 4 ana ve 9 alt kriter dikkate alınarak değerlendirilmiş, analitik hiyerarşi prosesi yöntemi ve analitik ağ prosesi yöntemleri ile uygun depo yerinin seçilmesi amaçlanmıştır. Sonuç olarak tehlikeli maddelerin ikinci bölgede depolanması gerektiği kanaatine varılmıştır. Bu çalışmada ilk defa tehlikeli madde depo yeri seçimi probleminde analitik hiyerarşi prosesi ve analitik ağ prosesi çözümü karşılaştırması yapılmış olup literatüre katkı sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Tehlikeli madde, Depo yeri seçimi, Çok kriterli karar verme yöntemleri, Analitik hiyerarşi prosesi yöntemi, Analitik ağ prosesi yöntemi

1 Giriş

Son yıllarda her çeşit piyasada artan küreselleşme, rekabeti arttırarak yeni pazarlara girme, hızlı dağıtım olanakları ve farklı boyutlardaki ekonomileri kullanma ihtiyacı doğurmuştur. Dinamik ve değişken bir çevre tarafından karakterize edilen günümüz küresel ekonomisinde, araştırmacılar pek çok yer seçimi faktörünün göz önünde bulundurulmasının önemini vurgulamaktadır [1]. Tehlikeli maddeler katı, sıvı veya gaz halinde bulunabilen kimyasal, fiziksel ve yapısal özellikleri itibariyle çevre, insan sağlığı ve emniyetine çeşitli zararlar verebilecek maddelerdir [2]. Tehlikeli maddelerin üretimi giderek artmakta ve çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Söz konusu maddelerin herhangi bir kaza sonucunda çevreye vereceği zararların en aza indirilmesi gerektiği için depolanmaları ayrı bir problem olarak ortaya çıkmaktadır.

Depo yeri seçimi her türlü madde için genel bir problemdir. Yatırıma karar vermiş bir yönetici, başarı hedeflerini en iyi bir biçimde gerçekleştirebilmek için en uygun yeri arar [3]. Bu yüzden çalışmada ele alınan depo yeri

Abstract

Warehouses are the structures where the goods are preserved and they need to be established in strategical points logistically. One of the warehouses which are classified according to their fields of activity is hazardous material warehouses. Hazardous materials are the substances that endanger the human health, the safety of people and the natural environment because of their structures. Considering these dangers, it is crucial that those materials are preserved under proper circumstances in appropriate places. In this study, a selection of a location for the warehouse of hazardous materials is made regarding the importance of the problem. Because there are several criteria that affect the selection of the warehouse location for hazardous materials and these criteria conflict with each other, methods of multi criteria decision-making are used in this study. Four places in the city of Kırıkkale are evaluated considering their strategical location. Selection of the appropriate location for the warehouse is aimed by taking the 4 main criteria and 9 sub-criteria into the consideration and by using the methods of analytic hierarchy and the analytic network processes. As a result, it is concluded that hazardous materials should be preserved in the second district. This study contributes to the literature as it compares the methods of analytic hierarchy and the analytic network processes for the selection of the warehouse location for hazardous materials for the first time.

Keywords: Hazardous material, Warehouse location selection, Multi-criteria decision making methods, Analytical hierarchy process method, Analytical network processing method

seçimi probleminin koşullarını sağlayabilmek adına kriterlerin ve bu kriterleri sağlayabilecek yer alternatiflerinin belirlenmesi önem teşkil etmektedir. Birden fazla kriterin ve depo yeri alternatifinin olması sebebiyle bu problem çok kriterli karar verme (ÇKKV) problemi olarak ele alınmıştır [4].

Literatür incelediğinde, kuruluş yeri seçimi ve tehlikeli maddeler konularında yapılan birçok çalışma olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmalardan ilkinde Korpela ve Tuominen [5] depo sahası seçimi için Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemine dayalı hem nitel hem de nicel yönlerin dikkate alınabileceği yer seçim sürecine entegre bir yaklaşım sunmuşlardır. Yaptıkları çalışmada, depolama için yer seçimi probleminin dağıtım stratejileri açısından en önemli unsur olduğunu savunmuşlardır. Uygun depo yeri seçimi sayesinde lojistik maliyetler önemli oranda azaltılabilmektedir. Hokkanen vd. [6] Helsinki’de yaptıkları çalışmada bir liman yeri seçimi problemi için Stokastik Çok Kriterli Kabul Edilebilirlik Analizi (SMAA) metodunu kullanmışlardır. Limanın en uygun yere kurulabilmesi için

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: tamereren@gmail.com (T. Eren)

Geliş / Recieved: Kabul 29.05.2020/ Accepted:16.11.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngmuh.744734

11 kritere göre 24 alternatif arasından seçim yapılmıştır. Bu çalışma SMAA yönteminin kullanıldığı ilk tesis yeri seçim problemi olması açısından önem taşımaktadır. Daha sonra SMAA yöntemi çeşitlendirilerek başka problemlerin çözümleri için kullanılmıştır. Lahdelma vd. [7] yaptıkları çalışmada Finlandiya'da bir atık arıtma tesisinin yerinin seçimi için çeşitlendirilmiş SMAA yöntemlerinden biri olan SMAA-O yöntemini kullanarak 17 kritere göre 4 alternatifini değerlendirmişlerdir.

Demirel vd. [8] yaptıkları çalışmada Choquet İntegral Yöntemi kullanarak Türkiye'de bulunan büyük bir lojistik firması için depo yeri belirlemişlerdir. Depo yeri seçimi yapılırken işçi özellikleri, pazar, makro çevre, fiyat ve altyapı kriterleri üzerinde durulmuştur. Özcan vd. [9] yaptıkları çalışmada birçok alternatif arasından en iyi depo yerinin nasıl seçileceği göstermiştir. Depo yeri seçim probleminin çözümü için Eleme Ve Seçim Yansıtın Gerçeklik (ELECTRE), İdeal Sonuç Odaklı Çok Ölçütlü Karar Verme (TOPSIS) ve Gri Teori Yöntemi kullanmışlardır. Çalışma sonucunda bu üç yöntemden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarını değerlendirmişlerdir. Kriter olarak elde bulundurma maliyeti, birim fiyat, hareket esnekliği, mağaza ve tedarikçilere uzaklık ele alınmıştır. Eroğlu vd. [2] yaptıkları çalışmada tehlikeli madde taşımacılığı tehlike değerlendirmesi yapılırken uzmanların görüşleri doğrultusunda dikkate alınması gereken hususların belirlenmesi için AHP yönteminden yararlanmışlardır. Bu yöntem sonucuna göre tehlikeli madde taşımacılığı tehlike değerlendirmesine imkân sağlayan bir indeks geliştirilmiştir. Aktepe ve Ersöz [10] yaptıkları çalışmada bir döküm fabrikası için 3 ayrı ilde 11 alternatif içerisinden AHP, Çok Kriterli Eniyileme ve Uzlaşık Çözüm (VIKOR), Oran Analizi Temelli Çok Amaçlı Eniyileme (MOORA) olmak üzere 3 farklı yöntem kullanılarak uygun depo yerinin seçilmesini amaçlamıştır. MOORA yönteminin kullanılması bu problem için literatüre yeni bir bakış açısı kazandırmıştır. Erbaş vd. [11] çalışmalarında Ankara bölgesinde kurulması düşünülen tehlikeli madde deposu için Coğrafi Bilgi Sistemlerindeki konum analizlerinden yararlanarak söz konusu kriterler için en uygun yerlerin belirlenmesini amaçlamıştır. Alternatifler belirlenirken hukuki ve politik kriterlerin de dikkate alınması gerektiğine değinilmiştir.

Özbek ve Erol [12] yaptıkları çalışmada depo yeri seçimi problemi için ÇKKV yöntemlerini kullanarak bütünleşik model önerisi sunmuşlardır. Yaptıkları çalışma ile işletmelerde yaşanabilecek diğer karar problemlerinin çözümlerinde de kullanılabilecek bütünleşik bir karar verme modeli kurmak amaçlanmıştır. Gül ve Eren [13] yaptıkları çalışmada bir kamu sektöründe 7 kriter belirleyerek depo yeri seçim süreci analizine yönelik AHP ve Hedef Programlama (HP) modeli birleştirilerek çok kriterli bir optimizasyon yaklaşımı geliştirmişlerdir. Belirlenen 5 hedef için ILOG CPLEX programı ile farklı senaryolarda sonuçlar elde etmişlerdir. Emeç ve Akkaya [14] yaptıkları çalışmada belirsiz bir durum içeren stokastik ortamdaki depo yeri sorununu çözmek için stokastik birçok kriterli karar verme yaklaşımı geliştirmişlerdir. Stokastik AHP ve bulanık VIKOR yöntemleri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Demirci [15] yaptığı çalışmada lojistik için önemli bir gider kalemi oluşturan depolama yer seçimi probleminde ağırlıklı çarpım ve ağırlıklı toplam tekniklerini aynı kriterler kullanılarak uygulamış ve sonuçlar üzerinde karşılaştırmalar yapmıştır. Aynı veriler ile aynı sonuçlara ulaşılmış olması yöntemlerin güçlü yanlarından biridir. Küçükkoç ve Acar [16] çalışmalarında dağıtım askeri birlikler için dağıtım ağları dikkate alınarak mühimmat depolarının kurulmasına yönelik yer seçiminin yapılmasını hedeflemiştir. Önerilen modeller GAMS yazılımı kodlanmasıyla çözülmüş ve sayısal örnekler ortaya konulmuştur. Özbek ve Eren [17] üçüncü parti lojistik firma seçimi problemini ÇKKV yöntemlerinden AHP yöntemi ile çözmüşlerdir. İnce vd. [18] yeni kurulacak sağlık kuruluşu için yer seçimi problemini AHP yöntemi ile değerlendirmişlerdir. Özder ve Eren [19] otomotiv sektöründe tedarikçi seçme problemine ANP ve hedef programlama yöntemleri ile çözüm aramışlardır. Özcan vd. [20] bakım planlaması için risk faktörlerini değerlendirip 9 kriter AHP yöntemi ile ağırlıklandırmışlardır. Hesaplanan risk değerleri temel alınarak revizyon bakım planlaması yapmışlardır. Deringöz vd. [21] pandemi sürecinde giyilebilir teknoloji uygulamalarını ÇKKV yöntemleri ile değerlendirmişlerdir. Covid-19 takibinde hastaların semptomlarını gözlemlemek için kullanılan GST'lerin seçiminde AHP yöntemi kullanmışlardır. Özder vd. [22] enerji sektöründe personel çizelgeleme probleminde personelin yetkinlik seviyelerini belirlemek için ANP yöntemi kullanmışlardır. Gür vd. [23] Ankara ilindeki uygulanabilecek monoray projelerini AHP ve hedef programlama kullanarak seçmişlerdir. Özcan vd. [24] büyük ölçekli bir hidroelektrik santraldaki ekipmanları AHP yöntemi kullanarak sıralamışlardır. Cömert ve Yener [25] Sakarya ilinde üretim yapan bir gıda firması bulanık AHP kullanarak depo yeri seçimi yapmışlardır. Çalışmada 4 ana kriter, 8 alt kriter ve 3 alternatif ele almışlardır. Sağnak [26] perakende sektöründe bulanık AHP yöntemi ile depo yeri seçimi yapmıştır.

Literatür taramasından elde edilen bilgiler ışığında depo yeri seçimi probleminde firmaların maksimum fayda sağlamaları gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Maksimum fayda, maksimum kar ile olduğu gibi tehlikeli maddelerin yapıları gereği taşıdıkları tehlikelerin en aza indirgenmesi ile de orantılıdır. Literatür incelendiğinde ÇKKV yöntemleri kullanılarak birçok çalışma yapıldığı fakat tehlikeli madde depo yeri seçimi konusunda yapılmış çalışmaların az sayıda olduğu görülmüştür. Bu sebeple tehlikeli madde depo yeri belirlemek için Kırıkkale ilinde bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmanın amacı tehlikeli madde depo yeri seçimi için Kırıkkale ilinde en uygun yer alternatifinin seçilmesini sağlamaktır. Bu seçimi yapabilmek için öne çıkan kriterler belirlenmiş ve bu kriterlerin önem dereceleri değerlendirildikten sonra en uygun alternatifin seçilmesi sağlanmıştır. Ana ve alt kriterlerin hiyerarşik yapıda olması ve alternatiflere ilişkin öncelik sıralarını belirlemek adına AHP yöntemi, karar seviyeleri ile kriterler arasındaki karmaşık ilişkilerin dikkate alınmasını sağlamak adına ise ANP yöntemi tercih edilmiştir. Literatürde ilk defa tehlikeli madde depo yeri seçiminde Türkiye için stratejik konumu itibari ile Kırıkkale ili ele alınmıştır. Ayrıca problem

hem AHP yöntemi ile hem de ANP yöntemi ile çözülerek kıyaslama yapılmış olup probleme farklı bir bakış açısı kazandırılmıştır. Sonuç olarak bu çalışma hem değerlendirilen alternatif açısından hem de kullanılan yöntemler açısından literatüre katkı sağlar niteliktedir.

Çalışmanın ikinci bölümünde tehlikeli madde depo yeri seçimi problemi için materyal metot başlığı altında problem ele alınmış olup ÇKKV yöntemlerinden AHP ve Analitik Ağ Prosesi (ANP) yöntemi adımları verilmiştir. Üçüncü bölümde bu adımlar takip edilerek bulgulara yer verilmiş ve Kırıkkale ilinde bir uygulama yapılmıştır. Dördüncü bölümde ise uygulama sonuçları karşılaştırılmış ve gelecekte yapılabilecek diğer çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2 Materyal ve metot

Tehlikeli madde depo yeri seçimi çok kriterli bir karar problemidir. Genellikle bu problemde en az iki alternatif var olup seçimi etkileyen birçok kriter yer almaktadır. Bu kriterlerin birbiri ile çeliştiği durumlarda literatürde sıklıkla kullanılan ÇKKV yöntemleri ile çözüm aranmaktadır. Bu çalışmada ise tehlikeli madde depo yeri seçimi için AHP ve ANP yöntemleri karşılaştırılmıştır.

2.1 Tehlikeli madde depo yeri seçim problemi

Tehlikeli maddeler, Birleşmiş Milletler önerilerine göre yapılarında taşıdıkları tehlikelere göre 9 ana ve 13 alt tehlike sınıfına ayrılmaktadır. ADR tehlikeli madde sınıflandırılması Tablo 1’de verilmiştir [27].

Tablo 1. ADR tehlikeli madde sınıflandırılması

Sınıf 1	Patlayıcı madde ve nesne
Sınıf 2	Sıkıştırılmış, sıvılaştırılmış veya basınç altında çözülmüş gaz
Sınıf 3	Yanıcı sıvı
Sınıf 4 (4.1)	Yanıcı katı, kendi kendine tepkimeye giren madde, hassasiyeti az patlayıcı
Sınıf 4 (4.2)	Kendiliğinden yanmaya yatkın madde
Sınıf 4 (4.3)	Su ile temas ettiğinde yanıcı gazlar çıkartan madde
Sınıf 5 (5.1)	Yükseltgen madde
Sınıf 5 (5.2)	Organik peroksit
Sınıf 6 (6.1)	Zehirleyici madde
Sınıf 6 (6.2)	Bulaşıcı madde
Sınıf 7	Radyoaktif madde
Sınıf 8	Aşındırıcı madde
Sınıf 9	Çeşitli tehlikeli maddeler

Tehlikeli maddelerin doğaları gereği depolanacakları yerin özellikleri önem teşkil etmektedir. Böyle bir kuruluş yerinin seçimini belirleyebilmek için çeşitli kriterlere ihtiyaç duyulur. Özellikle son zamanlarda gelişen bilim, teknoloji, artan enerji gereksinimleri, bu tür ürünlerin üretimin çeşitli aşamalarında kullanılması ve kullanımından sonra oluşan tehlikeli atıkların depolanması ihtiyacını karşılayacak bir kuruluş yeri seçiminin yapılmasını zorunlu kılmaktadır [11]. Depolar, yalnızca ürünlerin saklanması ve korunması

amacının yanında çeşitli hizmetlerin verildiği, müşteriye olabilecek en iyi hızda ulaşımın sağlandığı merkezler haline gelmiştir [28]. Başarı bir depolama hizmeti gerçekleştirebilmek için depolarda bulunması gereken temel koşullar aşağıdaki gibidir [29]:

- Uygun çalışma koşulları sağlanarak dağıtımın kolay yapılabilceği yerler seçilmelidir.

- Dağıtım yapılacak maddelerin hangi tip depolarda ve hangi koşullar altında depolanması gerektiği belirlenmeli, minimum ulaşım süresini mümkün kılacak şekilde en uygun depo yerleri belirlenmelidir.

- Depolar arazi araştırması yapılmış ve çeşitli doğa olaylarından zarar görmeyecek alanlarda kurulmalıdır.

- Depolar ulaşım alanlarına (havayolları, karayolları, demiryolları) ve limanlara yakın, güvenli yerlerde olmalıdır.

Tüm bu bilgiler göz önüne alındığında tehlikeli maddeler için depo yeri seçimi problemi oldukça önem teşkil etmektedir.

2.2 Yöntemler

Birçok alternatifin bulunduğu karar verme problemlerinde, alternatifler arasında seçim yapmak zaman alan, zor ve önemli bir konudur. Günlük hayatta karşılaştığımız karar vermeyi zorlaştıran bir diğer konu ise bir alternatifin, bir kriterde üstünlük sağlarken diğer bir kriterde üstünlük sağlayamamasıdır. Bunun yanı sıra karşılaştırılabilirlik ve ölçülemezliğin olduğu problemler de vardır. ÇKKV yöntemleri, ilave yaklaşımlar ile sorunları ortadan kaldırarak karar verme aşamasında karar vericiye yardımcı bulunur [30].

Bu çalışmada depo yeri seçimi problemine yönelik 2 farklı yöntemin kullanıldığı bir yaklaşım yer almaktadır. 2.2.1 ve 2.2.2 başlıkları altında çalışmada kullanılan AHP ve ANP yöntemleri ile ilgili adımların açıklamaları verilmiştir.

2.2.1 AHP yöntemi

ÇKKV yöntemlerinden AHP yöntemi, Thomas L. Saaty [31] tarafından 1977 yılında geliştirilmiştir. AHP yöntemi karar probleminde, kriterleri birden fazla alternatife göre değerlendiren ve önem derecelerine göre sıralayan bir yöntemdir. Bu yöntem sayesinde karar vericilerin kriter önemlerini göz önüne alarak, maksimum faydayı sağlayacak kararları vermeleri amaçlanmıştır [10].

AHP uygulama aşamaları şu şekildedir [32]:

1. Adım: İlk adım karar hiyerarşisinin kurulmasıdır. Karar vericinin hedeflediği amaca göre kriterler ve alt kriterler belirlenir. Kriterler göz önüne alınarak alternatifler belirlenir.

2. Adım: Seviyeler için ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmasıdır. İkili karşılaştırmalar 1- 9 puanlık skalada verilen değerlere göre hazırlanır. Tablo 2’de Saaty tarafından önerilen önem skalası verilmiştir [31].

3. Adım: Bu aşamaya ‘‘Sentez Aşaması’’ ismi de verilmektedir. Aynı skala kullanılarak her bir kriterin diğer kriterlere göre üstünlüğü hesaplanır. En büyük özdeğer ve özdeğere karşılık gelen özvektör hesaplanarak normalize edilir. Literatürde yaygın olarak kullanılan normalizasyon yöntemine göre her sütun elemanı, bulunduğu sütunun toplamına bölünür. Daha sonra bu satırın toplamı alınıp toplam satırdaki eleman sayısına bölünür [33].

Tablo 2. Saaty tarafından önerilen önem skalası

Değer	Tanım	Açıklama
1	Eşit önem	İki seçenek eşit derecede önemli.
3	Biraz daha önemli	Bir seçenek diğerine göre biraz daha üstün.
5	Oldukça önemli	Bir seçenek diğerine karşı oldukça üstün.
7	Oldukça önemli	Bir seçenek diğerine göre çok üstün.
9	En önemli	Bir seçeneğin diğerinden üstün olduğunu gösteren kanıt çok büyük güvenilirliğe sahip.
2,4,6,8	Ara değerler	Uzlaşma gerektiğinde kullanılmak üzere ara değerler.

4. Adım: Son aşamada, tutarlılık indeksi (CI) ve karşılaştırmaların tutarlı olup olmadığının belirlenmesi için tutarlılık oranı (CR) bulunur [21, 25]. CI, CR hesaplamaları için **Denklem (1)** ve **(2)**'de verilmiştir;

$$CI = (n_{max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

$$CR = CI / RI \quad (2)$$

CR değeri 0,1 değerinden küçük bulunduğu takdirde karşılaştırmalar tutarlı kabul edilir. RI değerleri **Tablo 3**'te verilmiştir [21].

2.2.2 ANP yöntemi

ANP yöntemi, kriterler ve alt kriterler arasında bulunan her türlü ilişkilerin dikkate alınmasını gerektiren ve bu özelliği sayesinde daha etkin sonuçlar ortaya koyma olanağı sağlayan bir yöntemdir. AHP yönteminin temel özellikleri ve karşılaştırma mantığı ANP yönteminde de benzerlik göstermektedir. ANP yönteminde model, ağ modeli şeklindedir. Ağ yapısı sayesinde kriterler arasındaki ilişkiler ortaya konur [22].

Karar probleminin ağ modeli şeklinde olabilmesi için problem parçalara ayrılır. Parçalar küme, kümelerin alt parçaları da faktör olarak adlandırılır. Kümeler ağ yapısındaki düğüm noktalarını oluşturur. ANP yönteminin geri besleme ve bağımlılık özellikleri sebebiyle faktörler diğer faktörlerle bağımlı olabileceği gibi kendi aralarında da bağımlı olabilmektedirler. Karar verme problemleri, ANP yöntemi kullanılarak dört adımda çözülür [34]:

1. Adım: Problemin tanımlanarak modelin kurulmasıdır. Karar vericinin amacı doğrultusunda ağ yapısı oluşturulur ve bağımlılıkları belirlemek adına faktörler arasındaki ilişkiler kurulur.

2. Adım: Kriterler için ikili karşılaştırma matrisleri oluşturularak öncelik vektörünün elde edilir. CR değeri hesaplanarak bu değer 0.1'e eşit veya düşük olması beklenir. Öncelik vektörleri matrise yerleştirilerek ağırlıklandırılmı ş süper matris oluşturulur. ANP yönteminde ikili karşılaştırmaların yapılabilmesi için **Tablo 2**' de verilen temel ölçek kullanılır.

3. Adım: Ağırlıklandırılmı ş süper ve limit süper matrislerin oluşturulmasıdır. Limit süper matriste en önemli kriter, en yüksek önceliğe sahip olan kriterdir.

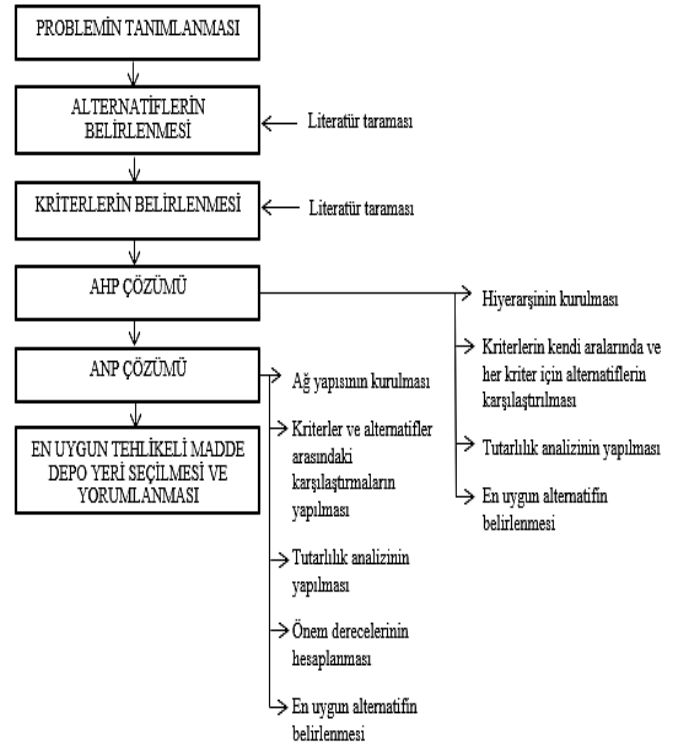
4. Adım: Limit süper matris sonuçlarına göre en yüksek öncelik değerine sahip alternatif en iyi alternatif olarak seçilir [34].

3 Bulgular ve tartışma

Çalışmanın bulgular ve tartışma kısmında AHP ve ANP yöntemleri ile tehlikeli madde depo yeri seçimi yapılmıştır. Karar verme problemi belirlendikten sonra alternatif bölgeler belirlenmiştir. Literatür taramasından elde edilen bilgiler kullanılarak kriterler belirlenmiş ve ilk olarak AHP yöntemi ile daha sonra ANP yöntemi ile çözüm yapılarak sonuca ulaşılmıştır.

3.1 Problemin tanımlanması

Kullanımı giderek artan tehlikeli maddeler, yapılarından dolayı çeşitli tehlikeler taşıdıkları için depolanmaları ve depo yerlerinin belirlenmesi karşımıza bir sorun olarak çıkmaktadır. Bu çalışmada tehlikeli madde depo yeri seçimi problemi için Kırıkkale ili içerisinde bir uygulama gerçekleştirilmiştir. İlk olarak tehlikeli madde depo yeri seçimi problemi tanımlanmıştır. Literatür taramasından edinilen bilgiler ile alternatif 4 bölge, 4 ana kriter ve 9 alt kriter belirlenmiştir. Çözüm için seçilen ÇKKV yöntemlerinden AHP ve ANP yöntemi ile çözüm yapılarak en uygun tehlikeli madde depo yeri seçimi yapılır. **Şekil 1**'de problemin çözümünde izlenecek akış şeması verilmiştir.



Şekil 1. Uygulama akış şeması

Tablo 3. RI değerleri

N	1 ve 2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

3.2 Alternatifler

Kırıkkale ili stratejik konumu itibariyle 43 ilin geçiş noktasında bulunmaktadır. Kırıkkale ilinde bulunan Makina ve Kimya Endüstrisi Kurumu (MKE), I. Organize Sanayi Bölgesi (OSB), Orta Anadolu Rafinerisi, Keskin OSB ve Silah İhtisas Organize Sanayi Bölgesi ile önemli bir sanayi kentidir. Bu sebeple tehlikeli madde kullanımı fazla ve bu maddelerin depolanması problem teşkil etmektedir. Tehlikeli maddeler en fazla sanayi bölgelerinde kullanıldığı için özellikle sanayi bölgelerine ve dağıtım kolaylığı açısından karayollarına yakın olmalıdır. Tehlike oluşturabilecek durumlarda çevreye verilecek zararın önlenmesi için şehir merkezine yakın olmaması tercih edilmiştir. Alternatif olarak seçilen dört bölge aşağıda verilmiştir. Bölgeler belirlenirken Google Earth kullanılmıştır.



Şekil 2. Birinci bölge alternatifi

Birinci bölge (A1) Merkez, Kızılırmak mahallesinde yer almaktadır. Kırıkkale-Kırşehir karayoluna 0.66 km, Kırıkkale şehir merkezine 6.2 km uzaklıkta bulunmaktadır. Alternatife ait Google Earth görüntüsü **Şekil 2'** de verilmiştir.



Şekil 3. İkinci bölge alternatifi

İkinci bölge (A2) Hacılar, Bahşili bölgesinde yer almaktadır. Kırıkkale-Karakeçili karayoluna 0.3 km, Kırıkkale şehir merkezine 19.5 km uzaklıkta bulunmaktadır. Alternatife ait Google Earth görüntüsü **Şekil 3'** te verilmiştir.



Şekil 4. Üçüncü bölge alternatifi

Üçüncü bölge (A3) Bahşeyh bölgesinde yer almaktadır. Kırıkkale-Çorum, Yozgat karayoluna 0.51 km, Kırıkkale şehir merkezine 19 km uzaklıkta bulunmaktadır. Alternatife ait Google Earth görüntüsü **Şekil 4'** te verilmiştir.



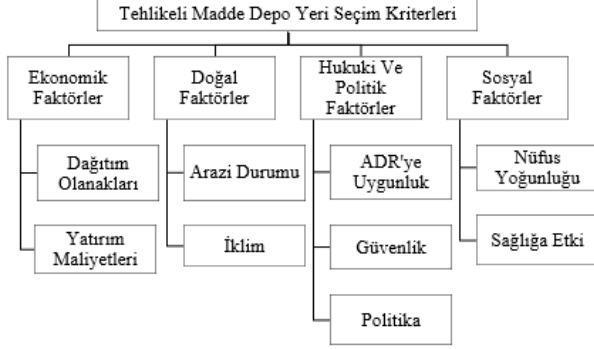
Şekil 5. Dördüncü bölge alternatifi

Dördüncü bölge (A4) Bahçelievler, Ahılı bölgesinde yer almaktadır. Vatan Caddesine 0.12 km, Kırıkkale şehir merkezine 5.4 km uzaklıkta bulunmaktadır. Alternatife ait Google Earth görüntüsü **Şekil 5'** te verilmiştir.

3.3 Kriterler

Tehlikeli madde depo yeri seçimine yönelik kriterler belirlenirken yapılan literatür taraması sonuçları dikkate alınmıştır. Ekonomik, doğal, hukuki ve politik, sosyal faktörler olmak üzere 4 ana kriter ve bu ana kriterler ile

ilişkili dağıtım olanakları [2], yatırım maliyetleri [8], arazi durumu [25], iklim [35], ADR'ye uygunluk [36], güvenlik [26], politika [8], nüfus [37] ve sağlığa [2] etki olmak üzere 9 alt kriter seçilmiştir. Seçilen kriterlere ait hiyerarşik yapı Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5. Kriterler

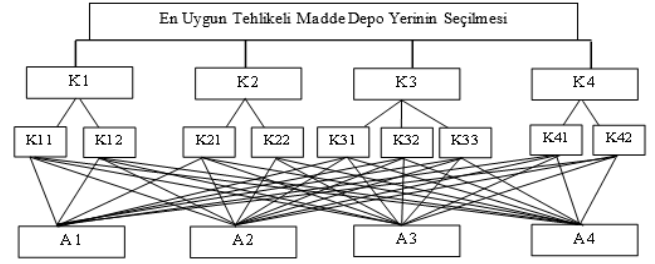
Belirlenen kriterlerin nasıl değerlendirildiğine ilişkin açıklamalar Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3. Kriterler ve açıklamaları

Ana Kriterler	Alt Kriterler	Açıklamalar
Ekonomik Faktörler (K1)	Dağıtım Olanakları (K11)	Dağıtım süreci için ulaştırma olanakları, tehlikeli maddelerin yapılarından dolayı şehir merkezine uzaklığı ve deponun diğer tesislere yakınlığı göz önüne alınarak minimum maliyetle gerçekleştirilebilmelidir.
	Yatırım Maliyetleri (K12)	Depo kurulumunu etkileyen işçilik maliyetleri, depolama maliyetleri, yapı maliyetleri, ekipman maliyetleri vb. maliyetler yatırım maliyetlerinin belirlenmesinde rol oynar.
Doğal Faktörler (K2)	Arazi Durumu (K21)	Arazi uygunluğunu konum, deprem kuşağına yakınlık, eğim, arazi genişliği belirler.
	İklim (K22)	Nem, ısı farklılıkları, yağış miktarı, rüzgar, hakim rüzgar.
Hukuki Ve Politik Faktörler (K3)	ADR'ye Uygunluk (K31)	ADR'ye göre belirlenmiş araç depoları, araç yanaşma alanları, ambalajlama talimatları gibi sorumluluk ve yükümlülükler uygun olmalıdır.
	Güvenlik (K32)	Bölgede hakim olan iç-dış hırsızlık, terör tehlikesi.
	Politika (K33)	Şehir planlaması, şehir için politik bakış.
Sosyal Faktörler (K4)	Nüfus (K41)	Nüfus sayısına bağlı olarak tehlikeli maddelere duyulan ihtiyaç artmaktadır. Bu nedenle nüfus yoğunluğu fazla olan bölgelere yönelmek gerekmektedir. Aynı zamanda yerleşim alanlarına çok yakın yerlere depo kurulmamalıdır.
	Sağlığa Etki (K42)	Olası kaza durumlarında tarıma ve su kaynaklarına etki göz önüne alınmalıdır.

3.4 Problemin AHP yöntemi ile çözümü

AHP yöntemi çözümünde kullanılan hiyerarşi Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 6. AHP yöntemi karar hiyerarşisi

Kriterlerin seçilmesinden sonra ana kriterler arasında ikili karşılaştırmalar Saaty'nin 1-9 skalası kullanılarak yapılmıştır. Oluşturulan matris Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Ana kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi

Kriterler	K1	K2	K3	K4
K1	1.00	2.00	0.33	0.50
K2	0.50	1.00	0.25	0.33
K3	3.00	4.00	1.00	2.00
K4	2.00	3.00	0.50	1.00

Her matris elemanı sütun toplamına bölünür ve normalize edilmiş matris elde edilir. Normalize edilmiş matris Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5. Ana kriterler için normalize edilmiş matris

Kriterler	K1	K2	K3	K4
K1	0.15	0.20	0.16	0.13
K2	0.08	0.10	0.12	0.09
K3	0.46	0.40	0.48	0.52
K4	0.31	0.30	0.24	0.26

Normalize edilmiş matrisin satır elemanlarının aritmetik ortalaması bulunur. Elde edilen ortalama değerler önem ağırlıklarını belirlemiş olur. Daha sonra tutarlık oranı hesaplanır. CR değerinin 0.1'den küçük olması beklenir. Ana kriterler için CR değeri 0.01 olarak bulunmuştur. Ana kriter önem ağırlıkları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 6. Ana kriterlerin önem ağırlıkları

Ana Kriterler	Ağırlıklar
K1	0.161
K2	0.096
K3	0.466
K4	0.277

Ana kriterlerin önem ağırlıkları bulunduktan sonra alt kriterlerin önemleri aynı adımlar tekrar edilerek bulunmuştur. Bu çalışmada K3 ana kriterinin alt kriterlerinin bulunması gösterilmiştir. Tablo 8'de alt kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi verilmiştir.

Tablo 7. K3 ana kriterinin alt kriterleri ikili karşılaştırma matrisi

Alt Kriterler	K31	K32	K33
K31	1.00	3.00	5.00
K32	0.33	1.00	3.00
K33	0.20	0.33	1.00

Tablo 9’da K3 alt kriterleri için normalize edilmiş matris verilmiştir.

Tablo 8. K3 alt kriterleri için normalize edilmiş matris

Alt Kriterler	K31	K32	K33
K31	0.65	0.69	0.56
K32	0.22	0.23	0.33
K33	0.13	0.08	0.11

K3 alt kriterlerinin CR değeri 0.03 olarak bulunmuştur. Önem ağırlıkları Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 9. K3 alt kriterlerinin önem ağırlıkları

Alt Kriterler	Ağırlıklar
K31	0.633
K32	0.260
K33	0.106

Bulunan önem ağırlıkları ile Tablo 10’da verilen K3 alt kriterlerinin önem ağırlıkları çarpılarak küresel ağırlıklar elde edilir. Aynı işlem diğer kriterler için de tekrarlanır. Bu değerler Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 10. Alt kriterlerin küresel ağırlıkları

Ana Kriterler	Yerel Ağırlık 1	Alt Kriterler	Yerel Ağırlık 2	Küresel Ağırlık
K1	0.161	K11	0.75	0.12
		K12	0.25	0.04
K2	0.096	K21	0.75	0.07
		K22	0.25	0.02
K3	0.466	K31	0.63	0.30
		K32	0.26	0.12
		K33	0.11	0.05
		K41	0.33	0.09
K4	0.277	K42	0.67	0.18

Tablo 12’de K31 alt kriteri ile depo yeri alternatifleri arasındaki karşılaştırma matrisi verilmiştir.

Tablo 11. Alternatiflerin K31 alt kriteri için kıyaslanmasındaki karşılaştırma matrisi

Alternatifler	A1	A2	A3	A4
A1	1.00	0.33	2.00	0.50
A2	3.00	1.00	4.00	2.00
A3	0.50	0.25	1.00	0.25
A4	2.00	0.50	4.00	1.00

Tablo 13’te bu alt kriterin normalize edilmiş matrisi verilmiştir.

Tablo 12. K31 alt kriteri normalize edilmiş matrisi

Alternatifler	A1	A2	A3	A4
A1	0.15	0.16	0.18	0.13
A2	0.46	0.48	0.36	0.53
A3	0.08	0.12	0.09	0.07
A4	0.31	0.24	0.36	0.27

Tehlikeli madde depo yeri alternatiflerinin K31 alt kriteri ile kıyaslanmasındaki CR değeri 0.02 olarak bulunmuştur. Önem ağırlıkları Tablo 14’te verilmiştir.

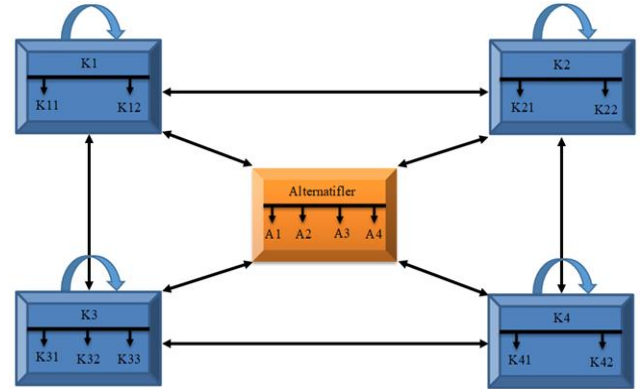
Tablo 13. K31 alt kriteri önem ağırlıkları

Alternatifler	Ağırlıklar
A1	0.16
A2	0.46
A3	0.09
A4	0.29

Tablo 14’te görüldüğü gibi yapılan işlemler sonucunda CR 0.1’den küçük çıkmıştır ve bu nedenle sonuç tutarlıdır. Tehlikeli madde depo yeri için en uygun bölgenin A2 olduğu görülmüştür.

3.5 Problemin ANP yöntemi ile çözümü

ANP yöntemi çözümü için “Super Decisions” programı kullanılmıştır. Kurulan hiyerarşik yapı Şekil 7’de verilmiştir. Hiyerarşik yapı kurulduktan sonra kriterler arasındaki ilişkiler belirlenerek tüm kriterler ile alternatifler bağlanması sağlanmıştır. Böylelikle ağ yapısı oluşturulur. Ağ yapısı Şekil 8’de verilmiştir.



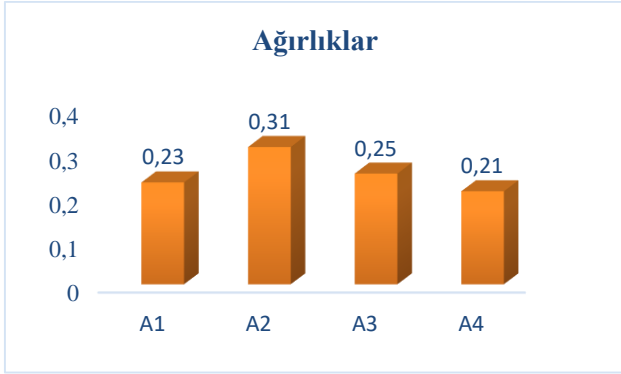
Şekil 7. ANP yöntemi için ağ yapısı

Daha sonra kriterler arasında ikili karşılaştırma matrisleri oluşturularak öncelik vektörü belirlenir. Karşılaştırma matrisleri için CR hesaplanır. Bu değer 0.1’e eşit veya düşük olması tutarlı olduğunu gösterir. Karşılaştırmalar sonucunda süper matris ve limit matrisi elde edilir. Alternatif ve kriterlerin önem dereceleri belirlenir. ANP yöntemi sonucunda ulaşılan alt kriter önem ağırlıkları Tablo 15’te gösterilmiştir.

ANP yöntemi sonucunda ulaşılan alternatiflere ait önem ağırlıkları Şekil 9’da verilmiştir.

Tablo 14. Alt ve ana kriterlerin önem ağırlıkları

Ana Kriterler	Ana Kriter Ağırlıkları	Alt Kriterler	Alt Kriter Ağırlıkları
K1	0.155	K11	0.566
		K12	0.434
K2	0.334	K21	0.67
		K22	0.33
		K31	0.685
K3	0.227	K32	0.254
		K33	0.061
		K41	0.208
K4	0.284	K42	0.792



Şekil 8. Alternatif önem ağırlıkları

ANP yöntemine göre en önemli kriter sosyal faktörler ana kriterinin (K4) alt kriteri olan sağlığa etki (K42) olarak belirlenmiştir. Alternatifler arasından tehlikeli madde depo yeri için Hacılar, Bahşili bölgesinde yer alan 2. alternatif (A2) depo yeri seçilmiştir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, tehlikeli madde depo yeri seçimi problemi için Kırıkkale ilinde belirlenen Merkez, Bahşili, Balışeyh ve Bahçelievler olmak üzere dört alternatif bölge arasından seçim yapılmıştır. Yapılan literatür taraması sonucunda edinilen bilgilere göre ekonomik, doğal, hukuki ve politik, sosyal faktörler olmak üzere 4 ana kriter ve bu ana kriterler ile ilişkili dağıtım olanakları, yatırım maliyetleri, arazi durumu, iklim, ADR'ye uygunluk, güvenlik, politika, nüfus ve sağlığa etki olmak üzere 9 alt kriter belirlenmiştir. Çok sayıda kriter olması sebebiyle ÇKKV yöntemlerinden AHP ve ANP yöntemleri tercih edilmiştir.

AHP yöntemi sonucunda önem ağırlıkları en yüksekten düşüğe doğru K31, K42, K11, K32, K41, K21, K33, K12, K22 olarak sıralanmıştır. En yüksek önem ağırlığına sahip ADR'ye uygunluk (K31) kriteri tehlikeli maddelerin yapılarından dolayı depo yeri seçiminde yerine getirilmesi gereken özel sorumluluk ve yükümlülükleri kapsamaktadır. ANP yönteminde ise önem ağırlıkları en yüksekten düşüğe doğru K42, K31, K21, K11, K12, K22, K32, K41, K33 olarak sıralanmıştır. En yüksek önem ağırlığına sahip sağlığa etki (K42) kriteri olası kaza durumlarında tehlikeli maddelerin, tarıma ve su kaynaklarına verebileceği zararları kapsamaktadır. Zararları en aza indirmek adına depo yeri tarım ve su kaynaklarına uzak bölgelerde kurulmalıdır. AHP yöntemi karar vericinin önceliklerini dikkate alarak nitel ve

nicel değişkenlerin bir arada değerlendirildiği bir yöntemdir. ANP yöntemi ise kriterlerin kendi içerisinde ve diğer kriterler ile bağımlılığını dikkate almaktadır. Bu sebeple kriter önem ağırlık sıralamasında iki yöntemden farklı sonuçlar elde edilmiştir.

AHP ve ANP yöntemleri sonuçlarından elde edilen sırasıyla 0.46 ve 0.31 alternatif önem ağırlıkları neticesinde tehlikeli madde depo yeri için en uygun bölge ikinci alternatif olan Hacılar, Bahşili olarak belirlenmiştir. Kırıkkale-Karakeçili karayoluna 0.3 km ve Kırıkkale şehir merkezine 19.5 km uzaklıkta bulunan bu bölge belirlenen kriterler göz önüne alındığında lojistik açısından oldukça iyi bir konuma sahiptir. AHP yöntemi ve ANP yönteminden elde edilen alternatif önem ağırlıkları karşılaştırılması sonuçları Tablo 16'da verilmiştir.

Tablo 15. Sonuçların karşılaştırılması

Alternatifler	AHP Çözümü		ANP Çözümü	
	Ağırlıklar	Sıralama	Ağırlıklar	Sıralama
A1	0.16	3	0.23	3
A2	0.46	1	0.31	1
A3	0.09	4	0.25	2
A4	0.29	2	0.21	4

Sıralamalar AHP ve ANP yöntemlerinin değerlendirilmesindeki farklılıktan meydana gelmektedir. Fakat her iki yöntemde de en uygun depo yerinin Hacılar, Bahşili bölgesi olarak seçilmesi, bölgenin istenen kriterlere sahip, güçlü bir konumda bulunduğunu göstermektedir.

Bu çalışmadan elde edilen bilgiler dahilinde tehlikeli madde depo yeri seçiminin kritik bir problem olduğu sonucu çıkarılmıştır. Daha doğru sonuçlara ulaşabilmek adına birden fazla yöntem kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması gerektiği öngörülmüştür. İleride AHP ve ANP yöntemi sonucunda seçilen bölge ile mevcut diğer tehlikeli madde depo bölgelerinin karşılaştırılmasına yönelik bir çalışma yapılabilir. Böyle bir çalışma, ulaşılan iki alt kriterden hangisinin önem ağırlığının yüksek olduğunun belirlenmesi açısından yol gösterici olacaktır. Ayrıca bu çalışmanın benzeri PROMETHEE gibi farklı sıralama yöntemleri ile gerçekleştirilebilir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı 2020/1 kapsamında 1919B012001288 başvuru numaralı proje ile desteklenmektedir. TÜBİTAK kurumuna teşekkürlerimizi sunarız.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %17

Kaynaklar

- [1] M. A. Badri, Combining the analytic hierarchy process and goal programming for global facility location-

- allocation problem. *International Journal Of Production Economics*, 62 (3), 237-248, 1999. [https://doi.org/ 10.1016/S0925-5273\(98\)00249-7](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00249-7)
- [2] Ö. Eroğlu, Ö. Bali and M. Ağdaş, Criteria evaluation model for third party logistics provider selection in fuel transportation. In XI. Logistics and Supply Chain Congress, pp. 451-470, Kayseri, Türkiye, 2013.
- [3] D. S. Korkut, A. M. Doğan ve İ. Bekar, Kuruluş yeri seçimini etkileyen faktörlerin Düzce ili açısından değerlendirilmesi. *Düzce Üniversitesi Ormancılık Dergisi*, 6 (1), 20-31, 2010.
- [4] T. Ustasüleyman ve S. Perçin, Analitik ağ süreci yaklaşımıyla kuruluş yeri seçimi. *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 9 (3), 37-55, 2007.
- [5] J. Korpela and M. Tuominen, A decision aid in warehouse site selection. *International Journal Of Production Economics*, 45 (1-3), 169-180, 1996. [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(95\)00135-2](https://doi.org/10.1016/0925-5273(95)00135-2)
- [6] J. Hokkanen, R. Lahdelma and P. Salminen, A multiple criteria decision model for analyzing and choosing among different development patterns for the helsinki cargo harbor. *Socio-Economic Planning Sciences*, 33 (1), 1-23, 1999.
- [7] R. Lahdelma, R. P. Salminen and J. Hokkanen, Locating a waste treatment facility by using stochastic multicriteria acceptability analysis with ordinal criteria. *European Journal of Operational Research*, 142 (2), 345-356, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00303-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00303-4)
- [8] T. Demirel, N. Ç. Demirel and C. Kahraman, Multi-criteria warehouse location selection using choquet integral. *Expert Systems with Applications*, 37 (5), 3943-3952, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.11.022>
- [9] T. Özcan, N. Çelebi and Ş. Esnaf, Comparative analysis of multi-criteria decision making methodologies and implementation of a warehouse location selection problem. *Expert Systems with Applications*, 38 (8), 9773-9779, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.02.022>
- [10] A. Aktepe ve S. Ersöz, AHP-VIKOR ve Moora yöntemlerinin depo yeri seçim probleminde uygulanması. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 25 (1- 2), 2- 15, 2014.
- [11] M. Erbaş, Ö. Bali ve T. Durğut, Tehlikeli madde depo yeri seçiminin coğrafi bilgi sistemleri açısından incelenmesi. 5. Uzaktan Algılama- CBS Sempozyumu, İstanbul, Türkiye, 14-17 Ekim 2014.
- [12] A. Özbek ve E. Erol, COPRAS ve Moora yöntemlerinin depo yeri seçim problemine uygulanması. *Ekonomi İşletme Siyaset ve Uluslararası İlişkiler Dergisi*, 2 (1), 23-42, 2016.
- [13] E. Gül ve T. Eren, Lojistik dağıtım ağ problemlerinde analitik hiyerarşi prosesi yöntemi ve hedef programlama ile depo seçimi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 2 (1), 1-13, 2017.
- [14] Ş. Emeç and G. Akkaya, Stochastic ahp and fuzzy vikor approach for warehouse location selection problem. *Journal of Enterprise Information Management*, 31 (6), 950-962, 2018. <https://doi.org/10.1108/JEIM-12-2016-0195>
- [15] A. Demirci, Lojistik maliyetler için çok kriterli karar verme yaklaşımı: depolama alanı seçimi örneği. *Toros Üniversitesi İİSBF Sosyal Bilimler Dergisi*, 6 (10), 23-43, 2019.
- [16] İ. Küçükkoç and M. Acar, Combined facility location and distribution network design problem: progressive models and a case study. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26 (1), 157-173, 2020. <https://doi.org/10.5505/pajes.2019.11456>
- [17] A. Özbek, T. Eren, Üçüncü parti lojistik (3PL) firmanın analitik hiyerarşi süreciyle (AHS) belirlenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 4(2), 46-54, 2012.
- [18] Ö. İnce, N. Bedir, ve T. Eren, Hastane kuruluş yeri seçimi probleminin AHP ile modellenmesi: Tuzla ilçesi uygulaması. *Gazi Sağlık Birimleri Dergisi*, 1(3), 08-21, 2016.
- [19] E. H. Özder ve T. Eren, Çok ölçütlü karar verme yöntemi ve hedef programlama teknikleri ile tedarikçi seçimi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(3), 196-207, 2016.
- [20] E. Özcan, R. Yumuşak and T. Eren, Risk based maintenance in the hydroelectric power plants. *Energies* 12, 1502-1523, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12081502>
- [21] A. Deringöz, T. Danışan ve T. Eren, Covid-19 takibinde giyilebilir sağlık teknolojilerinin çkkv yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, (basımda), 2021. 1-1. <https://doi.org/10.2339/politeknik.768219>
- [22] E. H. Özder, E. Özcan and T. Eren, Staff task-based shift scheduling solution with an ANP and goal programming method in a natural gas combined cycle power plant. *Mathematics*, 7, 192-218, 2019. <https://doi.org/10.3390/math7020192>
- [23] Ş. Gür, M. Hamurcu ve T. Eren, Ankara'da Monoray projelerinin analitik hiyerarşi prosesi ve 0-1 hedef programlama yöntemleri ile seçimi. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(4), 437-443, 2017. <https://doi.org/10.5505/pajes.2016.03903>
- [24] E. C. Özcan, T. Danışan, R. Yumuşak and T. Eren, An artificial neural network model supported with multi criteria decision making approaches for maintenance planning in hydroelectric power plants. *Eksploatacja i Niezawodność–Maintenance and Reliability*, 22(3), 400-418, 2020. <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2020.3.3>.
- [25] S. E. Cömert ve F. Yener, Bir gıda firması için bulanık analitik hiyerarşi prosesi ile depo yeri seçimi. *Uluslararası İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 2 (2), 161-177, 2017.
- [26] M. Sağnak, Depo yeri seçimi: perakende sektöründe melez çok kriterli karar verme uygulaması. *Journal of Yaşar University*, 15 (59), 615-623, 2020. <https://doi.org/10.19168/jyasar.689277>

- [27] UNECE, European Agreement Concerning The International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR). Geneva, 1968.
- [28] T. Can, M. Çilingirtürk ve H. Koçak, Dışbükey programlama ile lojistik merkezi tespiti. Yönetim Dergisi, 17 (54), 17-25, 2006.
- [29] M. Önsüz ve B. Atalay, Afet lojistiği. Osmangazi Tıp Dergisi, 37 (3), 1-6, 2015.
- [30] F. Urfaloğlu ve T. Genç, Çok kriterli karar verme teknikleri ile Türkiye'nin ekonomik performansının Avrupa Birliği üye ülkeleri ile karşılaştırılması. Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 35 (2), 329-360, 2013.
- [31] T. L. Saaty, How to make a decision: the analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research, 48 (1), 9-26, 1990. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-1](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-1)
- [32] T. Schoenherr, V. M. R. Tummala and T. P Harrison, Assessing supply chain risks with the analytic hierarchy process: providing decision support for the offshoring decision by a US manufacturing company. Journal of Purchasing and Supply Management, 14 (2), 100-111, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2008.01.008>
- [33] M. Dağdeviren ve T. Eren, Tedarikçi firma seçiminde analitik hiyerarşi prosesi ve 0-1 hedef programlama yöntemlerinin kullanılması. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 16 (1), 41-52, 2001. <https://doi.org/10.17341/gummfd.36633>
- [34] F. Y. Partovi, An analytic model for locating facilities strategically. Omega, 34 (1), 41-55, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2004.07.018>
- [35] E. Danışman, Tehlikeli madde lojistiğinde risk faktörlerinin değerlendirilerek depo yerinin seçimi. Yüksek Lisans Tezi, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [36] Ö. Eroğlu, Ö. Bali ve C. Gencer, Delphi tekniğine bulanık ahp ile tehlikeli madde depo yeri seçimi için gerekli niteliklerin belirlenmesi. III. Ulusal Lojistik ve Tedarik Zinciri Kongresi, Trabzon, Türkiye, 15-1 Mayıs 2014.
- [37] Ş. Emeç and Akkaya, G., Stochastic AHP and fuzzy VIKOR approach for warehouse location selection problem. Journal of Enterprise Information Management, 31(6), 950-962, 2018. <https://doi.org/10.1108/ JEIM-12-2016-0195>





Stokastik çok kriterli kabul edilebilirlik analizi ile bitkisel atık yağ toplama kutuları için yer seçimi

Site selection for waste vegetable oil collection boxes using stochastic multicriteria acceptability analysis

Aslı Çalış Boyacı^{1,*} 

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 55139, Samsun, Türkiye

Özet

Teknolojideki gelişmeler ve sanayileşme ile birlikte ortaya çıkan hızlı kentleşme ve nüfus artışı, tüm dünyada insan faaliyetlerini hızla artırmaktadır. Artan tüketim eğilimi sonucu oluşan atıklar, çevre ve insan sağlığını tehdit eder hale gelmiştir. Bitkisel atık yağlar, ekotoksik özellikleri nedeniyle çevre ile uyumlu olarak yönetilmesi gereken atıklar arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, Stokastik Çok Kriterli Kabul Edilebilirlik Analizi-2 (SMAA-2) yöntemi ile bitkisel atık yağların geri kazanımını artırmak üzere tasarlanan bitkisel atık yağ toplama kutuları için Samsun iline bağlı Atakum ilçesinde yer seçimi hedeflenmektedir. Nüfus yoğunluğu, tramvay istasyonlarına yakınlık, okullara yakınlık, parklara yakınlık gibi kriterlerin uzmanlar tarafından önem derecelerine göre sıralandığı çalışmada, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yazılımlarından ArcGIS ile belirlenen 11 alternatif yer SMAA-2 yöntemi ile sıralanmaktadır.

Anahtar kelimeler: Bitkisel atık yağ, ÇKKV, SMAA-2

Abstract

Rapid urbanization and population growth that have resulted from technological development and industrialization are increasing human activities all over the world. The waste generated as a result of the increasing consumption trend has become threatening to the environment and human health. Waste vegetable oil is among the waste that must be managed in harmony with the environment due to its ecotoxic properties. In this study, it is aimed to determine suitable locations in Atakum district of Samsun province for waste vegetable oil collection boxes designed to increase the recovery of waste vegetable oils with the Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis-2 (SMAA-2) method. In the study, criteria such as population density, proximity to tram stops, proximity to schools, and proximity to parks are ranked by experts according to their degree of importance. 11 alternative locations determined by ArcGIS, one of the Geographic Information Systems (GIS) software, are ranked using the SMAA-2 method.

Keywords: Waste vegetable oil, MCDM, SMAA-2

1 Giriş

Teknolojik gelişmeler ve sanayileşme kaynaklı hızlı kentleşme ve nüfus artışı, tüm dünyada insan faaliyetlerini hızla artırmaktadır. Bu süreçte, artan tüketim eğilimine bağlı olarak oluşan atıklar çevreyi ve insan sağlığını tehdit etmektedir [1, 2]. Günümüzde çevre teknolojileri ve uygulamaları ile çeşitli faaliyetler sonucunda oluşan atıkların maddi değeri olan ürünlere dönüştürülebilirliği mümkündür. Yağ sektörü atıkları, hammadde geri kazanım potansiyelleri ve kalorifik değerlerinden ötürü geri dönüşüme uygun olan en önemli atık gruplarından biri olarak ifade edilmektedir [3].

Dünyada gıda olarak tüketilen yağlar büyük oranda bitkisel kökenli olup ülkemizde de bitkisel yağ tüketimi dünyadaki gelişmelere paralel olarak artış göstermektedir [4, 5]. Ülkemizde yıllık yaklaşık 1.7 milyon ton bitkisel yağ tüketilmekte olup 2017 yılında 32 bin ton bitkisel atık yağ geri kazanılmak üzere toplanmıştır [6, 7]. Bitkisel atık yağların evsel atıklarla birlikte atılması, kanalizasyon sistemine verilmesi veya kontrolsüz bir şekilde açık alanlara bırakılması oldukça sakıncalıdır. Bu alanlara dökülen atık yağlar kanalizasyon sistemi gibi kolektör sistemlerini tıkaşabilmekte, yeraltı sularını kirleterek arıtma tesisi maliyetlerini artırabilmektedir [6]. Aksin vd. kanalizasyona dökülen yalnızca bir litre atık yağın bir milyon litre suyu kirletmeye yeterli olduğunu belirtmiştir [8].

Bitkisel atık yağlar, ekotoksik özellikleri nedeniyle çevre ile uyumlu olarak yönetilmesi gereken atıklar arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, bitkisel atık yağların üretiminden bertarafına kadar çevreye zarar verecek biçimde doğrudan veya dolaylı olarak alıcı ortama verilmesini önlemek, bu atık yağların yönetiminde gerekli teknik ve idari standartları oluşturmak, geçici depolama, geri kazanım ve bertaraf tesislerini çevreyle uyumlu yönetmek amacıyla "Bitkisel Atık Yağların Kontrolü Yönetmeliği" Nisan 2005'te Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir [6, 9]. Yönetmeliğe göre bitkisel atık yağların toplanması, toplama lisanslı geri kazanım tesisleri ile geçici depolama iznine sahip toplayıcılar tarafından gerçekleştirilmekte olup toplanan atık yağlar endüstride kullanılmak üzere külçe sabun, stearin gibi yarı mamul ürünlerin ve sabun, biyodizel gibi nihai ürünlerin üretiminde kullanılmak suretiyle geri kazanılmaktadır [6].

Bu çalışmada, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden Stokastik Çok Kriterli Kabul Edilebilirlik Analizi-2 (SMAA-2) yöntemi ile bitkisel atık yağların geri kazanımını artırmak üzere tasarlanan bitkisel atık yağ toplama kutuları için Samsun iline bağlı Atakum ilçesinde yer seçimi hedeflenmektedir. 2019 yılında nüfusu 215633 olan Atakum, son 5 yılda yıllık %6.4 büyüme ile Samsun ilinin en yüksek nüfus artış hızına sahip ilçesidir [10]. Nüfus artışına bağlı olarak son yıllarda Atakum'da oluşan atık

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: asli.calis@omu.edu.tr (A. Çalış Boyacı)
Geliş / Received: 15.10.2020 Kabul / Accepted: 14.11.2020 Yayımlanma / Published: 15.01.2021
doi: 10.28948/ngumuh.811240

miktarı hızla artmaktadır. Atık yağların geri kazanımı için mevcut durumda bitkisel atık yağ toplama kutuları, halktan gelen talep doğrultusunda belirlenen noktalara konulmaktadır. Bu çalışmada, uzman görüşleri doğrultusunda Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yazılımlarından ArcGIS ile belirlenen alternatif yerlerin, nüfus yoğunluğu, tramvay istasyonlarına yakınlık, okullara yakınlık, parklara yakınlık gibi kriterlere göre SMAA-2 yöntemi ile sıralanması söz konusudur. SMAA-2 yöntemi, kriter ağırlıklarının deterministik olarak belirlenemediği yada karar vericilerin kriter ağırlıkları üzerine ortak bir değerde uzlaşmadığı durumlar için aralık değerler girilmesine veya kriterlerin önem derecelerine göre sıralanmasına müsaade etmektedir. Bu yönüyle önerilen yöntemin, bu çalışmada ele alınan problemin yapısı ile uyumlu olduğunu söylemek mümkündür.

SMAA-2 yöntemi literatürde, liman yeri seçimi [11], elektrik dağıtıcısı için stratejik karar verme [12], makineli tüfek seçimi [13], afet lojistiği kapsamında dağıtım merkezi için yer seçimi [14], bilimsel araştırma konusu seçimi [15], imalat sanayi sektörlerinin değerlendirilmesi [16], bakım/onarım alternatiflerinin değerlendirilmesi [17], tersine lojistik opsiyon seçimi [18], zihinsel iş yükünün değerlendirilmesi [19], tedarikçi seçimi [20], eğitim göstergeleri açısından bölgelerin değerlendirilmesi [21], akrobasi uçağı seçimi [22], feribot taşımacılığında alternatif teknolojilerin değerlendirilmesi [23], sismik şiddet ölçüm alternatiflerinin değerlendirilmesi [24] gibi farklı alanlardaki birçok problemin çözümünde kullanılmıştır. Ancak bilindiği kadarıyla, SMAA-2 yöntemi bitkisel atık yağ toplama kutuluları için yer seçimi amacıyla literatürde ilk kez bu çalışmada kullanılmaktadır.

2 SMAA-2 yöntemi

SMAA, temeli ağırlık uzayını keşfetmeye dayanan çok kriterli bir karar destek tekniği olarak Lahdelma vd. tarafından 1998 yılında geliştirilmiştir [25]. SMAA, karar vericilerden alternatiflerin kriterler bazındaki değerlerinin ve/veya kriter ağırlıkları temin edilemediği, eksik ya da belirsiz olduğu kesikli ÇKKV problemlerinin çözümüne olanak sağlamaktadır [11]. Bu tür problemlerin üstesinden gelmek için SMAA yöntemi, ters ağırlık uzayı yaklaşımını kullanmaktadır [26, 27].

SMAA yönteminde, kabul edilebilirlik indisi, merkezi ağırlık vektörü ve güvenilirlik faktörü olmak üzere üç ölçek tanımlanmaktadır [11, 28]. SMAA yöntemindeki kabul edilebilirlik indisi, alternatifleri sıralama amaçlı düzenleme, sınıflandırır. Bu eksikliğin üstesinden gelmek için Lahdelma ve Salminen, 2001 yılında SMAA yöntemini, alternatiflerin en iyiden en kötüye her bir sıralaması için ağırlık vektörü kümelerine genişleterek SMAA-2 yöntemini geliştirmişlerdir [11]. SMAA-2, tüm alternatifleri sıralarken aynı zamanda en iyi alternatifini de ortaya çıkardığı için uygulamalarda öne çıkmaktadır.

SMAA-2, SMAA'yı tüm sıralamaları dikkate alacak şekilde genişletirken, beş yeni tanımlayıcı ölçü ortaya çıkarmaktadır. Bunlar; sıra kabul edilebilirlik indisi, üç en iyi sıra tipi ölçüğü ve tümleşik kabul edilebilirlik indisidir. SMAA-2 yönteminde, her alternatifin sıralaması en iyi

(=1)'den en kötü (=m)'ye **Denklem (1)**'de verilen sıralama fonksiyonu ile tanımlanır [11, 28].

$$\text{rank}(\xi_i, w) = 1 + \sum_k \rho(u(\xi_k, w) > u(\xi_i, w)) \quad (1)$$

Bu fonksiyonda $\rho(\text{true}) = 1$ ve $\rho(\text{false}) = 0$ kuralı geçerlidir. SMAA-2 yöntemi, uygun sıra ağırlıkları kümelerinin analizini temel alır. Uygun sıra ağırlıkları $W_i^r(\xi)$, **Denklem (2)**'deki gibi tanımlanır.

$$W_i^r(\xi) = \{w \in W : \text{rank}(\xi_i, w) = r\} \quad (2)$$

Burada, bir $w \in W_i^r(\xi)$ ağırlığı faydaları alternatiflere öyle bir şekilde tahsis eder ki alternatif x_i , r sırasını alır [11].

Sıra kabul edilebilirlik indisi: Sıra kabul edilebilirlik indisi b_i^r , x_i alternatifine r sırasını veren farklı ağırlıkların bir ölçüsüdür. Başka bir ifade ile alternatifleri, belirli bir sıra için kabul edilebilir kılan tüm uygun ağırlıkların payı olup genellikle yüzde cinsinden ifade edilir. Sıra kabul edilebilirlik indisi, kriter dağılımları ve uygun sıra ağırlıkları üzerinde çok boyutlu integrallerle **Denklem (3)**'teki gibi hesaplanır [11, 29].

$$b_i^r = \int_X f(\xi) \int_{W_i^r(\xi)} f(w) dw d\xi \quad (3)$$

Sıra kabul edilebilirlik indisi [0,1] aralığında olup 0, alternatifin hiçbir zaman verilen sıralamayı sağlamayacağını, 1 ise seçilen herhangi bir ağırlık için verilen sıralamanın her zaman sağlanacağını gösterir [28, 29].

k-en iyi sıra indisleri: Sıra kabul edilebilirlik indisleri, alternatiflerin performansı için temel göstergelerdir. Alternatiflerin sayısı fazla olduğunda, karar verme sürecinin erken safhasında alternatifleri *k-en iyi sıra (kbr) kabul edilebilirlikleri* şeklinde **Denklem (4)**'teki gibi toplamak uygun olur [28].

$$a_i^k = \sum_{r=1}^k b_i^r \quad (4)$$

Uygun ağırlık uzayının beklenen ağırlık merkezi olarak tanımlanan *merkezi ağırlık vektörü* (w_i^c) de benzer bir şekilde *merkezi kbr ağırlık vektörü* (w_i^k)'ne **Denklem (5)**'teki gibi genişletilebilir. kbr ağırlık vektörü, bir alternatifin k-en iyiler arasında olduğunu düşünen bir karar vericinin tercihlerini tanımlar [28].

$$w_i^k = \frac{1}{a_i} \int_{\xi \in X} f_X(\xi) \sum_{r=1}^k \int_{w \in W_r^f(\xi)} f_W(w) w dw d\xi \quad (5)$$

Bir alternatifin, merkezi ağırlık vektörü ile ifade edilen tercihlerle, tercih edilen alternatif olma ihtimali olarak tanımlanan *güvenilirlik faktörü* (p_i^c), benzer bir şekilde *kbr güvenilirlik faktörü* (p_i^k)'ne **Denklem (6)**'daki gibi genişletilebilir [28].

$$P_i^k = \int_{\xi \in X: \text{rank}(i, \xi, w_i^k) \leq k} f_X(\xi) d\xi \quad (6)$$

Tümleşik kabul edilebilirlik indisi: Her alternatif için sıra kabul edilebilirlik indislerinin birleştirilmesi ile tümleşik kabul edilebilirlik indisleri (a_i^h), **Denklem (7)**'deki gibi elde edilmektedir.

$$a_i^h = \sum_r a^r b_i^r \quad (7)$$

Burada, a^r meta ağırlık olarak ifade edilmekte olup, meta ağırlıkları seçmenin birçok yolu mevcuttur. Meta ağırlık negatif olmamalı, normalize edilmiş olmalı ve sıra değerindeki artışla artmamalıdır ($a^1 \geq a^2 \geq \dots \geq a^m \geq 0$) [11].

3 Uygulama

3.1 Problemin tanımı

Bu çalışmada, SMAA-2 yöntemi ile Atakum'da bitkisel atık yağ toplama kutuları için yer seçimi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda öncelikle üç kişiden oluşan uzman ekip tarafından yer seçimine ilişkin altı kriter belirlenmiştir. Kriterlere ilişkin detaylar aşağıdaki gibidir.

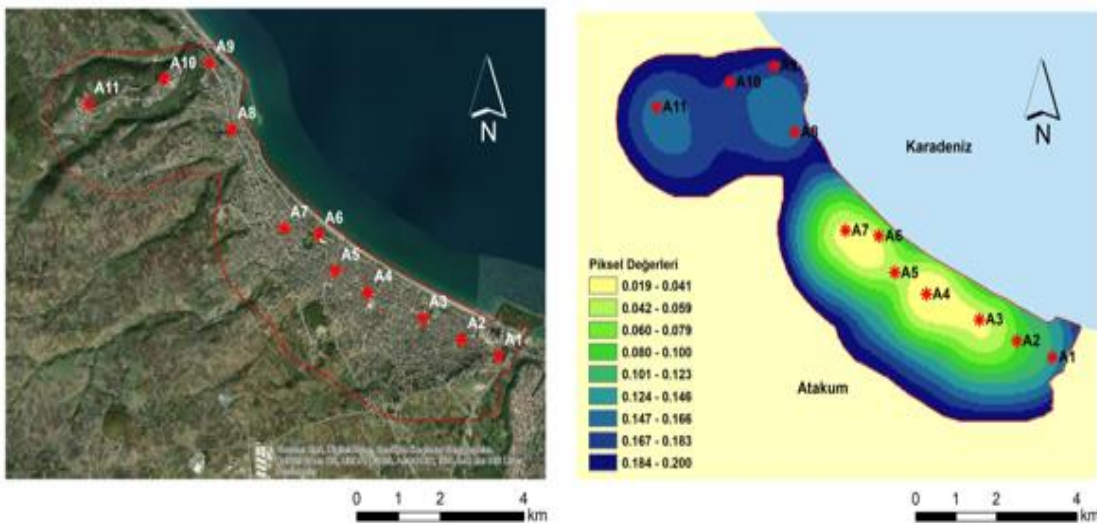
- Kriter 1 (K1): Nüfus yoğunluğu
- Kriter 2 (K2): Alışveriş merkezlerine yakınlık
- Kriter 3 (K3): Tramvay istasyonlarına yakınlık
- Kriter 4 (K4): Okullara yakınlık
- Kriter 5 (K5): Parklara yakınlık
- Kriter 6 (K6): Kamu kurumlarına yakınlık

Burada, K1 fayda yönlü iken diğer kriterler maliyet yönlüdür. Yukarıdaki bilgiler ışığında, bitkisel atık yağ toplama kutuları için uzmanlar tarafından belirlenen 11 alternatif yer **Şekil 1**'de gösterilmektedir. ArcGIS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen Öklidyen Mesafe Analizi ve Kernel Yoğunluk Analizi sonucu bu alternatiflere ilişkin normalize edilmiş piksel değerleri ile oluşturulan karar matrisi **Tablo 1**'de sunulmaktadır.

3.2 Alternatiflerin SMAA-2 ile sıralanması

SMAA-2 yönteminin el ile çözümü oldukça zor olup çözüm için çoğunlukla açık kaynaklı JSMAA yazılımı kullanılmaktadır [30]. SMAA-2, JSMAA'nın basit ara yüzleri ve nesne kütüphaneleri sayesinde kolaylıkla uygulanabilmektedir. Çalışmada JSMAA'nın 1.0.3 versiyonu kullanılmıştır [31].

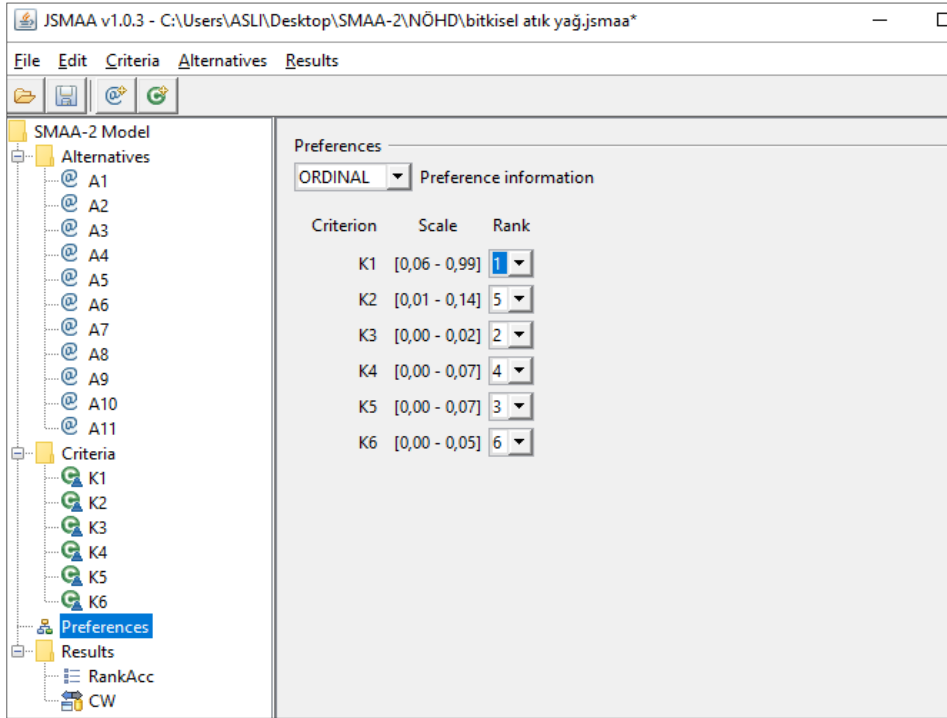
JSMAA yazılımında alternatif ve kriterlere ilişkin değerler girildikten sonra tercih (Preference) türü seçilmelidir. Yazılımda 'Missing', 'Ordinal' ve 'Cardinal' olmak üzere üç farklı tercih türü mevcuttur. 'Missing' tercihi kriterlere ilişkin herhangi bir ağırlık değeri ya da sıralamanın olmadığı durumda, 'Cardinal' tercihi ağırlık bilgisinin var olduğu durumda ve 'Ordinal' tercihi ise karar verici tarafından belirlenen bir sıralamanın mevcut olduğu durumda kullanılmaktadır. Bu çalışmada kriterler, uzman ekip tarafından önem derecelerine göre $K1 > K3 > K5 > K4 > K2 > K6$ şeklinde sıralandığı için tercih türü olarak 'Ordinal' ifadesi seçilmiştir (**Şekil 2**). Ayrıca, kriterlerin fayda ya da maliyet yönlü olma durumlarına göre tercih durumlarının (Ascending/Descending) belirtilmesi gerekmektedir. Çalışmada, K1 fayda yönlü kriter olduğu için sadece bu kritere ilişkin veri girişi yapılırken 'Ascending' ifadesindeki onay kaldırılmamıştır.



Şekil 1. Bitkisel atık yağ toplama kutuları için belirlenen alternatif yerler

Tablo 1. Karar matrisi

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
A1	0.335	0.068	0.009	0.009	0.013	0.017
A2	0.631	0.034	0.004	0.003	0.020	0.028
A3	0.836	0.023	0.006	0.021	0.007	0.005
A4	0.992	0.021	0.002	0.013	0.022	0.054
A5	0.799	0.046	0.003	0.008	0.019	0.037
A6	0.846	0.071	0.020	0.023	0.010	0.002
A7	0.978	0.103	0.003	0.004	0.041	0.033
A8	0.293	0.141	0.006	0.008	0.040	0.050
A9	0.138	0.122	0.006	0.016	0.032	0.012
A10	0.059	0.080	0.004	0.037	0.003	0.005
A11	0.217	0.005	0.002	0.066	0.074	0.014

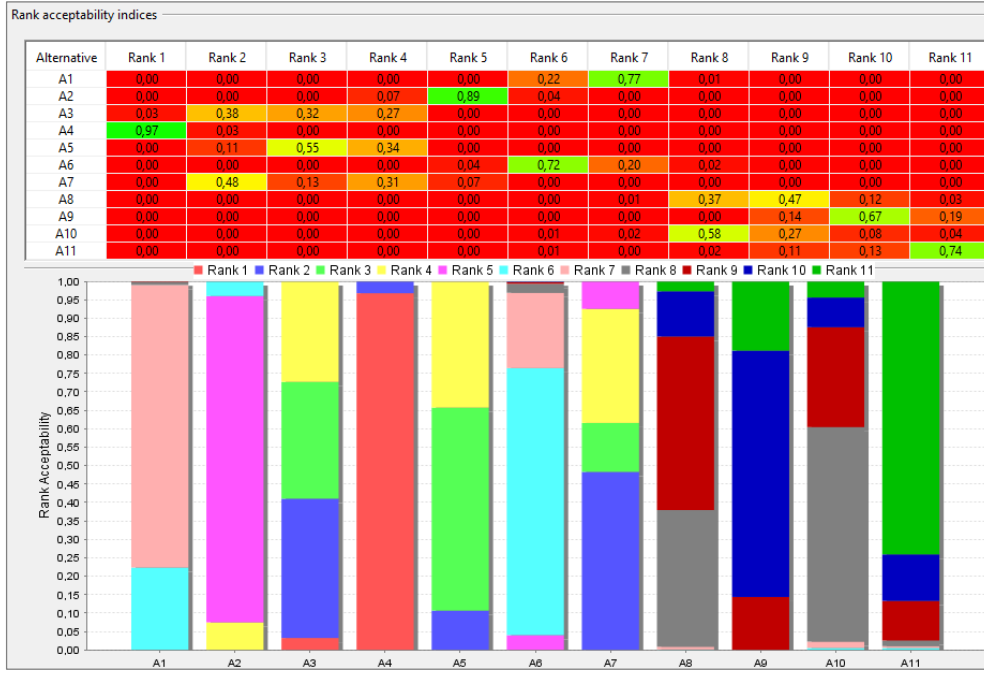


Şekil 2. JSMAA yazılımında tercih bilgisi girişi

Alternatiflere ve kriterlere ilişkin veri girişleri tamamlandıktan sonra, 'Results' sekmesinden sonuçlar elde edilmektedir. Burada karşımıza sıra kabul edilebilirlik indisleri, güvenilirlik faktörleri ve merkezi ağırlık vektörlerine ilişkin değerler çıkmaktadır. Probleme ilişkin sıra kabul edilebilirlik indisleri Şekil 3'te sunulmaktadır. Sıra kabul edilebilirlik indisi, girilen tercih değerlerine göre alternatifleri sıralamaktadır. Şekil 3'teki sütun ve satırların birlikte değerlendirilmesiyle alternatiflere ilişkin genel sıralamanın elde edilmesi mümkündür. Birinci sütun incelendiğinde, alternatiflerden A4'ün %97 ve A3'ün %3 olasılıkla birinci sırada tercih edilebileceği görülmektedir. Diğer alternatiflerin birinci sırada tercih edilme olasılıkları

0'dır. Benzer şekilde son sütun incelendiğinde, A11'in %74, A9'un %19, A10'un %4, A8'in %3 ve diğer alternatiflerin 0 olasılıkla son sırada tercih edilebileceği görülmektedir. İlk sırada tercih edilme olasılığı en yüksek olan A4'ün yer aldığı satır incelendiğinde, bu alternatifin %97 olasılıkla birinci ve %3 olasılıkla ikinci sırada tercih edilebileceği görülmektedir. A4'ün diğer sıralarda yer alma olasılığı ise 0'dır. Tüm sütun ve satırlar birlikte değerlendirildiğinde, bitkisel atık yağ toplama kutuları için alternatif yerlerin aşağıdaki şekilde sıralanabileceğini söylemek mümkündür:

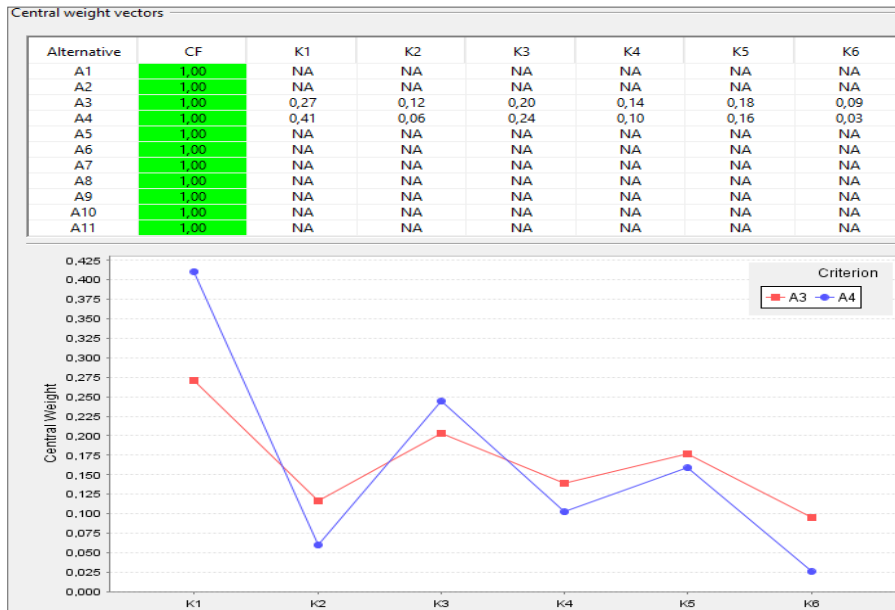
$$A4>A7>A5>A3>A2>A6>A1>A10>A8>A9>A11$$



Şekil 3. Sıra kabul edilebilirlik indisleri

Güvenilirlik faktörleri ve merkezi ağırlık vektörlerine ilişkin değerler Şekil 4'te sunulmaktadır. Güvenilirlik faktörü, alternatifleri ayırt etmede kullanılan kriter ölçümlerinin yeterli oranda doğru olup olmadığını göstermektedir. Şekil 4 incelendiğinde, tüm alternatiflere ilişkin güvenilirlik faktörü değerlerinin '1' olduğu görülmektedir. Bu durumda, ilgili çözümün güvenilir olduğunu söylemek mümkündür. Başka bir ifadeyle, A4'ün %97 olasılıkla ilk sırada tercih edilme durumunun güvenilirlik oranı %100'dür. Benzer şekilde A3'ün %3 olasılıkla birinci sırada tercih edilme durumunun güvenilirlik oranı da %100'dür. Merkezi ağırlık vektörü,

alternatiflerin seçilme olasılığının kriterler tarafından ne derece etkilendiğini göstermektedir. Şekil 4 incelendiğinde, A4'ün birinci sırada tercih edilmesinde 0,41 oranında K1'in, 0,24 oranında K3'ün, 0,16 oranında K5'in, 0,10 oranında K4'ün, 0,06 oranında K2'nin ve 0,03 oranında K6'nın etkili olduğu görülmektedir. A3 ve A4 dışındaki alternatiflerin birinci sırada tercih edilme olasılıkları 0 olduğu için bu alternatiflere ilişkin merkezi ağırlık vektörleri hesaplanmamaktadır. Şekil 4'te ilgili alternatiflere ait satırlarda görülen NA (Not Applicable) kısaltması bu durumu belirtmektedir.



Şekil 4. Güvenilirlik faktörleri ve merkezi ağırlık vektörleri

4 Sonuçlar

Bitkisel atık yağ toplama kutuları için Atakum'da yer seçiminin hedeflendiği bu çalışmada öncelikle uzman görüşleri doğrultusunda altı kriter belirlenmiştir. Nüfus yoğunluğu (K1), alışveriş merkezlerine yakınlık (K2), tramvay istasyonlarına yakınlık (K3), okullara yakınlık (K4), parklara yakınlık (K5) ve kamu kurumlarına yakınlık (K6) kriterlerinin dikkate alındığı çalışmada, uzmanların görüşleri doğrultusunda kriterler önem derecelerine göre $K1 > K3 > K5 > K4 > K2 > K6$ şeklinde sıralanmıştır. ArcGIS yazılımı kullanılarak belirlenen on bir alternatifte ilişkin normalize edilmiş piksel değerleri Öklidyen Mesafe Analizi ve Kernel Yoğunluk Analizi ile elde edilerek karar matrisi oluşturulmuştur. Ardından, kriter ağırlıklarının deterministik olarak belirlenemediği durumlarda, kriterlerin önem derecelerine göre sıralanmasına imkân tanıyan SMAA-2 yöntemi ile alternatifler değerlendirilmiştir. SMAA-2 yöntemi, A4'ün %97 olasılıkla birinci sırada; A11'in %74 olasılıkla son sırada tercih edilebileceğini göstermiştir. A4'ün %97 olasılıkla ilk sırada tercih edilmesindeki güvenilirlik oranı %100 olup, A4'ün birinci sırada tercih edilmesinde 0.41 oranında K1'in etkili olduğu görülmüştür. Bitkisel atık yağ toplama kutuları için alternatif yerler $A4 > A7 > A5 > A3 > A2 > A6 > A1 > A10 > A8 > A9 > A11$ şeklinde sıralanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda ilgili çözümlerin güvenilir olduğunu söylemek mümkündür.

İleriki çalışmalar için farklı ÇKKV yöntemleri kullanılarak sonuçlar karşılaştırılabilir. Ayrıca farklı kriterler de dikkate alınarak Samsun'un diğer ilçelerinde veya farklı şehirlerde bitkisel atık yağ toplama kutuları için uygun yerler değerlendirilebilir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %18

Kaynaklar

- [1] A. A. Gündüzalp ve S. Güven, Atık, çeşitleri, atık yönetimi, geri dönüşüm ve tüketici: Çankaya Belediyesi ve semt tüketicileri örneği. Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi, 1-19, 2016.
- [2] M. Ripa, G. Fiorentino, V. Vacca and S. Ulgiati, The relevance of site-specific data in Life Cycle Assessment (LCA). The case of the municipal solid waste management in the metropolitan city of Naples (Italy). J. Clean. Prod., 142, 445-60, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.149>
- [3] D. Bolat, E. Can-Güven, K. Gedik ve P. B. Kurt-Karakuş, Yağ sektörü ürün ve atıklarının yakılmasının potansiyel etkileri. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 21 (1), 22-44, 2016. <https://doi.org/10.17482/uujfe.00346>
- [4] V. Gül, E. Öztürk ve T. Polat, Günümüz Türkiye'sinde bitkisel yağ açığı kapatmada ayçiçeğinin önemi. Alnteri Zirai Bilimler Dergisi, 30 (1), 70-6, 2016.
- [5] T.C. Ticaret Bakanlığı, Esnaf, Sanatkârlar ve Kooperatifçilik Genel Müdürlüğü, 2018 yılı ayçiçeği raporu, 2019.
- [6] T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Bitkisel atık yağların yönetimi, 2010.
- [7] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Erişim 10 Eylül 2020, <https://csb.gov.tr/2017-ekim-ayi-itibari-ile-32-bin-ton-bitkisel-atik-yag-toplandi-bakanlik-faaliyetleri-22039>.
- [8] D. Aksen, O. Kaya, F. S. Salman and Y. Akça, Selective and periodic inventory routing problem for waste vegetable oil collection. Optim. Lett., 6, 1063-80, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11590-012-0444-1>
- [9] TCA, Turkish Court of Accounts, Waste management in Turkey: National regulations and evaluation of implementation results. Performance Audit Report, Ankara 1-76, 2007.
- [10] TÜİK, Türkiye İstatistik Kurumu, Erişim 17 Eylül 2020. <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=95&locale=tr>,
- [11] R. Lahdelma and P. Salminen, SMAA-2: Stochastic multicriteria acceptability analysis for group decision making. Operations Research, 49 (3), 444-54, 2001. <https://doi.org/10.1287/opre.49.3.444.11220>
- [12] R. Lahdelma, S. Makkonen and P. Salminen, Two ways to handle dependent uncertainties in multi-criteria decision problems. Omega, 37, 79-92, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2006.08.005>
- [13] D. Okul, C. Gencer and E. Kızılkaya Aydoğan, A method based on SMAA-TOPSIS for stochastic multicriteria decision making and a real-world application. International Journal of Information Technology & Decision Making, 13 (5), 957-78, 2014. <https://doi.org/10.1142/S0219622014500175>
- [14] M. Ağdaş, Ö. Bali ve H. Ballı, Afet lojistiği kapsamında dağıtım merkezi için yer seçimi: SMAA-2 tekniği ile bir uygulama. Beykoz Akademi Dergisi, 2 (1), 75-95, 2014.
- [15] A. Çalış, İ. Keskin ve C. Gencer, AHP ve SMAA-2 yöntemleri ile mühendislik alanında bilimsel araştırma konularının seçimi. Savunma Bilimleri Dergisi, 15 (1), 257-80, 2016.
- [16] A. Çalış, G. Özçelik ve C. Gencer, Türkiye'deki imalat sanayi sektörlerinin PROMETHEE MULTIMOORA ve SMAA-2 yöntemleriyle sıralanması. Endüstri Mühendisliği Dergisi, 27 (2), 28-44, 2016.
- [17] Ö. Eroğlu and C. Gencer, Integrating fuzzy DEMATEL and SMAA-2 for maintenance expenses. International Journal of Engineering Science Invention, 6 (2), 60-71, 2017.
- [18] E. Kızılkaya Aydoğan and M. Özmen, The stochastic VIKOR method and its use in reverse logistic option selection problem. RAIRO-Operations Research, 51, 375-89, 2017. <https://doi.org/10.1051/ro/2016027>
- [19] E. Kılıç Delice and G. F. Can, An integrated mental workload assessment approach based on NASA-TLX and SMAA-2: A case study. The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir

- Osmangazi University, 26 (2), 88-99, 2018. <https://doi.org/10.31796/ogummf.384328>
- [20] K. İ. Durmaz ve C. Gencer, Tedarikçi seçiminde entegre lojistik destek yaklaşımı ve işletme uygulaması: SWARA-SMAA-2. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8 (2), 828-41, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.488943>
- [21] K. İ. Durmaz, A. Çalış Boyacı ve C. Gencer, Türkiye'deki düzey-1 bölgelerinin eğitim göstergeleri açısından çok kriterli karar verme yöntemleri ile değerlendirilmesi. Bilişim Teknolojileri Dergisi, 13 (1), 13-25, 2020. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.570775>
- [22] K. İ. Durmaz and C. Gencer, A new plugin based on JSMAA: SWARA-JSMAA and aerobatic aircraft selection. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (3), 1487-98, 2020. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.476610>
- [23] D. M. Aspen and M. Sparrevik, Evaluating alternative energy carriers in ferry transportation using a stochastic multi-criteria decision analysis approach. Transportation Research Part D, 86, 102383, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102383>
- [24] J. Quian and Y. Dong, Multi-criteria decision making for seismic intensity measure selection considering uncertainty. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1-20, 2020. <https://doi.org/10.1002/eqe.3280>
- [25] R. Lahdelma, J. Hokkanen and P. Salminen, SMAA-Stochastic multiobjective acceptability analysis. European Journal of Operational Research, 106, 137-43, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00163-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00163-X)
- [26] S. Karabay, E. Köse ve M. Kabak, Stokastik çok kriterli kabul edilebilirlik analizi ile bir kamu kurumu için tesis yeri seçimi. Ege Akademik Bakış, 14 (3), 361-9, 2014.
- [27] M. Özmen, OECD ülkelerinin telekomünikasyon sektörü açısından SMAA-EDAS yöntemi ile değerlendirilmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9 (1), 224-37, 2020. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.611987>
- [28] T. Tervonen and J. R. Figueira, A survey on stochastic multicriteria acceptability analysis methods. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 15, 1-14, 2008. <https://doi.org/10.1002/mcda.407>
- [29] T. Tervonen and R. Lahdelma, Implementing stochastic multicriteria acceptability analysis. European Journal of Operational Research, 178, 500-13, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.037>
- [30] T. Tervonen, JSMAA: An open source software for SMAA computations. International Journal of Systems Science, 45 (1), 69-81, 2014. <https://doi.org/10.1080/00207721.2012.659706>
- [31] JSMAA, Accessed 5 July 2020, <http://smaa.fi/jsmaa/>



Elma atıklarından elma sirkesi üretimi üzerine bir araştırma

A research on the production of apple vinegar from apple wastes

Hasan Tangüler^{1,*} , Hande Mert¹ , Furkan İlman¹ , Büşra Yücel¹ , Selen Gençtürk¹ 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 51240 Kampüs/Niğde, Türkiye

Özet

Elma dünya genelinde en çok tüketilen ve en çok ticareti yapılan yumuşak çekirdekli meyvelerden biri olup, taze olarak tüketilebildiği gibi elma suyu, reçel-marmelat, şarap ve sirke gibi çok çeşitli ürünlere işlenmekte ve genellikle besin içeriği bakımından zengin olan elmanın kabukları, posa ve çekirdekleri atık olarak kalmaktadır. Bu gibi tarımsal atıkların katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesi, çevre sorunlarının azaltılması yanında ekonomik faydalar da sağlamaktadır. Bu çalışmada yavaş yöntem ile farklı çeşitlerde atık elma kabukları ve çekirdek evlerinin sirke üretiminde kullanılabilirliğini araştırılmıştır. Etil alkol fermantasyonu ile briks değerleri hızlı bir şekilde düşmüş ve esas ürün olarak etil alkol oluşmuş ve ardından gerçekleşen asetik asit fermantasyonu ile etil alkol %0.5'in altına düşmüştür. Ayrıca, elde edilen sirkelerde pH değerleri 3.25-3.41, toplam asitlik 15.3-23.07 g/L, antioksidan aktivite 68.3-90 µl ve toplam fenolik madde 259.8-387.1 mg GAE/L arasında belirlenmiştir. Bu çalışmada ülkemizde ilk defa elma atıkları sirke üretiminde değerlendirilmiştir. Özellikle temizlik amaçlı sirke üretimi, elma atıklarına katma değer kazandırılmasında alternatif olarak kabul edilebilir görülmektedir.

Anahtar kelimeler: Elma, Atık ürünler, Elma kabuğu, Çekirdek evi, Sirke

Abstract

Apple is one of the most consumed and traded soft-core fruits worldwide. Apples can be consumed fresh and also processed into a wide variety of products such as apple juice, jam-marmalade, wine and vinegar. Generally the apple peels and pulp which are rich in nutrient content and the apple cores remain as waste. The conversion of such agricultural wastes into high value-added products provides economic benefits as well as reduction in environmental problems. In this study, the usability of different types of waste apple peels and apple core with seeds in vinegar production was investigated with slow method. The brix values decreased rapidly due to the ethyl alcohol fermentation and the concentration of ethyl alcohol which was formed as the main product, got decreased below 0.5% after subsequent acetic acid fermentation. In addition, the values of pH, total acidity (as acetic acid), antioxidant activity and total phenolic substance in the vinegars obtained were determined between 3.25-3.41, 15.3-23.07 g/L, 68.3-90 µl and 259.8-387.1 mg GAE/L, respectively. In this study, apple wastes have been utilized in vinegar production for the first time in our country. Especially the production of vinegar for cleaning purposes seems like an acceptable alternative for value addition to apple wastes.

Keywords: Apple, Waste products, Apple peel, Apple core with seeds, Vinegar

1 Giriş

Dünya üzerinde önemli miktarda yaş meyve üreten ülkeler arasında (Çin, AB, ABD ve Türkiye) yer almakta olan ülkemiz, pek çok kültür meyvesinin de anavatanı olması nedeniyle de bir çeşit bolluğuna sahiptir [1,2]. Bunlar arasında en yaygın olanlarından biri olan elma (*Malus domestica*), Rosaceae (gülgiller) familyasında ve *Malus* cinsinin altında yer almakta olup, ticari olarak en çok yetiştirilen türdür [3]. Elma, 4000 yıldan daha uzun sürelerden bu yana kültüre alınmış olup, dünya genelinde en çok tüketilen, en çok sevilen ve en çok ticareti yapılan yumuşak çekirdekli meyvelerden biridir. Türkiye'nin hemen her bölgesinde yetiştiriciliği yapılmakta olan elma, hoş bir koku ve ferahlatıcı özelliğe sahip olmasıyla birlikte besleyici özelliği oldukça fazla olan bir meyvedir [2, 4, 5]. 2017 yılında 3,032 milyon ton elma üretimi yapan Türkiye, ABD ve Çin'den sonra dünyada üçüncü sırada yer almaktadır [6].

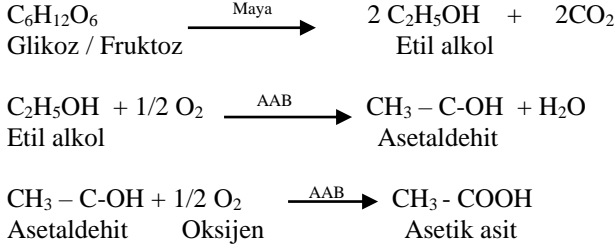
Son zamanlarda gıda sektöründe yaşanan ilerlemelere bağlı olarak, endüstriyel meyve işleme alanında da yeni yeni gelişmeler yaşanmaktadır. Meyveler taze olarak tüketiminin yanında, meyve suyu, konserve, marmelat gibi çeşitli ürünlere işlenerek de tüketicilere sunulabilmektedir [7]. Elma da, taze tüketilebileceği (sofralık) gibi dünya genelinde

çok çeşitli ürünlere işlenmekte veya çeşitli yiyecek ve içeceklerin bileşimine dâhil edilmektedir. Bunlar arasında; elma suyu, reçel-marmelat, kurutulmuş, konsantre meyve, püre, şarap ve sirke sayılabilir [4, 8]. Belirtilen çeşitli gıda maddelerine işlenen elmanın kabukları, posa ve çekirdekleri genelde atık olarak kalmaktadır. Bu ve benzeri besin içeriği bakımından zengin gıda atıkları genellikle katma değeri düşük hayvan yemi veya gübre olarak değerlendirilmektedir. Bunun dışında, bu maddeler hem çevre kirliliğine neden olmaları hem de bileşiminde bulunan önemli bazı bileşenlerin kaybı nedeniyle önemli bir sorun oluşturmaktadır. Bununla beraber, artan dünya nüfusuna bağlı olarak, gıda üretimi yapan işletme sayısının artacağı düşünüldüğünde, tarımsal atıkların da önemli düzeyde artması ve dolayısıyla sorunun büyüme olasılığı oldukça yüksektir. Bu sorunun üstesinden gelmek veya azaltarak katma değeri yüksek ürünlere dönüştürmek son yıllarda çok önemli hale gelmiştir [9, 10]. Tarımsal gıda atıkları (Agro-industrial food wastes) olarak adlandırılan bu atıklar, bol ve ucuz olduklarından, katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmeleri çevre sorunlarını azaltabileceği gibi ekonomik faydalar da sağlayacaktır [5].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: : htanguler@ohu.edu.tr (H. Tangüler)

Geliş / Received: 11.01.2020 Kabul / Accepted: 13.11.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngmuh.673508



Şekil 1. Sirke üretiminde karbonhidratların asetik aside dönüşümü

Son zamanlardaki fermantasyon ve biyodönüşüm teknolojisindeki hızlı gelişmeler, tarımsal gıda atıklarının katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesinde yeni alternatifler sunmaktadır. Bu alternatif değerlendirme yolları arasında biyoyakıt (biyodizel, biyoetanol, biyogaz vd.), enzim, pektin, flavanoid, fenolik bileşikler, pigmentler (astaksantin vd.) koku maddeleri, lif [5] ve glikoz üretimi sayılabilir [11]. Bununla beraber, gerçekleştirilen bu çalışmada elma kabukları ve çekirdek evlerini değerlendirme seçeneklerinden biri olarak sirke üretimi seçilmiştir.

Tarihi çok eskilere dayanan ve fermantasyon yoluyla üretilen bir ürün olan sirke Fransızca ekşi şarap anlamına gelen 2 kelimenin (Vin =şarap ve aigre =ekşi) bir araya getirilmesiyle oluşmaktadır. Sirke üretiminde genel olarak kullanılan başlıca 3 yöntem olup, bunlar yavaş usul ve çabuk usul yanında son yıllarda yüksek verim elde edilebilen derin kültür yöntemidir [12, 13]. Sirke yapımında uygulanan ilk yöntem olan yavaş yöntemde anahtar bileşik etil alkoldür. Yöntem özellikle bağcılar tarafından ve ayrıca ev tipi üretimlerde de kullanılan bir yöntem olup, iki aşamada gerçekleştirilen (etil alkol fermantasyonu ve asetik asit fermantasyonu) bir işlemdir [14, 15]. Yavaş yöntemde kullanılacak hammaddenin sırası öncelikle ortamda doğal olarak bulunan mayalar (genellikle *Saccharomyces* türleri) tarafından havasız (oksijensiz) ortamda etil alkol fermantasyonuna tabii tutularak, fermente olabilir şekerlerin alkollü sıvıya dönüşümü sağlanır. Daha sonra, bu alkollü sıvı havalı (oksijenli) ortamda asetik asit bakterileri (AAB) tarafından fermantasyona uğratılır. Bu aşamada anahtar bir bileşen olan etil alkol, AAB (genellikle *Acetobacter* türleri) tarafından asetik aside ve suya (Şekil 1) okside olurken [15-17], bu sırada alkollü sıvının yüzeyinde sirke anası adı verilen ve AAB tarafından oluşturulan bir film tabakası oluşmaya başlar. Sirke üretimi tamamlandığında bu tabaka çökmeye başlar [14]. Öte yandan, yavaş yöntem ile elde edilen sirkelerde uçucu aroma maddeleri başta olmak üzere diğer bazı elementlerin miktarı ve çeşidi hızlı yöntem ve derin kültür yöntemi ile elde edilen sirkelere göre daha fazladır. Bunun en önemli nedeni, işlem süresi diğer yöntemlere göre çok daha uzun olduğundan, süre uzadıkça özellikle AAB tarafından bu belirtilen maddelerin üretimi de artmakta olup, elde edilen sirkenin kalitesi de dolayısıyla daha iyi olmaktadır [16].

Genelde üretildiği hammaddenin rengini alan sirke, oldukça geniş bir kullanım alanına sahip bir üründür.

Özellikle yemeklerin, çeşitli soslar ve salataların, mayonez, salça vb. gıda maddelerinin hazırlanması ve konserve edilmesinde, turşu ve ilaç üretiminde, gıdaların korunmasında, antioksidan veya antibakteriyel madde olarak kullanılabilir [15, 18]. Öte yandan, sirkenin canlandırıcı, kan basıncını düzenleyici, iştah açıcı, sindirimi düzenleyici etkileri yanında kanser, osteoporoz ve nörolojik hastalıklar üzerinde de etkili olduğu bildirilmektedir [15].

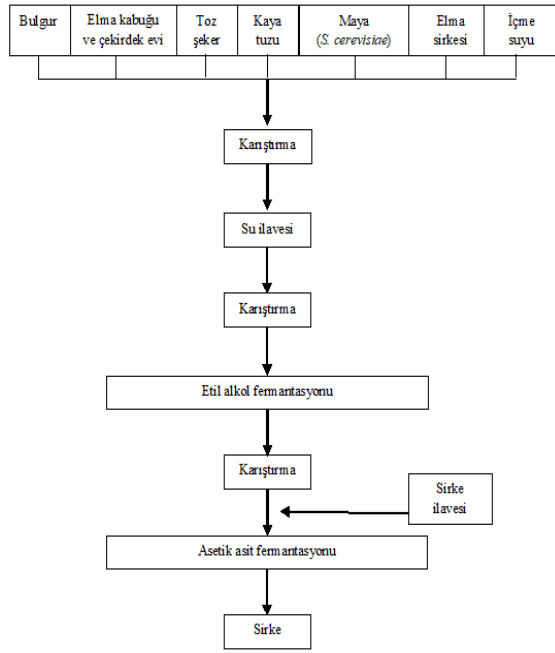
Günümüzde üretildiği ülkelere, bölgelere ve hatta yörelere göre farklı tiplerde sirkeler üretilmekle beraber, üretiminde kullanılan hammaddelere göre sirkeler Tablo 1'deki şekilde gruplandırılabilir [12, 18]. Öte yandan, gıda olarak kullanılabilir çeşitli şekerli ve nişastalı hammaddelerin kullanımıyla ilgili yüksek maliyeti nedeniyle alternatif hammaddeler üzerinde durulmaktadır. Bu nedenle tarımsal veya endüstriyel atıklar sirke üretiminde olası bir alternatif olarak değerlendirilebilir [15]. Bu çalışmada hem ev tipi üretimlere uygun olması hem de kullanılacak alet ekipman bakımından maliyetinin düşük olması nedeniyle yavaş yöntem seçilmiş olup, çalışmanın amacı; farklı çeşitlerde atık elma kabukları ve çekirdek evlerinin sirke üretiminde kullanılabilirliğini araştırmaktır

2 Materyal ve metod

Hammadde olarak elma kabukları ve çekirdek evleri kullanılmış olup, kullanılan elmalar (Super Chief; SC, Golden Delicious; GD, Scarlet Supur; SS, Granny Smith; GS ve Fuji; FJ) Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Tarım Bilimleri ve Teknolojileri Fakültesi, Araştırma ve Uygulama Bahçesi'nden sağlanmıştır. Ekmek mayası, tuz, şeker, bulgur ve sirke ise bunları satan yerel firmalardan temin edilmiştir. Denemeler Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü Fermantasyon Laboratuvarı'nda 2 litrelik cam damacanalarda gerçekleştirilmiştir.

2.1 Sirke üretimi

Yavaş yöntemle sirke üretiminde Aktan ve Yıldırım [19] ve Şahin [20] tarafından bildirilen yöntemde bir takım modifikasyonlar yapılarak üretimler gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Sirke üretimi amacıyla 2 litrelik cam damacanalara her bir deneme için 600'er gram elma kabuğu ve çekirdek evi karışımı tartılmış, ardından kullanılan karışımın ağırlığının %2.5'i bulgur, %2.5'i çözünmüş halde şeker ve %2.0'si tuz ilave edilmiştir. Başka bir steril beher içerisine, steril kaşık ile 0.2 g Maurivin (Maurivin SW; Mauri Inc., Australia) marka *Saccharomyces cerevisiae* tartılmış ve su içerisinde çözündürülmüştür. Ardından damacana içerisine eklenerek karıştırılmıştır. Daha sonra, damacanaya 100 mL sirke ve damacana boyun seviyesine kadar içme suyu ilave edilerek homojenizasyonun sağlanması için kaşık yardımı ile karıştırılmıştır. Her bir damacananın ağız kısmı tülbenç ile sarılmış ve parafilm yardımıyla oksijen geçirmeyecek şekilde kaplanarak 20°C'de etil alkol fermantasyonuna bırakılmıştır (Şekil 3). Alkol fermantasyonu sırasında, daha yüksek etil alkol elde edebilmek için 60 g şeker ilave edilmiştir. Daha sonra kabuklar dibe çökene kadar her gün homojen olacak şekilde karıştırma işlemi uygulanmıştır.



Şekil 2. Yavaş yöntemle elma sirkesi üretimi

Kabuklar dibe çöktükten sonra sirke (170 mL) ilave edilip tekrar karıştırılmış ve ağız kısmında sadece tülbent olacak şekilde asetik asit fermantasyonuna (28°C) bırakılmıştır.

İlave edilen sirkenin pH değeri 3.73 ve toplam asitlik miktarı ise 32.7 g/L olarak ölçülmüştür. Fermantasyon sırasında damacanada sirke anası oluşumu gözlemlenirken ve bu sirke anasının dibe çökmesinden sonra üretilen sirke tülbent yardımıyla süzölmüştür. Sirke üretimi, tüm elma çeşitlerinde iki paralel olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

2.2 Analizler

Etil alkol fermantasyonun gidişinde briks ölçümleri Hanna marka HI96801 model dijital marka refraktometre kullanılarak belirlenmiştir. Öte yandan, sirke örneklerinde toplam asitlik, pH [21], kurumadde ve kül [22] analizleri yapılmıştır. Bununla beraber, yoğunluk tayini Kyoto KEM marka DA-130N model (Tokyo, Japonya) el tipi yoğunlukölçerle gerçekleştirilmiştir. Etil alkol tayini ise, örneklerin damıtılmasından sonra 20°C'de piknometre ile belirlenmiştir [23].

2.3 Antioksidan aktivite (AA) analizi

Üretilen sirkelerde AA analizinde Başığit ve ark. [21] tarafından önerilen spektrofotometrik yöntemden yararlanılmış, ancak bazı modifikasyonlar yapılmıştır. AA tayini, basit, tekrarlanabilir ve ucuz bir yöntem olan 2,2-difenil-1-pikril-hidrazil (DPPH) yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Sirke örneklerinden farklı hacimlerde (20, 40, 60, 80 ve 100 µl) deney tüplerine alınarak etil alkol (% 80'lik) ile 100 µl'ye tamamlanmıştır. Üzerine 3,9 ml 0,1 mM DPPH (%80 etanolde) çözeltisi ilave edilmiştir. Vortekslenildikten sonra oda koşullarında karanlıkta 30 dakika bekletilerek 517 nm'de absorbansları okunmuştur. Örnek yerine 100 µl etanol (% 80'lik) kullanılarak aynı

şartlarda kontrol olarak kullanılmıştır. % inhibisyon aşağıda verilen formül ile hesaplanmıştır:

$$\% \text{İnhibisyon} = \frac{(\text{Kontrolün Absorbansı} - \text{Örnek absorbansı})}{\text{Kontrolün Absorbansı}} \quad (1)$$

2.4 Toplam fenolik madde (TFM) tayini

Sirkelerde TFM tayini, Folin-Ciocalteu yöntemine göre yapılmıştır [21]. Deney tüplerine 50 µL sirke örneği + 50 µL saf su (1:1 oranında %50 seyreltme) ve 750 µL Folin-Ciocalteu çözeltisi eklenerek 5 dakika bekletilmiş ve 750 µL Na₂CO₃ ilave edilerek hızlıca karıştırılmıştır. Karanlık bir ortam ve oda sıcaklığında 1 saatlik bekletmenin ardından 725 nm'de spektrofotometrede (Thermo Fisher Scientific, Evolution 300, Massachusetts, USA) örneklerin absorbans değerleri okunmuştur. Standart olarak gallik asit kullanılmış, aynı işlemler tekrar yapılarak kalibrasyon eğrisi için hazırlanmış farklı konsantrasyonlardaki gallik asit çözeltilerine de uygulanmıştır. Kalibrasyon eğrisinden yararlanılarak TFM konsantrasyonu belirlenmiş ve sonuçlar, mg GAE (gallik asit eşdeğeri) /L olarak verilmiştir.

2.5 Sirkelerde L*, a* ve b* değerleri

Sirke örneklerinde renk değerlerinin elde edilmesinde, objektif ölçümler Minolta CR-400 model (Konika Minolta Optics Inc., Tokyo, Japonya) renkteki farklılığı ölçme cihazından yararlanılmıştır. L* değeri aydınlık (0-100), a* değeri (+) kırmızı ve (-) yeşil aralığını ve b* değeri (+) sarı ve (-) mavi rengi belirlemektedir [21, 24].

2.6 İstatistiksel analiz

Gerçekleştirilen üretimler ve analizleri iki paralel olacak şekilde yapılmış ve bunların ortalama değerleri verilmiştir. Elde edilen değerlere farklılıkları belirlemek için varyans analizi (ANOVA, Minitab Ver.17) yapılmış ve grup içi değerlendirmeler aynı programla TUKEY Testi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

Elma kabukları ve çekirdek evlerinden sirke üretimi amacıyla gerçekleştirilen denemeler kapsamında etil alkol fermantasyonu başlangıcında belirlenen briks ve yoğunlukdeğerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Etil alkol fermantasyonu başlangıcında belirlenen briks ve yoğunluk değerleri

	Yoğunluk (g/cm ³)	Briks
SC	1.017	5.4
GD	1.015	4.8
SS	1.013	4.9
GS	1.013	4.8
FJ	1.016	4.8

SC: Super Chief, GD: Golden Delicious, SS: Scarlet Supur, GS: Granny Smith, FJ: Fuji



Şekil 3. Damacanalarda gerçekleştirilen etil alkol fermantasyonu

Etil alkol fermantasyonu başlangıcında örneklerin yoğunluk değerleri 1.013 ile 1.017 aralığında değişmektedir. Briks değerleri ise 4.75 ile 5.4 arasında olup, gerçekleştirilen etil alkol fermantasyonu briks ölçümü yapılarak izlenmiştir (Şekil 4).

Briks değerlerinde değişim azaldığında fermantasyona son verilmiştir. Etil alkol fermantasyonu 15 gün sürmüştür. Şekilden de görüldüğü gibi şeker ilavesinin ardından briks değerleri hızlı bir şekilde düşmeye başlamış ve 10. güne kadar bu azalma devam etmiştir. Daha sonra on beşinci güne kadar çok önemli bir değişiklik olmamıştır.

3.1 Elma kabuğu sirkesinin genel bileşimi

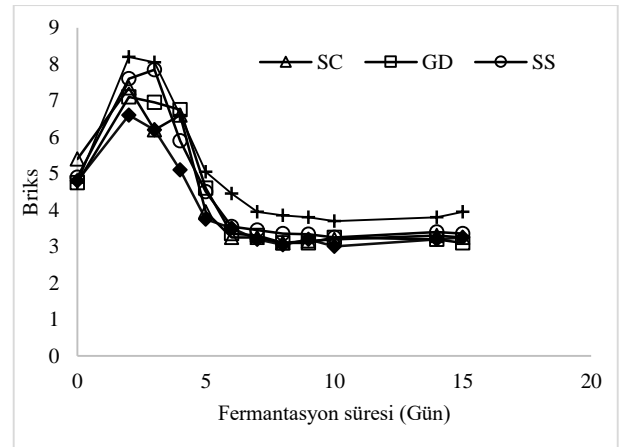
Asetik asit fermantasyonu sırasında birincil ve ikincil çeşitli maddeler oluştuğu gibi etil alkol, asetaldehit ve asetik asit dâhil pek çok uçucu bileşik buharlaşmaktadır [15]. Bununla beraber, 35 gün süren fermantasyonlar sonucunda elde edilen sirke örneklerinde gerçekleştirilen analizlerin sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.

Elijah ve Etukudo [15] muz kabukları ile gerçekleştirdikleri çalışmada, optimum asetik asit konsantrasyonu için en az 21 günlük fermantasyonun gerekli olduğunu bildirmişlerdir. Buna karşılık Ethiraj ve Suresh [25], yavaş yöntemde sirke üretiminde fermantasyonun tamamlanması için en az 4-5 haftaya gereksinim duyulduğunu ifade etmişlerdir. Benzer şekilde, Bayram ve ark. [26] tarafından pirinç sirkesi üretimi ile ilgili gerçekleştirilen çalışmada asetik asit fermantasyonunun 28 günde tamamlandığı belirtilmiştir. Dolayısıyla sirke üretiminde fermantasyon süresi önceki çalışmalar ile uyumludur.

Asetik asit fermantasyonu sırasında etil alkol, AAB tarafından kullanılarak iki aşamalı reaksiyon ile asetik aside dönüşür. Öncelikle etil alkolden asetaldehit ve ardından asetaldehitin oksidasyonu ile asetat oluşur [15]. Benzer şekilde gerçekleştirdiğimiz çalışmada da, sirkelerde toplam asitlik fermantasyon sonunda önemli şekilde artarak asetik asit cinsinden 15.3 g/L (Super Chief) ile 23.07 g/L (Scarlet Supur) seviyesine çıkmış ve pH değerleri de 3.25 ile 3.41 gibi düşük değerler bulunmuştur. En düşük ve en yüksek toplam asitlik arasında 6 g/L'den fazla bir fark olmasına rağmen, kullanılan elma çeşidinin pH ve toplam asitlik

üzerine etkisi istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur ($P \geq 0.05$).

Elijah ve Etukudo [15] muz kabukları kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada, asetik asit fermantasyonu sonunda toplam asitliğin arttığını buna karşılık pH değerinin 3,41'e düştüğünü belirtmişlerdir. Adebayo-Oyetero ve ark. [27] ise mango meyvesi ile yapmış oldukları çalışmada, mango sirkesinde toplam asitlik ve pH değerlerinin sırasıyla 0.25g/L ve 4.02-4.25 arasında olduğunu bildirmişlerdir. Bayram ve ark. [26] tarafından pirinç sirkesi üretimi ile ilgili gerçekleştirilen çalışmada fermantasyonun 27. gününde toplam asitliği 59.8 g/L ve pH değerini 3.25 olarak bulmuşlardır. Öte yandan, elma sirkelerinde pH değerlerini 2.79 (ticari elma sirkesi) – 3.39 (ev yapımı elma sirkesi) arasında ve toplam asitlik değerlerini de 5.04 (ev yapımı elma sirkesi) ile 39.78 g/L (ticari elma sirkesi) arasında elde etmişlerdir. Sengün [28] ise incir sirkesi ile ilgili yapmış olduğu çalışmada, pH değerlerini 3.05-3.73 arasında ve toplam asitlik değerlerini de 21-69.7 g/L arasında bulmuştur. Bununla beraber, ticari ve ev yapımı elma sirkelerinde toplam asitlik değerleri çeşitli araştırmacılar tarafından 40.5-184.3 g/L arasında ve pH değerleri de 2.16- 3.16 arasında bulunmuştur [29-31]. Diğer yandan, TS 1880 EN 13188 sirke standardına ek, 2004 (Nisan) tarihinde çıkan tadilinde



Şekil 4. Etil alkol fermantasyonu süresince briks değişimi

Tablo 3. Sirke örneklerinin genel bileşimi

	SC	GD	SS	GS	FJ
pH	3.32±0.339 ^A	3.32±0.071 ^A	3.25±0.495 ^A	3.28±0.014 ^A	3.41±0.001 ^A
Toplam Asitlik (g/L)*	15.3±3.39 ^A	21.45±7.00 ^A	23.07±3.95 ^A	17.55±1.23 ^A	16.29±0.47 ^A
Kuru Madde (%)	2.59±0.006 ^A	1.71±0.105 ^C	2.05±0.09 ^{BC}	1.95±0.096 ^{BC}	2.15±0.091 ^B
Kül (%)	0.58±0.263 ^A	0.08±0.099 ^A	0.16±0.033 ^A	0.47±0.064 ^A	0.45±0.018 ^A
AA (%)	68.34±11.95 ^A	90.04±23.2 ^A	62.84±8.76 ^A	84.7±3.57 ^A	83.85±6.42 ^A
TFM (mg GAE/L)	387.09±91.7 ^A	292.62±101.6 ^A	371.58±3.79 ^A	317.55±34.8 ^A	259.84±22 ^A
Yoğunluk (g/cm ³)	1.0025±0.0007 ^A	1.0015±0.0007 ^A	1.0015±0.0007 ^A	1.0025±0.0007 ^A	1.003±0.00001 ^A
Etil Alkol (%)	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
L*	28.19±0.08 ^A	29.14±0.14 ^A	30.89±2.03 ^A	30.35±1.67 ^A	31.33±0.09 ^A
a*	0.975±0.601 ^A	0.275±0.29 ^A	1.39±0.269 ^A	1.03±0.75 ^A	0.685±0.148 ^A
b*	0.67±0.01 ^A	2.86±0.3 ^A	4.01±1.44 ^A	4.455±1.46 ^A	2.435±0.08 ^A

* Asetik asit cinsinden, AA: Antioksidan Aktivite, TFM: Toplam fenolik madde SC: Super Chief, GD: Golden Delicious, SS: Scarlet Supur, GS: Granny Smith, FJ: Fuji. Aynı satırda farklı harfleri taşıyan ortalamalar arası fark önemlidir (P<0,05). Tüm değerler iki paralelin ortalamasıdır. Aynı harf ile gösterilenler istatistiksel açıdan önemsizdir (P≥0,05)

Türkiye’de üretilen sirkelerin toplam asit içeriğinin (suda serbest asetik asit cinsinden) litresinde 40 g’dan az olmaması gerektiği bildirilmektedir.

Gerçekleştirdiğimiz çalışmada sirke örneklerinde belirlenen toplam asitlik ve pH değerleri muz kabukları, mango ve pirinç sirkesi ile uyumludur. Bununla beraber, elma atıklarından üretilen sirkelerin pH değerleri Bayram ve ark. [26] tarafından elma sirkelerinde bildirilen değerler ile uyumlu olup, Budak [29], Jo ve ark. [30] ve Tekin [31] tarafından bildirilen değerlerden yüksektir. Öte yandan, toplam asitlik miktarları da benzer şekilde Bayram ve ark. [26] tarafından elma sirkelerinde bildirilen değerler ile uyumlu ancak, Budak [29], Jo ve ark. [30] ve Tekin [31] tarafından bildirilen değerlerden düşük olduğu gibi, TS 1880 standardına [32] da uymamaktadır. Bunun en önemli nedeni, elma atıklarının başlangıç şeker miktarının yetersizliği ve/veya üst oksidasyon olarak düşünülmektedir. Kurumadde, sirkeden su başta olmak üzere ve diğer uçucu maddelerin uçurulmasından sonra kalan maddelerin toplamı olarak ifade edilmekte olup, çeşitli organik asitler, tuz, protein, renk maddeleri ve mineral maddeleri içermektedir [33]. Farklı elma çeşitlerine ait kabuk ve çekirdek evleri kullanılarak üretilen sirkelerde kuru madde miktarları %1.71 (Golden Delicious) ile %2.59 (Super Chief) arasında belirlenmiştir. Benzer şekilde en düşük ve en yüksek kül miktarları da aynı denemelerde belirlenmiş olup, % 0.078 Golden Delicious ve %0.58 Super Chief’e ait elma atıklarının kullanıldığı denemelerde bulunmuştur. Bununla beraber, kullanılan elma çeşidinin kuru madde üzerine etkisi istatistiksel olarak %5 önem seviyesinde önemli bulunurken (P<0.05), kül miktarı üzerine etkisi %5 önem seviyesinde önemsiz bulunmuştur (P≥0.05).

Elma sirkesi üzerine yapılan çeşitli çalışmalarda [26, 29-31] kurumadde ve kül değerleri sırasıyla %1.03-7.82 ve %0.47-5.20 arasında belirlemiştir. Sengün [28] ise incir sirkesi ile ilgili yapmış olduğu çalışmada, kül miktarlarının 1.11 ile 5.60 g/L arasında olduğunu bildirmiştir. Ülkemizin sirke standardında kurumadde ve kül ile ilgili bir sınırlama bulunmamaktadır [32]. Ancak, gerçekleştirdiğimiz

çalışmada elde ettiğimiz elma sirkelerinde belirlediğimiz kurumadde ve kül değerleri Budak [29], Tekin [31] ve Bayram ve ark. [26] tarafından bildirilen değerlerle uyumlu, buna karşılık Bakır [34] tarafından bildirilen değerlerden düşüktür.

Sirkelerde etil alkol miktarı, sirkenin kalite ve verimliliği bakımından en önemli parametrelerden biri olup, sorunsuz sürdürülen bir asetik asit fermantasyonunu sonunda etil alkolün tamamına yakını aside okside olur [26]. Etil alkol fermantasyonu sonucu oluşan alkol, asetik asetik fermantasyonu sırasında kullanılmış ve elde edilen sirkelerde genel olarak %0.5 değerinin altına düşmüştür. Bu sonuç, ortamdaki asetik asit bakterilerinin oksijensiz ortamda etil alkolün önemli bir kısmını okside ederek asetik aside dönüştürdüğünü göstermektedir. TS 1880 sirke standardında şarap sirkeleri dışındaki sirkelerde kalıntı alkol miktarı hacimce %0.5’den fazla olmaması gerektiği ifade edilmektedir [32].

Elijah ve Etukudo [15] muz kabukları kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada, etil alkol fermantasyonu ile alkol miktarının %10.5’e çıktığını ancak, asetik asit fermantasyonu sonunda %0.0’a düşüğünü ve şarap sirkesi dışındaki sirkelerde etil alkol miktarının %0.5’ten az olması gerektiğini bildirmişlerdir. Benzer şekilde Budak (2010) elma sirkesinde alkol belirlenemediğini ifade ederken, Bayram ve ark. [26] pirinç, üzüm ve elma sirkelerinde, Sengün [28] ise incir sirkesinde etil alkol miktarının %0.5’ten düşük olduğunu bildirmişlerdir. Buna karşılık, Adebayo-Oyetero ve ark. [27] ise mango meyvesi ile yapmış oldukları çalışmada, asetik asit fermantasyonunu 15 gün gerçekleştirmişler ve elde ettikleri sirkelerde alkol içeriğinin %1.01 ile 6.17 arasında değiştiğini bildirmişlerdir. Gerçekleştirdiğimiz çalışmada üretilen sirkelerdeki etil alkol değerleri, sirke standardına uygun olduğu gibi, elma ve diğer sirkelerdeki etil alkol miktarları ile uyumlu olup, Adebayo-Oyetero ve ark. [27] tarafından üretilen mango sirkelerinden düşüktür. Bunun en önemli nedeninin araştırmacılar tarafından asetik asit fermantasyonunun yeteri şekilde sürdürülmemiş olması olarak ifade edilebilir.

Sirkelerde yoğunluk değerleri 1.0015 ile 1.003 arasında değişmiş ve bu değerler doğal sirkeler için düşük değerler olarak ifade edilebilir. Ancak, Akbaş ve Cabaroğlu [35] ülkemizde üretilen üzüm sirkelerinin bileşimleri üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada, yoğunluk değerlerinin 1.0016 ile 1.0139 g/cm³ arasında değiştiğini bildirmişler ve piyasada satılan bazı sirkelerde de düşük yoğunluk değerlerine sahip olabildiğini ifade etmişlerdir.

Bitkilerdeki sekonder metabolitlerden olan fenolik bileşikler, genel olarak polifenoller olarak adlandırılmakla birlikte, yapısındaki benzen halkasına –OH grubu bağlı olan maddelerdir. Bu bileşikler fenolik asitler ve alkoller, flavanoidler, tanenler ve antosiyaninler gibi bileşikler içermektedir [36]. Fenolik bileşiklerin insan sağlığı üzerinde pozitif etkileri bulunmakta olup, bu etkiler özellikle bu maddelerin antioksidatif ve antienflamatuar etkileri yanında yüksek biyolojik aktivitelerinden kaynaklanmaktadır [37].

Amerika Birleşik Devletlerinde insanlar tarafından meyve tüketimi sonucu alınan fenolik maddelerin yaklaşık %20'si yapısında 60 adet ve üzeri fenolik madde bulunan elmadan kaynaklanmaktadır. Elma kabuklarında bulunan fenolik maddelerin miktarı, elmanın meyve etine oranla çok daha fazladır (100 ile 250 kat arasında). Diğer yandan, elma kabuğunda, çekirdek ve elma posasına oranla yine daha fazla polifenol bulunmaktadır [9]. Ayrıca, elma, şarap ve alkol sirkeleri içerisinde fenol bileşikler bakımından en zengin olan sirke elma sirkesidir [38].

Tablo 3' den de görüldüğü gibi elma sirkesi örneklerinin TFM miktarları (Gallik asit cinsinden) 259.84 mg GAE/L (FJ) ve 387.09 mg GAE/L (SC) arasında bulunmuştur. Her ne kadar kullanılan farklı elma çeşitlerinin kabukları ve çekirdek evlerinin TFM miktarı üzerine etkisi istatistiksel olarak önemsiz ($P \geq 0.05$) bulunsun da, kullanılan farklı çeşit elma kabukları ve çekirdek evinden elde edilen sirkelerdeki miktarlar arasında önemli farklılık vardır.

Bayram ve ark. [26] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, elma sirkelerinde TFM miktarının 236-693 mg GAE/L ve üzüm sirkelerinin ise 354.7-403.4 mg GAE/L arasında olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, marketten temin ettikleri bir elma sirkesinin TFM içermediğini belirlemişlerdir. Ayrıca, Yapılan çeşitli çalışmalarda elma sirkelerinde TFM miktarlarının 36.9 ile 546.6 mg GAE/L arasında olduğu belirtilmiştir [29, 30, 34]. Gerçekleştirdiğimiz çalışmada elde ettiğimiz sonuçlar Budak [29], Jo ve ark. [30] ve Bayram ve ark. [26] tarafından bildirilen değerlerle uyumlu iken, Bakır [34] tarafından bildirilen değerlerden yüksektir. Öte yandan, elma sirkelerinde belirlenen TFM değerlerinin üzüm sirkeleri ile karşılaştırılabilir olduğu görülmektedir.

Meyve-sebze ve ürünlerinin AA'si, sadece polifenollerin içeriğinden değil, aynı zamanda ürünün çeşidi ve üretim yöntemi gibi çeşitli faktörlerden etkilenen fenolik bileşimlerinden de etkilenir [29,34]. AA'nin belirlenmesi ile ilgili yararlanılan ilk sentetik radikallerden biri, DPPH radikalidir [34]. Antioksidan özelliği bakımından oldukça zengin olan elmanın kabuk ve çekirdek evleri kullanılarak asetik asit fermantasyonu sonunda elde edilen elma sirkelerinin DPPH yöntemi ile belirlenen AA değerleri %62.84 ve %90.04 (GD) arasında belirlenmiş olup, en

yüksek AA değeri Scarlet Supur çeşidi elma atıklarının kullanıldığı denemede elde edilmiştir. Her ne kadar AA değerleri arasındaki fark istatistiksel olarak önemsiz bulunsun da, farklı çeşit elma atıklarından elde edilen sirkelerdeki AA değerleri arasında fark vardır. Benzer şekilde, Özgen ve Tokbaş [39] Amasya elmasının içerdiği antioksidan kapasitenin, Fuji elmasından daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir

Jo ve ark. [30] DPPH yöntemi ile ticari elma sirkelerinde AA değerini %16.18 ile 57.67 arasında bulmuşlardır. Gerçekleştirdiğimiz çalışmada elde ettiğimiz AA değerleri genel olarak Jo ve ark. [30] tarafından bildirilen değerlerden yüksek bulunmuştur.

Minolta CR-400 model cihaz ile uluslararası L*, a* ve b* sistemine göre yapılan ölçümler sonucunda, L* değerlerinin 28.2 ve 31.3 arasında değiştiği belirlenmiştir. a* değerleri 0.275 ile 1.39 arasında ve b* değerleri 0.67 ile 4.46 arasında değişmektedir. Her iki renk değeri her ne kadar pozitif sınırlarda olsa da, negatif değerlere oldukça yakın olup, elde edilen sirkeler sarı ve tonlarında renklere sahiptir. Bayram ve ark. [26] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, ev yapımı, organik ve ticari elma sirkelerinde L* değerinin 9.16-14.31, a* değerinin 0.50-9.28 ve b* değerinin 15.71-24.02 arasında olduğunu bulmuşlardır. Gerçekleştirdiğimiz çalışmada elma sirkelerinde L* değerleri Bayram ve ark. [26] tarafından bildirilen değerlerden yüksek, a* ve b* değerleri ise genel olarak düşük görünmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada üretilen sirkeler, kullanılan atık hammadde göz önüne alındığında ekonomik olup, özellikle temizlik amaçlı ticari sirkeler ile karşılaştırılabilir. Ancak TS 1880 Sirke Standardı'na özellikle asitlik bakımından bu hali ile uygun olmadığı, buna karşılık AA ve özellikle TFM içeriğinin önemli ve üzüm sirkeleri ile benzer seviyelerde olduğu görülmüştür. Öte yandan, gerçekleştirilen bu çalışma göstermektedir ki, çevre kirliliğine de neden olabilen elma atıklarının değerlendirilmesinde sirke üretimi bir alternatif olarak kabul edilebilir. Ancak, ülkemizde ilk defa elma atıklarının sirke üretiminde değerlendirilmesi ile ilgili gerçekleştirilen bu çalışma ile ilgili daha detaylı ve kapsamlı yeni çalışmalarında yapılması gerekmektedir.

Teşekkür

Çalışmaya katkılarından dolayı Dr. Öğretim Üyesi Cem Baltacıoğlu ve Dr. Öğretim Üyesi Hande Baltacıoğlu'na teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] I. Fidan, Niğde bölgesinde yetiştirilen bazı elma çeşitlerinin şaraplık değerleri üzerinde bir araştırma. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yıllığı, 24, 121-130, 1975.
- [2] G. Bashimov, Elma ihracatında Türkiye'nin karşılaştırmalı üstünlüğü. Adnan Menderes

- Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 13(2), 9-15, 2016. <https://doi.org/10.25308/aduziraat.293391>
- [3] O. Gencer, Niğde ilinde yetişen yerel elma tiplerinin morfolojik, pomolojik ve moleküler karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, 2019.
- [4] A. Canbas, T. Cabaroglu, ve T. Eskiuctepe, Starking ve Golden delicious çeşitlerinden düşük, normal ve yüksek alkollü elma şarabı üretimi üzerine bir araştırma, CUZF Dergisi, 15, 71-78, 2000.
- [5] E. B. Eryılmaz, Production of astaxanthin pigment from pomegranate, olive and apple wastes by solid state fermentation. MSc Thesis, Gaziantep University, Turkey, 2019.
- [6] FAO, <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Accessed: December 04, 2019
- [7] H. B. Tüfekci, ve H. Fenercioglu, Türkiye’de üretilen bazı ticari meyve sularının kimyasal özellikler açısından gıda mevzuatına uygunluğu, Akademik Gıda, 8(2), 11-17, 2010.
- [8] P. Satora, P. Sroka, A. Duda-Chodak, T. Tarko, and T. Tuszynski, The profile of volatile compounds and polyphenols in wines produced from dessert varieties of apples. Food Chemistry, 111, 513–519, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.04.007>
- [9] E. Demircan, Elma kabuklarından elde edilen fenolik bileşiklerin lipozom ile enkapsülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, 2016. <http://hdl.handle.net/11527/13599>
- [10] M. Horzum, Endüstriyel artık olan elma posasından diyet lifi üretimi optimizasyonu ve partikül boyutun teknolojik özelliklere etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2018.
- [11] B. Canan, Elma Posasından Glikoz eldesinde ozonlamanın etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze, 2008.
- [12] H. Tangüler, 2013. Sirke üretim yöntemleri. İç Anadolu Bölgesi 1. Tarım ve Gıda Kongresi, sayfa 81-83, Niğde, 2-4 Ekim 2013.
- [13] M. J. Waites, N. L. Morgan, J. S. Rockey, and G. Highton, Industrial Microbiology: An Introduction. Blackwell Science Ltd., London, 2001.
- [14] W.C. Frazier, and D. C. Westhoff, Food Microbiology. 4th ed., McGraw-Hill International Editions, 1988.
- [15] A. I. Elijah, and M. P. Etukudo, Quality evaluation of vinegar produced from banana peel using *Saccharomyces cerevisiae* and *Acetobacter aceti* isolated from palm wine dreg. Nigerian Journal of Agriculture, Food and Environment, 12(4), 205-211, 2016.
- [16] E. Ünal, Dimrit üzümünden değişik yöntemlerle sirke üretimi üzerinde bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2007.
- [17] M. R. Adams, Vinegar, in Microbiology of Fermented Foods, Wood, Brian J. B. (eds). Blackie Academic & Professional, Second Edition, 1, 1-44, New York, 1998. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0309-1>
- [18] S. C. Tan, Vinegar Fermentation. Master Thesis, Agricultural and Mechanical College, Louisiana State University Lafayette Parish, Louisiana, United States, 2005.
- [19] N. Aktan, ve H. K. Yıldırım (eds.), Sirke Teknolojisi, Sidas Medya, Yayın No: 11-1B, İzmir, 2011.
- [20] İ. Şahin (ed)., Asit Fermantasyonları (Sirke, Laktik ve Sitrik Asit Fermantasyonları). Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Teksir, Ankara, 1982.
- [21] B. Başıyigit, H. Alaşalvar, N. Doğan, C. Doğan, S. Berktaş ve M. Çam, Wild mustard (*Sinapis arvensis*) parts: compositional analysis, antioxidant capacity and determination of individual phenolic fractions by LC–ESI–MS/MS. Journal of Food Measurement and Characterization, 14, 1671–1681, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00415-2>
- [22] A.O.A.C., Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. (K. Hekrich, editor), vol. 1 and 2, 15th edn, Arlington, Virginia 22201 USA, 1990.
- [23] C. S. Ough, and M. A. Amerine (eds.), Methods for Analyses of Musts and Wines, 2nd. edn. John Wiley and Sons, New York, 377, 1988.
- [24] R. S. Hunter, Ed., Scales for the Measurements of Appearance, John Wiley and Sons, New York, 133-140, 1975.
- [25] S. Ethiraj, and E. R. Suresh, Studies on the utilisation of mango processing waste for production of vinegar. Journal of Food Science and Technology, 29, 48-50, 1990.
- [26] M. Bayram, C. Kaya, E. E. Yücel, B. Er, E. Gülmez, ve E. Terzioğlu, Pirinç sirkesi ve çeşitli ticari sirkelerin bazı kalite özellikleri, Akademik Gıda, 16(3), 293-300, 2018. <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.475357>
- [27] A. O. Adebayo-Oyetoro, E. Adenubi, O. O. Ogundipe, B. O. Bankole, and S. A. O. Adeyeye, Production and quality evaluation of vinegar from mango, Cogent Food & Agriculture, 3, 1-8, 2017. <https://doi.org/10.1080/23311932.2016.1278193>
- [28] I. Y. Sengun, Microbiological and chemical properties of fig vinegar produced in Turkey, African Journal of Microbiology Research, 7(20), 2332-2338, 2013. <https://doi.org/10.5897/ajmr12.2275>
- [29] H. N. Budak, Elma ve üzümünden üretilen sirkelerin bileşenleri ve fonksiyonel özellikleri üzerine araştırma. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 2010.
- [30] D. Jo, E-J. Park, G-R. Kim, S-H. Yeo, Y-J. Jeong, and J-H. Kwon, Quality comparison of commercial cider vinegars by their acidity levels. Korean J. Food Sci. Technol., 44(6), 699-703, 2012. <https://doi.org/10.9721/kjfst.2012.44.6.699>
- [31] S. Tekin, Elma ve üzüm sirkelerinin ağır metal içeriklerinin ICP-MS (İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometresi) ile belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, 2014.
- [32] Anonim, TSE-Sirke-Tarım kökenli sıvılardan elde edilen ürün-tarifler, özellikler ve işaretleme, TS 1880 EN 13188, Türk Standartları Enstitüsü Necatibey Cad. 112, Ankara, 2003.

- [33] D. Yener, Mersin il merkezinde değişik satış yerlerinden alınan şalgam suyu örneklerinin fiziksel, kimyasal, duyuşsal ve mikrobiyolojik özellikleri üzerine bir araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 1997.
- [34] S. Bakır, Investigating the phenolic content and in vitro bioaccessibility of some vinegars, and changes in antioxidant activity during grape and apple vinegar processing. MSc. Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, 2014.
- [35] M. Akbaş, ve T. Cabaroğlu, Ülkemizde üretilen bazı üzüm sirkelerinin bileşimleri ve gıda mevzuatına uygunlukları üzerine bir araştırma, Gıda, 35(3), 183-188, 2010.
- [36] P. Ribereau-Gayon, Y. Glories, A. Maujean, and D. Dubourdieu (eds.), Handbook of Enology, vol. II, The Chemistry of Wine and Stabilization and Treatments. John Wiley and Sons, Ltd., p. 404, 2000.
- [37] N. M. Nizamoğlu, ve N. Sebahattin, Meyve ve sebzelerde bulunan fenolik bileşikler; yapıları ve önemleri, Electronic Journal of Food Technologies, 5(1), 20-35, 2010.
- [38] V. Gerbi, G. Zeppa, R. Beltramo, A. Carnacini, and A. Antonelli, Characterization of white vinegars of different sources with artificial neural networks. J Sci Food Agric, 78, 417-422, 1998. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0010\(199811\)78:3%3C417::aid-jsfa134%3E3.0.co;2-8](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0010(199811)78:3%3C417::aid-jsfa134%3E3.0.co;2-8).
- [39] M. Özgen, ve H. Tokbaş, Işıklanma ve meyve dokusunun Amasya ve Fuji elmalarında antioksidan kapasitesine etkisi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 24(2), 1-5, 2007. <https://doi.org/10.13002/.V2007I2.5000012618>



Zeytin çekirdeği antioksidanlarının dondurarak kurutma tekniği ile mikroenkapsülasyonu: toz ürünün fiziksel ve kimyasal karakterizasyonu

Microencapsulation of olive stone antioxidants by freeze-drying technique: physical and chemical characterization of powder product

Emine Nakilcioğlu Taş^{1,*} , Semih Ötleş¹ 

¹ Ege Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 35040, İzmir, Türkiye

Özet

Sürdürülebilir gıda üretimini geliştirmeye yönelik yaklaşımlardan biri, gıda sanayi atıklarına değer katmaktır. Zeytin ve zeytinyağı atıklarından olan zeytin çekirdeği, yapısındaki fenolik bileşikler nedeniyle doğal bir antioksidan kaynağıdır. Bu çalışmada zeytin çekirdeği su ekstraktının, kitosan varlığında dondurarak kurutma yöntemiyle mikroenkapsülasyonu amaçlanmıştır. Toz ürünün bazı fiziksel, yağ, partikül ve rekonstitüsyon özellikleri ile in vitro salınım değerleri, fenolik bileşik içeriği ve antioksidan aktivitesi belirlendi. Düşük nem içeriğine (% 3.58), yağ (0.06 g/cm³) ve sıkıştırılmış yoğunluğa (0.10 g/cm³) sahip toz üründeki fenolik bileşiklerin in vitro salınımı, simüle mide sıvısında % 25.18 ve bağırsak sıvısında ise % 41.01 idi. Yüksek toplam fenolik içeriğe (565.61 mg GAE/100 g) ve antioksidan aktiviteye (EC50: 1.85 mg ve demir indirgeme yeteneği: 1330.80 mg FeSO₄/100 g) de sahipti. Hidroksitirozol, (+)-kateşin, vanilik asit, şiringik asit ve oleuropeinin varlığı, kalitatif ve kantitatif olarak tespit edildi. Elde edilen zeytin çekirdeği antioksidanı tozunun gıdaların fonksiyonel özelliklerinin geliştirilmesi için doğal katkı maddesi olarak kullanılabilceği öngörülmektedir.

Anahtar kelimeler: Antioksidan aktivite, Dondurarak kurutma, Fenolik bileşik, Higroskopik, Zeytin çekirdeği

Abstract

One of the approaches improving sustainable food production is to add value to the food industry wastes. Olive stone, which is one of the olive and olive oil wastes, is a natural antioxidant source due to its phenolic compounds. In this study, microencapsulation of olive stone water extract by freeze-drying in the presence of chitosan is aimed. Some physical, bulk, particle, and reconstitution properties, in vitro release values, phenolic content, and antioxidant activity of the powder were determined. The in vitro release of phenolic compounds in the powder with low moisture content (3.58 %), bulk (0.06 g/cm³), and tapped density (0.10 g/cm³) was 25.18 % in simulated gastric fluid and 41.01 % in simulated intestinal fluid. It also had high total phenolic content (565.61 mg GAE/100 g) and antioxidant activity (EC50: 1.85 mg, and ferric reducing antioxidant power: 1330.80 mg FeSO₄/100 g). The presence of hydroxytyrosol, (+)-catechin, vanilic acid, syringic acid and oleuropein was determined qualitatively and quantitatively. It is predicted that the obtained olive stone antioxidant powder can be used as a natural additive to improve the functional properties of foods.

Keywords: Antioxidant activity, Freeze-drying, Phenolic compound, Hygroscopicity, Olive stone

1 Giriş

Meyve ve sebzelerin tarımsal ve endüstriyel atıkları, iyi biyoaktif bileşik kaynaklarıdır ve bunların nutrasötik olarak kullanımına ilişkin literatürde yer alan pek çok çalışma vardır. Ekonomik açıdan bakıldığında ise bu ürünlerin geri kazanımı, gıda atıklarına katma değer kazandıracak ve çevreye atılmasını azaltabilecektir. Böylece sürdürülebilir endüstriyel üretim sistemine katkı sağlanarak yeni gıda, ilaç ve kozmetik ürünlerinin eldesi mümkün kılınacaktır [1]. Zeytinyağı ve çekirdeksiz sofralık zeytin, özellikle Akdeniz ülkelerinde önemli ekonomik değere sahip ürünlerdir. Zeytin çekirdeği, zeytinyağı ekstraksiyonunda ve çekirdeksiz sofralık zeytin üretiminde açığa çıkan bir atıktır [2]. Meyvenin ağırlıkça % 10-30'undan sorumludur ve bu da yıllık yaklaşık 360000 tonluk zeytin çekirdeği atığının ortaya çıktığı anlamına gelmektedir [2, 3]. Zeytin çekirdeği pek çok alanda kullanılmasına rağmen, büyük çoğunluğu biyoyakıt olarak değerlendirilmektedir ve gıda sektöründe kullanımı bulunmamaktadır [3]. Selüloz, hemiselüloz ve lignin içeriğiyle lignoselülozik bir materyal olarak bilinen zeytin çekirdeği önemli miktarlarda antioksidan özelliklere sahip

fenolik bileşikleri de içermektedir [4]. Antioksidanlar, hücreleri serbest radikaller olarak bilinen kararsız moleküllerin neden olduğu kanser, diyabet, osteoporoz, nörodejeneratif ve kardiyovasküler hastalıklardan korumaktadır [5, 6]. Gıdalarda doğal antioksidanların (gıda kaynaklı fenolik bileşikler ve vitaminler) kullanımı, sentetik olanlarının muhtemel zararlı etkileri nedeniyle tercih edilmektedir [7]. Fakat antioksidanlar, moleküler yapılarında doymamış bağların varlığı nedeniyle ışık, oksijen ve neme karşı oldukça savunmasızdır. Bu nedenle, depolama stabilitelerini artırmak, bazılarının hoş olmayan lezzetlerini maskeleyerek ve gıda ingredientleri olarak daha güvenli hale getirmek için mikroenkapsüle edilmelidirler [8]. Gıda sektöründe sıklıkla kullanılan mikroenkapsülasyon teknolojileri, ince ve kuru tozlar oluşturan püskürtmeli kurutma ve dondurarak kurutma gibi desolvasyon mekanizmalarına dayanmaktadır [9]. Özellikle dondurarak kurutma, antioksidanlar gibi ısıya duyarlı moleküllerin mikroenkapsülasyonunda sıklıkla tercih edilen ve püskürtmeli kurutmaya alternatif bir yöntemdir [9, 10]. Bu proseste, kaplama materyali ile matris çözeltisi homojenize

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: emine.nakilcioglu@ege.edu.tr (E. Nalkilcioğlu-Taş)
Geliş / Received: 21.05.2020 Kabul / Accepted: 03.11.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021
doi: 10.28948/ngmuh.740797

edilir ve daha sonra birlikte liyofilize edilerek kuruma sağlanır [1]. Dondurarak kurutma, minimum termal ve oksidatif degradasyon ile yüksek kapsülleme verimi sonucunda daha kaliteli mikrokapsüllerin elde edilmesini sağlamaktadır [9]. Ayrıca elde edilen tozlar genellikle düşük kütle yoğunlukları, yüksek gözeneklilikleri, aroma ve lezzetin iyi korunumu ile karakterize edilmektedir [10]. Bu ve benzeri olumlu fiziksel özellikler, toz ürünlerin düşük taşıma maliyeti, ambalajlama ve depolama kolaylığı açısından üretici için önem arz etmektedir [11].

Bu çalışmanın amacı, zeytin ve zeytinyağı endüstrisinin atığı olarak karşımıza çıkan zeytin çekirdeğinden ekstrakte edilen antioksidanlarca zengin ekstraktın, kitosan varlığında dondurarak kurutma yöntemiyle mikrokapsüle edilmesi ve mikrokapsüllerin fizikokimyasal özelliklerinin belirlenmesidir. Bunun için elde edilen toz ürünün fiziksel özellikleri (nem içeriği, su aktivitesi (aw), renk, partikül özellikleri (SEM)), yığın özellikleri (yığın ve sıkıştırılmış yoğunluk, akabilirlik, yapışkanlık, kekleşme derecesi ve higroskopisi), ve rekonstitüsyon özellikleri (ıslanabilirlik ve dağılılırlik) tespit edilmiştir. Ayrıca zeytin çekirdeği antioksidan tozlarının in vitro fenolik bileşik salınımları, antioksidan aktiviteleri ve hem toplam hem de bireysel fenolik bileşik içerikleri ortaya konulmuştur.

2 Materyal ve metot

2.1 Zeytin çekirdeğinden antioksidan bileşiklerce zengin su ekstraktının eldesi

Bu çalışmada kullanılmak üzere Domat tipi zeytinlere ait çekirdekler, Manisa'nın Akhisar ilçesindeki bir ticari salamura işletmesinden temin edilmiştir. Çekirdekler, bir hafta boyunca güneş görmeyen ortamda serilerek kurutulmuş ve analize kadar oda koşullarında depolanmıştır. Ekstraksiyon öncesi çekiçli değirmen (Brook Crompton series 2000, UK) yardımıyla öğütülmüştür. Öğütülmüş çekirdeklerin antioksidan bileşiklerini ekstrakte etmek için Nakilcioğlu-Taş ve Ötles [12]'in çalışması temel alınmıştır. Çekirdek materyali olarak kullanılan antioksidan bileşiklerce zengin su ekstraktı, pilot ölçekte basınçlı su ekstraktörü kullanılarak optimum ekstraksiyon koşullarında (50°C-50 bar-90 dk) elde edilmiştir.

2.2 Dondurarak kurutma yöntemiyle zeytin çekirdeği antioksidanlarının mikrokapsülasyonu

Zeytin çekirdeğinin antioksidan bileşiklerce zengin su ekstraktı ile 1:1.25 (v/v) oranında kaplama materyali olarak kullanılan %1'lik (w/v) kitosan çözeltisi karıştırılmış ve manyetik karıştırıcı (Stuart Scientific, UK) ile 5 saat süreyle homojenize edilmiştir [13]. Daha sonra karışım, -45°C'lik sabit sıcaklıkta 0.045 bar basınçta bir liyofilizatör (Labconco 2.5 FreeZone, ABD) yardımıyla dondurarak kurutulmuştur. Kurutulmuş ürün, havanda öğütülmüştür. Elde edilen mikrokapsüllerin bir kısmı bekletmeden fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için analize alınmış ve kalanları ise alüminyum kaplı polietilen (ALPE) ambalajlarda paketlenmiştir. Ambalajlı ürünler, analize kadar -20°C'de depolanmıştır.

2.3 Mikrokapsüllerin karakterizasyonu

Elde edilen toz ürünün nem içeriği, gravimetrik olarak vakumlu etüv yöntemiyle 65 °C'lik kurutma sıcaklığı kullanılarak belirlenmiştir [14]. Su aktivitesi değeri ± 0.001 hassasiyete sahip su aktivitesi ölçüm cihazıyla (Testo AG 400, Almanya) ve renk değerleri (L, a, b) ise kolorimetrenin (HunterLAB ColorFlex, ABD) Hunter modunda tespit edilmiştir. Kroma (C), Hue açısı (h°) ve renk değişimi (ΔE) değerleri, **Denklem(1-3)**'den hesaplanmıştır:

$$C = \sqrt{(a^2 + b^2)} \quad (1)$$

$$h^\circ = \tan^{-1} \frac{b}{a} \quad (2)$$

$$\Delta E = \sqrt{\begin{matrix} (L_{ekstrakt} - L_{toz \text{ ürün}})^2 \\ + (a_{ekstrakt} - a_{toz \text{ ürün}})^2 \\ + (b_{ekstrakt} - b_{toz \text{ ürün}})^2 \end{matrix}} \quad (3)$$

Toz ürünün partikül morfolojisi, taramalı elektron mikroskobu (SEM, FEI, QUANTA 250 FEG, Hillsboro, Oregon, ABD) kullanılarak 5000x ve 20000x büyütme oranıyla değerlendirilmiştir. Yığın özelliklerinin tespiti ise toz ürünün yığın yoğunluğu (ρ_b) ve sıkıştırılmış yoğunluk (ρ_t) değerlerinin belirlenmesiyle başlamıştır [15]. Daha sonra bu veriler ile toz ürünün **Denklem (4)**'ten akabilirlik (Carr indeks (CI) [16, 17]) ve **Denklem (5)**'den yapışkanlık (Hausner oranı (HR) [18]) değerleri hesaplanmıştır. Toz ürünün % higroskopisi değeri, Cai ve Corke [19] ile Fernandes ve ark. [20]'nin yöntemlerine göre tespit edilmiştir. Higroskopisi analizine tabi tutulmuş toz ürünün kullanımıyla da % kekleşme derecesi, **Denklem (6)**'da verilen denklem vasıtasıyla ortaya konulmuştur [21–23].

$$CI = \frac{\rho_t - \rho_b}{\rho_t} \times 100 \quad (4)$$

$$HR = \frac{\rho_t}{\rho_b} \quad (5)$$

$$\% \text{ Kekkleşme derecesi} = \frac{100 \times b}{a} \quad (6)$$

Toz ürünlerin rekonstitüsyon özellikleri ise “dk” cinsinden ıslanabilirlik değerinin [20, 24] ve % dağılılırlik değerinin [25] belirlenmesiyle ifade edilmiştir.

2.4 Mikrokapsüllerin in vitro salınım, fenolik bileşik ve antioksidan içeriğinin tespiti

2.4.1 Ekstraksiyon

Toz ürün, 4:1 (mg/mL) oranında %1 asetik asit (v/v) çözeltisiyle karıştırılmış ve manyetik karıştırıcı yardımıyla ekstraksiyon gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ekstrakt, toz ürünün toplam fenolik madde miktarının, in vitro koşullarda gastrointestinal sistemde salınan fenolik madde oranının, bireysel fenolik bileşik içeriğinin, toplam flavonoid miktarının ve antioksidan aktivitesinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Toz ürün, 1:10 (mg/mL) oranında metanol:etanol (1:1, v/v) çözeltisiyle manyetik karıştırıcı

varlığında ekstrakte edilmiş ve elde edilen ekstraktan ise toz ürünün yüzey fenolik madde miktarının belirlenmesinde faydalanılmıştır [26, 27].

2.4.2 Spektroskopik analizler

Toz ürünün toplam fenolik ve yüzey fenolik madde miktarları, Singleton ve Rossi [28] tarafından geliştirilen ve Li ve ark. [29] tarafından modifiye edilen Folin-Ciocalteu yöntemine göre tespit edilmiştir. Sonuçlar, “gallik asit eşdeğeri (GAE)” cinsinden ifade edilmiştir. Toz ürünün toplam flavonoid miktarı, Heimler ve ark. [30]’nın yöntemi kullanılarak ortaya konulmuş ve “(-)-epikateşin eşdeğeri ((-)-EE)” olarak verilmiştir. Toz ürünün mikroenkapsülasyon etkinliği (%) ise Denklem (7)’de verilen denklem kullanılarak hesaplanmıştır [31]:

$$\% \text{ Mikroenkapsülasyon etkinliği} = \frac{\text{Toplam fenolik madde miktarı} - \text{Yüzey fenolik madde miktarı}}{\text{Toplam fenolik madde miktarı}} \times 100 \quad (7)$$

Luca ve ark. [27] ve Konecsini [32] tarafından kullanılan yöntemler esas alınarak; in vitro koşullarda enzimsiz simüle edilmiş gastrik ve intestinal sıvılarda zeytin çekirdeği su ekstraktının ve toz ürünün fenolik bileşiklerinin salınım oranları, Folin-Ciocalteu yöntemi ile belirlenmiştir. Sonuçlar “% salınım” cinsinden ifade edilmiştir. Toz ürünün antioksidan aktivitesi ise hem DPPH radikal süpürme aktivitesi hem de demir indirgeyici/antioksidan güç (FRAP) denemesiyle tespit edilmiştir. Brand-Williams ve ark. (1995) [33]’nin yöntemine göre gerçekleştirilen DPPH analizinin sonuçları, antiradikal etkinlik (AE) ve EC50 cinsinden verilmiştir. DPPH radikalının % 50’sini inhibe eden antioksidan maddenin “mg” cinsinden miktarını gösteren EC50 değeri, Graph Pad 5.0 programı kullanılarak hesaplanmıştır. AE, “1/EC50” olarak ortaya konulmuştur. Toz üründe Guo ve ark. [34] ile Xu ve ark. [35] tarafından uygulanan FRAP yönteminden elde edilen sonuçlar, “FeSO4 eşdeğeri” cinsinden ifade edilmiştir.

2.4.3 Fenolik bileşiklerin yüksek performans sıvı kromatografisi (HPLC) ile analizi

Toz ürünün fenolik bileşikleri, otomatik enjeksiyon, kuaterner pompa ve diyot dizinli dedektör (DAD) sistemlerine sahip Agilent 1200 serisi bir HPLC (Agilent Technologies Ltd, ABD) cihazı kullanılarak kalitatif ve kantitatif olarak tespit edilmiştir. Bu amaçla 20 µl ekstrakt, 40 °C sıcaklıktaki Nucleosil C18 kolona (5µm, 4.6 mm x 250 mm) enjekte edilmiştir. Mobil faz olarak metanol (çözücü A) ve % 2.5 (v/v) asetik asit/su (çözücü B) kullanılmış ve akış hızı 0.7 ml/dk’ya ayarlanmıştır. Kullanılan dereceli elüsyon programı, Tablo 1’de verildiği gibidir:

Fenolik bileşik standartlarının 190-400 nm arasında spektrumu alınarak, DAD dedektörde maksimum absorbans yaptıkları dalga boyları belirlenmiştir. Toz üründe hidroksitirozol, (+)-kateşin, şiringik asit ve oleuropein varlığı 280 nm’de, vanilik asit ise 265 nm’de tespit edilmiştir. Fenolik bileşiklerin belirlenmesinde standart katma tekniği, dış standart metodu ve polifenol standartlarının spektrumlarının örnekle kıyaslanması

yöntemlerinden faydalanılmıştır. Sonuçlar “mg/100 g” cinsinden ifade edilmiştir.

2.5 İstatistiksel analiz

Analizler 2 tekrar 2 paralel şekilde gerçekleştirilmiş ve tüm sonuçlar “ortalama ± standart sapma” şeklinde ifade edilmiştir. Zeytin çekirdeği su ekstraktı ile toz ürünün in vitro salınım değerleri, SPSS 20.0 paket programı yardımıyla bağımsız örneklem t-testi ile istatistiksel bakımdan değerlendirilmiştir. Toz ürünün bireysel fenolik bileşikleri ise tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ve Duncan testi kullanılarak istatistiksel açıdan değerlendirilmiştir. Bireysel fenolik içerikleri arasında anlamlı bir farklılığın olup olmadığı % 95 güven aralığında ortaya konmuştur.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Mikrokapsüllerin bazı fiziksel ve toz ürün özellikleri

Zeytin çekirdeğinden elde edilen ve antioksidan bileşiklerce zengin su ekstraktı ile kitosan karışımının liyoflizatörle kurutulması işlemi 43 saat sürmüştür. Elde edilen toz ürünün bazı fiziksel ve toz ürün özellikleri Tablo 2’de gösterilmiştir. Dondurarak kurutulmuş zeytin çekirdeği antioksidan tozlarının nem içeriği ve su aktivitesi sırasıyla % 3.58 ve 0.14 olarak bulunmuştur. Mikrokapsüllerin raf ömrü, nem içeriğine ve hazırlama/depolama sıcaklığına bağlıdır. Gıda endüstrisindeki çoğu kurutulmuş toz için nem, maksimum % 3-4 civarındadır [10]. Bu çalışmadaki toz ürünün nem içeriği, dondurarak kurutulmuş süt tozları (% 1.78-2.22) [36] ile dondurarak kurutulmuş çilek aroması mikrokapsüllerinin (% 3.9-4.1) [10] nem içeriği değerleri arasındadır. Toz ürünün su aktivitesi görüldüğü gibi oldukça düşüktür ve Tontul ve ark. [37]’nin dondurarak kurutulmuş yoğurt tozunda tespitledikleri su aktivitesi değerine (0.14) benzer bulunmuştur. Dondurarak kurutma, genellikle daha düşük su aktiviteli ürün oluşumuna yol açmaktadır. Bu durum, kurutma mekanizmasıyla ilişkilidir. Dondurarak kurutmada su, buz kristallerinin süblimasyonu ile uzaklaştırılır ve daha gözenekli bir yapı oluşur. Bu gözenekli yapı, kapiler kuvvetleri arttırmakta ve böylece toz ürünün su aktivitesi azalmaktadır [37]. Su aktivitesi, kurutulmuş ürünün depolama stabilitesi açısından oldukça önemlidir. Toz ürünlerin kimyasal ve mikrobiyolojik açıdan stabil ve güvenli olarak kabul edilebilmesi için su aktivitesi değerinin 0.30’un altında olması gerekmektedir [38].

Zeytin çekirdeği antioksidanı tozlarının nem ve su aktivitesi değerlerinin düşük olması, nispeten uzun raf ömrüne sahip ve mikrobiyolojik ve kimyasal reaksiyonlar açısından güvenli bir ürün elde edildiğinin göstergesidir.

Tablo 1. Dereceli elüsyon programı

Süre (dk)	Çözücü A (%)	Çözücü B (%)
0	5	95
2	5	95
5	25	75
15	40	60
23	50	50
37	100	0

Tablo 2. Dondurarak kurutulmuş zeytin çekirdeği antioksidanı tozunun bazı fiziksel ve toz ürün özellikleri

Özellikler	Değerler
Nem içeriği (%)	3.58 ± 0.06
Su aktivitesi (a _w)	0.14 ± 0.00
L	79.43 ± 0.02
A	3.11 ± 0.01
B	25.43 ± 0.02
Kroma (C)	25.62 ± 0.02
Hue Açısı (h°)	1.45 ± 0.00
ΔE	73.25 ± 0.01
Yığın yoğunluğu (ρ _b) (g/cm ³)	0.06 ± 0.00
Sıkıştırılmış yoğunluk (ρ _s) (g/cm ³)	0.10 ± 0.01
Akabilirlik (Carr indeks, CI)	43.51 ± 3.11
Yapışkanlık (Hausner oranı, HR)	1.77 ± 0.10
Islanabilirlik (dk)	21.00 ± 1.57
Dağılılırlik (%)	45.42 ± 0.03
Higroskopik (%)	33.01 ± 0.24
Kekleşme (%)	53.17 ± 1.20

Değerler, ortalama ± standart sapma olarak ifade edilmiştir.

Kurutulmuş ürünlerde renk, hem duyuşal açıdan ürünün çekiciliğini etkileyen hem de kalitesini yansıtan önemli bir kriteridir. Fonksiyonel gıdalar, birçok sağlık yararlarına rağmen tüketicileri görsel olarak etkilemeden pazarlanamazlar. Bu nedenle genellikle kullanılan ingredientlerin renginin, katıldığı ürünün rengini değiştirmemesi istenmektedir [39]. Dondurarak kurutulmuş zeytin çekirdeği antioksidanı tozlarının da çok az kırmızımı (a = 3.11) açık parlak (L = 79.43 ve C = 25.62) sarı renge (b = 25.43 ve h° = 1.45) sahip olduğu tespit edilmiştir. Sarı rengin varlığı, zeytin çekirdeğinin kendi renginden sorumlu olan pigmentlerden kaynaklanmaktadır. Düşük kırmızılık değeri, dondurarak kurutma işlemiyle esmerleşme reaksiyonlarının ve karotenoid degradasyonunun düşük olduğunun göstergesidir [38]. González-Ortega ve ark [9], bu çalışmaya benzer şekilde dondurarak kurutma yöntemiyle üretilen zeytin yaprağı ekstraktı mikrokapsüllerinin L değerini yüksek (46.07-55.32), a değerini 0'a yakın (0.03-2.41) ve b değerini 0'dan büyük (11.90-21.73) olarak bulgulamıştır. Toz ürünün toplam renk değişimi (ΔE) ise 73.25 olarak belirlenmiştir. Bu renk değişiminin en önemli sebepleri kurutma sırasında karotenoid kayıpları, renk pigmentlerinin parçalanması ve L-askorbik asitin okside olmasıdır [38]. Ergüney ve ark. [40] tarafından dondurularak kurutulmuş karayemiş tozunun toplam renk değişimi (27.58-35.87), bu çalışmadan daha düşüktür.

Şekil 1'de gösterildiği gibi, dondurarak kurutulmuş zeytin çekirdeği antioksidanı tozunun partikül morfolojisi, küçük ve değişken boyutlarda kırık cam yapısına benzemektedir. Bu yapı, dondurarak kurutma yöntemiyle üretilen mikrokapsüllerin ortak özelliğidir [1]. Pellicer ve ark. [10]'nın ürettiği çilek aroması mikrokapsüllerinde ve Yamashita ve ark. [1] tarafından böğürtlen yan ürününden elde edilen antosiyaninlerce zengin ekstratın mikroenkapsülasyonunda da benzer morfoloji gözlenmiştir.

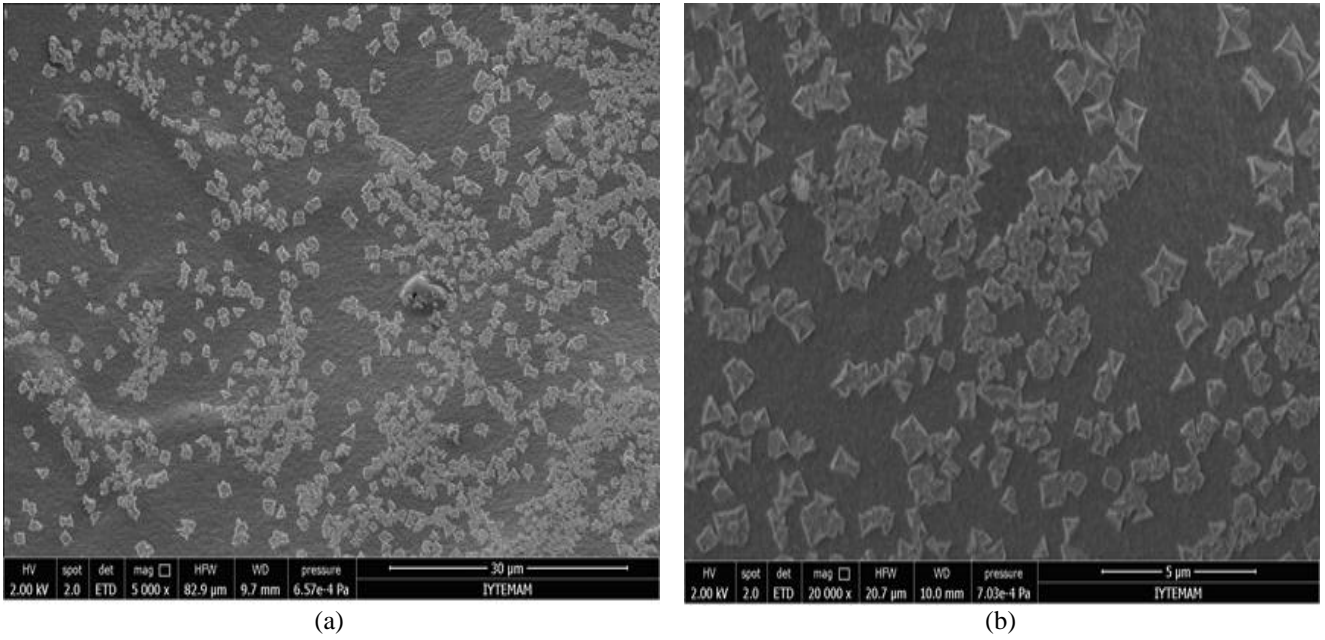
Düzensiz şekilli bu camsı yapı fenolik bileşikleri, ısıya ve oksijene maruz kalmaya karşı koruyabilir [1, 10]. Ayrıca partiküller, aglomere mikrokapsüller gibi görünmektedir. Benzer davranış Quispe-Condori ve ark. [41] tarafından dondurarak kurutma kullanılarak keten yağının zein ile mikrokapsülasyonunda da gözlenmiştir.

Zeytin çekirdeği antioksidanı tozunun yığın yoğunluğu 0.06 g/cm³ ve sıkıştırılmış yoğunluğu 0.10 g/cm³ olarak tespit edilmiştir. Dondurarak kurutulmuş tozların hem yığın hem de sıkıştırılmış yoğunluğunun oldukça düşük olduğu gözlenmiştir ve bu istenilen bir durumdur. Örneğin gözenekli yapıda olması, düşük yığın ve sıkıştırılmış yoğunluğa sahip olmasının sebebi olabilir [37]. Yığın yoğunluğunun düşük olması, toz ürünlerin paketleme maliyetini ve taşıma verimliliğini olumlu yönde etkilediğinden üretici ve tüketici tarafından önemlidir. Fakat düşük yığın yoğunluklu kurutulmuş gıdaların oksidatif bozunmaya yatkın olabileceği ve depolanma stabiliteilerinin azalabileceği unutulmamalıdır [42]. Zeytin çekirdeği antioksidanı tozu için bulunan yığın ve sıkıştırılmış yoğunluk değerleri, Dirim ve ark. (2015) (0.16-0.32 g/ml ve 0.25-0.42 g/ml) [11] ile Laokuldilok ve Kanha (yığın yoğunluğu 0.33-0.35 g/ml) [42]'nin buldukları değerlerden daha düşüktür.

Bu çalışmada elde edilen toz ürünün akabilirliği ve yapışkanlığı sırasıyla Carr indeksi (CI) ve Hausner oranı (HR) ile hesaplanmıştır. Bu değerler, toz ürünlerin depolanması, taşınması, işlenmesi sırasında kullanılacak ekipmanların tasarımları ve dizaynlarıyla ilgili önemli yol göstericilerdir [11]. CI değeri 38'den ve HR değeri 1.60'dan büyük olması durumunda toz ürünün akabilirliği çok çok zayıf ve yapışkanlığı oldukça yüksek olarak değerlendirilmektedir [17]. Bu sınıflandırmaya dayanarak zeytin çekirdeği antioksidanı tozunun akabilirliği çok çok zayıf ve yapışkanlığı oldukça yüksek olarak bulgulanmıştır. Yüksek HR değeri, toz ürünün daha yapışkan ve serbestçe daha az akabileceği anlamına gelmektedir [41]. CI değerinin yüksek olan toz ürünün HR değerinin de yüksek olması beklenen bir durumdur. Ayrıca toz ürünün oldukça küçük partiküllü olmasının, ürünün akışkanlık davranışını olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir. Bu çalışmaya benzer şekilde dondurarak kurutulmuş maltodekstrin ilaveli kamkat tozunun [38] ve maltodekstrinsiz kivi tozunun [43] akabilirliği çok çok zayıf ve yapışkanlığı da oldukça yüksek olarak tespit edilmiştir.

Islanabilirlik ve dağılılırlik partikülün boyutuna, gözenekliliğine, yoğunluğuna ve yüzey alanına bağlı olarak değişmektedir [44]. Islanabilirlik, toz ürünün kapiler kuvvetlerle sıvıya nüfuz etme kabiliyetidir. Daha düşük ıslanma süresi arzu edilen bir özelliktir [37]. Zeytin çekirdeği antioksidanı tozunun ıslanabilirliği 21.00 dk olarak belirlenmiştir. Islanabilirliğin yüksek olması, toz ürünün düşük yoğunluğu ve nem içeriği ile ilişkili olabilir [11, 37].

Toz ürünün dağılılırliği ise ürünün hafifçe karıştırarak suda dağıldığında, ayrı ayrı parçacıklara ayrılma yeteneğidir. Bu değer, gıda işleme endüstrisi için önemli bir indekstir. Yüksek dağılılırlik değeri, daha az topaklanmanın ortaya çıkması anlamına gelmektedir [42].



Şekil 1. Dondurarak kurutulmuş zeytin çekirdeği antioksidanı tozunun taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ((a) - x5000, (b) - x20000 (ölçeklendirilmiş))

Tablo 3. Dondurarak kurutulmuş zeytin çekirdeği antioksidanı tozlarının polifenol içerikleri, simüle mide ve bağırsak sıvılarında salınan fenolik bileşik miktarları ve antioksidan aktiviteleri

Özellikler	Değerler
Toplam fenolik madde miktarı (mg GAE/100 g)	565.61 ± 6.64
Yüzey fenolik madde miktarı (mg GAE/100 g)	147.24 ± 5.42
Mikroenkapsülasyon etkinliği (%)	73.95 ± 1.26
Toplam flavonoid miktarı (mg (-)-EE/100 g)	264.00 ± 6.75
<i>in vitro</i> salınım-simüle mide (SGF) (% w/v)	25.18 ± 0.48
<i>in vitro</i> salınım-simüle ince bağırsak (SIF) (% w/v)	41.01 ± 0.56
DPPH-EC ₅₀ (mg)	1.85 ± 0.13
DPPH-Antiradikal Etkinliği (AE)	0.54 ± 0.04
FRAP (mg FeSO ₄ /100 g)	1330.80 ± 14.73

*Değerler, ortalama ± standart sapma olarak ifade edilmiştir.

Zeytin çekirdeği antioksidanı tozunun dağılılırılık değeri % 45.42'dir ve orta düzeydedir. Bu çalışmada elde edilen toz ürünün ıslanılabilirlik değerinin, dondurarak kurutma yöntemiyle üretilmiş yoğurt tozu (71 sn) [37] ile maltodekstrinsiz ve maltodekstrinli kumkat tozunun ıslanılabilirliğinden (196.33 ve 774.66 sn) [38] daha yüksek olduğu görülmüştür. Toz ürünün dağılılırılık değeri ise vakatsız propolis tozunun (% 83.2-98.7) [45] ve karayemiş tozunun dağılılırılığinden (% 87-95) [40] daha düşüktür.

Higroskopik, toz ürünün yüksek bağıl nemli ortamda nem absorplama yeteneği olarak tanımlanır. Genellikle ürünün gözenekliliği veya gıdada bulunan şekerin amorf camısı durumu ile ilgilidir [37]. Depolama sırasında fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik stabilite sağlamak için toz üründe düşük higroskopik istenmektedir [37, 46]. Ayrıca toz ürünlerin higroskopik değeri, nem içerikleriyle de ters orantılıdır. Toz ürün ile ortam havası arasındaki nem farkı arttıkça, ürün tarafından daha fazla nem absorbe

edilebilmektedir [46]. Zeytin çekirdeği antioksidanı tozunun higroskopik değerleri % 33.01'dir. Kekleşme ise çökme durumudur. Toz ürünün partiküllerine yüzey teması için yeterli zaman tanındığında, kalıcı agregasyon meydana gelmektedir. Kekleşme durumunda toz ürünün akış özellikleri yok olmaktadır [44]. Zeytin çekirdeği antioksidanı tozunun kekleşme derecesi ise % 53.17 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen ürünün higroskopik değeri ve kekleşme derecesi, dondurarak kurutulmuş karayemiş tozunun kekleşme derecesinden (% 16-24) [40] ve yoğurt tozunun higroskopik değerinden (% 9.78-10.16) [37] daha yüksektir.

3.2 Mikrokapsüllerin *in vitro* salınım, fenolik bileşik ve antioksidan içeriği

Zeytin çekirdeği antioksidanı tozlarının fenolik bileşik içerikleri, *in vitro* fenolik bileşik salınımları ve antioksidan içerikleri Tablo 3'de verilmiştir. Toz ürünün toplam

fenolik madde miktarı % 0.57, toplam flavonoid miktarı % 0.26 ve yüzey fenolik madde miktarı % 0.15 olarak tespit edilmiştir. Nakilcioğlu-Taş ve Ötleş [12] tarafından püskürtmeli kurutma yöntemi ile elde edilen zeytin çekirdeği antioksidanı tozlarının toplam fenolik içeriğinin (% 1.72), dondurarak kurutulmuş zeytin çekirdeği antioksidanı tozlarınıninkine kıyasla daha yüksek olduğunu belirlenmiştir. Buna paralel olarak püskürtmeli kurutmaya elde edilen toz ürünün dondurarak kurutma yöntemine kıyasla daha yüksek toplam flavonoid (% 0.46) ve yüzey fenolik içerdiği (% 0.40) de görülmektedir. Dondurarak kurutma işlemi, ısıya duyarlı fenolik bileşikler üzerinde yüksek sıcaklığın yarattığı olumsuz etkiyi önleyebilmektedir [42].

Tablo 4. Dondurarak kurutulmuş zeytin çekirdeği antioksidanı tozlarının bireysel fenolik miktarları

Fenolik bileşikler	Alıkonma zamanı (dk)	Miktar (mg/100 g)
Hidroksitirozol	10.783	11.15 ± 0.21 ^c
(+)-kateşin	12.412	90.93 ± 0.51 ^a
Vanilik asit	15.966	6.42 ± 0.15 ^d
Şiringik asit	16.941	1.93 ± 0.10 ^e
Oleuropein	25.130	25.91 ± 0.08 ^b

*Değerler, ortalama ± standart sapma olarak ifade edilmiştir. Aynı sütündeki farklı harfler, fenolik bileşikler arasındaki istatistiksel farklılıkları göstermektedir ($p < 0.05$).

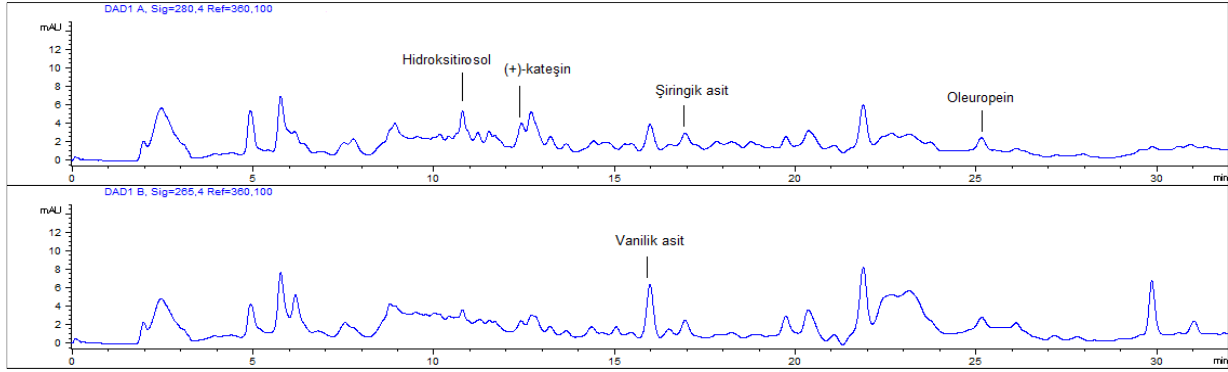
Bununla birlikte, dondurarak kurutma yönteminde fenolik ve antioksidan içeriğiyle ilgili gözlenen kayıplar, kurutma işleminden sonra ürünün öğütülmesi ile ilişkilidir ve benzer sonuçlar Barbados kirazı posasını püskürtmeli ve dondurarak kurutma ile mikroenkapsüle eden Rezende ve ark. [47] tarafından da belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların, dondurarak kurutulmuş kamkat tozunun toplam fenolik içeriği (%0.45-0.70) ile benzer ve toplam flavonoid içeriğinden (%0.15-0.22) yüksek olduğu belirlenmiştir.

Dondurarak kurutulmuş zeytin çekirdeği antioksidanı tozlarının mikroenkapsülasyon etkinliği % 73.95 olarak hesaplanmıştır. Bu durum zeytin çekirdeği antioksidanlarının % 26.05'inin yüzeyde kalıp kapsüllemediğinin ve oksidasyona yatkın olduğunun bir göstergesidir. Mikroenkapsülasyon etkinliğinin yüksek olması istenilen bir durumdur ve fenolik bileşiklerin % 73.95'inin kapsülenebilmesi oldukça iyi bir orandır. Benzer sonuçlar, püskürtmeli kurutma yöntemiyle üretilen zeytin çekirdeği antioksidanı tozlarında (% 65.35-76.89) [12] ve dondurarak kurutulmuş zeytin yaprağı ekstraktında (% 50.22-91.60) [9] da elde edilmiştir. Quispe-Condori ve ark [41], dondurarak kurutulmuş keten yağı mikroenkapsülasyon etkinliğini % 32.68 ile % 59.63 aralığında bulmuş ve bu çalışmaya göre daha düşük bir mikroenkapsülasyon etkinliği tespit etmişlerdir. Bu değerlerin çalışmalarda farklı olmasının sebebi, mikroenkapsülasyon etkinliğinin kapsülleme bileşiklerine ve kullanılan kaplama materyaline büyük ölçüde bağlı olmasıdır [8].

Zeytin çekirdeği su ekstraktının simüle SGF'de salınan toplam fenolik madde miktarı % 54.67 ± 2.58 ve SIF'de salınan toplam fenolik madde miktarı ise % 88.59 ± 1.99 olarak belirlenmiştir. Dondurarak kurutulmuş zeytin çekirdeği antioksidanı tozunda ise kapsüllerin parçalanmasıyla midede toplam fenolik içeriğinin % 25.18'i salınmakta ve kalan mikroenkapsüllerin bir kısmında ince bağırsakta parçalanmasıyla kalan toplam fenolik içeriğinin % 41.01'i de ince bağırsakta salınmaktadır. Bu durumda zeytin çekirdeği su ekstraktının tüketimiyle fenolik bileşiklerin sadece % 5.17'si kolona ulaşabilirken, dondurarak kurutulmuş zeytin çekirdeği antioksidanı tozu tüketimiyle fenolik bileşiklerin % 44.14'ü kolona ulaşabilmektedir. Bu da gerçekleştirilen mikroenkapsülasyon işleminin fenolik bileşiklerin biyoyararlılığı üzerinde olumlu etkiler yarattığının en iyi göstergesidir. Su ekstraktı ile toz ürün arasında simüle SGF'de salınan toplam fenolik madde miktarı ve SIF'de salınan toplam fenolik madde miktarı açısından istatistiksel bakış açısıyla anlamlı bir fark olduğu belirlenmiştir ($p < 0.05$). Ayrıca su ekstraktında SGF'de salınan toplam fenolik madde miktarı ile SIF'de salınan toplam fenolik madde miktarı arasında ve toz üründe SGF'de salınan toplam fenolik madde miktarı ile SIF'de salınan toplam fenolik madde miktarı arasında da istatistiksel açıdan anlamlı bir farklılığın varlığı tespit edilmiştir ($p < 0.05$).

Toz ürünün mikroenkapsüle edilmesindeki nedenlerden biri fenolik bileşiklerin gıda matriksiyle interaksyonunu önleme ve gastrointestinal yolda kontrollü salınımlarını sağlamaktır. Bağırsak koşullarında korunarak kontrollü biçimde plazmadaki konsantrasyonlarının artırımını ana hedefler. Fenolik bileşiklerin absorpsiyonunu etkileyen en önemli faktörler olan protein interaksyonu ve bağırsak mukozasındaki enzimlerle etkileşim, mikroenkapsülasyonla engellenebilmektedir ve bu durum bileşiklerin biyoyararlılıklarını artırmaktadır [31]. Luca ve ark. [27], santrifüjlenme sonrasında dondurarak kurutulmuş vişne posası fenoliklerinin SGF'de in vitro salınım değerlerini % 11.88-14.41 ve SIF'de in vitro salınım değerlerini ise % 31.74-38.28 olarak belirtmiştir. Santrifüjlenmiş kontrol örneklerinde ise salınım oranları daha yüksektir ve % 26.79-41.09 (SGF) ile % 47.07-49.22 (SIF) aralığındadır. Dondurarak kurutulmuş kateşin nanopartikülünün simüle edilmiş SGF'deki fenolik salınımı % 5-15 ve simüle edilmiş SIF'deki salınımı ise % 9-25 olarak tespit edilmiştir [31]. Bu çalışmadaki in vitro salınım değerlerinin daha yüksek belirlenmesinin sebebi, mikroenkapsülasyon verimi, kapsülleme fenolik bileşikler ve kaplama materyalindeki farklılıklar olduğu kanısına varılmıştır.

Zeytin çekirdeği antioksidanı tozunun antioksidan aktivitesi incelendiğinde, 1.85 mg toz ürünün DPPH serbest radikalının % 50'sini süpürme yeteneğinde olduğu ya da başka bir ifadeyle toz ürünün antiradikal etkinliğinin (AE) 0.54 olduğu ortaya çıkmıştır. Kıyaslamak açısından fenolik bileşiklerden gallik asidin EC50 değerinin 0.001 mg ve AE değerinin ise 960.42 olduğu tespit edilmiştir. Zeytin çekirdeğinin DPPH yöntemiyle belirlenen antioksidan aktivitesi gallik asidinkine göre düşük iken, dondurarak



Şekil 2. Dondurarak kurutulmuş zeytin çekirdeği antioksidanı tozunun HPLC ile belirlenen fenolik bileşikleri

kurutulmuş kamkat tozundan (EC50: 76.16-137.16 mg/mg) oldukça yüksektir. Püskürtmeli kurutma yöntemiyle elde edilen zeytin çekirdeği antioksidanı tozunun antioksidan aktivitesinden (EC50: 1.56 mg ve AE: 0.64) çok az düşük olduğu görülmektedir. Dondurarak kurutulmuş zeytin çekirdeği antioksidanı tozunun FRAP yöntemiyle belirlenen antioksidan aktivitesi ise 1330.80 mg FeSO₄/100 g'dır. Toz ürünün FRAP yöntemiyle tespitlenen antioksidan aktivitesi fenolik içeriğiyle bağlantılı olarak Nakilcioğlu-Taş ve Ötles [12] tarafından püskürtmeli kurutulmuş zeytin çekirdeği antioksidanı tozununkinden daha düşük (4724.61 mg FeSO₄/100 g) olduğu görülmüştür. Literatürde dondurarak kurutulmuş Japon ayvasının FRAP yöntemiyle belirlenen antioksidan aktivitesi 3.3-6.7 mmol Trolox/100 g kuru madde [48] iken, dondurarak kurutulmuş kahve telvesinininki ise 1.21-1.58 mmol Fe+2/100 ml [8] olduğu ifade edilmiştir. Antioksidan aktivitenin güvenli ve kesin bir şekilde belirlenmesi için farklı testlerin kullanılması önemlidir. Çünkü her yöntemin kendine özgü bir özelliği vardır ve belirli bir etki alanına sahiptir [47]. Sonuçlar dondurarak kurutulmuş zeytin çekirdeği antioksidanı tozunun yüksek indirgeme gücüne sahip olduğunu ve kontrolsüz oksidasyona karşı koruyucu olabileceğini göstermiştir.

3.3 Mikrokapsüllerin bireysel fenolik bileşikleri

Zeytin çekirdeği antioksidanı tozunda HPLC-DAD kullanılarak belirlenen fenolik bileşiklerin miktarları Tablo 4'te verilmiştir. Toz üründe beş adet fenolik bileşik (hidroksitirozol, (+)-kateşin, vanilik asit, şiringik asit ve oleuropein) tespit edilmiştir (Şekil 2). Bunlardan hidroksitirozol ve oleuropein, zeytin ve zeytin ürünlerinde bulunan baskın fenolik bileşiklerdir [49].

Toz üründe en fazla miktarda bulunan fenolik bileşimin (+)-kateşin olduğu, daha sonra ise onu sırasıyla oleuropein, hidroksitirozol, vanilik asit, şiringik asit takip ettiği bulunmuştur (p<0.05). En düşük miktarda tespitlenen fenolik bileşik ise şiringik asittir (p<0.05).

Püskürtmeli kurutmayla elde edilen zeytin çekirdeği antioksidanı tozunun fenolik bileşiklerinin belirlendiği çalışmada, örnekte bu çalışmaya benzer şekilde hidroksitirozol, (+)-kateşin, vanilik asit, şiringik asit ve oleuropein varlığı belirlenmiş ve baskın fenolik bileşimin (+)-kateşin (231.5 mg/100 g), miktarı en düşük olanın da şiringik

asit (2.73 mg/100 g) olduğu ifade edilmiştir [12]. Püskürtmeli kurutmayla elde edilen zeytin çekirdeği antioksidanı tozunun bireysel fenolik bileşik miktarları, bu çalışmadakine kıyasla daha yüksektir. Bu sonuç diğer analiz sonuçlarıyla da uyumludur ve sebebi daha önce ifade edildiği gibi dondurarak kurutma işleminden sonra ürünün havanda ezilerek öğütülmesidir [47]. Bu aşamada mikrokapsüller zarar görmüş ve polifenollerin oksidasyonunun gerçekleşmiş olabileceği düşünülmektedir. Dondurarak kurutma yönteminde uygulanan düşük sıcaklık ve vakum basıncının fenolik bileşiklerin bozunmasına yol açan termal ve oksidatif reaksiyonları büyük oranda sınırlandırdığı bilinmektedir [38]. Buna rağmen bu çalışmada kullanılan kaplama materyali: çekirdek materyali oranı, kurutma kalınlığı ve dondurarak kurutma koşulları gibi parametrelerin optimize edilmemiş olması, püskürtmeli kurutma yöntemiyle elde edilen kadar yüksek polifenol ve antioksidan içeriğe sahip toz ürünün elde edilememesindeki diğer bir neden olabileceği kanısına varılmıştır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada hem fonksiyonel gıda tasarımında kullanılabilecek bir ingredient hem de doğal katkı maddesi elde etmek amacıyla, antioksidan bileşiklerini koruyabilen bir kurutma yöntemi olan dondurarak kurutma yöntemi kullanılmış ve zeytin çekirdeğinin antioksidan bileşiklerce zengin su ekstraktı, kitosan ile mikrokapsüle edilerek toz formuna getirilmiştir. Geliştirilen toz ürünün bazı fiziksel ve toz ürün özellikleri ile polifenol ve antioksidan içeriği incelenmiştir. Zeytin çekirdeği antioksidanı tozlarının nem içeriği ve su aktivitesi değerleri güvenli depolama için uygun sınırlardadır. Açık sarı renge sahip ürünün, katıldığı gıdanın rengini ciddi derecede değiştirmeyeceği düşünülmektedir. Partiküller arası aglomerasyon gözlenmiştir ve partiküller, değişken boyutlarda, küçük ve kırık cam yapısındadır. Yüksek kekleşme derecesine, yapışkanlığa, higroskopik ve ıslanabilirlik değerine, orta düzeyde dağılıbilirlik değerine, zayıf akabilirliğe, düşük yığın yoğunluğu ve sıkıştırılmış yoğunluk değerlerine sahip bir ürünün elde edildiği söylenebilir. Ayrıca geliştirilen zeytin çekirdeği antioksidanı tozu dikkate değer düzeyde fenolik bileşik içerdiği ve antioksidan aktiviteye sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmada elde edilen fizikokimyasal özelliklere ek olarak,

toz ürünün depolama süresi ve koşullarında stabilitesinin değerlendirileceği çalışmaların da gerçekleştirilmesi tavsiye edilmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] C. Yamashita, M. M. S. Chung, C. dos Santos, C. R. M. Mayer, I. C. F. Moraes, and I. G. Branco, Microencapsulation of an anthocyanin-rich blackberry (*Rubus* spp.) by-product extract by freeze-drying. *LWT - Food Science and Technology*, 84, 256–262, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.063>.
- [2] V. Hernández, J. M. Romero-García, J. A. Dávila, E. Castro, and C. A. Cardona, Techno-economic and environmental assessment of an olive stone based biorefinery. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 145–150, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.09.008>.
- [3] F. J. Gomez-de la Cruz, P. J. Casanova-Pelaez, J. M. Palomar-Carnicero, and F. Cruz-Peragon, Drying kinetics of olive stone: A valuable source of biomass obtained in the olive oil extraction. *Energy*, 75, 146–152, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.085>.
- [4] A. Moubarik and N. Grimi, Valorization of olive stone and sugar cane bagasse by-products as biosorbents for the removal of cadmium from aqueous solution. *Food Research International*, 73, 169–175, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.07.050>.
- [5] E. Shannon, A. K. Jaiswal, and N. Abu-Ghannam, Polyphenolic content and antioxidant capacity of white, green, black, and herbal teas: a kinetic study. *Food Research*, 2(1), 1–11, 2017. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.2\(1\).117](https://doi.org/10.26656/fr.2017.2(1).117)
- [6] M. Al-Farsi, A. Al-Amri, A. Al-Hadhrami, and S. Al-Belushi, Color, flavonoids, phenolics and antioxidants of Omani honey. *Heliyon*, 4, e00874, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00874>.
- [7] V. G. L. Souza, A. L. Fernando, J. R. A. Pires, P. F. Rodrigues, A. A. S. Lopes, and F. M. B. Fernandes, Physical properties of chitosan films incorporated with natural antioxidants. *Industrial Crops and Products*, 107, 565–572, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.056>.
- [8] L. F. Ballesteros, M. J. Ramirez, C. E. Orrego, J. A. Teixeira, and S. I. Mussatto, Encapsulation of antioxidant phenolic compounds extracted from spent coffee grounds by freeze-drying and spray-drying using different coating materials. *Food Chemistry*, 237, 623–631, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.142>.
- [9] R. Gonzalez-Ortega, M. Faieta, C. D. Di Mattia, L. Valbonetti, and P. Pittia, Microencapsulation of olive leaf extract by freeze-drying: effect of carrier composition on process efficiency and technological properties of the powders. *Journal of Food Engineering*, 285, 110089, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110089>.
- [10] J. A. Pellicer, M. I. Fortea, J. Trabal, M. I. Rodríguez-López, J. A. Gabaldon, and E. Núñez-Delgado, Stability of microencapsulated strawberry flavour by spray drying, freeze drying and fluid bed. *Powder Technology*, 347, 179–185, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.03.010>.
- [11] S. N. Dirim, G. Çalışkan, and K. Ergun, Dondurularak kurutulmuş bazı meyve tozlarının toz ürün özelliklerinin belirlenmesi. *Gıda*, 40(2), 85–92, 2015. <https://doi.org/10.15237/gida.GD14059>.
- [12] E. Nakilcioğlu-Taş and S. Ötleş, Polyphenols from olive stones: extraction with a pilot scale pressurized water extractor, microencapsulation by spray-dryer and storage stability evaluation. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(2), 849–861, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00333-y>.
- [13] S. L. Kosaraju, L. D'ath, and A. Lawrence, Preparation and characterisation of chitosan microspheres for antioxidant delivery. *Carbohydrate. Polymers*, 64(2), 163–167, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.11.027>.
- [14] S. L. Young, X. Sarda, and M. Rosenberg, Microencapsulating properties of whey proteins.1. Microencapsulation of anhydrous milk fat. *Journal of Dairy Science*, 76, 2868–2877, 1993. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77625-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77625-0).
- [15] E. M. Littringer, M. F. Noisternig, A. Mescher, H. Schroettner, P. Walzel, U. J. Griesser, and N. A. Urbanetz, The morphology and various densities of spray dried mannitol. *Powder Technology*, 246, 193–200, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.05.04>
- [16] R. L. Carr, Evaluating flow properties of solids. *Chemical Engineering*, 72, 163–168, 1965.
- [17] M. R. I. Shishir, F. S. Taip, N. A. Aziz, and R. A. Talib, Physical properties of spray-dried pink guava (*Psidium guajava*) powder. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, 74–81, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2014.11.011>.
- [18] Hausner H.H., Friction conditions in a mass of metal powder. *The International Journal of Powder Metallurgy*, 3(4), 7–13, 1967.
- [19] Y. Z. Cai and H. Corke, Production and properties of spray-dried *Amaranthus betacyanin* pigments. *Journal of Food Science*, 65(6), 1248–1252, 2000. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb10273.x>
- [20] R. V. B. Fernandes, S. V. Borges, and D. A. Botrel, Influence of spray drying operating conditions on microencapsulated rosemary essential oil properties. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 33(1), 171–178, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612013000500025>.
- [21] S. Jaya and H. Das, Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and tricalcium phosphate on vacuum dried mango powder properties. *Journal of Food Engineering*, 63(2), 125–134, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00135-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00135-3)

- [22] A. M. Goula and K. G. Adamopoulos, Effect of maltodextrin addition during spray drying of tomato pulp in dehumidified air: I. Drying kinetics and product recovery. *Drying Technology*, 26(6), 714–725, 2008. <https://doi.org/10.1080/07373930802046369>.
- [23] M. Koç, Ö. Güngör, A. Zungur, B. Yalçın, İ. Selek, F. Kaymak-Ertekin, and S. Ötles, Microencapsulation of extra virgin olive oil by spray drying: Effect of wall materials composition, process conditions, and emulsification method. *Food and Bioprocess Technology*, 8, 301–318, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1404-9>.
- [24] M. Fuchs, C. Turchiuli, M. Bohin, M. E. Cuvelier, C. Ordonnaud, M. N. Peyrat-Maillard, and E. Dumoulin, Encapsulation of oil in powder using spray drying and fluidised bed agglomeration. *Journal of Food Engineering*, 75(1), 27–35, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.047>
- [25] N. Jinapong, M. Suphantharika, and P. Jamnong, Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. *Journal of Food Engineering*, 84(2), 194–205, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.04.032>.
- [26] C. Saénz, S. Tapia, J. Chávez, and P. Robert, Microencapsulation by spray drying of bioactive compounds from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*). *Food Chemistry*, 114(2), 616–622, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.095>.
- [27] A. Luca, B. Cilek, V. Hasirci, S. Sahin, and G. Sumnu, Storage and baking stability of encapsulated sour cherry phenolic compounds prepared from micro- and nano-suspensions. *Food and Bioprocess Technology*, 7(1), 204–211, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1048-1>.
- [28] V. L. Singleton and J. A. Rossi, Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic- phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16, 144–153, 1965.
- [29] Y. Li, C. Guo, J. Yang, J. Wei, J. Xu, and S. Cheng, Evaluation of antioxidant properties of pomegranate peel extract in comparison with pomegranate pulp extract. *Food Chemistry*, 96(2), 254–260, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.02.033>.
- [30] D. Heimler, P. Vignolini, M. G. Dini, and A. Romani, Rapid tests to assess the antioxidant activity of *Phaseolus vulgaris* L. dry beans. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 53(8), 3053–3056, 2005. <https://doi.org/10.1021/jf049001r>.
- [31] L. Zhang and S. L. Kosaraju, Biopolymeric delivery system for controlled release of polyphenolic antioxidants. *European Polymer Journal*, 43(7), 2956–2966, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2007.04.033>.
- [32] K. Konecni, Analysis and entrapment of select antioxidants from chokecherry and saskatoon berry fruits. Master Thesis, The University of Saskatchewan, Saskatchewan, Canada, 2011.
- [33] W. Brand-Williams, M. E. Cuvelier, and C. Berset, Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Lebensmittel-Wissenschaft-und-Technologie*, 28, 25–30, 1995. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5).
- [34] C. Guo, J. Yang, J. Wei, Y. Li, J. Xu, and Y. Jiang, Antioxidant activities of peel, pulp and seed fractions of common fruits as determined by FRAP assay. *Nutrition Research*, 23(12), 1719–1726, 2003. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2003.08.005>.
- [35] J. Z. Xu, S. Y. V. Yeung, Q. Chang, Y. Huang, and Z.-Y. Chen, Comparison of antioxidant activity and bioavailability of tea epicatechins with their epimers. *British Journal of Nutrition*, 91(6), 873–881, 2004. <https://doi.org/10.1079/BJN20041132>.
- [36] S. Yerlikaya and H. Şen Arslan, Dondurularak ve püskürtülerek kurutulmuş süt tozlarının bazı mikrobiyolojik ve fizikokimyasal özelliklerinin karşılaştırılması. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 677–687, 2019.
- [37] İ. Tontul, F. Ergin, E. Eroğlu, A. Küçükçetin, and A. Topuz, Physical and microbiological properties of yoghurt powder produced by refractance window drying. *International Dairy Journal*, 85, 169–176, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.06.002>.
- [38] D. Yıldız Turgut and A. Bayır Yeğin, Kamkat tozunun fizikokimyasal özellikleri üzerine farklı kurutma uygulamalarının etkisi. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 23(4), 477–488, 2019. <https://doi.org/10.29050/harranziraat.569808>.
- [39] S. N. Dirim and G. Çalışkan, Determination of the effect of freeze drying process on the production of pumpkin (*Cucurbita moschata*) puree powder and the powder properties. *Gıda*, 37(4), 203–210, 2012.
- [40] E. Ergüney, Z. Gülsünoğlu, E. Fıratlıgil-Durmuş, and M. Kılıç-Akyılmaz, Karayemiş tozu fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi. *Akademik Gıda*, 13(2), 108–114, 2015.
- [41] S. Quispe-Condori, M. D. A. Saldaña, and F. Temelli, Microencapsulation of flax oil with zein using spray and freeze drying. *LWT - Food Science and Technology*, 44, 1880–1887, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.01.005>.
- [42] T. Laokuldilok and N. Kanha, Effects of processing conditions on powder properties of black glutinous rice (*Oryza sativa* L.) bran anthocyanins produced by spray drying and freeze drying. *LWT - Food Science and Technology*, 64(1), 405–411, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.015>.
- [43] G. Çalışkan, K. Ergün and S. N. Dirim, Freeze drying of kiwi (*Actinidia deliciosa*) puree and the powder properties. *Italian Journal of Food Science*, 27, 385–397, 2015. <https://doi.org/10.14674/1120-1770/ijfs.v282>.
- [44] İ. Türker, B. Koç, and H. İşleroğlu, Effect of spray-freeze drying process on physical properties of maltodextrin. *Gıda*, 43(2), 197–210, 2018. <https://doi.org/10.15237/gida.GD17101>.

- [45] L. Sturm, I. G. O. Črnivec, K. Istenič, A. Ota, P. Megušar, A. Slukan, M. Humar, S. Levic, V. Nedović, R. Kopinč, M. Deželak, A. P. Gonzales, and N. P. Ulrich, Encapsulation of non-dewaxed propolis by freeze-drying and spray-drying using gum Arabic, maltodextrin and inulin as coating materials. *Food and Bioproducts Processing*, 116, 196–211, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.05.008>.
- [46] H. Baykal, K. Karais, G. Çalışkan Koç, and S. N. Dirim, Tarçın, keçiboynuzu ve zencefil ile zenginleştirilerek üretilmiş keçi sütü tozlarının özellikleri. *Gıda*, 43(4), 716–732, 2018. <https://doi.org/10.15237/gida.gd18046>.
- [47] Y. R. R. S. Rezende, J. P. Nogueira, and N. Narain, Microencapsulation of extracts of bioactive compounds obtained from acerola (*Malpighia emarginata* DC) pulp and residue by spray and freeze drying: Chemical, morphological and chemometric characterization. *Food Chemistry*, 254(February), 281–291, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.026>.
- [48] I. P. Turkiewicz, A. Wojdyło, K. Tkacz, K. Lech, A. Michalska-Ciechanowska, and P. Nowicka, The influence of different carrier agents and drying techniques on physical and chemical characterization of Japanese quince (*Chaenomeles japonica*) microencapsulation powder. *Food Chemistry*, 323, 126830, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126830>.
- [49] S. H. Omar, P. G. Kerr, C. J. Scott, A. S. Hamlin, and H. K. Obied, Olive (*Olea europaea* L.) biophenols: a nutraceutical against oxidative stress in SH-SY5Y cells. *Molecules*, 22, 1–20, 2017. <https://doi.org/10.3390/molecules22111858>



Ekmeğin üretiminde ekşi maya üzerine taze meyvelerin kullanımının etkisi

The effect of the use of fresh fruits on sourdough in bread production

Bihter Yıldız¹ , Avni Çakıcı¹  Dilek Yaprak Uslu²  Hasan Uslu^{3,*} 

¹ İstanbul Aydın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Bölümü, 34295, İstanbul, Türkiye

² Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu, Ascılık Programı, 51240, Niğde Türkiye

³ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Özet

Bu çalışmada, eski zamanlardan beri bilinen ancak son yıllarda dünya da ve özellikle ülkemizde tüketicilerin bilinçlenmesi ile birlikte daha çok bilinir ve tüketilir hale gelen ekşi mayalı ekmeğin hakkında araştırmalar yapılmıştır. Gün geçtikçe artan doğal ve sağlıklı gıdaya olan tüketici taleplerini karşılayan ekşi maya ekmeği üretimi için çeşitli meyveler kullanılarak ekşi mayaların geliştirilmesi üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışma aynı yöntemlerle ancak farklı tercih kaynakları kullanılarak ekşitilmiş hamurlardan üretilen ekmeğin belirlenen özellikler yönünden karşılaştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla çalışmada tercih kaynağı olarak farklı ailelerde yer alan elma (Rosaceae) ve incir (Moraceae) meyveleri tercih edilmiştir. Ekşi maya hazırlık aşamasında geleneksel yöntemlerden türetilmiş dört aşamalı bir yol izlenmiş ve ekşi mayaların özelliklerinin belirlenmesinde pH, toplam titrasyon asitliği, laktik asit bakteri sayımı, küf ve maya sayımı analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen elma ve incir olmak üzere iki ayrı ekşi hamur farklı konsantrasyonlarda tam buğday unlu ekmeğin hamurlarına ilave edilmiştir. Türk Gıda Kodeksi Ekmeğin ve Ekmeğin çeşitleri Tebliğine uygun olarak üretilen Tam buğday unlu ekşi mayalı ekmeğin özelliklerinin belirlenmesinde ise ağırlık, pişme kaybı, spesifik hacim, kalite indeksi (en-boy-yükseklik), pH tayini, toplam titre edilebilir asitlik (%10.37 – 11.40), nem tayini (%35.50 – 35.53), su aktivitesi (aw) (0.944 – 0.941), ekmeğin içi ve kabuk renk analizi, tekstürel analizler ve duyu analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda ekşi maya ilavesinin hem duyu analizi hem de deneysel testler sonucunda ekmeğin tat ve aromasını geliştirdiği, ürünün kabuk ve iç rengi üzerinde etkili olduğu, nem kaybını azaltarak raf ömrü süresini uzattığı sonucuna varılabilmektedir.

Anahtar kelimeler: Ekşi maya, Ekmeğin, Meyve, Tam buğday unu, Hamur reolojisi

1 Giriş

İnsanoğlu tarafından işlenmiş ilk gıdalar arasında yer alan ekmeğin, dünyada en çok tüketilen gıda ürünlerinden biridir. Türk Gıda Kodeksi, tebliğ numarası 2012/2 olan Ekmeğin ve Ekmeğin Çeşitleri Tebliği'ne göre ekmeğin; "buğday ununa; su, tuz, maya (*Saccharomyces cerevisiae*) gerektiğinde şeker, enzimler, enzim kaynağı olarak malt unu, vital gluten ve izin verilen katkı maddeleri ilave edilip bu karışımın tekniğine uygun olarak yoğrulması, şekillendirilmesi, fermantasyona bırakılması ve pişirilmesi ile yapılan ürünü" olarak tanımlanmaktadır [1]. Diğer gıda ürünleri ile karşılaştırıldığında daha ucuz ve kolay sağlanabilir olması, besleyici ve doyurucu özellikleri gibi nedenlerle vazgeçilmez bir gıda maddesi olarak kabul edilmektedir.

Abstract

In this study, research has been conducted on sourdough breads that have been known since ancient times but have become more known and consumed in recent years with the awareness of consumers in the world and especially in our country. Studies have been carried out on the development of sourdough using various fruits for production of sourdough bread, which meets consumer demands for natural and healthy food, which is increasing day by day. This study was carried out in order to compare breads produced from sourdough with the same methods but using different preference sources in terms of specified properties. For this purpose, apple (Rosaceae) and fig (Moraceae) fruits in different families were preferred as the preferred source in this study. During the preparation phase of sourdough, a four-stage path derived from traditional methods was followed and pH, total titration acidity, lactic acid bacteria count, mold and yeast count analysis were performed to determine the properties of sourdough. Two different sourdough, apple and fig obtained, were added to whole flour bread doughs in different concentrations. In determining the properties of whole wheat flour sourdough breads produced in accordance with the Turkish Food Codex Bread and Bread Types Communique, weight, loss of baking, specific volume, quality index, pH, total titration acidity (10.37 – 11.40), humidity determination (%35.50 – 35.53), water activity (0.944 – 0.941), crumb and crust color analysis, texture analysis and sensory analysis were performed. As a result of the study, it can be concluded from both sensory and experimental tests that the addition of sourdough improves the taste and aroma of bread, has effect on the crust and inner color of the product, and increases the shelf lifetime by reducing moisture loss.

Keywords: Sourdough, Bread, Fruits, Whole wheat flour, Dough rheology

Ekmeğin oluşturan ana maddelerden birisi tahıllardır ve beslenme açısından tahıllar; diyet proteinleri, karbonhidratlar, kompleks E ve B vitaminleri, demir (hem olmayan), iz mineraller ve lif içeriği bakımından önemli kaynaklardır. Bu nedenle de tahıllar vücudun temel enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Diğer bir adı hububat olan ve dünya genelinde üretilen başlıca tahıl ürünleri arasında buğday (*Triticum*), pirinç (*Oryza sativa*), mısır (*Zea mays*), arpa (*Hordeum vulgare*), sorgum (*Sorghum*), yulaf (*Avena*), darı (*Panicum miliaceum*) ve çavdar (*Secale cereale*) yer almaktadır. Tahılların ekmeğin ve ekmeğinlik ürünleri üretimi başta olmak üzere gıda sanayide birçok kullanım alanı bulunmaktadır [2]. Tahıllar içerisinde ekmeğin üretiminde, kullanılabilenler sadece buğday ve çavdardır. Diğer tahıllarda ekmeğin hamurunun genişlemesinde ve elastikiyet özelliğini kazanmasında esas olan kompleks

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hasanuslu@gmail.com. (H. Uslu)

Geliş / Received: 22.06.2020 Kabul / Accepted: 04.09.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.756207

protein yapıdaki gluten (%8-14) maddesi yeterli miktarda bulunmamaktadır [3].

Gün geçtikçe artan kaliteli ve sağlıklı gıdaya olan tüketici talebi, duyuşsal ve besleyici özelliklere sahip ekmekler geliştirilmesi yönünde un ve unlu mamuller endüstrisini zorlamaktadır [4]. Genel itibari ile ekşi hamur kullanımı gibi geleneksel ekmek üretim süreçlerini taklit eden yeni teknolojiler, son yıllarda tüketicilerin doğal ve/veya temiz teknolojiye olan talepleri karşılamak için kullanılmaktadır [5, 6]. Ekşi hamur mayası, hamur ve ekmek hazırlamada starter kültür olarak kullanılan ve metabolik olarak aktif maya ve laktik asit bakterileri (LAB) içeren temel olarak bir un-su karışımıdır [7]. Hiçbir maya ilavesi olmadan kendi haline bırakılan hamur bir süre sonra değişime uğrayarak içinde gaz kabarcıkları oluşur, kendini salan hamur yumuşar ve kokusu değişir. Hamurda oluşan bu değişimlere içerisinde barındırdığı un ve suyun yanı sıra ortamda bulunan mikroorganizmalar sebep olmaktadır. Kendiliğinden fermente olan ve ekşimsi bir tada sahip olan bu hamurlara “ekşi hamur” veya “ekşi maya” denilmektedir [8]. Ekşi hamur, ekmeğin besleyici değerini, duyuşsal özelliklerini ve raf ömrünü geliştirmek için binlerce yıldır kullanılan geleneksel bir üründür.

Ekşi hamurun temelinde tahıl fermantasyonu vardır. Tahıl fermantasyonu besinsel kaliteyi ve dolayısıyla da gıdaların sağlık üzerindeki etkilerini geliştirdiğinden ötürü önemli bir potansiyele sahiptir [9]. Buğday ve çavdar, ekşi maya yapımında en çok kullanılan tahıllardır. Maya fermantasyonu sırasında asit üretimi, amilazlar ve proteazlar gibi enzimlerin aktivitelerini arttırmaktadırlar. Ekşi mayadaki kimyasal ve mikrobiyal değişiklikler un cinsine, su miktarına, sıcaklığa, zamana, starter türüne ve miktarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir [10]. Bu açıdan ekşi maya, ekmeğin duyuşsal özelliklerinin ve raf ömrünün arttırılması için kullanılan temel yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Ekşi maya fermantasyonu, mineral alımının arttırılması, biyoaktif bileşiklerin içeriğinin iyileştirilmesi ve nişastanın sindirilebilirliğini geciktirmek gibi ekmeğin beslenme kalitesini de çeşitli şekillerde değiştirebilmektedir [11]. Ekşi hamur mayası kullanılarak yapılan ekmek üretimi, kontrol edilmesi gereken çeşitli parametrelere dayanan çok hassas bir yöntemdir. Bunlardan en önemlisi fermantasyonun pH değeri, fermantasyon sıcaklığı ve spesifik ve arzu edilen özelliklere sahip bir starter kültürün seçilmesidir. Bu amaçla, *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus reuteri* ve *Lactobacillus casei*, *Lactococcus*, gibi laktik asit bakterileri ile *Candida* gibi mayalar ekşi mayalı ekmek üretiminde genellikle geleneksel ekmek mayası olarak da bilinen *Saccharomyces cerevisiae* ile birleştirilen çeşitli starter kültürler kullanılmaktadır [12].

Fermente gıda üretiminde, fermantasyon işleminden sorumlu olan mikroorganizmaların kaynakları değişiklik gösterebilmektedir. Ekşi maya hamurlarında starter kültür olarak kullanılabilir maya ve laktik asit bakteri türlerinin çeşitliliği çok geniştir. Bu mikroorganizmaların bilinen üstünlükleri göz önüne alındığında, starter kültürün ilk kaynağı başlangıçtaki organizmaların bir hamur sistemi içerisinde fonksiyonu üzerinde büyük bir etkiye sahip

olabilmektedir [13]. Ekmek üretimi için çoğu ekşi maya kültürü, tahıllar, hububatlar veya un ile ilişkili kaynaklardan elde edilmektedir. Bununla birlikte, sadece küçük bir kısım ekşi maya kültürünü taze ve/veya kuru meyve, ve sebzeler, yoğurt, kefir, vb. kaynaklardan elde edilmektedir [13]. Elma, üzüm, şeftali ve diğer yüksek şeker oranına sahip meyvelerden elde edilen maya ve laktik asit bakterisi suşlarının, tahıllarla ilişkili olanlardan farklılık gösterdiği yapılan çalışmalarla ortaya koyulmuştur. Yapılan önceki araştırmalar, meyve kaynaklarından elde edilen kültürlerle yapılan ekşi mayalı ekmeklerin, tahıllardan elde edilmiş kültürlerle yapılan ekmeklere göre daha az ekşi olduğunu göstermiştir [14].

Bu çalışma da geleneksel yöntemlerden farklı olarak elma, incir gibi çeşitli taze meyveler kullanılarak ekşi mayalar elde etmek ve elde edilen ekşi mayaların ekmek üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

2 Materyal ve metod

2.1 Materyal

Yapılan bu çalışmada materyal olarak piyasadan temin edilen buğday unu (Tip 750) (%0.75 kül, %10.5 protein ve %14.5 nem), tam buğday unu (%1.2 kül, %11 protein ve %14.5 nem), buğday unu (%60 kül, %12 protein ve %14.5 nem), yaş maya, tuz, içme suyu, katkı maddesi olarak %85 enkapsüle edilmiş sorbik asit ve Trabzon ilinin Maçka ilçesi başta olmak üzere yerel bahçelerden temin edilen taze meyveler hammadde olarak kullanılmıştır.

2.2 Ekşi maya hamuru

Ekşi maya uygulaması Türk Gıda Kodeksi (TGK) Ekmek ve Ekmek çeşitleri tebliğinde (Tebliğ no: 2012/2) belirtilen “Ekşi” tanımına göre yapılmıştır. Ekşi maya hamurunun hazırlık aşamasında substrat olarak taze meyveler tercih edilmiştir. Organik olarak nitelendirilen kimyasal ziraat ilaçlarla muamele edilmemiş elma ve olgunlaşmış incir meyveleri bu çalışmada kullanılmıştır. Seçilen meyve numuneleri (M) işlem için uygun hale getirildikten sonra başlangıç olarak 1:1 oranında su ilave edilerek 4 gün 28 °C’de bekletilmiş ve bu şekilde fermente olabilmesi için sağlanmıştır. 4. günün sonunda fermantasyon işlemi tamamlayan numunelerden fermente meyve suları (MI) elde edilmiş ve elde edilen bu fermente meyve suları ekşi hamur mayasının hazırlanmasında başlangıç kültürü olarak kullanılmıştır. Ekşi mayanın hazırlık aşamasında geleneksel prosedürlerden yararlanılarak dört aşamalı bir yöntem tercih edilmiştir. Birinci aşamada 2:1 oranında fermente meyve suları ve buğday unu ile karıştırılarak sıvı formda bir hamur (HI) elde edilmiştir. Hamur verimi (HV) 300’ü elde edebilmek için 28 °C’de 24 saat fermantasyon kabininde inkübasyona bırakılmıştır ve inkübasyon işleminden sonra fermente ekşi hamur (EH-I) elde edilmiştir. İkinci aşamada 0.500 kg EH-I, 0.500 kg ekmeklik buğday unu (1:1 oranında) ve 0.300 kg çeşme suyu ile karıştırılarak katı formda bir hamur (H-II) elde edilmiştir. Pişirme sonucunda elde edilen fırın kurusu hamur miktarının pişirme başlangıcında kazana giren fırın kurusu odun miktarına oranı olarak bilinen hamur verimi (HV) 200’ü elde edebilmek için 28 °C’de 24 saat fermantasyon kabininde inkübasyona bırakılmıştır ve

inkübasyon işleminden sonra fermente ekşi hamur (EH-II) elde edilmiştir. Bu işlemden sonra iki kere daha aynı işlemler uygulanmış ve son basamakta fermente ekşi hamur (EH-IV) elde edilmiş ve ekmeğin yapımında kullanılabilir hale getirilmiştir.

2.2.1 Hamur ve ekşi maya hamurlarında yapılan analizler

Yapılan çalışmalar göz önüne alınarak ekşi maya hamurlarının oluşumları için yeterli inkübasyon süresini belirlemek için 28 °C'de 24 saatlik periyotlar ile beslemeler yapılmıştır ve her aşamada pH ve toplam titre edilebilir asitlik (TTA) analizleri yapılmıştır. Ekşi mayalı ekmeğin yapımında kullanılacak olan son basamakta elde edilen EH-IV ekşi mayalarında hücre sayımı analizi yapılmıştır

2.2.2 . pH ve toplam titrasyon asitliği (TTA)

Hamur ve ekşi maya hamur örneklerinde pH analizi AOAC Metod no 981.12'ye göre yapılmıştır [15]. Örnekler 1/10 oranında saf su ile seyreltilmiş ve manyetik karıştırıcıda (Mtops MS300 HS, Kore) homojenize edilerek pH metre (Testo 205, İstanbul, Türkiye) ile değerler okunmuştur.

Toplam titre edilebilir asitlik (TTA) analizi AACC Metod no 02-31'e göre yapılmıştır [16]. Örnekler 1/11 oranında saf su ile seyreltilmiş ve homojenize edilerek, 0.1 N (0.1 M) NaOH çözeltisi ile pH 8.5 ± 0.1'e ulaşıncaya kadar titre edilmiştir. Titrasyon işlemi harcanan çözelti miktarı bütenden okunmuştur ve laktik asit cinsinden hesaplanmıştır [17].

2.2.3 Maya, küf ve laktik asit bakterisi (LAB) sayımı

Maya ve küf sayımı, FDA BAM Bölüm 18 Metodu uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Aseptik koşullarda analiz örneklerinden 25 gr numuneler tartılmış, 225 mL'lik %1'lik (w/v) pepton çözeltisi kullanılarak 2 dakika homojenize edilmiştir. Elde edilen homojenattan %1'lik peptonlu su ile ardışık seyreltiler hazırlanmıştır. İligi metoda uygun olarak DRBC Agar üzerine yayma yöntemi uygulanarak ekimler iki paralel olarak yapılmıştır. Ekim işlemi yapılan besiyerleri küf ve maya gelişimi için 25 °C'de 5 gün inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon işlemi sonucunda gelişme görülen ve sayım aralığında bulunan besiyerlerinde toplam maya ve küf sayısı hesaplanmıştır [18].

Laktik asit bakterisi sayımı ISO 15214 yöntemine göre yapılmıştır. Aseptik koşullarda analiz örneklerinden 25 g numuneler tartılıp, 225 ml'lik tamponlanmış peptonlu su çözeltisi kullanılarak analiz örnekleri 2 dakika homojenize edilmiştir. Elde edilen homojenattan %1'lik peptonlu su ile ardışık seyreltiler hazırlanmıştır. Bu standarda göre pH değeri 5.7'ye ayarlanan MRS Agar besiyeri kullanılmıştır. Dökme yöntemi kullanılarak, bakteri ekimleri iki paralel olarak yapılmıştır. Ekim yapılan besiyerleri LAB gelişimi için 30 °C'de 72 saat inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon işlemi sonucunda gelişme görülen ve sayım aralığında bulunan besiyerlerinde toplam LAB sayısı hesaplanmıştır [19].

2.3 Tam buğday unlu ekmeğin üretimi

Türk Gıda Kodeksi (TGK) Ekmeğin ve Ekmeğin çeşitleri tebliğinde (Tebliğ no: 2012/2) belirtilen "Tam buğday unlu ekmeğin" ve "Ekşi mayalı ekmeğin" tanımlarına uygun olarak

ekmeğin örnekleri hazırlanmıştır. Ekşi mayalı ekmeğin örneklerinde yukarıda belirtilen ve çeşitli taze meyvelerden elde edilen ekşi mayalar un ağırlığı dikkate alınarak %10, %20 ve %30 oranlarında ekmeğin hamurlarına ilave edilmiştir.

Referans olarak değerlendireceğimiz tam buğday unlu kontrol ekmeği hazırlanırken; tam buğday unu (%60), buğday unu (%40), su (%65), ticari yaş maya (%2.5), tuz (%1.5), gluten (%1) reçete hazırlanmıştır. Tüm formüllerde her bir ekmeğin numunesi için belirlenen miktarlarda un, su, ticari yaş maya, tuz, ekşi hamur ve diğer malzemelerden oluşan karışımlar hazırlanmıştır. Tanımlanan formülasyon ile hazırlanan ekmeğin numunelerine Şekil 1'de belirtilen proses uygulanmıştır.

Buna göre hazırlanan karışımlar, Şekil 1.'de gösterildiği gibi ortalama 8 dakika belirlenen hız ve devirde spiral uçlu mikser yardımı ile yoğurulmuştur. Yoğurma işleminden sonra ekmeğin hamurları oda sıcaklığında 10 dakika kitle fermantasyonu (1. fermantasyon) ile dinlenmeye bırakılmıştır. Dinlendirilen hamurlar şekil verilme işleminden sonra porsiyonlanmış ve teflon tavalara alınmıştır. Bu işlemden sonra 38 °C'de %80 RH'de belirlenen sürelerde fermantasyon (2. fermantasyon) işlemi uygulanmıştır. Fermantasyon işleminden sonra 180 mL buhar ve 220 °C'de 35 dakika ekmeğin pişirilmesi. Pişirme işlemi tamamlayan ekmeğin 2 saat oda sıcaklığında soğutulduktan ve dilimlendikten sonra polipropilen ambalajlara konularak 7 gün boyunca oda sıcaklığında depolanmıştır

2.3.1 Tam buğday unlu ekmeğin uygulanması

Tam buğday unlu ekmeğin kalite karakteristiklerini belirlemek için pişirme kaybı (%), spesifik hacim (mL/g), pH, toplam titrasyon asitliği (TTA), nem içeriği (%), su aktivitesi (aw), tekstür profil analizi (TPA), renk analizi (L*,b*, a*) ve duyu analizleri gibi fiziksel ve kimyasal analizler yapılmıştır.

2.3.2 . Pişirme kaybı (%) ve spesifik hacim (mL/g)

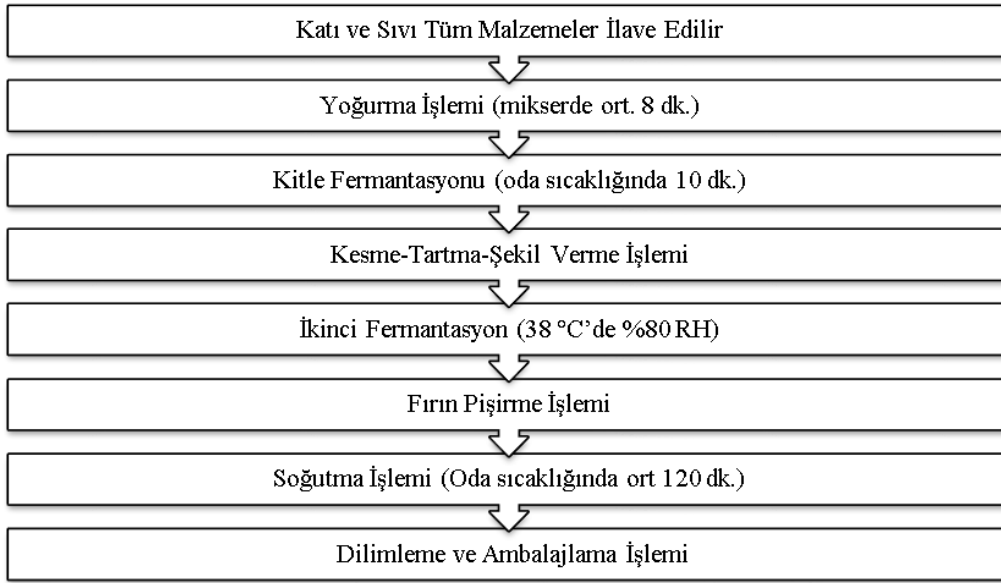
Pişirme kaybı (%), ekmeğin fırından çıktıktan ve soğuduktan sonraki ağırlığı ile başlangıçta kullanılan hamur ağırlığı arasındaki fark belirlenerek hesaplanmıştır [20].

Ekmeğin numunelerinin spesifik hacimleri pişirme işlemi tamamlandıktan 120 dk sonra ölçülmüştür. Her bir ekmeğin hacmi kolza tohumu ile yer değiştirme esasına dikkate alınarak belirlenmiştir (AACC Method no 10-05.01). Spesifik hacim (mL/g); hacim değeri ağırlığa bölünmek suretiyle elde edilmiştir [21].

2.3.3 . pH ve toplam titrasyon asitliği (TTA)

Ekmeğin örneklerinde pH analizi AOAC Metod no 981.12'ye göre yapılmıştır [15]. Örnekler 1/10 oranında saf su ile seyreltilmiş ve homojenize edilerek pH metre ile değerler okunmuştur.

Toplam titre edilebilir asitlik (TTA) analizi AACC Metod no 02-31'e göre yapılmıştır [16]. Örnekler 1/11 oranında saf su ile seyreltilmiş ve homojenize edilerek, 0.1 N (0.1 M) NaOH çözeltisi ile pH 8.5 ± 0.1'e ulaşıncaya kadar titre edilmiştir. Titrasyon işlemi harcanan çözelti miktarı bütenden okunmuştur [17].



Şekil 1. Tam buğday unlu ekmeklerin (kontrol ekmeği) yapımında uygulanan işlem basamakları.

2.3.4 Nem içeriği (%) ve su aktivitesi (aw)

Ekmek numunelerinin nem içeriği (%) nem analiz cihazı (Precisa XM 60 – HR, Dietikon, İsviçre), su aktivitesi ölçüm cihazı ve su aktivitesi (aw) (Novasina LabMaster-aw manual, Lachen, İsviçre) değerleri gravimetrik yöntemlerle tespit edilmiştir. Yapılan nem ve su aktivitesi analizleri depolama süresinin 1., 3., 5. ve 7. günlerinde tekrar edilmiş ve bu günler dikkate alınarak hesaplanmıştır

2.3.5 Renk analizi

Minolta Cr – 300 (Konica Minolta, Japonya) renk ölçer cihazı kullanılarak örneklerin kabuk rengi ve ekmek iç rengi iki paralelli ve dört farklı noktadan alınan sonuçlar doğrultusunda Hunter skalasında ölçümler yapılmıştır. Tam buğday unlu ekmeklerin renk yoğunluğunun ölçülmesi ve sonuçların değerlendirilmesinde, uluslararası aydınlatma komisyonunun (CIE LAB: Commission Internationale de l'Eclairage) belirtmiş olduğu formül dikkate alınmıştır [21].

2.3.6 Sertlik analizi

Ekmekler pişirme işleminden ve ortalama 120 dk oda sıcaklığında soğutulduktan sonra 1.2-1.3 cm kalınlığında dilimlenmiştir. Dilimlenen ekmek numuneleri 12 saat sonra değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Ekmek numunelerinin iç yumuşaklık değerleri tekstür analizörü TA-XT Plus cihazında 36 mm (model P/36R) çapında bir silindir prob kullanılarak AACC Metod no 74-09.01'e göre belirlenmiştir. Ekmek numunelerinin iç doku özelliklerinin belirlenmesinde Sertlik Analizi yöntemi uygulanmıştır. Tekstür analiz cihazının test parametreleri ise ön test hızı 1 mm/sn, test hızı 1.7 mm/sn, son test hızı 10 mm/sn ve batma derinliği (strain) %40 olarak ayarlanmıştır. Sertlik yöntemi ile ekmek numunelerinin sertlik, özellikleri belirlenmiştir.

2.3.7 Duyusal analiz

Ekşi maya ve ekmek mayası kullanılarak üretilen tam buğday unlu ekmeklerin duyusal olarak kabul edilebilirliğini

belirlemek amacıyla eğitilmiş 10 panelistin katılımıyla sıralama testi yapılmıştır. Panelistlerden her ekmek örneği için tat, aroma, koku, görünüş, kabuk rengi, ekmek içi rengi, gözenek yapısı, ağızda bıraktığı his/çiğnenebilirlik, tekstür ve genel beğeni tercihlerini 1 (en az veya en açık) ile 10 (en çok veya en koyu) arasında sıralamaları istenmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Ekşi maya hamurunun hazırlanması

Ekşi maya için asidik özellik gösteren taze meyveler tercih edilmiştir. Tercih kaynağına göre pH ve TTA değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Tercih edilen meyvelerin 1. gün pH ve TTA değerleri sırasıyla 3.86-4.15 ve 2.90-5.40 arasında bulunmuştur. Asidik pH ortamına sahip elma (E) en düşük asitlik değerine sahiptir. Tercih edilen meyvelerin kendiliğinden fermantasyonu sonucunda pH ve TTA değerleri sırasıyla 3.69 (E) ile 3.75 (E) ve 2.55 ml (E) ile 4.90 ml (I) arasında bulunmuştur. Yapılan çalışma sonucunda tercih kökeninin istatistiksel olarak TTA üzerinde önemli farklılıklara neden olduğu tespit edilirken, pH değerleri üzerinde ise etki göstermediği görülmüştür. Elde ettiğimiz sonuçlara göre, farklı kaynaklardan elde edilen ekşi mayalar arasında asitliği en yüksek incirden elde edilen ekşi maya, en düşük ise elmadan elde edilen ekşi mayadır. Kullandığımız ekşi mayaların analiz sonuçları literatür ile karşılaştırıldığında sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Yapılan bir çalışmada heterofermentatif laktik asit bakterisi Lactobacillus plantarum FST 1.7 kullanılarak çeşitli un türlerinden ekşi mayalar üretmişler, çalışma sonucunda pH ve TTA (%LA) değerlerini sırasıyla 3.6-4.4 ve 0.43-3.18 arasında olduğunu bildirmişlerdir [22].

Tercih kaynağına göre ekşi maya örneklerinde laktik asit bakterisi, küf ve maya sayısı belirlenmiştir. Örneklerde yapılan mikrobiyolojik analizlerin sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Meyvelerin doğal fermentasyonu sonucu oluşan pH ve TTA değerleri.

Tercih Kaynağı	pH		TTA (ml)	
	1.Gün	4.Gün	1.Gün	4.Gün
Elma (E)	3.86±0.08	3.69±0.11	2.90±0.10	2.55±0.20
İncir (I)	4.15±0.11	3.75±0.12	5.40±0.13	4.90±0.09

En yüksek hücre sayısına elma kökenli ekşi hamur örneklerinde, en düşük hücre sayısı ise incir kökenli ekşi hamur örneklerinde bulunmuştur. Mayaların, laktik asit bakterilerine oranı 1:10 ile 1:100 arasında değişmektedir [23]. Yapılan diğer çalışmalar incelendiğinde; bu tür ürünler için standart olarak maya hücrelerini 5.03 ila 8.61 cfu/g arasında değişen konsantrasyonlarda olduğunu belirtmiştir [24]. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde elma (E) ile hazırlanan ekşi mayaların literatür ile daha uyumlu olduğu görülmüştür. Ortaya çıkan bu farklılıklar her bir çalışmada kullanılan tercih kaynağına, un tipine, fermantasyon işlemi vb. gibi süreçlerin farklı olmasından ileri gelebilmektedir.

3.2 Tam buğday unlu ekmeklerin özellikleri

3.2.1 Pişirme kaybı (%) ve spesifik hacim (mL/g)

Tam Buğday Unlu Ekmeklerde pişirme kaybı ve spesifik hacim sonuçları Tablo 3'de verilmiştir. Ekşi mayalı ekmecek numunelerinde pişirme sırasındaki nem kaybı %12.03 (I-10) ile %14.56 (I-20) arasında değişmektedir. Kontrol ekmeğinde ise bu değer %12.19'dur. Ekmecek yapımında kullanılan ekşi mayaların ilave edilme miktarları ve substrat türleri ağırlık kaybında önemli değişikliklere yol açmamıştır. Yapılan bir çalışmada araştırmacılar, heterofermentatif laktik asit bakterisi olan *Lactobacillus plantarum* FST 1.7 kullanarak fermente edilen ekşi mayaların glutensiz ekmeklerde pişirme kaybı üzerindeki etkisini araştırmış ve araştırma sonucunda pişirme kaybında önemli bir azalma gözlemlenmediğini bildirmişlerdir [22].

Ekşi mayalı ekmecek numunelerinde spesifik hacim 2.51 (mL/g) ile 3.50 (mL/g) değerleri arasında değişirken en yüksek spesifik hacim değeri ise 3.91 (mL/g) ile kontrol ekmeğinden elde edilmiştir. Bu durum, ekşi maya miktarının spesifik hacimde önemli olduğunu ve aralarında ters orantı olduğunu göstermektedir. Ekmecek hacminin, ekmeğın iç yapısının, lezzetin, besin değerlerinin ve raf ömrünün iyileştirilmesi de dahil olmak üzere ekmecek üretiminde ekşi maya ilavesinin olumlu etkileri konusunda önemli bir fikir birliği bulunmaktadır [25]. Buna rağmen, ekmecek hamuruna ekşi maya ilavesinin, ekşi hamurun miktarına, proteolitik aktivitesine ve asitleştirici özelliklerine bağlı olarak spesifik hacimde azalmaya neden olduğunu belirten çalışmalarda bulunmaktadır [26].

3.2.2 Renk analizi (L, a, b)

Ekmecek rengi, genel olarak bakıldığında kullanılan hammadde bileşenlerinden ve pişirme koşullarından etkilenmektedir [27]. Kontrol ekmeğın örneğı, ekşi mayalı ekmecek örneklerinden daha açık ekmecek içi ve ekmecek kabuk rengine sahip olduğu görülmüştür. Ekmecek kabuk rengi değerlendirildiğinde; 29.46 ile en düşük L* (açıklık-

koyuluk) değeri I-30 örneğinden elde edilirken 40.29 ile en yüksek L* (açıklık-koyuluk) değeri ise I-10 örneğinden elde edilmiştir. Kontrol ekmeğında (K) ise bu değer 49.09 olarak bulunmuştur. Kabuk renginde en etkili faktör a* (kırmızılık-yeşillik) değeri olup, kontrol ekmeğın a* değeri ise 16.28 olarak bulunmuştur. Ekşi mayalı ekmeklerin kabuktaki a*(kırmızılık-yeşillik) değeri 8.26 ile en düşük E-10 örneğinden elde edilirken 16.32 ile en yüksek I-30 örneğinden elde edilmiştir. Farklı ekşi maya konsantrasyonları ile hazırlanan ekmecek örneklerinde b* (sarı-mavilik) değeri ise 10.67 ile 22.79 değerleri arasında olup kontrol ekmeğının b* (sarılık-mavilik) değeri 28.68 olarak bulunmuştur.

Üretilen ekmeklerin iç rengi açısından etkili parametreler L* (açıklık-koyuluk) ve b* (sarılık-mavilik) değerleridir [28]. Ekmecek içi rengi değerlendirildiğinde; 62.19 ile en düşük L* (parlaklık) değeri E-30 örneğinden elde edilirken 65.85 ile en yüksek L* değeri E-10 örneğinden elde edilmiştir. Kontrol ekmeğında (K) ise bu değer 66.07 olarak bulunmuştur. L* değerinin yüksek olması ekmecek içi renginin açık olduğunu belirtmektedir [21]. Ekşi mayalı ekmeklerde diğer etkili faktör olan b* (sarılık-mavilik) ise 21.04 ile 22.15 değerleri arasında olup kontrol ekmeğının b* (sarılık-mavilik) değeri ise 21.68 olarak bulunmuştur. Tercih kaynağına göre ekşi mayalı ekmeklerin iç renk; L* (açıklık) değerleri arasında en yüksek (en açık) 64.68 ile elmadan elde edilirken, a* (kırmızılık) ve b* (sarılık) değerleri arasında en yüksek 8.30 ile 21.80 ile incirden elde edilmiştir. Konsantrasyon bakımından en yüksek L*(parlaklık) ve b* (sarılık) değerine %10 oranlarında görülürken, en yüksek a* (kırmızılık) değerine %30 oranlarında ilave edilen ekmeklerde görülmüştür.

Ekmecek kabuğunda ise L* (parlaklık) ve b* (sarılık) değerleri sırasıyla 35.20 ve 17.54 ile incirden, a* ((kırmızılık-yeşillik) değeri ise en yüksek 13.25 ile incirden elde edilmiştir. Konsantrasyon bakımından ekmecek kabukları en yüksek L* (parlaklık) ve b* (sarılık) değerine %10 oranlarında, a* (kırmızılık) değerine ise %30 oranlarında hazırlanan ekmeklerde görülmüştür. Kontrol ekmeğı ise hem tercih kaynağı hem de konsantrasyon bakımından değerlendirildiğinde L* (parlaklık) değeri açısından en açık renge sahip ekmecektir.

Yapılan bu çalışmada genel olarak, tam buğday unlu ekmecek örneklerinde farklı konsantrasyonlarda ekşi maya kullanımı ekmeklerin L* (açıklık-koyuluk) ve b* (sarılık-mavilik) değerini düşürürken, a* (kırmızılık-yeşillik) değerinin ise artmasına neden olduğu görülmüştür. Bu durum kontrol ekmeğına göre daha koyu ekmecek rengine sahip ürünler elde edilmesini sağlamıştır.

Tablo 2. Ekşi maya örneklerinde mikrobiyolojik analiz sonuçları.

Mikrobiyolojik Analizler	Tercih Kaynağı	
	Elma (E)	İncir (I)
Küf (kob/g)	<10	<10
Maya (kob/g)	4.2×10^6	6.8×10^5
Laktik Asit Bakterisi (kob/g)	6.3×10^8	1.3×10^9

3.2.3 Nem içeriği (%) ve su aktivitesi (aw)

Yapılan bu çalışmada ekmekler polipropilen ambalajlara konmuş ve 7 gün boyunca oda sıcaklığında muhafaza edilmiştir. Analizler ise depolamanın 1., 3., 5. ve 7. gününde yapılmıştır. Ekşi mayalı ekmek numunelerinin depolama süresinin ilk güne ait nem içeriği %35.14 (I-20) ile %37.18 (I-10) değerleri arasında değişirken, depolama süresinin son günü olan 7.gün üzerindeki etkisi ise %34.65 (I-20) ile %35.59 (E-10) değerleri arasında değişmektedir. Yapılan analizler sonucunda maya ilavesinin ekmeğin nem içeriğini düşürdüğü sonucuna varılabilmektedir. Taze halde genellikle kuru, gevrek ve kolay kırılabilir yapıya sahip olan kabuk, ekmek içinden nemi çekerek yumuşak bir doku oluşması ile karakterize edilirken, bunun aksine ekmek içi ise nem kaybederek doku sertleşmesi ile karakterize edilmektedir. Nem içeriği bayatlamamanın bir göstergesidir. Ekmek bayatladıkça nem kaybeder, iç yapı daha sert ve kolay parçalanabilir bir hal almaktadır [29].

Tablo 5 'te verildiği gibi farklı kaynaklardan ve konsantrasyonlarda üretilen, oda sıcaklığında 7 gün süreyle muhafaza edilen ekmek numunelerine ait su aktivitesi (aw) değerleri değerlendirmeye alınmıştır. Tercih kaynağı göz önüne alındığında ekşi mayalı ekmeklerde ilk gün ve depolama süresinin son günü arasındaki fark dikkate alındığında en yüksek aw değerini incir (I) meyvesi katkılı ekmekler göstermiştir. Maya konsantrasyonu göz önüne alındığında ise en yüksek aw değeri %10 konsantrasyonlu ekşi mayalarda görülmüştür. Depolama süresi değişkenine bağlı olarak tam buğday unlu ekmek örneklerinin su aktivitesi (aw) değerlerinin karşılaştırılmıştır ve buna göre muhafaza süresinin 1. gününde 0.943 olan aw değeri, muhafaza süresinin son günü olan 7. günün sonunda 0.939'a düşmüştür. Elde edilen veriler dikkate alındığında süre arttıkça tam buğday unlu ekmeklerin aw değerleri azalmaktadır. Yapılan bu çalışmada ekşi maya yapımında tercih edilen kaynak ve muhafaza süresi nem değerlerinde olduğu gibi ekmek numunelerinin su aktivitesi (aw) değerleri üzerinde de etkili olmuştur. Literatür kaynaklarında, ekşi mayanın su aktivitesi üzerindeki etkisi çelişkili açıklamalar bulunmaktadır. Yapılan bir çalışmada, yaygın olarak tuz olarak adlandırılan sodyum klorür (NaCl) kullanımı ile su aktivitesi arasındaki etkileşim üzerine çalışmalar yürütülmüş ve higroskopik doğası ile iyi bilinmekte olan NaCl'nin su aktivitesini etkilediğini bildirmişlerdir. Farklı NaCl konsantrasyonları ile kombinasyonlar halinde hazırlanan ekşi maya ekmekleri, sadece NaCl ile hazırlanan kontrol ekmekleri ile kıyaslandığında biraz daha düşük seviyelerde aw değerleri gösterdiklerini belirtmişlerdir [30]. Yapılan bir diğer çalışmada ise kontrol ekmekleri ile maya ve laktik asit bakterilerinin su aktivitesi üzerine araştırmalar yapılmış ve

araştırma sonucunda maya ve laktik asit bakterilerinin metabolik faaliyetlerinin su tutma üzerindeki etkisi göz önüne alındığında kontrol ekmeklerine göre daha yüksek aw değerleri gösterdiklerini bildirmişlerdir [31].

3.2.4 pH ve toplam titrasyon asitliği (TTA)

Tam buğday unlu kontrol ve ekşi mayalı ekmek numunelerinin pH ve TTA değerleri Tablo 6' de verilmiştir. Örneklerin muhafaza süresinin 1. gününe ait pH değerleri 4.22 (I-30) ile 5.46 (K) arasındayken, muhafaza süresinin son günü olan 7. gününe ait pH değerleri ise 4.27 (I-30) ile 5.56 (K) arasında bulunmuştur. Ekşi hamur yapımında tercih edilen kaynak ve kullanım oranı, tam buğday unlu kontrol ve ekşi mayalı ekmek numunelerinin pH değerlerini önemli ölçüde etkilemediği görülmüştür. Kontrol örneği ile kıyaslandığında ekşi maya konsantrasyonu arttıkça pH değeri düşmektedir. Buna göre 5.52 ile kontrol ekmeği en yüksek pH değerine sahipken, artan ekşi maya konsantrasyonu ile 4.27 ile %30 konsantrasyonlarda hazırlanan örnekler en düşük pH değerini göstermiştir. Muhafaza süresi içerisinde kontrol ve ekşi maya ekmek örneklerinin pH değerlerinde küçük bir artış gözlemlense bile ekşi maya tercih kaynağı ve konsantrasyon üzerinde sürenin önemli bir etkisi gözlemlenmemiştir.

Yapılan bu çalışmada, elma kaynaklı ekşi maya ekmekleri, incir kaynaklarından elde edilen ekmeklere göre farklılıklar göstermektedir. Aynı ekşi maya konsantrasyonu ile üretilen ekmek örneklerinin pH değerleri tercih kaynağına ve konsantrasyonlarına göre farklılıklar göstermektedir. Yapılan bir çalışmada, pişirme sırasında (220 0C) mayalar ve laktik asit bakterilerinin inaktivasyona uğraması ile depolama sırasında pH değerinin değişmediğini bildirmişlerdir [31]. Tam buğday unlu ekşi maya ve ekmek mayası ile üretilen ekmeklerin toplam titre edilebilir asitlik (TTA) analiz verileri Tablo 6'da verilmiştir. Depolama süresinin 1. gününde örneklerin TTA değerleri 5.90 mL (K) ile 14.00 mL (I-30) arasında, 7. gününde ise 5.30 mL (K) ile 13.80 mL (I-30) değerleri arasında bulunmuştur. Buna göre ekşi mayalı ekmeklerde depolama süresinin sonunda TTA değeri, tercih kaynağı bakımından 10.37 ml (E) ile 11.40 mL (I) arasında olurken, maya konsantrasyonu açısından ise 7.77 mL (%10) ile 13.17 mL (%30) arasında değerler bulunmuştur. Ekmek mayası ile üretilen kontrol ekmeğinin TTA değeri ise 5.30 mL olarak bulunmuştur. Bir kıyaslama yapıldığında kontrol ekmeğinin TTA değeri ekşi mayalı ekmeklere göre daha düşük olduğu görülmüştür. Yapılan bu çalışmada, ekşi maya ve kontrol ekmeklerinin asitlenme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla pH ve toplam titre edilebilir asitlik (TTA) değerleri ölçülmüştür.

Tablo 3. Ekmek örneklerinde pişirme kaybı(%) ve spesifik hacim (mL/g) analiz sonuçları.

Tercih Kaynağı	Pişirme Kaybı (%)				Spesifik Hacim (ml/gr)			
	%0	%10	%20	%30	%0	%10	%20	%30
Kontrol (K)	12.19±0.23	-	-	-	3.91±0.05	-	-	-
Elma	-	14.30±0.53	13.82±0.53	12.83±0.35	-	3.50±0.30	3.31±0.31	2.89±0.13
İncir	-	12.03±0.55	14.56±0.70	14.05±1.68	-	3.39±0.19	3.11±0.07	2.51±0.26

Tablo 4. Ekmek örneklerinde ekmek içi ve ekmek kabuk renk değerleri.

Tercih Kaynağı	Ekmek İçi			Ekmek Kabuğu		
	L *	a *	b *	L *	a *	b *
Kontrol (K)	66.07±0.93	8.16±0.14	21.68±1.55	49.09±2.43	16.28±0.29	28.68±2.31
Elma (E)						
E-10	65.85±0.92	7.89±0.17	21.94±1.54	34.51±1.50	8.26±0.15	17.36±2.02
E-20	64.17±1.69	8.16±0.39	21.52±1.05	32.05±2.15	10.18±0.63	13.20±1.31
E-30	64.01±0.70	8.51±0.44	21.42±0.32	30.45±1.45	13.69±0.54	10.57±0.86
İncir (I)						
I-10	65.43±0.91	7.78±0.12	22.15±0.97	40.29±1.99	8.88±0.39	22.79±1.88
I-20	63.18±1.67	8.25±0.42	21.66±0.32	35.85±1.62	14.56±0.76	19.16±1.91
I-30	62.19±0.68	8.37±0.38	21.58±1.55	29.46±1.83	16.32±0.29	10.67±1.22

Mayalı hamurlarda fermentasyon sonucu meydana gelen organik asitler ve karbondioksit gazının ortam pH değerinin düşmesine ve titrasyon asitlik değerinin ise artmasına neden olduğu görülmüştür. Poitrenaud [32] yaptığı bir çalışmada, fermentasyon sonucu meydana gelen alkol, ikincil metabolitler, düşen pH ve artan TTA ekmeğe aromatik lezzetini kazandıran unsurlardan biri olarak görüldüğünü bildirilmiştir. Rózyło et al. [33], çeşitli un türleri ile üretilen glutensiz ekmek formülasyonlarına %10-20-30-40 oranlarında ekşi maya ilave edilmesiyle ekmek numunelerinin pH değerlerinin ekşi maya oranı artışı ile azalma gösterirken TTA değerlerinin ise artma gösterdiğini bildirmişlerdir.

3.2.5 Sertlik analizi

Farklı konsantrasyonlarda ekşi maya içeren tam buğdaylı ekmek örneklerinde formülasyondaki tercih kaynağının ve ekşi maya ilavesinin ekmek dokusu üzerine etkisini incelemek amacıyla sertlik analizi yapılmış ve sertlikleri ölçülmüştür. Oda sıcaklığında 7 gün süreyle muhafaza edilen

ekmek mayalı ve ekşi mayalı ekmeklerin TPA değerlerine ait veriler Tablo 7'da verilmiştir. Buna göre depolama süresinin 1. gününde örneklerin sertlik değerleri 436.97 (K) ile 2118.91 (I-30) değerleri arasında, 7. gününde ise 1160.01 (K) ile 5637.34 (I-30) arasında bulunmuştur. Ekşi mayaların tercih kökenleri arasında depolama süresi boyunca incir, elmaya göre daha sıkı ve sert doku özelliği göstermiştir. Tablo 7'da görüldüğü gibi %30 konsantrasyon ile hazırlanan incir mayalı ekmekler depolama süresinin ilk ve sonuncu gününde de en yüksek sertlik değerine sahiptir.

Ekşi yapımında tercih edilen kaynak ve ekmeklere ilave edilen oran, tam buğday unlu ekşi maya ve kontrol ekmek numuneleri arasında sertlik farklılığına neden olmuştur. Depolama sırasında tam buğday unlu ekmeklerin analiz sonuçları dikkate alındığında tercih kaynağına göre incir (I), ekşi maya oranına göre ise %30'luk konsantrasyona sahip olan ekmekler en yüksek sertlik değerini vermiştir. Artan ekşi maya kullanım oranı tercih kökenine bakılmaksızın daha sıkı ve sert ekmek içinin oluşmasına neden olmuştur.

Tablo 5. Ekmek numunelerinde nem içeriği (%) ve su aktivitesi (aw)

Tercih Kaynağı	Nem İçeriği (%)				Su Aktivitesi (aw)			
	1.Gün	3.Gün	5.Gün	7.Gün	1.Gün	3.Gün	5.Gün	7.Gün
Kontrol(K)	40.00±0.07	39.82±0.10	39.65±0.26	39.05±0.19	0.946±0.01	0.940±0.01	0.943±0.01	0.937±0.01
Elma (E)								
E-10	36.11±0.08	36.09±0.11	35.85±0.19	35.59±0.53	0.937±0.01	0.941±0.01	0.939±0.01	0.926±0.01
E-20	36.53±0.10	36.04±0.14	35.72±0.69	35.37±0.44	0.941±0.01	0.940±0.01	0.942±0.01	0.939±0.01
E-30	36.03±0.20	35.76±0.15	35.62±0.39	35.50±0.16	0.943±0.01	0.940±0.01	0.943±0.01	0.944±0.01
İncir (I)								
I-10	37.18±0.11	36.95±0.13	36.68±0.12	34.88±0.10	0.947±0.01	0.943±0.01	0.941±0.01	0.941±0.01
I-20	35.14±0.10	34.99±0.12	34.91±0.13	34.65±0.19	0.944±0.01	0.943±0.01	0.943±0.01	0.939±0.01
I-30	35.66±0.16	35.64±0.13	35.60±0.09	35.53±0.12	0.948±0.01	0.941±0.01	0.943±0.01	0.941±0.01

Tablo 6. Ekmek numunelerinde pH ve toplam titrasyon asitliği (TTA)

Tercih Kaynağı	pH				Toplam Titrasyon Asitliği (TTA)(mL)			
	1.Gün	3.Gün	5.Gün	7.Gün	1.Gün	3.Gün	5.Gün	7.Gün
Kontrol(K)	5.46±0.05	5.49±0.06	5.52±0.04	5.56±0.06	5.90±0.15	5.50±0.18	5.30±0.22	5.30±0.16
Elma (E)								
E-10	5.04±0.08	5.07±0.09	5.11±0.08	5.09±0.04	8.00±0.13	7.60±0.18	7.45±0.15	7.10±0.15
E-20	4.40±0.12	4.41±0.08	4.43±0.01	4.45±0.02	11.80±0.16	11.60±0.18	11.30±0.19	11.20±0.17
E-30	4.25±0.07	4.28±0.02	4.29±0.08	4.29±0.04	13.70±0.20	13.10±0.11	12.50±0.19	12.80±0.13
İncir (I)								
I-10	4.92±0.07	4.92±0.04	4.97±0.03	4.98±0.08	8.90±0.16	8.10±0.08	8.35±0.13	8.30±0.14
I-20	4.23±0.05	4.39±0.04	4.25±0.03	4.37±0.04	12.80±0.16	12.90±0.13	12.65±0.17	12.10±0.11
I-30	4.22±0.05	4.24±0.03	4.27±0.02	4.27±0.04	14.00±0.17	13.20±0.12	13.55±0.16	13.80±0.12

Bu durum, yüksek miktarda ekşi maya kullanımının ekmeğin gelişmesini engelleyerek düşük hacimli ve sıkı/sert dokulu ekmeğin oluşumuna neden olduğu gerçeğini ortaya çıkartmaktadır. Sonuçlara uygun olarak, kepekli ekşi mayalı ekmeğin yapımında bifidobakterileri başlangıç kültürü olarak kullandıkları çalışmada, %5-10-15-20 olmak üzere dört farklı ekşi maya seviyesi ile kontrol ekmeği arasında değerlendirmeler yapılmış ve ekşi maya ilavesiyle artan sıklığın düşük spesifik hacimden kaynaklandığını bildirmişlerdir [34]. Bu tez çalışmasındaki bulgulara benzer şekilde, Corsetti et al. [23] , yaptıkları çalışmada direkt hamur yapma işlemine göre ekşi maya işleminin daha sert bir iç dokuya neden olduğunu bildirmişlerdir.

3.2.6 Duyusal değerlendirme

Taze meyve katkılı tam buğday unlu ekmeğin örneklerine ekşi maya ilavesinin tüketiciler tarafından kabul edilebilirliğini belirlemek amacıyla, ekmeğin örneklerinin duyusal analizi eğitilmiş panelistlerin katılımı ile gerçekleştirilmiştir. Panelistler ekmeğin örneklerini tat, aroma, koku, görünüş, kabuk rengi, ekmeğin içi rengi, gözenek yapısı, ağızda bıraktığı his/çiğnenabilirlik, tekstür ve genel beğeni açısından değerlendirmişlerdir. Tam buğday unlu ekmeğin duyusal analiz sonuçları incelendiğinde; kontrol ekmeğinden sonra, tüm ekşi mayalı ekmeğin örnekleri içinde %10 oranında ilave ile hazırlanan incir ve elma mayalı ekmeğin en yüksek puanı aldığı görülürken, en düşük puanı ise %30 oranında ilave ile hazırlanan incir ekşi mayalı ekmeğin aldığı görülmüştür. Tercih kaynağı ve ekşi maya

kullanım oranlarının duyusal değerlendirme üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Değerlendirme sonucunda, kontrol örneği referans alınarak tercih kaynağına göre en yüksek puanı elma (E) ekşi mayalı ekmeğin, en düşük puanı ise incir (I) ekşi mayalı ekmeğin aldığı görülmüştür. Elma ekşi mayalı ekmeğin tat ve aroma özellikleri bakımından ön plana çıkmıştır. Ekşi maya ilave edilme oranı ile ilgili olarak ise %10 ekşi maya uygulamasının kontrol ekmeğine daha yakın, %30 oranının ise daha uzak sonuçlar verdiği görülmüştür. Ekşi maya ilavesi genel olarak; tat ve aroma özelliklerinde ön plana çıkarken, kontrol ekmeği ise esas olarak tekstür ve çiğnenabilirlik gibi özelliklerde ön plana çıkmaktadır. Mevcut literatür ile uyumlu olarak, artan oranda ekşi maya ilavesinin ekmeğin hacmini küçülttüğü, ekmeğin kabuk renginin koyulaşmasını sağladığı, damakta algılanan ekşi aromanın arttığı ve tercih kaynağı kişisel beğenilere göre değişse bile ekmeğe ilave edilecek ideal ekşi miktarının %10 olduğu görülmüştür.

4 Sonuçlar

Farklı tercih kaynakları kullanılarak elde edilen ekşi mayaların ekmeğin üretiminde farklı oranlarda kullanılmasının tam buğday unlu ekmeğin özelliklerine etkisinin araştırıldığı bu çalışmada; ekşi mayalar ve ekmeğin hücre sayımları, pH, titrasyon asitliği, nem içeriği, su aktivitesi, pişirme kaybı, renk, tekstürel ve duyusal özellikler açısından değerlendirilmiştir.

Tablo 7. Ekmek numunelerine ait sertlik analiz sonuçları.

Tercih Edilen Kaynak	1.Gün	3.Gün	5.Gün	7.Gün
Kontrol (K)	436.97±57.7	899.43±167.9	915.94±153.4	1160.01±141.7
Elma (E)				
E-10	887.27±91.5	1634.28±157.1	1760.86±80.4	2059.38±66.1
E-20	967.51±103.5	1911.88±100.6	2500.17±97.81	2654.85±133.1
E-30	1417.81±45.1	2618.29±133.6	3088.21±129.1	3945.23±462.6
İncir (I)				
I-10	879.20±59.1	1614.93±181.2	1772.59±61.9	2197.04±156.2
I-20	1442.37±44.5	3028.40±150.4	3531.22±185.9	3803.48±359.0
I-30	2118.91±66.9	2685.46±84.9	4994.94±285.7	5637.34±243.2

Yapılan değerlendirmeler sonucunda, ekşi mayaların hazırlık aşamasında farklı substratların ve farklı konsantrasyonlarda kullanılmasının farklı fiziksel, kimyasal ve duyuşal özelliklere sahip ekmeklerin oluşmasına neden olduğu görülmüştür. Ekşi maya ilavesinin ekmeğin nem içeriğini düşürdüğü ve böylece raf ömrünü arttırdığı görülmüştür. Çalışma sonucunda % 10 ekşi maya konsantrasyonu ile üretilen ekmek örneklerinin hem ekmek kalitesi açısından hem de duyuşal olarak tüketiciye hitap etmektedir. Tercih kaynağı göz önüne alındığında elma ve incir bir çok açıdan birbirlerinden farklılık göstermiştir. Tekstür açısından elma ekşi mayalı ekmekler daha yumuşak değerler ortaya çıkartırken, en düşük nem kaybı incir ekşi mayalı ekmeklerde, en düşük su aktivitesi değişimi ise elma ekşi mayalarda olmaktadır. Tüketim alışkanlığı açısından toplumumuzda vazgeçilmez bir yeri bulunan ekmeğin üretiminde elma ve incir tercih kaynağı ile hazırlanan ekşi mayalı ekmeklerin üretimi ve tüketimi yaygınlaştırılabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %19

Kaynaklar

- [1] TKG Türk Gıda Kodeksi Ekmek ve Ekmek Çeşitleri Tebliği. Resmi Gazete, 04.01.201228163, Tebliğ No:2012/2, Ankara, 2012.
- [2] J. K. Chaven, and S. S. Kadam, Nutritional improvement of cereals by fermentation. *CRC Critical Reviews in Food Science and Technology*, 28(5), 349, 1989. <https://doi.org/10.1080/10408398909527507>.
- [3] N. Aktaş, ve Y. Özdoğan, Gıda ve beslenme okuryazarlığı. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 20(2), 146-153, 2016. <https://doi.org/10.29050/harranziraat.259105>.
- [4] M. Mariotti, C. Garofalo, L. Aquilanti, A. Osimani, L. Fongaro, S. Tavoletti and F. Clementi, Barley flour exploitation in sourdough bread-making. A technological, nutritional and sensory evaluation, *LWT-Food Science and Technology*, 59(2), 973-980, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.06.052>.
- [5] C. Collar Esteve, C. Benedito de Barber, and M.A. Martinez-Anaya, Microbial sourdoughs influence acidification properties and breadmaking potential of wheat dough. *Journal of Food Science*, 59, 629–633, 1994. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1994.tb05579.x>
- [6] Y. Y. Linko, P. Javanainen, and S. Linko, Biotechnology of bread baking. *Trends in Food Science and Technology*, 8, 339–344, 1997. [https://doi.org/10.1016/s0924-2244\(97\)01066-2](https://doi.org/10.1016/s0924-2244(97)01066-2).
- [7] S. Plessas, M. Trantallidi, A. Bekatorou, M. Kanellaki, P. Nigam and A. A. Koutinas, Immobilization of kefir and *Lactobacillus casei* on brewery spent grains for use in sourdough wheat bread making. *Food Chemistry*, 105(1), 187-194, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.03.065>.
- [8] T. Tamerler, Ekşi maya ile buğday ekmeğinin hazırlanması ve ekşi maya mikroorganizmaları. *Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Seri B*. 4; 145-154, 1986.
- [9] R. F. Vogel, M. Pavlovic, M. A. Ehrmann, A. Wiezer, H. Liesegang, S. Offschanka, S. Voget, A. Angelov, G. Bocker and W. Liebl, Genomic analysis reveals *Lactobacillus sanfranciscensis* as a stable element in traditional sourdoughs. *Microb Cell Fact*, 10 (1), 1-11, 2011. <https://doi.org/10.1186/1475-2859-10-S1-S6>.
- [10] L. Flander, T. Suortti, K. Katina and K. Poutanen, Effects of wheat sourdough process on the quality of mixed oat-wheat bread. *LWT-Food Science and Technology*, 44, 656-664, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.11.007>.
- [11] K. Katina, E. Arendt, K. H. Liukkonen, K. Autio, L. Flander, and K. Poutanen, Potential of sourdough for healthier cereal products. *Trends in Food Science & Technology*, 16(1-3), 104-112, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2004.03.008>
- [12] S. Plessas, A. Alexopoulos, I. Mantzourani, A. Koutinas, C. Voidarou, E. Stavropoulou and E. Bezirtzoglou, Application of novel starter cultures for sourdough bread production. *Anaerobe*, 17(6), 486-489, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2011.03.022>.
- [13] G. G. Hou, and Y. Hsu, Comparing fermentation gas production between wheat and apple sourdough starters using the Risograph. *Food Bioscience*, 3, 75-81, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2013.04.007>
- [14] H. J. Cheng, Japan's famous bakeries: processing techniques of natural sourdough breads. Taiwan: Taiwan Tohan Publishing Co. Ltd. In Chinese, 2002.
- [15] AOAC (Official Methods of Analysis), 13th ed. Official method 981.12. pH of acidified foods International Washington D.C, 1998.
- [16] AACC International,. Method 02-31, Approved methods of the AACC, 10th ed. St. Paul, MN: American Association of cereal chemists, 2000a.
- [17] K. Katina, R. L. Heiniö, K. Autio, and K. Poutanen, Optimization of sourdough process for improved sensory profile and texture of wheat bread. *LWT-Food Science and Technology*, 39(10), 1189-1202, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.08.001>.
- [18] FDA BAM Chapter 18, Division Microbiology Center for Food Safety and Applied Nutrition. US. Food and Drug Administration. Bacteriological Analytical Manuel Online,2018.
- [19] ISO 15214, Microbiology of Food and Animal Feding Stuffs. Horizontal method for the enumeration of mesophilic lactic acid bacteria. Colony-count technique at degrees C.1998.
- [20] G. M. Turkut, H. Cakmak, S. Kumcuoglu, and S. Tavman, Effect of quinoa flour on gluten-free bread batter rheology and bread quality. *Journal of Cereal Science*, 69, 174–181, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.03.005>

- [21] A. Elgün, Z. Ertugay, M. Certel, ve H. G. Kotancılar, Tahıl ve ürünlerinde analitik kalite kontrolü ve laboratuvar uygulama kılavuzu, Atatürk Üniversitesi Yayınları, 867, Ziraat Fakültesi Yayın 335, 2002.
- [22] A. Wolter, A. S. Hager, E. Zannini, M. Czerny, and E. K. Arendt, Impact of sourdough fermented with *Lactobacillus plantarum* FST 1.7 on baking and sensory properties of gluten-free breads. *European Food Research and Technology*, 239(1), 1-12, 2014a. <https://doi.org/10.1007/s00217-014-2184-1>.
- [23] A. Corsetti, M. Gobbetti, B. De Marco, F. Balestrieri, F. Paoletti, L. Russi, and J. Rossi, Combined effect of sourdough lactic acid bacteria and additives on bread firmness and staling. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(7), 30443051, 2000. <https://doi.org/10.1021/jf990853e>.
- [24] S. Valmorri, R. Tofalo, L. Settanni, A. Corsetti, G. Suzzi, Yeast microbiota associated with spontaneous sourdough fermentations in the production of traditional wheat sourdough breads of the Abruzzo region (Italy). *Antonie van Leeuwenhoek*, 97(2), 119–129, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10482-009-9392-x>.
- [25] E. K. Arendt, L. A. Ryan, and F. Dal Bello, Impact of sourdough on the texture of bread. *Food microbiology*, 24(2), 165-174, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2006.07.011>.
- [26] A. Wolter, A. S. Hager, E. Zannini, and E. K. Arendt. Influence of sourdough on in vitro starch digestibility and predicted glycemic indices of gluten-free breads. *Food and Function*, 5(3), 564-572, 2014b. <https://doi.org/10.1039/c3fo60505a>.
- [27] N. M. M. Alencar, C. J. Steel, I. D. Alvim, E. C. de Moraes and H. M. A. Bolini, Addition of quinoa and amaranth flour in gluten-free breads: Temporal profile and instrumental analysis. *LWT-Food Science and Technology*, 62(2), 1011-1018, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.02.029>.
- [28] M. K. Demir, A. Elgün, ve N. Bilgiçili, Sıvı ferment yöntemi ile ekmek üretiminde kullanılan maya (*saccharomyces cerevisiae*) performansına katkı maddeleri ve ortam şartlarının etkisi. *Gıda*, 31 (6), 303-310, 2006.
- [29] R. Ercan, ve H. Özkaya, Ekmeğin bayatlaması. Ankara üniversitesi Ziraat Fakültesi Gıda Bilimi ve Teknolojisi A.B.D. 1985.
- [30] M. C. Belz, R. Mairinger, E. Zannini, L. A. Ryan, K. D. Cashman, and E. K. Arendt, The effect of sourdough and calcium propionate on the microbial shelf-life of salt reduced bread. *Applied microbiology and biotechnology*, 96(2), 493-501, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4052-x>.
- [31] C. Cevoli, A. Gianotti, R. Troncoso, and A. Fabbri, Quality evaluation by physical tests of traditional Italian flat bread Piadina during storage and shelf-life improvement with sourdough and enzymes, *European Food Research and Technology*, 1-9, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00217-015-2429-7>.
- [32] B. Poitrenaud, Baker's Yeast. In: *Handbook of food and baverage fermentation technology*. Hui, Y.H. Goddik, L.M. Hansen, A.S. Josephsen, J. Nip, W. Stanfield, P.S. and Toldra, F. (eds) 39; 800-831. New York, 2004.
- [33] R. Różyło, S. Rudy, A. Krzykowski, D. Dziki, D. U. Gawlik-Dziki, K. Różyło and S. Skonecki, Effect of adding fresh and freeze-dried buckwheat sourdough on gluten-free bread quality. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(2), 313-322, 2015. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12622>.
- [34] J. M. Sanz-Penella, J. A. Tamayo-Ramos, and M. Haros, Application of Bifidobacteria as starter culture in whole wheat sourdough breadmaking. *Food and Bioprocess Technology*, 5(6), 2370–2380, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0547-1>





Use of fruits and vegetables in meat and meat products in terms of dietary fiber Meyve ve sebzelerin diyet lifi bakımından et ve et ürünlerinde kullanımı

Hülya Şen Arslan ^{1,*} , Cemalettin Sarıçoban ² , Sabire Yerlikaya ¹ 

¹ Department of Food Engineering, Karamanoğlu Mehmetbey University, 70100, Karaman, Turkey

² Department of Food Engineering, Selçuk University, 42100, Konya, Turkey

Abstract

Fruits and vegetables contain different amounts of dietary fiber. Fruit and vegetable wastes that are considered as food waste and have high added value are important in many aspects. Wastes with added value are used as dietary fiber. Dietary fiber added meat and meat products are effective for health and these additives improves meat in terms of technological properties. Dietary fibers have properties such as increasing water retention capacity, reducing formulation expenses, modifying texture, and improving storage stability in low-fat products. Dietary fibers have the opportunity to be used in meat products due to their technological features such as preventing cooking losses and improving texture as well as being functional. Consumers are increased in the awareness that there is a relationship between nutrition and health day after day. However, there are also concerns that diseases increase with improper diet. For this reason, it is recommended to increase the dietary fiber addition in the daily diet. The use of dietary fiber as a filler in meat products can be a satisfying factor for conscious consumers. For this reason, production of meat and meat products rich in dietary fiber will guide new studies by using fruit and vegetable waste.

Keywords: Dietary fiber, Functional food, Fruits and vegetables, Meat and meat products

Özet

Meyve ve sebzeler farklı miktarlarda diyet lifi içerir. Gıda atığı sayılan ve katma değeri yüksek meyve ve sebze atıkları pek çok açıdan önemlidir. Katma değeri olan atıklar diyet lifi olarak kullanılmaktadır. Diyet lifi katkısı olan et ve et ürünleri sağlık için etkilidir ve eti teknolojik özellikleri açısından iyileştirir. Diyet lifleri, az yağlı ürünlerde su tutma kapasitesini artırma, formülasyon maliyetlerini azaltma, dokuyu değiştirme ve depolama kararlılığını geliştirme gibi özelliklere sahiptir. Diyet lifleri, fonksiyonel olmasının yanı sıra pişirme kayıplarını önleme ve dokuyu düzeltme gibi teknolojik özellikleri nedeniyle et ürünlerinde kullanıma imkânına sahiptir. Tüketiciler beslenme ile sağlık arasında her geçen gün bir ilişki olduğu bilincinde artmaktadır. Bununla birlikte, yanlış beslenme ile hastalıkların arttığına dair endişeler de vardır. Bu nedenle günlük diyetle diyet lifi ilavesinin artırılması önerilmektedir. Et ürünlerinde dolgu maddesi olarak diyet lifinin kullanılması bilinçli tüketiciler için tatmin edici bir faktör olabilir. Bu nedenle diyet lifi yönünden zengin et ve et ürünlerinin üretimi, meyve ve sebze atığını kullanarak yeni çalışmalara yön verecektir.

Anahtar kelimeler: Diyet lifi, Fonksiyonel gıda, Meyve ve sebzeler, Et ve et ürünleri

1 Giriş

Dietary fiber is a group of food components that are indigestible in the small intestine [1, 2] fermented in the large intestine [3]. Lignin in the plant cell wall; lignin derivatives such as cutin, wax and suberin [2]; Structural polysaccharides such as cellulose, hemi-cellulose, pectin, oligosaccharides such as inulin and oligofructose [1, 2, 4, 5] are defined as dietary fiber. In addition, gum agents such as gum arabic and guar gum without structural compounds and seaweed polysaccharides such as carrageenan, agar, alginate [1, 4] are reported to be dietary fiber. Dietary fiber is also referred to as non-starch polysaccharide [5]. However, digestion-resistant starch falls outside this definition [3]. Because it is known that starch-derived products can be digested in the small intestine and resistant starch is partially hydrolyzed [6].

Meat and meat products are highly nutritious and versatile products that contain high biological value proteins, fat-soluble vitamins, minerals, trace elements and bioactive compounds. Meat contains high amounts of saturated fatty acids and cholesterol, which are often linked to health problems [7]. In addition, processed meat products contain high amounts of added salt [8] and fat [9], which are

additional risk factors for various diseases. Epidemiological studies have shown an association between energy-rich diets and chronic diseases [10], and therefore increased consumption of dietary fiber has been proposed.

Consumers are increased in the awareness that there is a relationship between nutrition and health day after day. However, there are also concerns that diseases increase with improper diet. For this reason, it is recommended to increase the dietary fiber addition in the daily diet. In this review, the physiological role of dietary fibers in fruits and vegetables and their effect on the quality characteristics of meat and meat products will be examined.

The interest of researchers has shifted in this direction, since the use of dietary fiber in meat and meat products is effective for health and improves meat in terms of technological properties. Fruits and vegetables can be used in the products due to their high dietary fiber content. In addition, the pulp remaining as waste in the fruit and vegetable processing industry is not used much and is used as animal feed. To prevent this, wastes with added value are used as dietary fiber. Dietary fiber has many uses in food. However, in this study, the use of fruit and vegetable dietary fibers in meat and meat products was examined.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hsenarlan@kmu.edu.tr (H. Şen Arslan)

Geliş / Received: 15.08.2020 Kabul / Accepted: 10.12.2020 Yayımlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngmuh.783613

Table 1. Classification of dietary fiber based on solubility[1]

Class	Examples
Insoluble	Cellulose
Soluble (only in hot water)	Agars, amylose, aligins, kappa-type carrageenans (in the presence of K ⁺ or Ca ²⁺), gelatin, konjac, mannan, locust bean gum, low methoxyl pectins, granular starches and starch derivatives
Soluble (in water at room temperature but insoluble in hot water)	Curdlan, hydroxypropylcelluloses, hydroxypropylmethylcelluloses and methylcelluloses
Soluble (in water at room temperature and hot water)	Alginates, amylopectins, carboxymethylcelluloses, dextrans, iota type carrageenans, guar gum, gum Arabic, high methoxyl pectins, polydextrose and xanthan gum

2 Dietary fiber

Dietary fibers are evaluated in two groups as soluble and insoluble fibers based on their solubility. Soluble dietary fiber connects the water to form a gel and firm structure. The insoluble dietary fiber absorbs up to 20 times its weight but does not form a viscous structure [1]. Dietary fiber improves fecal volume, shortens intestinal transit time and helps prevent constipation [6]. This effect is thought to be mainly caused by insoluble dietary fiber. Because the insoluble dietary fiber causes an increase in stool mass as a direct fiber. In contrast, soluble dietary fiber undergoes fermentation to form gas with short-chain fatty acids, and these compounds change the pH of the intestinal content, causing an increase in the mass of bacteria in the gut. However, it is reported that the soluble dietary fiber may cause an increase in stool volume, considering its water holding capacity and its role in gas formation [11]. On the other hand, soluble dietary fiber is known to be more effective in lowering cholesterol in the blood and reducing the absorption of glucose in the gut [8; 9; 10]. Foods that are generally rich in dietary fiber contain both fiber components in different proportions. It is reported that the amount of soluble fiber in fruits, vegetables, nuts [1] and oat bran [12] is higher in insoluble fiber content in wheat bran [12]. Examples of soluble dietary fiber are gum substances, pectin and other gel-like polysaccharides [4], β -glucan [6], inulin [15]; insoluble dietary fiber is given cellulose, hemicellulose and lignin in the plant cell wall [1].

3 Classification of dietary fibers

Dietary fiber is examined under two groups: water-soluble and water-insoluble. Table 1. illustrates the classification of dietary fiber based on solubility. Water insoluble fibers contains lignin, cellulose and water-insoluble pentoses, while water-soluble fibers; it contains water-soluble pentoses, pectins and gummy substances [12; 13]. Soluble and insoluble fibers are found in different ratios in foods containing dietary fiber. In pectin, apple, quince, etc. foods from the soluble fiber group; gums in resin; β -glucan, oats, etc. in foods; musilages in plants; resistant starch is found in dry legumes. Cellulose from insoluble dietary fiber group, in bran; hemicellulose is abundant in cereals and lignin in wheat [18]. Cellulose, lignin and hemicellulose, which are abundant in wheat and many cereal products, and vegetables, are dietary fiber components that are water-insoluble. Pectin and gum substances found in barley, oats, legumes and fruits are mainly water-soluble dietary fiber compounds.

Approximately 75% of dietary fiber in foods is insoluble [15, 16].

Since the digestive enzymes that break down dietary fibers into glucose units are not found in humans, these components cannot be digested completely and therefore cannot be absorbed. However, it gives some energy after fermentation in the intestine [16]. The fermentation rate varies depending on the metabolism, plant type, maturity, daily diet amount and composition. It is stated that dietary fibers affect bacterial species in human metabolism and control the intestinal flora and metabolism with their synergistic and antagonistic effects [21].

The quality of the part of the plant consumed, the level of maturation, storage conditions and food processing techniques are some of factors affecting the dietary fiber composition of vegetable foods. While the amount of cellulose, lignin and ash in the plant cell wall composition increases during the maturation of the plant; non-cellulosic polysaccharides, waxes and protein percentage tend to decrease [19].

There are many types of fruit used in fruit juice production such as apricot, sour cherry, peach, apple and orange. There are different recyclable components with high added value in the remaining parts after fruit processing. Dietary fiber concentrations from vegetables showed a higher total dietary fiber content and a better insoluble / soluble dietary content ratio than cereal bran [32].

4 Dietary fiber content of various fruits and vegetables

Fruits and vegetables contain different amounts of dietary fiber. In addition to the edible parts of fruits and vegetables, the inedible parts, namely those known as by-products, contain dietary fiber. By-products left over from food processing are an important source of dietary fiber. By-products obtained from processing fruits and vegetables into products such as fruit juice and fruit concentrates are a socio-economic source of dietary fiber. Table 2. gives information about water-soluble and insoluble dietary fibers of fruits and vegetables. It attracts attention as new and economical resources of a healthy functional component [22]. Such by-products can be defined as residues after the manufacture of fruit and vegetable based products; these remains include the shell, core, stem, and core. Currently these by-products are disposed of animal feed, storage or incineration, usually at a cost to the producer; therefore, it creates potentially negative impacts on the environment [19, 20].

5 Reasons of use of dietary fiber in meat and meat products

Emulsified meat products such as sausages typically contain 20-30% fat and high amounts of water. Fat is an important source of energy and contains essential fatty acids as well as fat-soluble vitamins in meat [28, 29]. However, a possible relationship between saturated fat intake and various chronic diseases such as diabetes, cardiovascular diseases, obesity, infectious and respiratory diseases has increased the demand of consumers to consume healthy meat products [35]. As a result, the development of healthy meat products with added value for diet and low-calorie content has become one of the key targets for the food industry.

However, fat is also one of the main ingredients in foods and contributes to their texture and flavor and increases the feeling of fullness during meals [31, 32]. For these reasons, fat reduction in product formulas often means undesirable effects on technological and textural properties (eg increased cooking losses, impaired texture and low heating stability).

In the production of fat-reduced meat products, sensory and textural changes that occur as a result of fat reduction should be minimized [38]. One of the strategies applied to reduce the fat content in meat products is the use of fat with non-meat ingredients such as animal or vegetable protein, hydrocolloid or dietary fiber to achieve the desired textural properties and to achieve certain functional properties to affect the composition of the final product [33-35].

Various dietary fibers, alone or in combination, have been evaluated to replace fat in meat products as a result of different functional properties such as water retention, emulsion stability, tissue modification and neutral sweetener [29, 35-38]. Using dietary fiber as an oil replacement not only reduces the fat content, but also increases the nutritional properties of the product. It has been found that eating more dietary fiber reduces the risk of obesity, cardiovascular disease and colon cancer. The recommended dietary fiber intake for adults is 28-36 g / day, 70-80% of it should be insoluble fiber [44]. Another important reason for using dietary fiber is that their sources are generally relatively inexpensive agricultural by-products and their inclusion in meat products can reduce overall production costs [44].

6 Functions of dietary fiber in meat products

Dietary fibers have properties such as increasing water retention capacity, reducing formulation expenses, modifying texture, and improving storage stability in low-fat products [28, 29]. Due to the fact that dietary fibers reduce cooking losses and have a neutral taste, it finds use in meat products. For this purpose, sugar beet, peas [46], wheat, oats [30, 47], lemon albedoes [28, 32, 37], soy, apple, pear [38], peach, apple and orange [46] fibers are used in studies.

There is an increase in fiber addition in meat products for technological reasons and benefits to human health [50]. Fiber is suitable for meat products because it retains water, reduces cooking losses, has a neutral flavor and has been used in studies to develop meat emulsion products [50, 51]. By adding dietary fiber to meat products, it helps preserve the juicy structure of meat. In this way, the volatile components that affect the flavor of the product are

preserved in the meat for a longer time [52]. Various dietary fibers have also been used as potential fat substitutes [53].

Dietary fibers have the opportunity to be used in meat products due to their technological features such as preventing cooking losses and correcting texture as well as being functional [38]. The technological effects of the fibers on the products change according to the source and amount of the fiber used. These effects of dietary fibers on texture are due to their water and oil binding properties [45]. Dietary fibers with high water holding capacity are used for the prevention of syneresis in foods, modification of viscosity and structure [54]. It is stated that the insoluble fiber holds 5 times the weight of the fat and prevents the loss of oil from the product during cooking. This is important in terms of preserving the taste of food and improving its technological features. It was determined that the fat absorption capacity of dietary fiber varies according to the particle size, and the fibers which have coarse particles absorb more fat. It is reported that dietary fiber source also affects the structure of the products. It is stated that apple and sugar beet fibers form a tighter structure compared to wheat fiber [55].

7 Use of dietary fiber in meat and meat products

Fibers obtained from oats, sugar beets, soy, apples and pears are used in some meat products such as sausage and beef patties [38]. Sayas et al [56] stated that, when 0.5%, 1%, 1.5% and 2% citrus-sourced fiber is added to fermented sausages, containing 2% fiber amount is not liked by the panelists because the products become granulated and acidic. It was determined that the textural properties of the fermented sausages containing 0.5% fiber was the closest to the control. Sensory analysis results revealed that fermented sausages added with citrus fiber negatively affected the flavor. Fernandez-Gines et al. [45], lemon albedoes, which were raw and cooked, were added to fermented sausages in 4 different concentrations. Thanks to the dietary fiber added to Bologna type sausages, the nutritional value of the product was increased and it was determined that the bioactive components reduce the amount of residual nitrite. It was found that the sensory properties of fermented sausages added with 2.5% and 5% raw and 2.5%, 5 and 7.5% cooked albedo were not different from fermented sausages produced by traditional methods. It was determined that the addition of cooked or raw albedo reduced the L* (brightness), the a* (redness), b* (yellowness), chroma (C*) and hue (H*) values [48]. There are studies in which there are significant changes in pH, lactic acid, TBARS, weight loss and penetrometer values of sausage samples were found with the addition of bitter orange albedo. It has been concluded that adding bitter orange albedo as a component to sausage formulation in Turkish style sausage yields positive results [57]. Peach fibers with high water holding capacity prevented the change of the textural properties of the product by keeping the water in the products with reduced oil [58]. According to the study of Akşit [58], some physicochemical and emulsion properties of quince, grape fruit and tomato pulp from food wastes were determined and potentials for use in sausage production were investigated.

Table 2. Soluble and insoluble fiber content of some fruits and vegetables (% dry matter)

Dietary Fiber Source	Soluble	Insoluble	References
By-products of fruits			
Orange peel	13.28	54.19	[2]
Lemon peel	31.81	41.86	[2]
Apple pulp	8	54.5	[3]
Peach peel	12	24	[3]
Grape pulp	9.53	68.36	[3]
Banana peel	12.84	70.16	[4]
Mango Shell	19	32.1	[5]
Pineapple Shell	5.9	36.3	[6]
Fruits			
Apple	5.8	7.5	[7]
Orange	9.8	5.2	[7]
Peach	7.1	6.4	[7]
Tomato	7.4	11.4	[7]
Palm	5.16-6.68	9.19-11.7	[8]
Vegatables			
Carrot	14.9	11.1	[7]
Potatoes	2.12	4.97	[9]

It was determined that all 3 pulp types have high hydration properties. According to dietary fiber analysis results, the total fiber contents of quince, grapefruit and tomato pulp were 87.90%, 90.34% and 63.76%, respectively. Sarıçoban et al. [59] stated that supplement of albedo raised stability of emulsions and emulsion capacity. The supplement of albedo as a dehydrated form proceeded better results in respect on the emulsion parameters. It has been reported that the addition of albedo provided an advantage especially in high-fat products to produce better emulsion. In the study by Grigelmo et al. [60], it was stated that dietary fibers obtained from orange juice are important in terms of water binding capacity and oil binding capacity. Sarıçoban et al. [59] stated that sunflower head pith had an effect on emulsification and viscosity properties of meat emulsions. It was reported that the addition of sunflower head pith at a concentration of more than 5% negatively affects the emulsion [61]. Tömek et al. [47] determined that the viscosity of sausage dough with 17% and 29% peach fiber and fat content varying between 5-20% increased with the amount of dietary fiber. In the same study, it was stated that dietary fiber increased the water holding capacity of the product and reduced cooking losses. It was determined that the color of sausages whose fat was reduced was darker than the control sample and only high fiber use negatively affected the texture of the product. In a study where the fat content of sausages was set at 5%, 10% and 20%, 2% citrus fiber or soy protein concentrates were added as oil substitute. It was determined that fat substitutes increased the energy values of sausages and decreased the cholesterol levels. However, there was no statistical difference between citrus fiber and soy protein concentrates. It was determined that the energy values and cholesterol levels of sausages could be reduced by 30-40% to 30-45%, respectively [62].

A previous study showed that beef patties containing various fibers had lower TBARS values than no-fiber patties [63]. Citrus fruits contain a higher proportion of soluble dietary fiber (33 %) compared to traditional grain fiber sources (7 %) [32, 64]. When lemon albedoes at 2.5, 5 and 7.5% levels were added to beef burgers, it was stated that the cooking characteristics of burgers had improved [48]. In the

study of Güven [65], "The possibility of using carrot fiber in low-fat hamburger production" was investigated. It was found that as the rate of carrot fiber usage in hamburger patty increased, the moisture content of the samples increased. Since the amount of water in the samples with high fiber amount was high, there was an increase in the moisture content due to the increase in the total mass. Similarly, Aleson-Carbonella [49] stated that the increase in the moisture contents was found significant with the addition of lemon albedo at the rate of 0%, 2.5%, 5% 7.5% to hamburger patties prepared from beef. In a study of Sobrassada type fermented sausages, which are traditional for the Malorca region, a variety of carrot fiber was used (3%, 6%, 9%, 12%) [66]. The use of carrot fiber significantly affected the pH values of hamburger patty samples ($p < 0.05$). It was observed that the pH values of the samples tended to decrease with respect to the increase in carrot fiber ratio. It is thought that this decrease in pH may be due to the low pH (4.45) of the carrot fiber used [65]. In the study, it was stated that adding the dietary fiber suspension obtained from peaches in the ratio of 17-29% to low-fat frankfurter type sausages containing 5-20% of fat decreased the pH value [14]. Aleson-Carbonella [49] found that the addition of lemon albedo into beef hamburger patties significantly lowers the pH value. García [67], on the other hand, did not see a statistical difference between the groups in terms of color scores in the study where peach, apple and orange fiber were used at the rate of 15g / kg 30 g/ kg in Mortadela type sausages. The effects of adding 10% different concentrations of pea flour, pumpkin flour, and apple pulp in fiber-rich chicken wings, poor in salt and fat, were investigated. Addition of fiber sources significantly increased the total dietary fiber content of processed products [68].

Savadkoohi et al. [69] dried tomato pulp to use in meat products and ground and made ready for use in production by pH adjustment and scalding. In the results of the chemical analysis of the pulp (over wet weight), it was found that the amount of fiber was 39.11% and the amount of oil was 9.87%. In the study, where Oskaybaş [70] added pumpkin fiber to Sivas patties, it was observed that dietary fiber addition increased the moisture content. In the study of Avcı

[71], watermelon peel, melon peel and potato peel fibers were added to the Sivas patties and their textural and physical properties were examined. Although sensuous fiber dumplings are not preferred, they had positive results in terms of water binding capacity. Pea fiber produced from the inner cell wall of peas contains approximately 48% fiber. In studies, it was used to reduce the fat content of beef patties due to its high water holding capacity. As a result, it was provided cooking efficiency [72].

There are studies using fruit and vegetable wastes as coating material. In the study of Yüce [73], the use of carrot and orange pulp in the production of coated fish fillets was investigated. In the study of Aldemir [74], the possibilities of using tomato paste production wastes were investigated for coating fish fillets. Although microbial studies were conducted predominantly in these studies, dietary fiber and phenolic substances were examined in fillets as well.

8 Conclusion

In the food industry, by adding water, synthetic oil substitutes, protein or carbohydrate-containing additives, there are studies for the production of meat products with reduced fat ratio while preserving the textural and sensory properties of the product. However, it is stated that the best result is possible with the addition of dietary fiber.

It is emphasized that dietary fiber has advantages such as improving the textural properties of the product, reducing cooking losses, and reducing formulation prices. However, the most important feature of dietary fiber is that it has functional features that reduce the risks of discomfort such as colon cancer, cardiovascular diseases, constipation and cholesterol. Products with reduced fat content produced by the addition of natural ingredients such as dietary fiber are expected to increase the consumption of meat products, which has seen a significant decline in recent years, by meeting both the taste and health and safety expectations of the consumer. As a matter of fact, the use of dietary fiber as a filler in meat products can be a satisfying factor for conscious consumers. According to the researches, dietary fibers are added to various foods and their properties are examined.

Fruit and vegetable wastes that are considered as food waste and have high added value are important in many aspects. Dietary fiber comes first. For this reason, production of meat and meat products rich in dietary fiber will guide new studies by using fruit and vegetable waste.

Dietary fiber enriched meat products can be considered a good trend in terms of human nutrition and health. However, there are difficulties in effectively developing these functional meat products and reaching the consumers. The consumer's desire to consume meat products enriched in fiber should also be investigated broadly.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %12

Kaynaklar

- [1] J. Y. Thebaudin, A. C. Lefebvre, M. Harrington, and C. M. Bourgeois, Dietary fibres: Nutritional and technological interest. *Trends in Food Science and Technology*, 8(2), 41–48, 1997. [http://doi:10.1016/S0924-2244\(97\)01007-8](http://doi:10.1016/S0924-2244(97)01007-8).
- [2] T. Vasanthan, J. Gaosong, J. Yeung, and J. Li, Dietary fiber profile of barley flour as affected by extrusion cooking. *Food Chem.*, 77(1), 35–40, 2002. [http://doi:10.1016/S0308-8146\(01\)00318-1](http://doi:10.1016/S0308-8146(01)00318-1).
- [3] F. Guillon and M. Champ, Structural and physical properties of dietary fibres, and consequences of processing on human physiology. *Food Research International*, 33(3–4), 233–245, 2000. [http://doi:10.1016/S0963-9969\(00\)00038-7](http://doi:10.1016/S0963-9969(00)00038-7).
- [4] A. Jiménez-Escrig and F. J. Sánchez-Muniz, Dietary fibre from edible seaweeds: Chemical structure, physicochemical properties and effects on cholesterol metabolism. *Nutr. Res.*, 20(4), 585–598, 2000. [http://doi:10.1016/S0271-5317\(00\)00149-4](http://doi:10.1016/S0271-5317(00)00149-4).
- [5] P. J. Harris and L. R. Ferguson, Dietary fibres may protect or enhance carcinogenesis. *Mutat. Res. - Genet. Toxicol. Environ. Mutagen.*, 443(1–2), 95–110, 1999. [http://doi:10.1016/S1383-5742\(99\)00013-7](http://doi:10.1016/S1383-5742(99)00013-7).
- [6] R. L. BeMiller, J. N. Whistler, Dietary Fiber And Carbonhydrate Digestibility. *Food Chemistry*, M. D. O.R. Fennema (ed.), pp. 157–224, 1996.
- [7] J. M. Fernández-Ginés, J. Fernández-López, E. Sayas-Barberá, and J. A. Pérez-Alvarez, Meat products as functional foods: A review, *Journal of Food Science*, 70(2), R37-R43, 2005. <http://doi:10.1111/j.1365-2621.2005.tb07110.x>.
- [8] R. N. Terrell and J. A. Brown, Salt, water and oilseed proteins affect brine content of sausages. *J. Food Prot.*, 44(1), 43–46, 1981. <http://doi:10.4315/0362-028x-44.1.43>.
- [9] F. Wirth, Reducing the fat and sodium content of meat products. What possibilities are there?, *Fleischwirtschaft*, 71(3), 294–297, 1991.
- [10] G. A. Kaferstein, F. K. Clugston, Human health problems related to meat production and consumption. *Fleischwirtschaft Technol.*, 75, 889–892, 1995.
- [11] M. Roberfroid, Dietary Fiber, Inulin, and Oligofructose: A review comparing their physiological effects. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 33(2), 103–148, 1993. <http://doi:10.1080/10408399309527616>.
- [12] B. Schneeman, Soluble vs insoluble fiber-different physiological responses, *Food Technol.*, 41, 81–82, 1987.
- [13] R. A. Baker, Potential Dietary Benefits of Citrus Pectin and Fiber, *Food Technol.*, 48, 133–139, 1994.
- [14] N. Grigelmo-Miguel, M.I. Abadías-Serós, and O. Martín-Belloso, Characterisation of low-fat high-dietary fibre frankfurters. *Meat Sci.*, 52(3), 247–256, 1999. [http://doi:10.1016/S0309-1740\(98\)00173-9](http://doi:10.1016/S0309-1740(98)00173-9).

- [15] J. L. Causey, J. M. Feirtag, D.D. Gallaher, B.C. Tungland, and J. L. Slavin, Effects of dietary inulin on serum lipids, blood glucose and the gastrointestinal environment in hypercholesterolemic men. *Nutr. Res.*, 20(2), 191–201, 2000. [http://doi:10.1016/S02715317\(99\)00152-9](http://doi:10.1016/S02715317(99)00152-9).
- [16] W. R. LaCourse, Carbonhydrates and Other Electrochemically Active Compounds in Functional Foods. *Methods of Analysis for Functional Foods and Nutraceuticals.*, W. Jeffrey Hurst, Ed., pp. 466–492, 2008.
- [17] D. M. Jalili, T. Wildman, R.E.C. Medeiros, Dietary Fiber and Coronary Heart Disease. in *Handbook of nutraceuticals and functional foods*, R. E. C. Wildman, Ed. USA, pp. 281–293, 2001.
- [18] R. Rodríguez, A. Jiménez, J. Fernández-Bolaños, R. Guillén, and A. Heredia, Dietary fibre from vegetable products as source of functional ingredients., *Trends Food Sci. Technol.*, 17(1), 3–15, 2006, <http://doi:10.1016/j.tifs.2005.10.002>.
- [19] M. L. Dreher, Dietary Fiber Overview, in *Handbook of Dietary Fiber*, S. S. Cho (ed.), New York, pp. 1–17, 2001.
- [20] F. Figuerola, M. L. Hurtado, A. M. Estévez, I. Chiffelle, and F. Asenjo, Fibre concentrates from apple pomace and citrus peel as potential fibre sources for food enrichment. *Food Chem.*, 91(3), 395–401, 2005. <http://doi:10.1016/j.foodchem.2004.04.036>.
- [21] Y. Dror, Dietary Fiber Intake for the Elderly, *Nutrition*, 19 (4), 388–389, 2003.
- [22] J. F. Ayala-Zavala et al., Agro-industrial potential of exotic fruit byproducts as a source of food additives. *Food Res. Int.*, 44(7), 1866–1874, 2011. <http://doi:10.1016/j.foodres.2011.02.021>.
- [23] J. Angulo et al., Nutritional evaluation of fruit and vegetable waste as feedstuff for diets of lactating Holstein cows, *J. Environ. Manage.*, 95, pp. 210–214, 2012. <http://doi:10.1016/j.jenvman.2011.06.050>.
- [24] B.L.M.M. Leroy, L. Bommele, D. Reheul, M. Moens, and S. De Neve, The application of vegetable, fruit and garden waste (VFG) compost in addition to cattle slurry in a silage maize monoculture: Effects on soil fauna and yield. *Eur. J. Soil Biol.*, 43(2), 91–100, 2007. <http://doi:10.1016/j.ejsobi.2006.10.005>.
- [25] E. Mañas, L. Bravo, and F. Saura-Calixto, Sources of error in dietary fibre analysis. *Food Chem.*, 50(4), 331–342, 1994. [http://doi:10.1016/0308-8146\(94\)90201-1](http://doi:10.1016/0308-8146(94)90201-1).
- [26] P. Wachirasiri, S. Julakarangka, and S. Wanlapa, The effects of banana peel preparations on the properties of banana peel dietary fibre concentrate. 31(6), 605–611, 2009.
- [27] I. S. Ashoush and M. Gadallah, Utilization of mango peels and seed kernels powders as sources of phytochemicals in biscuit. *World Journal of Dairy & Food Sciences*, 6(1), 35–42, 2011.
- [28] Y. L. Huang, C. J. Chow, and Y. J. Fang, Preparation and physicochemical properties of fiber-rich fraction from pineapple peels as a potential ingredient. *J. Food Drug Anal.*, 19(3), 348–323, 2011. <http://doi:10.38212/2224-6614.2179>.
- [29] H. N. Englyst and G. J. Hudson, The classification and measurement of dietary carbohydrates. in *Food Chemistry*, 57(1), 15–21, 1996. [http://doi:10.1016/0308-8146\(96\)00056-8](http://doi:10.1016/0308-8146(96)00056-8).
- [30] M. Elleuch et al., Date flesh: Chemical composition and characteristics of the dietary fibre. *Food Chem.*, 111(3), 676–682, 2008. <http://doi:10.1016/j.foodchem.2008.04.036>.
- [31] I. Prosky, L. Asp, G. G. Schweizer, T. F. DeVries, J. W. Furda, Determination of insoluble, soluble, and total dietary fiber in foods and food products.: interlaboratory study. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.*, 71, 1017–1023, 1988
- [32] N. Grigelmo-Miguel, O. Martin-Belloso, Comparison of dietary fibre from by-products of processing fruits and greens and from cereals. *Leb. Wiss Technol*, 32, 503–508, 1999.
- [33] Y. S. Choi et al., Characteristics of low-fat meat emulsion systems with pork fat replaced by vegetable oils and rice bran fiber. *Meat Sci.*, 82(2), 266–271, 2009. <http://doi:10.1016/j.meatsci.2009.01.019>.
- [34] S. S. C. Henning, P. Tshalibe, and L. C. Hoffman, Physico-chemical properties of reduced-fat beef species sausage with pork back fat replaced by pineapple dietary fibres and water. *LWT - Food Sci. Technol.*, 74, 92–98, 2016, <http://doi:10.1016/j.lwt.2016.07.007>.
- [35] ‘WHO | Diet, nutrition and the prevention of chronic diseases’, WHO, 2014.
- [36] C. M. Almeida, R. Wagner, L. G. Mascarín, L. Q. Zepka, and P. C. B. Campagnol, Production of Low-Fat Emulsified Cooked Sausages Using Amorphous Cellulose Gel. *J. Food Qual.*, 37(6), 437–443, 2014, <http://doi:10.1111/jfq.12104>.
- [37] P. C. B. Campagnol, B. A. dos Santos, R. Wagner, N. N. Terra, and M. A. Rodrigues Pollonio, Amorphous cellulose gel as a fat substitute in fermented sausages. *Meat Sci.*, 90(1), 36–42, 2012. <http://doi:10.1016/j.meatsci.2011.05.026>.
- [38] F. Jiménez-Colmenero, J. Carballo, and S. Cofrades, Healthier meat and meat products: Their role as functional foods. *Meat Science*, 59(1), 5–13, 2001. [http://doi:10.1016/S0309-1740\(01\)00053-5](http://doi:10.1016/S0309-1740(01)00053-5).
- [39] J. R. Claus and M. C. Hunt, Low fat, High Added water Bologna Formulated with Texture modifying Ingredients. *J. Food Sci.*, 56(3), 643–647, 1991. <http://doi:10.1111/j.1365-2621.1991.tb05347.x>.
- [40] M. Gibis, V. Schuh, and J. Weiss, Effects of carboxymethyl cellulose (CMC) and microcrystalline cellulose (MCC) as fat replacers on the microstructure and sensory characteristics of fried beef patties. *Food Hydrocoll.*, 45, 236–246, 2015. <http://doi:10.1016/j.foodhyd.2014.11.021>.
- [41] M. Luisa García, E. Cáceres, and M. Dolores Selgas, Effect of inulin on the textural and sensory properties of mortadella, a Spanish cooked meat product. *Int. J.*

- Food Sci. Technol., 41, 10, 1207–1215, 2006. <http://doi:10.1111/j.1365-2621.2006.01186.x>.
- [42] A.B.G. García, M.I.C. Rodríguez, M.D.R. de Ávila Hidalgo, and H.C. Bertram, Water mobility and distribution during dry-fermented sausages “Spanish type” manufacturing and its relationship with physicochemical and textural properties: a low-field NMR study. *Eur. Food Res. Technol.*, 243(3), 455–466, 2017. <http://doi:10.1007/s00217-016-2759-0>.
- [43] U. Kehlet, M. Pagter, M. D. Aaslyng, and A. Raben, Meatballs with 3% and 6% dietary fibre from rye bran or pea fibre: Effects on sensory quality and subjective appetite sensations. *Meat Sci.*, 125, 66–75, 2017, <http://doi:10.1016/j.meatsci.2016.11.007>.
- [44] N. Mehta, S. S. Ahlawat, D. P. Sharma, and R. S. Dabur, Novel trends in development of dietary fiber rich meat products—a critical review. *Journal of Food Science and Technology*, 52(2), 633–647, 2013. <http://doi:10.1007/s13197-013-1010-2>.
- [45] J. M. Fernández-Ginés, J. Fernández-López, E. Sayas-Barberá, E. Sendra, and J. A. Pérez-Álvarez, Lemon albedo as a new source of dietary fiber: Application to bologna sausages. *Meat Sci.*, 67(1), 7–13, 2004, <http://doi:10.1016/j.meatsci.2003.08.017>.
- [46] M. L. García, R. Dominguez, M. D. Galvez, C. Casas, and M. D. Selgas, Utilization of cereal and fruit fibres in low fat dry fermented sausages. *Meat Sci.*, 60(3), 227–236, 2002. [http://doi:10.1016/S0309-1740\(01\)00125-5](http://doi:10.1016/S0309-1740(01)00125-5).
- [47] S. O. Tömek, M. Serdaroğlu, S. Demirtaş, and A. Bulgay, Production of Sucuk with the Addition of Wheat Bran. 39 th. Int. Cong. Meat Sci. Tech. Canada, 1993.
- [48] L. Aleson-Carbonell, J. Fernández-Ginés, E., Sayas-Barberá, J. Fernández-López, C. Navarro, Influence of Albedo on Color in Dry Cured Sausage Model System. in 48th ICoMST, Rome, Italy, 2002,
- [49] L. Aleson-Carbonell, J. Fernández-López, J. A. Pérez-Alvarez and V. Kuri, Characteristics of beef burger as influenced by various types of lemon albedo. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 6(2), 247–255, 2005. <http://doi:10.1016/j.ifset.2005.01.002>.
- [50] S. Vendrell-Pascuas, A.I. Castellote-Bargallo, Determination of insulin in meat products by high performance liquid chromatography with refractive index detection. *J Chromat A*, 881, 591–597, 2000.
- [51] H. E. Cofrades and D. J. Troy, The effect of fat level on textural characteristics of low fat emulsion type meat products. in Proc 41st Int Congress Meat Sci and Technol, pp. 66–67, San Antonio, TX, USA, 20-25 August., 1995,
- [52] F. F. Chevance, L. J. Farmer, E. M. Desmond, E. Novelli, D. J. Troy, Effect of some fat replacers on the release of volatile aroma compounds from low-fat meat products. *J Agric Food Chem*, 48, 3476–3484, 2000.
- [53] K. A. Mansour, Characteristics of low-fat beefburgers as influenced by various types of wheat fibers., *J Sci Food Agric*, 79, 493–498, 1999.
- [54] N. Grigelmo-Miguel, S. Gorinstein, and O. Martín-Belloso, Characterisation of peach dietary fibre concentrate as a food ingredient. *Food Chem.*, 65(2), 175–181, 1999. [http://doi:10.1016/S0308-8146\(98\)00190-3](http://doi:10.1016/S0308-8146(98)00190-3).
- [55] F. Burdurlu, H. S.; Karadeniz, Gıdalarda diyet lifinin önemi, *Gıda Mühendisliği Derg.*, 7(15), 18–25, 2003.
- [56] C. Sayas, M. E. Fernandez-López, J. Pérez-Alvarez, J.A. Fernández-Gines, J.M. Sendra, E. Navarro, Effects of Citrus Fiber on the Sensory and Textural Properties of Beef Bologna. pp. 884–885, in 48th ICoMST, 2002.
- [57] E. Coksever and C. Sariçoban, Effects of bitter orange albedo addition on the quality characteristics of naturally fermented Turkish style sausages (sucuks). *J. Food, Agric. Environ.*, 8(2), 82–85, 2010.
- [58] Z. Akşit And H. Gençlepe, Texture Profile Analysis of Quince Waste Emulsion. International Conference on Agronomy and Food Sci., 2019.
- [59] C. Sariçoban, B. Özalp, M. T. Yilmaz, G. Özen, M. Karakaya, and M. Akbulut, Characteristics of meat emulsion systems as influenced by different levels of lemon albedo. *Meat Sci.*, 80(3), 599–606, 2008. <http://doi:10.1016/j.meatsci.2008.02.008>.
- [60] N. Grigelmo-Miguel and O. Martín-Belloso, Characterization of dietary fiber from orange juice extraction. *Food Res. Int.*, 31(5), 355–361, 1998. [http://doi:10.1016/S0963-9969\(98\)00087-8](http://doi:10.1016/S0963-9969(98)00087-8).
- [61] C. Sariçoban, M. T. Yilmaz, M. Karakaya, and S. S. Tiske, The effect of different levels of sunflower head pith addition on the properties of model system emulsions prepared from fresh and frozen beef. *Meat Sci.*, 84(1), 186–195, 2010. <http://doi:10.1016/j.meatsci.2009.08.046>.
- [62] E. Cengiz and N. Gokoglu, Changes in energy and cholesterol contents of frankfurter-type sausages with fat reduction and fat replacer addition. *Food Chem.*, 91(3), 443–447, 2005. <http://doi:10.1016/j.foodchem.2004.06.025>.
- [63] S. J. Hur, B. O. Lim, G. B. Park, and S. T. Joo, Effects of various fiber additions on lipid digestion during in vitro digestion of beef patties. *J. Food Sci.*, 74(9), 653–657, 2009. <http://doi:10.1111/j.1750-3841.2009.01344.x>.
- [64] M. Leontowicz, S. Gorinstein, E. Bartnikowska, H. Leontowicz, G. Kulasek, and S. Trakhtenberg, Sugar beet pulp and apple pomace dietary fibers improve lipid metabolism in rats fed cholesterol. *Food Chem.*, 72(1), 73–78, 2001. [http://doi:10.1016/S0308-8146\(00\)00207-7](http://doi:10.1016/S0308-8146(00)00207-7).
- [65] N. Güven, Düşük Yağlı Hamburger Üretiminde Havuç Lifi Kullanım Olanğı, Master’s Thesis, Ankara Univ. Inst. Sci., Ankara, 2010.
- [66] V. S. Eim, S. Simal, C. Rosselló, and A. Femenia, Effects of addition of carrot dietary fibre on the ripening process of a dry fermented sausage (sobrassada). *Meat Sci.*, 80(2), 173–182, 2008. <http://doi:10.1016/j.meatsci.2007.11.017>.
- [67] M. L. García, E. Cáceres, and M. D. Selgas, Utilisation of fruit fibres in conventional and reduced-fat cooked-

- meat sausages. J. Sci. Food Agric., 87(4), 624–631, 2007. <http://doi: 10.1002/jsfa.2753>.
- [68] A. K. Verma and B. D. Sharma, Quality characteristics and storage stability of low fat functional chicken nuggets with salt substitute blend and high fi bre ingredients. Fleischwirtschaft Int, 24(6), 52–57, 2009.
- [69] S. Savadkoohi, H. Hoogenkamp, K. Shamsi, and A. Farahnaky, Color, sensory and textural attributes of beef frankfurter, beef ham and meat-free sausage containing tomato pomace. Meat Sci., 97(4), 410–418, 2014. <http://doi: 10.1016/j.meatsci.2014.03.017>.
- [70] B. Oskaybaş, Çerezlik Kabak Posası Kullanılarak Diyet Lifi Ve Pektin Üretimi, Master Thesis, Erciyes Univ. Inst. Sci., Kayseri, 2016.
- [71] Ş. Avcı, Karpuz, Kavun ve Patates Kabuklarından Pektin ve Diyet Lif Üretimi, Master Thesis, Erciyes Univ. Inst. Sci., Kayseri, 2016.
- [72] B. W. Anderson, E. T. Berry, Sensory, shear and cooking properties of low fat beef patties made with inner pea fiber. J. Food Sci., 65, 805–810., 2000. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb13591.x>
- [73] F. Yüce, Kaplanmış Balık Filetosu Üretiminde Havuç ve Portakal Posasının Kullanımı., Master Thesis, Pamukkale Univ. Inst. Sci., Denizli, 2018.
- [74] Ö. Aldemir, Balık filetolarının kaplanması salça üretim artıklarının kullanımı, Master Thesis, Pamukkale Univ. Inst. Sci., Denizli, 2013.



Gıda takviyeleri kullanım alışkanlıklarının değerlendirilmesi Evaluation of food supplements usage habits

Eda Kılıç Kanak^{1,*} , Seda Nur Öztürk¹ , Yağmur Özdemir¹ , Kübra Asan¹ ,
Suzan Öztürk Yılmaz¹ 

¹ Sakarya Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

Özet

Bu araştırmanın amacı, ülkenin her bölgesinden tüketici fikri alınıp gıda takviyeleri hakkında tüketim sıklığının ve miktarının belirlenmesidir. Araştırma sonucunda ulaşılan veriler Minitab programı ile ortalama, olasılık değeri (p değeri), yüzde değerleri ve ki-kare (χ^2) önemlilik testi kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Yapılan anket sonuçlarında 800 kişiden %35.3'ünün gıda takviyesi kullandığı belirlenmiştir. Tüketicilerin takviye kullanım sıklığı %45.1 oranında günde 1-2 defa olarak belirlenmiştir ($p > 0.05$). Gıda takviyesi kullanan tüketicilerin %39.4'ünün kullanım sebebi bağışıklık sistemini güçlendirmesidir ($p < 0.05$). Tüketicilerin %44.3'ü vitaminlerden takviye aldığını belirtmiştir ($p < 0.05$). Bununla beraber takviye kullanan tüketicilerin %46.2'si gıda takviyelerinden fayda gördüğünü belirtmiştir ($p < 0.05$). Katılımcılar %52.87 oranında gıda takviyelerinden uzak durulmalıdır ifadesine katılmadığını belirtmiştir ($p < 0.05$). Kullanıma başlangıç aşamasında ise %59.7 oranında doktorların tavsiyesi ile başladığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Gıda takviyeleri, Tüketici, Anket

1 Giriş

Gıda takviyeleri; yeterli miktarda tüketilmeyen besinlerin hap, tablet, kapsül ve sıvı formlarda tüketilmesidir. Bu takviyeler vitamin, mineral, yağ asitleri, fonksiyonel gıdalar ve bitkisel gıdalar olabilmektedir. Ek olarak kullanılan gıdaların çoğunluğu insan vücudunda olumlu sonuç vermektedir. Bunlardan bazıları kan değerlerinin doğru bir şekilde yükselmesi, çocuklarda büyüme gözlenmesi ve enerji vermesi olarak söylenebilir. Ancak bazı takviye edici gıdalar ise oldukça ciddi zararlar verebilmektedir. Bunun sebebi doğru kullanımda bulunmama, doğru satıcılardan almamak ve ek olarak kullanılan gıdaların alerjik reaksiyon göstermesi olabilmektedir. Gıda takviyeleri ek olarak kozmetik amaçlı, düzenli beslenmeye yardımcı, bağışıklık sistemini güçlendirme ve bazı hastalıkları iyileştirme amacıyla kullanıldığı belirtilmiştir [1].

Gıda takviyeleri;

- Normal beslenme ile vücudumuza alamadığımız besin öğelerini takviye etmek için
- Çeşitli hastalıklar ve mazeretler nedeniyle normal seviyenin üzerinde ihtiyaç duyduğumuz besin öğelerini takviye etmek için
- Çeşitli hastalıklar, gıda alerjisi veya gıda intoleransı nedeniyle belirli bir gıda grubu tüketemediğimiz ve dolayısıyla bu gıdalardan elde edemediğimiz besin öğelerini takviye etmek için

Abstract

The aim of this research is to determine the frequency and amount of consumption about food supplements by taking consumer ideas from every region of the country. The data obtained as a result of the research were evaluated using the Minitab program, using the mean, probability value (p value), percentage values and chi-square (χ^2) significance test. The frequency of supplement use of consumers was determined as 45.1% 1-2 times a day ($p > 0.05$). The reason for using 39.4% of consumers who use food supplements is that they strengthen the immune system ($p < 0.05$). 44.3% of consumers stated that they took supplements from vitamins ($p < 0.05$). In addition, 46.2% of consumers using supplements stated that they benefited from food supplements ($p < 0.05$). The participants stated that 52.87% did not agree with the statement that food supplements should be avoided ($p < 0.05$). In the initial phase of use, it was observed that 59.7% started with the advice of doctors.

Keywords: Dietary supplements, Consumer, Survey

- Bitkisel gıda ağırlıklı beslenme modelini benimseyen (vejetaryenler) kişilerde ortaya çıkabilecek bazı besin öğelerinin eksikliğini takviye etmek için

- Belirli bir yaşın üzerinde olan ve bazı hastalıklara yakalanma riski olan kişilerin bu hastalıkların önlenmesinde ya da geciktirilmesinde ihtiyaç duyduğu besin öğelerini takviye etmek için gıda yerine geçmeyen, doktor kontrolünde tüketilmesi ve kullanılması gereken ürünlerdir.

İnsan ihtiyaçlarının en temellerinden biri olan beslenme, hem bireysel ve toplum sağlığın korunması hem de sağlam, sağlıklı ve güçlü bir neslin yetiştirilmesi için kilit bir unsurdur. Kişilerin sağlığını ve gücünü koruyacak bir beslenme ise ancak dengeli, yeterli ve doğal besinlerle mümkündür.

Günümüzde artan nüfus, iş yoğunluğu vb. etmenlerden dolayı insanların beslenmesinde aksamalar olmaktadır ve bunun sonucunda da gıda takviyelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Aynı zamanda gelişen iletişim olanakları ile gıda takviyelerine olan ilgiyi arttırmıştır. Bu ilginin artmasının diğer sebeplerinden bahsedecek olursak, takviyelerin doğal olduğu, güvenli olduğu ve yan etkisinin olmadığı düşüncesi, buna ek olarak kolay ulaşılabilmesi (hekim tarafından reçetelendirilme zorunluluğu yoktur, internet, süpermarket vb. yerlerden kolay temin edilebilir) söylenebilir [2].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: edakilic@sakarya.edu.tr (E. Kılıç Kanak)
Geliş / Received: 21.08.2020 Kabul / Accepted: 15.11.2020 Yayımlanma / Published: 15.01.2021
doi: 10.28948/ngmuh.783613

Tablo 1. Katılımcılara ait genel bilgiler

		Kadın		Erkek		Toplam	
		Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
Yaş	12-18	113	14,12	30	3,75	143	17,87
	19-25	314	39,25	90	11,25	404	50,5
	26-35	77	9,625	33	4,125	110	13,75
	36-50	86	10,75	22	2,75	108	13,5
	50 ve üzeri	27	3,375	8	1	35	4,375
Eğitim Durumu	İlkokul	25	3,125	4	0,5	29	3,625
	Ortaokul	14	1,75	4	0,5	18	2,25
	Lise	165	20,62	49	6,125	214	30,12
	Ön lisans veya lisans	388	48,5	112	14	500	62,5
	Yüksek lisans ve üzeri	25	3,125	14	1,75	39	4,875
Medeni Durum	Evli	187	23,37	42	5,25	229	28,62
	Bekar	430	53,75	141	17,62	571	71,35
İkamet Bölgesi	Marmara	445	55,62	123	15,37	568	71
	Ege	46	5,75	14	1,75	60	7,5
	Akdeniz	13	1,625	2	0,25	15	1,875
	İç Anadolu	39	4,5	13	1,625	52	6,5
	Karadeniz	50	6,25	22	2,75	72	9
	Doğu Anadolu	17	1,75	7	0,875	24	3
	Güneydoğu Anadolu	7	0,875	2	0,25	9	1,125
Çalışma Durumu	Evet	134	16,75	85	10,62	219	27,37
	Hayır	146	18,25	18	2,25	164	20,5
	Öğrenciyim	337	47,12	80	10	417	52,12

Bununla beraber günümüzde birçok kişi kendi kararları ile beslenme miktarını yeterli kılmak, daha sağlıklı ve dinç olmak, sahip oldukları hastalıklarını tedavi etmek veya hastalığı önlemek amacıyla gıda takviyesi kullanmaktadır. Yani besin desteklerinin/suplemenların kontrolsüz olarak kullanımı söz konusudur. Besin desteklerinin bu şekilde kontrolsüz olarak kullanımının güvenliği sorgulanmalıdır [3].

Bu çalışmada insanların gıda takviyeleri konusunda takviye edici gıdaların tüketim sıklığı ve tercih durumunu etkileyen faktörlerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2 Materyal ve metod

2.1 Araştırmanın evreni

Bu araştırma Türkiye genelindeki her bölgeden katılımcıları kapsamaktadır (Tablo 1). Çalışma cinsiyet, yaş ve bölgeyi içeren sorular ile başlamaktadır. Bu sorular ışığında gıda takviyesi kullanımının cinsiyet, yaş ve bölgeye bağlı kullanım oranları ve bilinç düzeyleri karşılaştırılarak belirlenmiştir. Anket çalışması toplamda 800 kişiye ulaşmıştır. Anket çalışmasında toplam 800 katılımcı bulunmaktadır. 800 kişinin 617'si kadın, 183'ü erkektir

Çalışmaya katılan kişilerin %17,87'si 12-18; %50,5'i, 19-25; %13,75'i 26-35; %13,5'i 36-50 yaş arasında ve %4,43'si 50 yaş ve üzerindedir.

Katılımcıların %71'i Marmara; %7,5'i Ege; %1,87'si Akdeniz; %6,5'i İç Anadolu; %9'u Karadeniz; %3'ü Doğu Anadolu; %1,12'si Güneydoğu Anadolu bölgesinde ikamet etmektedir.

2.2 Araştırmanın yöntemi

Çalışmada; veri toplama yöntemi olarak “anket çalışması” yöntemi kullanılmıştır. Çalışma verileri anket formu ile Mart-2020 ve Nisan-2020 tarihleri arasında her yaş grubuna ulaşabilmek amacıyla online yollarla (Google forms) ve okulumuz öğrencilerine ve bölümümüz öğrencilerine ders esnasında bizzat araştırmacı gözetiminde uygulanmıştır. Araştırmaya katılan kişilerin doğru ve tarafsız cevap verdikleri kabul edilmiştir. Anket iki bölüme ayrılmıştır; birinci bölümde genel bilgiler başlığı altında kişilerin bilgileri ile gıda takviyesi bilinç düzeyi, tüketim sıklığı ve alışkanlıklarını tespit etmek amacıyla sıklık sorular yöneltilmiş, ikinci bölümde ise bilinç düzeyini ölçmek amacıyla “katılıyorum”, “katılmıyorum” ve “kısmen katılıyorum” seçeneklerinden birinin işaretlenmesi istenmiştir.

2.3 Veri analizi

Sakarya Üniversitesi kapsamında yapılan Gıda takviyeleri kullanım alışkanlıkları anketine ilişkin, alınan yanıtların istatistiksel değerlendirilmesi amacıyla “MINITAB 17” paket istatistik programı kullanılmıştır. Anket sonucundan elde edilen verilerin istatistiksel değerlendirilmesinde ortalama, yüzde değerleri (%) ve ki-kare (χ^2) önemlilik testi kullanılmıştır. P değeri 0,05'ten küçük ise istatistiksel olarak “Anlamlı bir fark var” kabul edilmiş ve değerlendirilmiştir.

Tablo 2. Gıda takviyesi kullanım durumu ve sıklığına ilişkin oranlar

	Kadın		Erkek		Toplam	
	Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
Gıda Takviyesi Kullanım Durumu						
Evet	213	26.62	69	8.625	282	35.25
Hayır	404	50.5	114	14.25	518	64.75
Gıda Takviyesi Kullanım Sıklığı						
Günde 1-2 defa	445	55.62	123	15.37	568	71
Haftada 1-2 defa	46	5.75	14	1.75	60	7.5
Ayda 1-2 defa	13	1.625	2	0.25	15	1.875

$\chi^2 = 5.800; p = 0.049$

Tablo 3. Katılımcıların gıda takviyelerini kullanma ve kullanmama sebeplerine ilişkin oranlar

	Kadın		Erkek		Toplam	
	Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
Gıda Takviyesi Kullanma Sebebi						
Sağlığa faydası olduğunu düşündüğüm için	105	13.12	21	2.625	126	15.75
Enerji verdiği için	15	1.875	11	1.375	26	3.25
Kilo kontrolü için	27	3.375	19	2.375	46	5.75
Bağışıklık sistemini güçlendirdiği için	105	13.12	16	2	121	15.12
Cevap vermeyenler.	377	47.12	116	14.5	493	61.62
$\chi^2 = 22.646 p = 0.00$						
Gıda Takviyesi Kullanmama Sebebi						
Ne olduğunu bilmiyorum.	121	15.12	36	4.5	157	19.62
Fiyatını pahalı buluyorum.	79	9.875	21	2.625	100	12.5
Sağlıklı olduğuna inanmıyorum.	196	24.5	60	7.5	256	32
Besin alerjisi.	14	1.75	2	0.25	16	2
Cevap vermeyenler.	207	25.87	64	8	271	33.87

3 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde “genel bilgiler” başlığı altında katılımcıların kişisel bilgileri, gıda takviyeleri hakkında bilgi ve tüketim durumları ile tüketim alışkanlıklarına dair sonuçlar yer almaktadır.

3.1 Katılımcılara ilişkin genel bilgiler

Bu bölümde katılımcıların cinsiyetine göre yaş, eğitim durumları, medeni durumları, ikamet bölgeleri, çalışma durumlarına ait bilgiler sayısal ve yüzdesel olarak verilmiştir.

Anket çalışmasında toplam 800 katılımcı bulunmaktadır. 800 kişinin 617’si kadın, 183’ü erkektir. Çalışmaya katılan kişilerin %50.5’i, 19-25 yaş arasındadır. Katılımcılar eğitim durumu olarak %62.5 oranında önlisans veya lisans öğrenimi görmüş veya görmektedir. Ankete katılanların %71.35’ inin medeni durumu bekarlıdır. Anket katılımcılarının %52.12’i öğrencilerden oluşmaktadır

Yapılan bir çalışmada katılımcıların %38.2’si gıda takviyesi kullandıklarını, %61.8’i gıda takviyesi kullanmadıklarını belirtmiştir. Bu durumda yapılan çalışmada aynı şekilde aynı yaş gruplarına yapılmıştır. Kullanım durumuna ilişkin sonuçlara bakıldığında örnek olarak alınan çalışmaya katılan katılımcıların gıda takviyesi kullanım oranının daha fazla olduğu görülmektedir [3].

Diğer bir çalışma ise fitness yapan kişileri kapsamaktadır. Fitness yapan 136 kişiye gıda takviyesi kullanıp kullanmadıkları sorulmuştur. Cevap verenlerden %86.8’i evet yanıtını verirken, %13.2’si hayır cevabını vermiştir. Bizim çalışmamıza göre oransal olarak oldukça

fazla evet yanıtı alınmıştır. Fitness yapan kişiler kullanım durumlarını, vücut geliştirmelerine yardımcı olduğu ve enerji sağladığı için kullandıklarını belirtmişlerdir [4].

Anket çalışmasında katılımcılara ‘Gıda takviyelerini ne sıklıkla kullanıyorsunuz?’ sorusu yöneltilmiştir. Cevap olarak %71 oranında günde 1-2 defa, %7.5 oranında haftada 1-2 defa ve %1.87 oranında ayda 1-2 defa yanıtı alınmıştır. Kadınların %55.62’i günde 1-2 defa gıda takviyesi kullanırken erkeklerin %15.37’inin günde 1-2 defa kullandığı tespit edilmiştir ($\chi^2 = 5.800; p < 0.05$).

İstanbul genelinde yapılan bir araştırmaya bakıldığında tüketicilerin vitaminleri %25 oranında her gün, %31.8 oranında haftada 1-2 gün, %16.8 oranında ayda birkaç gün, %10.8 oranında ayda 1 kez ve hiç kullanmayanların oranı %15.6 olarak belirlenmiştir. Gıda takviyesi olarak düşünüldüğünde anket katılımcılarımızın daha aktif tüketici olduğu gözlemlenmiştir [5].

Tıp ve Mühendislik öğrencilerine yapılan bir anket çalışmasında bitkisel gıda takviyesinin tüketim sıklığı sorulmuştur. Öğrencilerin büyük çoğunluğu hastalandıkları zaman kullandıklarını belirtmişlerdir [6].

Zayıflamak isteyen ve bir hastanenin diyet polikliniğine başvuran 206 kişiyle yapılan bir çalışmada katılımcıların %50.3’ünün sadece diyet yaptıkları durumda zayıflama ürünlerini kullandıklarını belirtmişlerdir. Çalışmaya katılan bireylerin %10.8’i ise ürünleri her gün istedikleri kadar tükettiklerini belirtmişlerdir [7]. Yaptığımız çalışmada katılımcıların %71’i gıda takviyesini günde 1-2 defa kullandıklarını belirtmişlerdir

Tablo 4. Katılımcıların gıda takviyelerini güvenli bulma ve bulmamalarına ilişkin oranlar

	Kadın		Erkek		Toplam	
	Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
Gıda Takviyelerini Güvenilir Bulma						
Evet	92	11.5	38	4.75	130	16.25
Hayır	111	13.87	46	5.75	157	19.62
Kısmen	414	51.75	99	12.37	513	64.12

$\chi^2 = 10.369$; $p = 0.006$

Tablo 5. Kullanıcıların kullandığı gıda takviyelerine ilişkin oranlar

	Kadın		Erkek		Toplam	
	Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
Kullanılan Gıda Takviyeleri						
Vitaminler	111	13.87	30	3.75	141	17.62
Mineraller	56	7	8	1	64	8
Sporcu gıdası	10	1.25	24	3	34	4.25
Fonksiyonel gıdalar	29	3.625	9	1.125	38	4.75
Bitkisel Gıda Takviyesi	36	4.5	5	0.625	41	5.125
Cevap vermeyenler	375	46.87	107	13.37	482	60.25

$\chi^2 = 48.945$ $p = 0.00$

Tablo 6. Kullanıcıların gıda takviyesi olarak kullandıkları vitamin çeşidine ilişkin oranlar

	Kadın		Erkek		Toplam	
	Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
Kullanılan Vitamin Çeşidi						
C vitamini	31	3.875	23	2.875	54	6.75
D vitamini	86	10.75	11	1.375	97	12.125
B12 vitamini	89	11.12	20	2.5	109	13.625
Multivitaminler	31	3.875	7	0.875	38	4.75
Folik asit	18	2.25	-	-	18	2.25
Diğer	22	2.75	6	0.75	28	3.5
Cevap vermeyenler	340	42.5	116	14.5	456	57

Tablo 7. Kullanıcıların gıda takviyesi olarak kullandıkları mineral çeşidine ilişkin oranlar

	Kadın		Erkek		Toplam	
	Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
Kullanılan Mineral Çeşidi						
Kalsiyum	21	2.625	12	1.5	33	4.125
Magnezyum	20	2.5	7	0.875	27	3.375
Demir	96	12	12	1.5	108	13.5
Çinko	15	1.875	4	0.5	19	2.375
Diğer	30	3.75	10	1.25	40	5
Cevap vermeyenler	435	54.375	138	17.25	573	71.625

Tablo 8. Kullanıcıların gıda takviyesi olarak kullandıkları kilo kontrol ürünü çeşidine ilişkin oranlar

	Kadın		Erkek		Toplam	
	Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
Kullanılan Kilo Kontrol Çeşidi						
Protein	3	1.625	27	3.375	40	5
Karbonhidrat	3	0.375	6	0.75	9	1.125
Yağ	1	0.125	4	0.5	5	0.625
Zayıflama ürünleri	23	2.875	7	0.875	30	3.75
Diğer	39	4.875	4	0.5	43	5.375
Cevap vermeyenler	538	67.25	135	16.875	673	84.125

Tablo 9. Kullanıcıların fonksiyonel gıda takviyesi olarak kullandıkları ürün çeşidine ilişkin oranlar

Kullanılan Fonksiyonel Gıda Çeşidi	Kadın		Erkek		Toplam	
	Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
Balık yağı	77	9.625	22	2.75	99	12.375
Probiyotik	29	3.625	8	1	37	4.625
Ginseng	7	0.875	1	0.125	8	1
Diğer	24	3	7	0.875	31	3.875
Cevap vermeyenler	480	60	145	18.125	625	78.125

Tablo 10. Kullanıcıların gıda takviyesi olarak kullandıkları bitkisel ürün çeşidine ilişkin oranlar

Kullanılan Bitkisel Gıda Çeşidi	Kadın		Erkek		Toplam	
	Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
Chia Tohumu	23	2.875	2	0.25	25	3.125
Keten tohumu	8	1	4	0.5	12	1.5
Yeşil çay ekstraktı	76	9.5	15	1.875	91	11.375
Diğer	46	5.75	12	1.5	58	7.25
Cevap vermeyenler	464	58	150	18.75	614	76.75

Tablo 11. Katılımcıların gıda takviyelerine başlamalarındaki etmenler ve fiyat hakkındaki düşünceleri

	Kadın		Erkek		Toplam	
	Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
Sosyal medyada beslenme, diyet vb. üzerine bir sayfa / kanal takip etme durumu.						
Evet	255	31.87	60	7.5	315	39.37
Hayır	362	45.25	123	15.37	485	60.62
Gıda takviyesi kullanmaya nasıl başladıkları						
Doktor tavsiyesi	164	20.62	27	3.375	191	23.87
Eczacı tavsiyesi	9	1.125	4	0.5	13	1.625
Aile arkadaş	48	6	29	3.625	77	9.625
Televizyon internet	25	3.125	14	1.75	39	4.875
Cevap vermeyenler	371	46.37	109	13.62	480	60
Gıda takviyelerinin fiyatları hakkındaki düşünceler						
Normal buluyorum	112	14	37	4.625	149	18.62
Ucuz buluyorum	0	0	3	0.375	3	0.375
Pahalı buluyorum	265	33.12	69	8.625	334	41.75
Fikrim yok	240	30	74	9.25	314	39.25

Tablo 12. Kullanıcıların gıda takviyelerini temin etme şekillerine ilişkin oranlar

Kullanılan Yöntem	Kadın		Erkek		Toplam	
	Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
Eczane	301	37.625	59	7.375	360	45.000
Aktar	28	3.5	5	0.625	33	4.125
Televizyon-internet	14	1.75	17	2.125	31	3.875
Market	16	2	11	1.375	27	3.375
Diğer	20	2.5	10	1.25	30	3.75
Cevap vermeyenler	238	29.75	81	10.125	319	39.875

$\chi^2 = 35.517$; $p = 0.00$

Tablo 3'de yapılan çalışmada katılımcıların gıda takviyesi kullanma sebebine birden fazla cevap verdikleri görülmüştür. Sağlığa faydası olduğunu düşünen 12 kişinin aynı zamanda bağışıklık sistemini güçlendirdiği için de gıda takviyesi kullandıkları görülmüştür. Katılımcılar gıda takviyesi kullanmama sebebine ait soruda ise sadece bir şıkkı seçmişlerdir. Anket çalışmasında gıda takviyesi kullanım

sebebi olarak %15.75 oranıyla sağlığa faydası olduğu için ve ona yakın bir oranla bağışıklık sistemini kuvvetlendirdiği için kullanıldığı belirlenmiştir. Kullanmama sebebi olarak da katılımcılar %32 oranla sağlıklı olduğuna inanmadıklarını belirtmişlerdir.

Tablo 13. Kullanıcıların takviye içeriği ve son kullanma tarihlerine dikkat edip etmemelerine ilişkin oranlar

	Kadın		Erkek		Toplam	
	Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
Kullanıcıların gıda takviyesi satın alırken son tüketim tarihine dikkat etme durumu.						
Evet	304	38	89	11.12	393	49.12
Hayır	25	3.125	11	1.375	36	4.5
Cevap vermeyenler	288	36	83	10.37	371	46.37
Takviye kullananların ürünün içeriği hakkında bilgiye sahip olup olmama durumu.						
Evet	230	28.75	72	9	302	37.75
Hayır	54	6.75	16	2	70	8.75
Cevap vermeyenler	333	41.62	95	11.87	428	53.5

Tablo 14. Katılımcıların devlet denetimlerinin yeterliliği ve denetimlerin kullanım için yeterli görüşlerine ilişkin oranlar

	Kadın		Erkek		Toplam	
	Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
Devlet Denetimlerinin Yeterli Bulunması						
Evet	189	23.625	67	8.375	256	77.125
Hayır	428	53.5	116	14.5	544	22.875
Devlet Denetimlerinin Kullanımı Sağlıklı Kılması						
Evet	96	12	33	4.125	129	16.125
Hayır	229	28.625	67	8.375	296	37

Tablo 15. Kullanıcıların gıda takviyelerini kullanımı sonucu yan etkilere ilişkin oranlar

	Kadın		Erkek		Toplam	
	Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
Karşılaşılan Yan etki Durumu						
Evet	20	2.875	12	1.5	32	4.375
Hayır	245	30.625	68	8.5	313	39.125
Cevap vermeyenler	352	44	103	12.875	455	56.875
Karşılaşılan Yan Etki						
Alerjik reaksiyon	10	1.25	4	0.5	14	1.75
Böbrek taşı oluşumu	-	-	1	0.125	1	0.125
Karaciğer rahatsızlığı	-	-	2	0.25	2	0.25
Kalp ve damar hastalıkları	-	-	3	0.375	3	0.375
Diğer	44	5.5	17	2.125	61	7.625
Cevap vermeyenler	563	70.375	156	19.5	719	89.875

Tablo 16. Kullanıcıların gıda takviyelerinin faydası hakkındaki görüşlerine ilişkin oranlar

	Kadın		Erkek		Toplam	
	Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
Gıda Takviyelerini Faydalı Bulma						
Evet	112	14	51	6.375	163	20.37
Hayır	18	2.25	8	1	26	3.25
Kısmen	138	17.25	26	3.25	164	20.5
Cevap vermeyenler	349	43.625	98	12.25	447	55.875

$\chi^2 = 11.624$; $p = 0.003$

Kadınların %13.12'i sağlığa faydası olduğunu ve bağışıklık sistemin güçlendirdiği için gıda takviyesini kullandıklarını belirtirken erkeklerde bu oran %2.37 olarak belirlenmiştir ($\chi^2 = 22.646$ $p < 0.001$).

Özel bir hastanede diyet polikliniğine başvuran hastalara ve sağlık personeline uygulanmış bir araştırmada; hastalar kullanım sebebi olarak %45.83 oranında zayıflamak için olduğunu belirtmiş, sağlık personelleri ise kullanım sebepleri olarak % 48.15 oranında gebelik olduğunu belirtmiştir. Gebelik sırasında kullanım amacı olarak bebeğin ve annenin sağlıklı bir hamilelik geçirmesi buna bağlı olarak bağışıklık sistemini korumak ve güçlendirmek amacıyla kullandıklarını

belirtmişlerdir. Anketimizde kullanım sebebi olarak sağlığa faydası ve bağışıklık sistemini kuvvetlendirmesi yüksek payda almıştır. Anketimiz katılımcıları ve sağlık personellerinin kullanım sebeplerinin aynı olduğu düşünülmektedir. Aynı hastanede gıda takviyelerinin neden kullanılmadığı da sorulmuştur. Cevap olarak; hastalardan %93 oranında ihtiyaç duymadım yanıtı alınmıştır.

Sağlık personeli de %71.25 oranında ihtiyaç duymadığını ve bu sebepten kullanmadığını belirtmiştir [2].

Tayvan'da 65 yaş üstü 458 kadın ve 456 erkekle yapılmış araştırmada erkeklerin kullanım nedeni dengesiz olan bes-

Tablo 17. Katılımcıların gıda takviyeleri hakkında bilgi ve bilinç düzeylerine ait oranlar

	Sayı	Kadın %	Sayı	Erkek %	Sayı	Toplam %
Gıda takviyelerinden uzak durulması gerekir.						
Katılıyorum	98	12.25	42	5.25	140	17.5
Katılmıyorum	331	41.375	92	11.5	423	52.87
Kısmen katılıyorum	144	18	33	4.125	177	22.12
Cevap vermeyenler	44	5.5	16	2	60	7.5
$\chi^2 = 6.147; p = 0.046$						
Gıda takviyelerinin çeşitli alerjik hastalıklara yol açma durumu						
Katılıyorum	247	30.875	59	7.375	306	38.25
Katılmıyorum	140	17.5	45	5.625	185	23.12
Kısmen katılıyorum	155	19.375	56	7	211	26.37
Cevap vermeyenler	75	9.375	23	2.975	98	12.25
$\chi^2 = 4.075; p = 0.130$						
Gıda takviyelerinin saklanma koşullarına dikkat edilip ve ona göre muhafaza edilmesi durumu						
Katılıyorum	459	57.375	123	15.37	582	72.75
Katılmıyorum	30	3.75	17	2.125	47	5.875
Kısmen katılıyorum	27	3.375	11	1.375	38	4.75
Cevap vermeyenler	101	12.626	32	4	133	16.62
$\chi^2 = 6.530; p = 0.038$						
Kullanılan gıda takviyelerinde cam ambalajın plastik ambalaja tercih edilmesi durumu						
Katılıyorum	379	47.375	98	12.25	477	59.62
Katılmıyorum	79	9.875	30	3.75	109	13.62
Kısmen katılıyorum	41	5.125	23	2.875	64	8
Cevap vermeyenler	118	14.75	32	4	150	18.75
$\chi^2 = 8.849; p = 0.012$						
Satın alınan gıda takviyelerinin markasına göre tercih edilme durumu.						
Katılıyorum	323	40.375	100	12.5	423	52.87
Katılmıyorum	95	11.875	28	3.5	123	15.37
Kısmen katılıyorum	92	11.5	23	2.875	115	14.37
Cevap vermeyenler	107	13.375	32	4	139	17.37
$\chi^2 = 0.680; p = 0.712$						

lenme alışkanlıklarının yerini doldurmak amacıyla, kadınları ise eklemlerinde oluşan ağrıları azaltmak olduğu belirlenmiştir. Kadınların kullanım amacına çalışmamızdaki yüksek orana sahip olan sağlığa faydası olduğu için kullanıyor denilebilir [8].

Gıda takviyelerinin kullanımına ilişkin Ankara’da yapılan 137 kişilik bir çalışmada kullanım sebebi olarak erkeklerde, zindelik ve bağıışıklığı arttırmak olarak söylenmiştir. Kadınlarda, bağıışıklığı arttırmak, zindelik ve yaşlanmayı geciktirmek amacıyla kullandıklarını belirtmişlerdir. Bu çalışmada da kullanım sebepleri çalışmamızdaki ile örtüşmektedir [8].

Bir çalışmada gıda takviyesi kullanmayan 624 katılımcıya neden kullanmadıkları sorulmuş ve yanıt olarak; %69.1’i ihtiyacı olmadığını söylemiş, %23.6 dışarıdan gıda takviyesi alınmasını uygun görmediklerini belirtmişlerdir. Aynı çalışmada gıda takviyesi kullanan 386 katılımcıya neden kullandıkları sorulmuş ve cevap olarak; %29’u sağlığına faydası olduğu için kullandığını ve %20.1’i zihinsel performansı arttırdığı için kullandığını belirtmiştir. Gıda takviyesi tüketen katılımcıların tüketme sebeplerinden ilki çalışmamızdaki kullanım sebebiyle aynıdır

Anket çalışmasında katılımcılara Gıda Takviyeleri Sizce Güvenilir mi? sorusu sorulmuş ve %16.25 oranında ‘Evet’, %19.62 oranında ‘Hayır’, %64.12 oranında ‘Kısmen’ cevabı alınmıştır. Anket çalışması sonucunda katılımcıların çoğu

gıda takviyelerini kısmen güvenilir bulmaktadır. Kadınların %51.75’i gıda takviyelerini kısmen güvenilir bulurken erkeklerin %12.37’i kısmen güvenilir bulmaktadır ($\chi^2 = 10.369; p < 0.05$).

Yapılan bir çalışmada İstanbul ilinde 4 farklı sosyo-kültürel grubu temsil eden 1000 kişilik bir gruba ‘Vitaminlerde fiyat mı güvenilirlik mi daha önemlidir?’ sorusu sorulmuş ve %12.9 oranında ‘fiyat’, %34.8 oranında ‘güvenilirlik’, %37.6 oranında ‘her ikisi de’ ve %11.1 oranında ‘fikrim yok’ cevabı alınmıştır. İlgili çalışmadan elde edilen sonuç vitamin kullanımında fiyat ve güvenilirliğin aynı oranda önemli olduğu görülmüştür. [5].

Tablo 5’de yapılan çalışmada katılımcılar sadece bir şıkkı seçmişlerdir. Anket çalışmasında katılımcılara ‘Hangi gıda takviyelerini kullanıyorsunuz?’ sorusu sorulmuş olup %17.62 oranında ‘vitamin’, %8 oranında ‘mineral’, %4.25 oranında ‘sporcu gıdası’, %4.75 oranında ‘fonksiyonel gıda’, %5.12 oranında ‘bitkisel gıda’ ve %60.25 oranında boş cevap alınmıştır. Kadınların %13.87’i vitamin kullandığını belirtirken erkeklerin ise %3.75’inin kullandığı tespit edilmiştir. Kadınların erkeklere göre daha fazla vitamin kullandığı sonucuna ulaşılmıştır ($\chi^2 = 48.945 p < 0.05$).

Tablo 6’da yapılan çalışmada katılımcılar sadece bir şıkkı seçmişlerdir. Anket çalışmasında katılımcılara ‘Hangi vitamini kullanıyorsunuz?’ sorusu sorulmuş olup %6.75

oranında ‘C vitamini’,%12.12 oranında ‘D vitamini’,%13.62 oranında ‘B12 vitamini’,%4.75 oranında ‘Multivitamin’,%2.25 oranında ‘Folik asit’,%3.5 oranında ‘diğer vitamin türleri’ ve %57 oranında boş cevap elde edilmiştir.

Yapılan bir çalışmada 4 farklı sosyo-kültürel yapıya sahip yerleşim bölgelerinde ikamet eden 1000 kişi ile yapılan bir anketten; %38 oranında ‘kombinasyonlar’,%13.7 oranında ‘A,D,E,K vitaminleri’,%11.5 oranında ‘B vitamini’,%17.9 oranında ‘C vitamini’,%18.9 oranında ‘diğer vitaminler’ cevapları alınmıştır. İlgili çalışma ile anket çalışmamız kıyaslandığında D ve B vitamini kullanım oranları arasında paralellik görülmektedir [5].

Tablo 7’de yapılan çalışmada katılımcılar sadece bir şıkkı seçmişlerdir. Anket çalışmasında katılımcılara ‘Hangi minerali kullanıyorsunuz?’ sorusu sorulmuş olup %4.12 oranında ‘Kalsiyum’, %3.37 oranında ‘Magnezyum’, %13.5 oranında ‘Demir’, %2.37 oranında ‘Çinko’, %5 oranında ‘Diğer’ ve %71.62 oranında boş cevap elde edilmiştir. İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Narlidere 4 No’lu Eğitim Aile Sağlığı Merkezi’ne başvuran 18-65 yaş arası hastalara yapılan bir çalışmada ‘Hangi tür gıda takviyeleri alıyorsunuz?’ sorusuna %30.8 oranında ‘Magnezyum’, %26.2 oranında ‘Demir’, %7.7 oranında ‘Kalsiyum’, %7.7 oranında ‘Çinko’, %2.3 oranında ‘Selenyum’, %0.8 oranında ‘Krom’, cevapları alınmıştır. İlgili çalışma ile anket sonuçları kıyaslandığında kişilerin kullandıkları mineral çeşitlerinde ve kullanım oranlarında paralellik görülmektedir [9].

Tablo 8’de yapılan çalışmada katılımcılar sadece bir şıkkı seçmişlerdir. Anket çalışmasında katılımcılara ‘Kilo kontrol ürünü kullanıyorsanız hangisini kullanıyorsunuz?’ sorusu sorulmuş olup %5 oranında ‘Protein’, %1.12 oranında ‘Karbonhidrat’, %0.62 oranında ‘Yağ’, %3.75 oranında ‘Zayıflama Ürünleri’, %5.37 oranında ‘Diğer’ ve %84.12 oranında boş cevap elde edilmiştir. Anket sonuçlarına göre soruyu cevaplayan katılımcıların çoğu diğer seçeneğinde belirttikleri ürünleri tercih etmişlerdir.

Tablo 9’da yapılan çalışmada katılımcılar sadece bir şıkkı seçmişlerdir. Anket çalışmasında katılımcılara ‘Fonksiyonel gıda ürünü kullanıyorsanız hangisini kullanıyorsunuz?’ Sorusu sorulmuş olup %12.37 oranında ‘Balık Yağı’, %4.62 oranında ‘Probiyotik’, %1 oranında ‘Ginseng’, %3.87 oranında ‘Diğer’ ve %78.12 oranında boş cevap elde edilmiştir.

Trakya bölgesinde yaşayan ve farklı sosyokültürel yapıya sahip 1010 kişi ile gerçekleştirilen anketlerde katılımcılara ‘Gıda takviyesi olarak balık yağı kullandınız mı / kullanıyor musunuz?’, sorusu sorulmuş olup 386 katılımcıdan %30.1 oranında ‘Evet’, %69.9 oranında ‘Hayır’ cevabı alınmıştır [10]. Anket çalışmamızda soruya cevap veren katılımcıların çoğunun balık yağını tercih ettikleri görülmektedir. Bu durumda ilgili çalışma ile paralellik gözlemlenmektedir.

Tablo 10’da yapılan çalışmada katılımcılar sadece bir şıkkı seçmişlerdir. Anket çalışmasında katılımcılara ‘Hangi fonksiyonel gıda çeşidini kullanıyorsunuz?’ sorusu sorulmuş olup %3.12 oranında ‘Chia tohumu’, %1.5 oranında ‘Keten tohumu’,%11.37 oranında ‘Yeşil çay ekstraktı’, %7.25

oranında ‘Diğer’ ve %76.75 oranında boş cevap elde edilmiştir.

35-45 yaş arası obez kadınlarla yapılmış bir çalışmada ‘Herhangi bir bitkisel zayıflama ürünü kullanıyor musunuz?’ sorusu sorulmuş olup ‘Evet’ cevabı aldıkları katılımcılara ‘Tercih ettikleri ürünü ve sıklığını yazmaları istenmiştir. Çalışma sonucunda; ‘Bitki çayları’ için %62 oranında ‘Her gün’, %22 oranında ‘haftada 3-4 gün’, %16 oranında ‘Haftada 1-2 gün’ cevapları alınmıştır. ‘Keten tohumu’ için %10 oranında ‘Her gün’, %30 oranında ‘Haftada 1-2 gün’, %46 oranında ‘15 günde 1’, %10 oranında ‘Daha seyrek’ ve %4 oranında ‘Hiç’ cevabı alınmıştır. ‘Chia tohumu’ için %4 oranında ‘Her gün’, %20 oranında ‘Haftada 1-2 gün’, %40 oranında ‘15 günde 1’, %32 oranında ‘Daha seyrek’ ve %4 oranında ‘Hiç’ cevabı alınmıştır. ‘Yulaf’ için %4 oranında ‘Her gün’, %4 oranında ‘Haftada 3-4 gün’, %16 oranında ‘Haftada 1-2 gün’, %36 oranında ‘15 günde 1’, %20 oranında ‘Daha seyrek’ ve %20 oranında ‘Hiç’ cevabı alınmıştır. Günlük kullanım oranlarına bakıldığında en çok kullanılan ‘Bitki Çayı’ olarak görülmektedir. İlgili çalışma ve anket arasında paralellik görülmektedir [3].

Tablo 11’de yapılan çalışmada katılımcılar sadece bir şıkkı seçmişlerdir. Çalışmamızda katılımcılarımıza yönelttiğimiz sosyal medyada diyet, beslenme vb. üzerine bir sayfa veya kanal takip ediyor musunuz sorusuna çoğunluk %60.62 oranıyla hayır cevabını verirken, %39.37’lik kısım ise evet cevabı vermiştir.

Takviye kullanan katılımcıların kim tavsiyesiyle kullanmaya başladıklarına ilişkin sorunun cevapları sırasıyla %23.87’lik oranla doktor tavsiyesi, %9.62’lik oranla aile-arkadaş tavsiyesi, %4.87’lik oranla televizyon-internet ve %1.62’lik oranla eczacı tavsiyesi şeklinde sıralanmaktadır. Bu sonuçların yanında %60’lık kısım ise bu soruyu cevaplandırmamıştır.

Gıda takviyelerinin fiyatları konusundaki katılımcıların düşünceleri %41.75’lik oranla pahalı olduğuna yöneliktir. Ucuz olduğunu düşünen katılımcı sayısı ise %0.37 gibi oranla oldukça düşüktür.

Son yıllarda sağlık programlarındaki artış ve izlenme oranlarının artması, bu programda yer alan uzmanlara olan güven ve ilgi tüketicilerde algı değişmesine neden olmaya başlamıştır. Çalışmada, araştırmaya katılan kadınların görsel medyada yer alan uzman görüşlerine güvenmeleri ile bu ürünleri satın almaları arasında istatistiksel açıdan anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir. Bu durum katılımcıların hem uzman kişilerin tavsiyesine hem de televizyon-internet aracılığı ile takviye kullanımına yönlendirilmeye örnek verilebilir. Veriler çalışmamız ile kıyaslandığında da birbirine paralel cevapların elde edildiği görülür [11].

Tablo 12’de yapılan çalışmada katılımcılar sadece bir şıkkı seçmişlerdir. Anket çalışmasında katılımcılara ‘Gıda takviyelerini nereden satın alırsınız?’ sorusu sorulmuş olup %3.12 oranında ‘Eczane’, %1.5 oranında ‘Aktar’, %11.375 oranında ‘Televizyon-internet’, %7.25 oranında ‘Market’, %76.75 oranında ‘Diğer’ ve %39.87 oranında boş cevabı alınmıştır. Yapılan çalışmada kadınların %37.62’i gıda takviyelerini eczanelerden temin ederken erkeklerin ise %7.37’inin eczanelerden temin ettiği tespit edilmiştir.

Kadınların erkeklere göre eczaneleri daha fazla tercih ettiği belirlenmiştir ($\chi^2 = 35.517$ p < 0.05).

İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Narlıdere 4 No'lu Eğitim Aile Sağlığı Merkezi'ne başvuran 18-65 yaş arası hastalara yapılan bir çalışmada katılımcılara 'Gıda takviyelerinizi nereden temin ediyorsunuz?' sorusu sorulmuş olup %83.1 oranında 'Eczane', %6.9 oranında 'Market', %3.8 oranında 'İnternet sitesi', %3.2 oranında 'Aktar' ve %3.1 oranında 'Spor salonu' cevabı alınmıştır. İlgili çalışma ile anket sonuçları kıyaslandığında temin yöntemlerine verilen cevapların oranları farklılık göstermektedir [9].

Gıda takviyesi satın alımlarda son tüketim tarihine dikkat edenlerin oranı %49.12 iken, dikkat etmeyenlerin oranı ise %4.5'dir. Bu soruyu cevaplandırmayanların oranı da %46.37 şeklindedir.

Kullanıcı bilincini ölçtüğümüz bir diğer soru olan kullandığınız ürünün içeriği hakkında bilginiz var mı sorusuna verilen cevapları incelediğimizde %37.75'lik çoğunluğun evet cevabı verdiği, bunun yanında %8.75'lik kısım ise hayır cevabı vermiştir. %53.5'lik katılımcı da bu soruyu cevaplandırmamıştır.

Bu konuyla ilgili daha önce yapılmış bir çalışmada katılımcılara yöneltilen gıda ürünü satın alırken etiket bilgilerini okur musunuz sorusuna %30.5 hiçbir zaman, %49 bazen ve %20.5 her zaman cevabına vermiştir. Bu sonuçlara göre etiket konusunda bizim katılımcılarımızın daha duyarlı olduğunu söyleyebiliriz [12].

Anket çalışmasında katılımcılara Devletin gıda takviyeleri hakkında gerekli standartlar ve denetimleri yaptığını düşünüyor musunuz? sorusu sorulmuş ve %77.12 oranında 'Evet', %22.87 oranında hayır cevabı alınmıştır. Anket sonucunda katılımcıların çoğu yapılan denetimleri yeterli bulmaktadır.

Çalışmada katılımcılara Kullandığınız ürünün Sağlık Bakanlığı tarafından onaylı olması onu tamamen sağlıklı kılar mı? sorusu sorulmuş ve %16.12 oranında 'Evet', %37 oranında 'Hayır', ve %46.87 oranında da boş cevap verilmiştir. Anket sonucunda katılımcıların kullanılan ürünün devlet tarafından denetim yapılması onu tamamen sağlıklı kıldığı konusunda net bir kararda olmadıkları görülmüştür.

Tablo 15'de yapılan çalışmada katılımcılar sadece bir şıkki seçmişlerdir. Anket çalışmasında katılımcılara 'Kullandığınız gıda takviyesinin herhangi bir yan etkisini gördünüz mü?' sorusu sorulmuş olup %4.37 oranında 'Evet', %39.12 oranında 'Hayır' ve %56.87 oranında boş cevap alınmıştır. 'Evet' cevabı verenler katılımcılara 'Ne gibi bir yan etkiyle karşılaştınız?' sorusu yönetildi. Soruya

%1.75 oranında 'Alerjik Reaksiyon', %0.12 oranında 'Böbrek taşı oluşumu', %0.25 oranında 'Karaciğer rahatsızlığı', %0.37 oranında 'Kalp ve damar hastalıkları', %7.62 oranında 'Diğer' ve %89.87 oranında boş cevap verildi. Anket sonuçlarına göre soruyu cevaplayan katılımcıların çoğu herhangi bir yan etki görmediklerini belirtmiştir.

Anket çalışmasında katılımcılara 'Gıda takviyelerinin faydasını gördünüz mü?' sorusu sorulmuş olup %20.37 oranında 'Evet', %3.25 oranında 'Hayır', %20.5 oranında 'Kısmen' ve %55.87 oranında boş cevabı alınmıştır. Yapılan

çalışmada kadınların %14'ü, erkeklerin ise %6.37'i evet cevabını vermiştir. Kadınların erkeklere göre gıda takviyelerini daha faydalı bulduğu gözlemlenmiştir ($\chi^2 = 11.624$; p<0.05).

İstanbul ilinde bulunan 2 farklı spor salonunda 20 erkek ve 20 kadın olmak üzere toplam 40 kişi ile yapılmış bir çalışmada 'Besin takviyesi kullanımının yararlı olduğunu düşünüyor musunuz?' sorusuna %62.5 oranında 'Evet', %22.5 oranında 'Kararsız' ve %15 oranında 'Hayır' cevabı alınmıştır. İlgili çalışma ile anket çalışmamız kıyaslandığında paralellik görülmektedir [13].

Anket katılımcılarının büyük çoğunluğu gıda takviyelerinden uzak durulmalıdır sorusuna %52.87'lik oranda katılmıyorum cevabı verirken %17.5'lik kısım ise katılıyorum cevabı vermiştir. Kadın katılımcıların %41.37'i, erkeklerin %11.5'i katılmıyorum cevabını vermişlerdir. Sonuçlara göre kadınların erkeklere göre gıda takviyesi kullanımına daha yatkın olduğu söylenebilir ($\chi^2=6.147$; p<0.05). Katılımcılar gıda takviyelerinin alerjik rahatsızlara yol açar sorusuna %38.25 oranında katılıyorum cevabını vermiştir. Kadınların %30.87'i, erkeklerin %7.37'i katılıyorum cevabını vermiştir. Bu durumda gıda takviyesinden kaynaklı alerjik reaksiyonla karşılaşma durumları açısından kadın ve erkekler arasında istatistiksel olarak fark olmadığı saptanmıştır ($\chi^2=4.075$; p>0.05).

Gıda takviyelerinin uygun şekilde muhafaza edilip edilmediğini sorduğumuz soruda katılımcılar, %72.75'lik oranla katılıyorum cevabı vermiştir. Kadınların %57.37'i, erkeklerin %15.37'i katılıyorum yanıtını vermiştir. Bu durumda kadınların uygun koşullarda muhafaza etmeye daha dikkat ettikleri söylenebilir ($\chi^2=6.530$; p<0.05). Katılımcıların takviye satın alırken ambalaja göre tercihlerinin değişip değişmediğini sorduğumuzda da çoğunluk %59.62'lik oranla katılıyorum cevabını vermiştir.

Kadınların %47.35'i, erkeklerin %12.25'i katılıyorum cevabını vermiştir. Sonuçlara bakıldığında kadın tüketicilerin ambalaj materyaline daha fazla önem verdiği anlaşılmaktadır ($\chi^2=8.849$; p<0.05). Satın alımlarda markaya dikkat ediyor musunuz sorusunda katılımcıların %52.87 gibi bir oranla katılıyorum cevabı verdiği görülmüştür. Kadınların %40.375'i, erkeklerin ise %12.5'inin markaya göre tercih yaptığı; bu durumda satın alırken markaya önem verme açısından kadın ve erkekler arasında istatistiksel olarak fark olmadığı belirlenmiştir ($\chi^2=0.680$; p>0.05).

Yapılan bir çalışmada katılımcıların %55.00'lik kısmı "Ambalajda üretici firma isminin bulunması" ifadesine Çok Önemli olarak cevap vermişlerdir. %31.70'lik kısmı Önemli demekle yetinmiş, %11.70'lik kısmı Ne Önemli Ne Önemsiz, %1.70'lik kısmı Önemli Değil olarak cevap vermişlerdir. Bizim çalışmamızda markaya göre tercih edilme durumu %52.87 olduğu göz önüne alındığında cevapların çok yakın olduğu görülmektedir [14].

4 Sonuçlar

Yapılan anket kapsamında gıda takviyeleri tüketim oranı oldukça düşük çıkmıştır. Buna sebep olarak gıda takviyeleri hakkında insanların yanlış, yetersiz bilgiye sahip olmaları ve devlet tarafından yapılan denetimlerin tüketiciler tarafında güvenilir bulunmaması gösterilebilir. Gıda takviyeleri satın

almırken etiket bilgilerine dikkat edilme oranı yüksektir ancak yeterli değildir. Bu bilincin artırılması eğitim seviyesi ile alakalı olabilmektedir. Anket kapsamında ulaşılan kişilerin büyük çoğunluğunu kadınların oluşturmasından dolayı yüzdelik dilimlerde kadınların oranları daha fazladır. Buna bakılarak kadınların erkeklere göre bilinç düzeyinin daha olduğu yargısına kesin olarak varılamaz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] A. Petroczi, G. Taylor and D. P. Naughton, Mission Impossible? Regulatory and enforcement issues to ensure safety of dietary supplements. *Food and Chemical Toxicology*, 49, 393-402, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2010.11.014>.
- [2] S. K. Bakan, Çankırı Özel Karatekin Hastanesi sağlık personeli ve diyet polikliniğine başvuran hastalarda gıda takviyelerinin kullanımı üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Besin Analizleri ve Beslenme Anabilim Dalı, Türkiye, 2013.
- [3] E. V. Er, Gıda takviyeleri kullanımının belirlenmesi üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Türkiye, 2019.
- [4] A. Mermertaş, Spor merkezlerinde fitness egzersizi yapan bireylerin doping ve gıda takviyeleri hakkındaki bilgi düzeylerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [5] F. Coşkun ve H. Turhan, İstanbul'da vitamin kullanım alışkanlıkları ve bu alışkanlıkları etkileyen faktörler üzerine bir araştırma. *Marmara Pharmaceutical Journal*, 4(1), 21-28, 2010.
- [6] Y. Yavaş, A. H. Sezgin, S. Bilget, H. Aras, B. Varol, U. Demir ve A. Musmul, Esogü Tıp ve Mühendislik Fak. 2. sınıf öğrencilerinin besin destekleri ve bitkisel ürün kullanımını konusundaki tutumlarının araştırılması, *Türk Tıp Öğrencileri Araştırma Dergisi*, 1(3), 59-66, 2019.
- [7] S. Nas Can, Beden kitle indekslerine göre bireylerin diyet ürünler kullanma durumları ile bilgi düzeylerinin saptanması. Doktora Tezi Haliç Üniversitesi, Beslenme Bilimleri Anabilim Dalı, Türkiye, 2012.
- [8] F. Bozkurt Bekoğlu ve A. Ergen, Türkiye'de besin destek ürünlerine yönelik görüşler ve tüketici profilini tanımlamaya yönelik bir araştırma. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 8(1), 323-341, 2016.
- [9] N. S. Karadağ, Aile sağlığı merkezine başvuran 18-65 yaş arası bireylerin gıda takviyesi alım davranışları ve ilişkili etmenlerin değerlendirilmesi. Tıpta Uzmanlık Tezi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Tıp Fakültesi. Aile Hekimliği Anabilim Dalı, Türkiye, 2019.
- [10] H. Martin, 35-45 yaş arası obez kadınlarda bitkisel hayıflama ürünleri kullananlar ve kullanmayanların antropometrik ölçümler açısından değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Haliç Üniversitesi, Beslenme ve Diyetetik Anabilim Dalı, 2018.
- [11] C. Ö. Dölekoğlu, A. Şahin ve F. H. Giray, Kadınlarda fonksiyonel gıda tüketimini etkileyen faktörler: Akdeniz illeri örneği, *Tarım Bilimleri Dergisi*, 21, 572-584, 2015.
- [12] M. Babaoğlu, A. Şener ve E. B. Buğday, Tüketici profili ve bilinç düzeyi araştırması. Tüketici profili, eğilimleri ve davranışlarının analizi, TC Gümrük ve Ticaret Bakanlığı, Tüketici akademisi projesi, 2016.
- [13] B. Çavdar, Y. Cinel, B. Bayazıt ve O. Yılmaz, Fitness merkezlerinde egzersiz yapan bireylerin supplement kullanımı ile ilgili görüşlerinin belirlenmesi. *Muş Alparslan Üniversitesi Uluslararası Spor Bilimleri Dergisi*, 2(2), 19-28, 2018.
- [14] B. Değirmenci, E. Yavuz, Gıda ambalajlarının tüketici satın alma davranışına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Türkiye, 2019.





Turizm kentlerinde taşınmaz değerlemenin CBS ve AHP yöntemi yardımıyla incelenmesi: Alanya kenti örneği

Analysis of real estate in tourism cities by GIS and AHP method: The case of Alanya city

Tansu Alkan^{1,*} , Süleyman Savaş Durduran¹ 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya Türkiye

Özet

Taşınmaz değerlendirme, bir taşınmazın ve taşınmaza bağlı hakların değerlendirilmesidir. Ülkemizde taşınmaz değerlendirme ile ilgili yasal dayanakların eksik olması ve kesin bir matematiksel yöntemin bulunmaması sebebiyle kamulaştırma, özelleştirme, kentsel dönüşüm, arsa ve arazi düzenlemesi, emlak vergisi ve alım-satım gibi uygulamalarda aynı taşınmaza ait farklı değerlerin elde edilmesi ekonomik ve sosyal sorunlara sebep olmaktadır. Taşınmaz değerlendirme işlemleri bağımsız ve doğru veriler kullanılarak hızlı ve güvenilir bir şekilde yapılmalıdır. Bu çalışma, Türkiye'nin turizm sektörü ile ön planda olan Antalya ili Alanya ilçesinde gerçekleştirilmiştir. Taşınmazların değerini etkileyen yapısal ve konumsal kriterler dikkate alınmıştır. Anket uygulaması yapılarak uzman kişilerin görüşlerine başvurulmuştur. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi kullanılarak taşınmazın değerini etkileyen kriterlerin önem dereceleri belirlenmiştir. Yapısal özellikler kriterlerinden oda sayısı kriteri ile konumsal özellikler kriterlerinden sağlık alanlarına uzaklık kriteri en büyük ağırlığa sahiptir. Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) teknolojileri kullanılarak taşınmazların konumları ve sosyal donatı alanlarına olan mesafeleri tespit edilmiştir. Her bir taşınmazın sahip olduğu yapısal ve konumsal özellikleri dikkate alınarak AHP ile elde edilen ağırlıklar doğrultusunda her bir taşınmaz için AHP değeri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar ile taşınmazların satış değerleri arasındaki ilişki incelenmiş ve AHP değerleri ile satış değerleri arasındaki ortalama yaklaşıklık değeri %83,85 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Taşınmaz değerlendirme, Taşınmaz değer haritası, Analitik Hiyerarşi Süreci, Coğrafi Bilgi Sistemi

Abstract

Real estate valuation is the determination of the value of a real estate and real estate rights by considering the criteria and conditions on the valuation day. In our country, due to the lack of legal bases regarding real estate valuation and the lack of a definitive mathematical method, obtaining different values of the same real estate in applications such as expropriation, privatization, urban transformation, plot and land regulation, real estate tax and purchase-sale causes economic and social problems. Real estate valuation procedures must be carried out quickly and reliably using independent and accurate data. This study was carried out in Alanya district of Antalya province that at the forefront of Turkey's tourism sector. Structural and spatial criteria that affect the value of the real estate were taken into consideration. The opinions of the experts were taken by questionnaire application. Using Analytical Hierarchy Process (AHP) method, the importance levels of the criteria affecting the value of the real-estate were determined. The room number criterion from the structural properties criteria and distance to the health areas criterion from the spatial properties criteria have the greatest weight. Using the Geographical Information System (GIS) technologies, the locations of the real-estate and their distances to the social reinforcement areas were determined. AHP value was calculated for each real estate by considering the structural and spatial properties of each real estate. The relationship between the obtained results and the sales values of the real estates was examined and the average approximate value between the AHP values and the sales values was calculated as 83.85%.

Keywords: Real estate valuation, Real estate value map, Analytical Hierarchy Process, Geographic Information System

1 Giriş

Taşınmaz, kişiler ve kurumlar tarafından sahip olunan maddi kaynakların değerlendirildiği bir yatırım aracıdır. Taşınmaz değerlendirme ise bir veya birden fazla taşınmazın ve bu taşınmazlara bağlı hak ve faydaların nesnel kriterlere dayanarak değerlendirilmesidir. Taşınmaz değerlendirme, sahip olunan varlığa değer biçilmesinden beri var olan bir alandır ve değerlendirme sonucu elde edilen değerlerin vergiye yansıtılması en önemli ekonomik kaynaklardan biridir [2, 3]. İmar planlarının ekonomik olarak değerlendirilmesi, taşınmaz sektörünün güvenli ve açık bir hale getirilmesi ve piyasada meydana gelen fiyat değişiminin takip edilmesi ile taşınmaz değerlendirme alanına olan ilgi ve önem artmıştır. Taşınmaz değerlendirme alanına hem kamulaştırma, özelleştirme, arsa ve arazi düzenlemesi, kentsel dönüşüm, vergilendirme ve tescile esas işlemler gibi kamusal uygulamalarda hem de bankacılık, sigortacılık,

kredilendirme ve alım-satım gibi bireysel uygulamalarda ihtiyaç duyulmaktadır [4, 5].

Taşınmaz değerlendirme son yıllarda gelişmeye başlayan ve akademik çalışmalar yapılan bir alandır. Taşınmaz değerlendirme ile ilgili kamulaştırma, özelleştirme, kadaströ, emlak vergisi gibi kanunlarda hükümler bulunmasına rağmen genel anlamda bu konu ile ilgili herhangi bir yasal düzenleme yoktur. Taşınmaz değerlendirme alanında kullanılan kesin bir matematiksel yöntemden de bahsetmek mümkün değildir. Yakın zamana kadar kişilerin sezgi ve deneyimlerine göre yapılan taşınmaz değerlendirme uygulamaları günümüzde nesnel ve bilimsel yöntemlerin kullanılmasını gerekli kılmıştır [6, 7]. Taşınmaz değerlendirmede kullanılan geleneksel, istatistiksel ve modern olarak gruplandırılacak birçok yöntem vardır. Taşınmaz değerlendirme uygulamalarında kullanılan bu yöntemler sonucu elde edilen değerler ile piyasa değerleri arasında farklılıklar bulunmaktadır ve bunun yanı sıra farklı yöntemler

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: tansualkan93@gmail.com (T. Alkan)

Geliş / Received: 01.07.2020 Kabul / Accepted: 12.10.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.760816

kullanılarak aynı taşınmazlar için elde edilen değerler birbirlerinden farklılık gösterebilmektedir [2, 8]. Bir taşınmazın değerinin belirlenebilmesi için öncelikle taşınmazın değerini etkileyen kriterlerin tespit edilmesi gerekir. Her taşınmaz sahip olduğu yasal, konumsal, fiziksel, yapısal ve çevresel özellikleri ile birbirinden farklıdır ve bu özellikler nicelik ve nitelik bakımından kişiden kişiye değişebilen özelliklerdir. Bu kriterler sayısal olarak ifade edilirse taşınmaz değeri tespit edilebilir.

Taşınmaz değerlemede kesin bir model veya matematiksel yöntemden bahsedilemez. Çünkü değerleme işlemlerinde kullanılan birçok yöntem vardır. Taşınmaz değerlemede kullanılacak yöntemin belirlenmesinde taşınmazın değerini etkileyen yapısal ve konumsal özellikler, çevresel nitelikler, sosyal ve ekonomik faaliyetler ve yasal mevzuatlar gibi birçok kriter etkilidir. Bir taşınmazın değerlendirilmesinde eş zamanlı olarak birden fazla yöntem kullanılabilir ve değer takdiri farklı yöntemlerle desteklenebilir [9]. Teknolojinin gelişmesi ve geleneksel yöntemlerin uygulanmasında yaşanan sorunlar sebebiyle yeni yöntemlerin arayışına girilmiştir ve alternatif değerlendirme yöntemleri ortaya konulmuştur [10]. Taşınmaz değerlemede kullanılan yöntemler geleneksel, istatistiksel, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) ve yapay zeka teknikleridir.

Değerleme yöntemlerinden ÇKKV yöntemleri birden fazla kriteri birlikte değerlendirerek alternatiflere değerler atayan bir süreçtir. Aynı anda ve birden fazla kriterin değerlendirilmesi sonucu en iyi alternatifin tercih edilmesine olanak tanıyan yöntemlerdir. Taşınmazın değerini etkileyen birçok kriter olduğu için birden fazla kriteri aynı anda değerlendiren bu yöntemler değerlendirme işlemlerinde kullanılan yöntemlerdir. ÇKKV yöntemlerinden en çok tercih edileni Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemidir. Bunun nedeni, karar verme problemlerinde birden fazla kriteri nitel ve nicel özellikleri ile birlikte değerlendiren matematiksel bir yöntem olmasıdır. AHP yönteminin temelini ikili karşılaştırma matrisleri oluşturur. AHP yönteminde kriterler karşılıklı olarak karşılaştırılır ve kriterlerin birbirlerine göre önem dereceleri tespit edilir. Taşınmaz değerlendirme uygulamalarında AHP yöntemiyle kriterlere ait ağırlıklar elde edilir ve kriterlerin taşınmazı ne derecede etkilediği tespit edilir. Taşınmaz değerlendirme uygulamalarında karar destek sistemleri ile Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) birlikte kullanılabilir. Taşınmazın konumsal özellikleri ile ilgili işlem ve analizlerde ve taşınmaz değer haritalarının üretilmesinde CBS teknolojilerinden faydalanılır. CBS teknolojilerinin taşınmaz değerlendirme uygulamalarında kullanılması bu sektörde çalışan ve araştırma yapan kullanıcılara büyük kolaylık sağlamaktadır. Analiz yetenekleri ile CBS teknolojileri taşınmaz değerlendirme çalışmalarında ortaya çıkan sorunların çözümüne yönelik farklı seçenekler geliştirerek verileri işleme, anlama, yorumlama, sunma, görselleştirme ve paylaşma adımlarını etkili bir şekilde yönetir [11]. AHP ve CBS entegrasyonunun taşınmaz değerlendirme uygulamalarında kullanılması ile toplu taşınmaz değerlendirme işlemleri daha kısa sürede ve nesnel olarak gerçekleştirilebilmektedir. AHP ile taşınmazın değerini etkileyen kriterlerin nitel ve nicel özellikleri birlikte değerlendirilmekte ve kriterlerin

birbirlerine göre önem dereceleri tespit edilmektedir. Bu kriter ağırlıkları kullanılarak elde edilen taşınmaz değerleri CBS yardımıyla haritalar ile görselleştirilmekte ve birçok alanda kullanılmaktadır. Ayrıca CBS ile taşınmazların konumsal özellikleri ile yapılan analiz sonuçları AHP yönteminde kullanılmakta ve bilimsel sonuçlar elde edilmektedir.

Literatürde AHP yönteminin taşınmaz değerlendirme ile ilgili çalışmalarda sıkça tercih edilen bir yöntem olduğu tespit edilmiştir. Özbay [12] tarafından yapılan çalışmada AHP yöntemi kullanılarak bir arsa üzerine yapılacak olan karma kullanımlı yapı projesi için en uygun alternatif belirlenmiştir. Yılmaz [13], Kadıköy ilçesinde bulunan taşınmazların değerini etkileyen kriterleri AHP yöntemi ile incelemiş, CBS ile uzaklık-yakınlık analizleri gerçekleştirmiş ve oran çalışması ile sonuçlar irdelemiştir. Sarathy [14] tarafından, uzman görüşleri alınarak emlak sektöründeki kurumsal yenilikleri etkileyen kriterler AHP yöntemi ile belirlenmiştir. Safian ve Nawawi [15] tarafından, özel amaçlı ofisleri konumsal olarak değerlendirmek için kriterler AHP yöntemi ve CBS analizleri kullanılarak incelenmiştir. Bünyan Ünel ve Yalçın [16], konumsal olarak taşınmazın değerini etkileyen kriterler AHP yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Akkaynak [17] tarafından, taşınmaz değerlendirme uygulamasında karşılaştırma, gelir, maliyet, AHP ve bulanık AHP yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bünyan Ünel ve Yalçın [18] tarafından, on adet imar adasının değerini etkileyen ve konumsal, fiziksel ve yasal olarak üç ana başlık altında incelenen kriterler AHP yöntemi kullanılarak irdelenmiş ve CBS ile değer haritaları oluşturulmuştur. Kavas ve Topçu [19], uzman görüşü ve literatür taraması sonucu belirlenen kriterleri AHP yöntemi ile irdeleyerek taşınmaz değerlendirme uygulaması gerçekleştirmiştir. Koziol-Kaczorek [20], taşınmazların çok kriterli değerlendirilmesi için bir yöntem sunmayı amaçlamıştır. Kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesinde AHP yöntemini, regresyon modelinin parametrelerinin belirlenmesinde hedef programlama yöntemini kullanmıştır. Yalçın [21], Konya ili Selçuklu ilçesinde seçilen taşınmazlar için yapısal ve konumsal olarak 13 kriter belirlemiştir. AHP yöntemi ile taşınmazların değeri tespit edilmiş ve piyasa değerleri ile kıyaslama yapılmıştır. Gutierrez-Bucheli vd. [22], bir taşınmaz projesi için arsa seçiminde AHP yöntemini kullanmıştır. Yöneticiler ve gayrimenkul geliştiriciler tarafından dikkate alınan kriterler ile en uygun alternatif belirlenmiştir. Gürbüz [23], akademisyen bir kişinin satın alabileceği konutlar içerisinde en uygun olan alternatifi belirlemek için AHP yöntemini kullanmıştır. Belirlenen 9 kriter ile 15 alternatif içerisinde en uygun konut tespit edilmiştir. Yalçın ve Ekiz [24] tarafından, imar uygulamasında değer esaslı dağıtım yapılması için AHP yöntemi kullanılmıştır. Kriterler kadastro ve imar durumuna göre ayrı ayrı incelenmiş ve AHP yöntemi ile ağırlıklar elde edilmiştir. Dağıtım elde edilen AHP değerlerine göre yapılmış ve mevcuttaki uygulama ile kıyaslama yapılarak çalışmanın başarısı değerlendirilmiştir. Yılmaz [25], taşınmazın değerini etkileyen 16 kriter içerisinde en önemli 9 kriteri yaptığı anket çalışması ile belirlemiştir. AHP yardımıyla geliştireceği metodun

karşılaştırma yöntemi için emsal bulunmadığı durumlarda kullanılmasını ve ayrıca emsal bulunduğu durumlarda da karşılaştırma yöntemini desteklemesini amaçlamıştır. Demirel vd. [26], uzman kişilerle görüşerek taşınmazın değerini etkileyen kriterleri belirlemişlerdir. Değerleme işlemi yapılırken hangi kriterin daha önemli olduğunu belirlemek için AHP yöntemini kullanmışlardır. İpek ve Şahin [27], dört kişilik bir ailenin satın alabileceği konut seçimi için 6 adet ana ve 18 adet alt kriteri uzman görüşleri ve literatür taramasına dayanarak belirlemişlerdir. AHP yöntemini kriterlerin ağırlıklandırılmasında, gri ilişkisel analiz yöntemi ise konut seçeneklerinin sıralamasında kullanmışlardır. Bünyan Ünel ve Yalçın [28], taşınmaz değerlendirme uygulamasında kriter ağırlıklarını AHP yöntemiyle belirlemiş ve performans analizleri için çoklu regresyon analiz yöntemiyle bir değerlendirme modeli oluşturmuştur. AHP ile çoklu regresyon analizi sonucu elde edilen veriler CBS ile birleştirilmiştir. Performans karşılaştırma ve değer haritaları AHP yönteminin çoklu regresyon analiz yönteminden daha başarılı olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışmanın amacı, taşınmaz değerini etkileyen kriter ağırlıklarının uzman görüşleri ile AHP yöntemi ve CBS teknolojileri yardımıyla belirlenerek taşınmaz değer haritası oluşturmaktır. Belirlenen uygulama alanında tamamen turizm faktörüne bağlı olarak taşınmaz değerlendirme çalışmalarında oluşan olumsuz piyasa koşullarının önlenmesi ve bilimsel yöntemler ile nesnel bir şekilde taşınmaz değerlendirme yapılması amaçlanmıştır. Uygulama alanının bir turizm kenti olması nedeniyle taşınmaz değerlerini etkileyen kriterlerin yöreye özgü nitelikte belirlenerek uzman görüşleri doğrultusunda ağırlıklandırılması ve tamamen turizm faktöründen etkilenen bir bölge olması ile bu çalışma literatürdeki çalışmalardan farklılık göstermektedir. Ayrıca çalışma kapsamında, taşınmazın değerini etkileyen kriterlerin değere etkisinin matematiksel bir modelle ifade edilmesi, taşınmaz değerlendirme işlemlerinde CBS'den nasıl faydalanılabileceği ve elde edilen sonuçlar ile taşınmazların piyasa değerleri arasında tutarlılık durumunun incelenmesine ilişkin süreç ortaya konulmuştur. Bu çalışma, taşınmaz değerini etkileyen kriterlerin AHP yöntemi ile sayısal ölçütlerle ifade edilmesi ve olumsuz piyasa koşullarının önlenmesi amacıyla objektif ve bilimsel bir yöntemle taşınmaz değerlendirme uygulamasının gerçekleştirilmesi ile literatüre katkı sağlamaktadır.

2 Materyal ve metot

Taşınmaz değerlendirme uygulamalarında kullanılan yöntemler Tablo 1'de verilmiştir. Günümüzde bilim ve teknolojinin gelişmesine paralel olarak karmaşık yapıdaki problemlerin çözümünde tek faktörlü analizler yeterli değildir [29]. Tek faktörlü analizlerde problemdeki diğer faktörlerin etkileri sabit tutularak çözüme ulaşılmaya çalışılır. Fakat gerçek problemlerin var olmasına sebep olan olaylar sadece tek bir faktörün etkisi ile değil çok sayıda iç ve dış faktörlerin etkisi ile oluşur ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Tüm faktörlerin birlikte değerlendirilebildiği ÇKKV yöntemleri ile en iyi çözümü bulmak için seçenekler üretilmektedir. ÇKKV yöntemlerinden bazıları şunlardır

[13]: Ağırlıklı toplam metodu, ağırlıklı çarpım metodu, Analytic hierarchy process (AHP), Analytic network process (ANP), Elimination and choice translating reality (ELECTRE), Technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS). ÇKKV yöntemleri içerisinde en fazla kullanılan yöntem AHP yöntemidir.

Tablo 1. Taşınmaz değerlendirme yöntemleri

Geleneksel Değerleme Yöntemleri	İstatistiksel Değerleme Yöntemleri	ÇKKV Yöntemleri	Yapay Zeka Yöntemleri
*Karşılaştırma	*Nominal Yöntem	*AHP	*Makine Öğrenimi
*Gelir	*Çoklu Regresyon	*TOPSIS	*Derin öğrenme
*Maliyet	*Hedonik		

2.1 AHP yöntemi

AHP yöntemi, ilk olarak 1968 yılında Myers ve Alpert ikilisi tarafından ortaya atılmış ve 1977 yılında Saaty tarafından geliştirilerek çok kriterli karar verme problemlerinin çözümünde kullanılabilir bir hale getirilmiştir. AHP karar verme problemlerinde, birey ya da grubun önceliklerini de dikkate alan, nicel ve nitel kriterleri bir arada değerlendiren matematiksel bir yöntemdir [30].

AHP yönteminin uygulama adımları şöyledir [31]:

Problemin Tanımlanması: İlk olarak problem belirlenmeli ve ulaşılmak istenilen hedef ortaya konulmalıdır. Daha sonra problemi etkileyen kriterler değerlendirilerek alternatifler belirlenir.

Hiyerarşik Yapının Oluşturulması: Problem belirlendikten sonra amaç, kriterler ve alternatiflerden oluşan bir hiyerarşik yapı belirlenir.

İkili Karşılaştırma Matrislerinin Oluşturulması: Her bir kriter için ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulur. Bu matrisler $n \times n$ boyutunda kare matristir. İkili karşılaştırma ile kriterlerin birbirlerine göre önem dereceleri belirlenir. Kriterlerin ikili karşılaştırılmasında kullanılan ölçek Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. AHP yönteminde ikili karşılaştırma ölçeği [31]

Önem Ölçeği	Tanım	Açıklama
1	Eşit önemli	İki seçenek eşit derecede önemlidir
3	Orta önemli	Yargı ve tecrübe bir kriteri diğerine karşı biraz üstün kılmaktadır
5	Kuvvetli önemli	Yargı ve tecrübe bir kriteri diğerine karşı oldukça üstün kılmaktadır
7	Çok kuvvetli derecede önemli	Bir kriter diğerine göre üstün sayılır.
9	Kesin önemli	Bir kriterin diğerinden üstün olduğunu gösteren kanıt çok büyük güvenirliliğe sahiptir
2,4,6,8	Ara değerler	Uzlaşma gerektiğinde kullanılmak üzere iki ardışık yargı arasındaki değerlerdir

Kriterler için ağırlıkların hesaplanması: İkili karşılaştırma matrisleri oluşturulur (Denklemler(1)) ve daha sonra bir kriterin bütün kriterler içindeki ağırlığını belirlemek için sentezleme işlemine geçilir. Her bir sütun toplamı bulunur ve her bir değer ait olduğu sütun toplamına

bölünür (Denklem(2)). Elde edilen matrisin her bir satırındaki değerlerin ortalaması alınarak W sütun vektörü elde edilir (Denklem(3)).

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & 1/a_{3n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{n} \quad (3)$$

İkili karşılaştırma matrislerinin tutarlılıklarının hesaplanması: Tutarlılık oranı her bir ikili karşılaştırma matrisi için hesaplanır ve bu oran için Saaty tarafından önerilen üst limit 0.10'dur. Hesaplanan tutarlılık oranı 0.10'dan küçük bir değer çıkarsa yargılar tutarlıdır.

Tutarlılık Oranı (CR) hesaplamasının temeli kriter sayısı ile Temel Değer (λ) adı verilen bir katsayının karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Öncelikle A karşılaştırma matrisi ile W sütun vektörü çarpılır. Elde edilen D sütun vektörü (Denklem(4)) ile W sütun vektörünün elemanları karşılıklı olarak bölünür (Denklem(5)) ve aritmetik ortalaması alınır (Denklem(6)). Böylece Temel Değer (λ) katsayısı hesaplanmış olur.

$$D = [a_{ij}] \times [w_i] = [d_i] \quad (4)$$

$$E_i = \frac{d_i}{w_i} \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (6)$$

λ hesaplandıktan sonra Tutarlılık Göstergesi (CI) hesaplanır (Denklem(7)). Tutarlılık Oranı, Tutarlılık Göstergesi değerinin Tablo 3'te verilen ve Rasallık Göstergesi (RI) olarak adlandırılan standart düzeltme değerlerine bölünmesi ile elde edilir (Denklem(8)).

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (7)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

Tutarlılığın test edilmesi yönü ile AHP diğer ÇKKV yöntemlerine göre daha güven veren bir yöntemdir [33]. Eğer $CR \leq 0.10$ ise yapılan karşılaştırmaların tutarlı olduğu söylenir. CR sıfıra ne kadar yakınsa karşılaştırma sonuçları daha tutarlı olacaktır. $CR > 0.10$ ise elde edilen sonuçlar tutarsızdır.

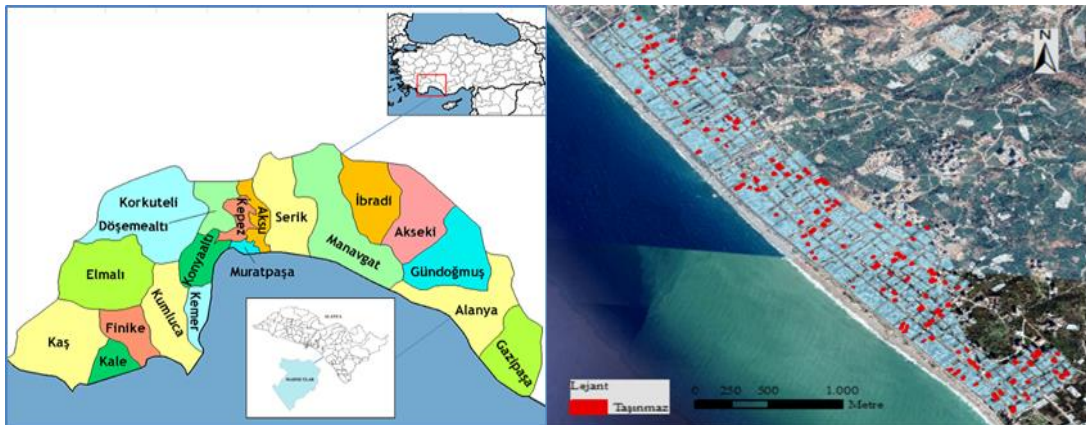
2.2 AHP yönteminin Alanya kenti örneğinde incelenmesi

Çalışma alanı olarak Alanya ilçesinin Mahmutlar Mahallesi seçilmiştir (Şekil 1). Alanya ilçesinin şehir merkezine uzaklığı 154 kilometredir ve 1598.51 km²'lik bir alana sahiptir [34]. İlçenin doğusunda Gazipaşa ilçesi, batısında Gündoğmuş ve Manavgat ilçeleri yer alır. Kuzeyinde Toros Dağları uzanır ve güneyinde Akdeniz ile çevrilidir. Alanya ilçesi turizm bölgesi olması ve doğal güzellikleri sebebiyle maddi açıdan oldukça değerli alanlara sahip bir yerleşim birimidir.

Alanya/Antalya çok sayıda turistlerin hem tatil hem de taşınmaz satın alma açısından tercih ettiği bir ilçedir. Özellikle yabancı turistler tarafından çok fazla sayıda taşınmaz alım-satımı söz konusudur. TÜİK tarafından yayınlanan konut satış istatistiklerine göre yabancılara

Tablo 3. Rasallık göstergesi değerleri [32]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57



Şekil 1. Çalışma alanı ve çalışma kapsamında elde edilen taşınmaz verisi

yapılan konut satış sayılarında 2013 ve 2014 yıllarında Antalya ilk sırada yer alırken 2015 yılından 2020 yılına kadar yapılan satışlarda İstanbul ilk sırada yer alırken Antalya ikinci sırada yer almaktadır [35].

Taşınmazlarla ilgili yapısal özelliklere ait bilgiler (yapının yaşı, bulunduğu kat, kullanım alanı, oda sayısı, balkon, asansör, daire imkanları, manzara) online emlak sitelerinde takip edilen ilanlar sayesinde elde edilmiştir (Şekil 1). Online emlak sitelerinde verilen bu yapısal özelliklere ait bilgilere ek olarak taşınmazların konumları da belirtilmektedir. Genellikle ilanlarda yanlış verilen taşınmaz konumlarını tespit etmek için Google Maps ve Alanya Kent Bilgi Sisteminden faydalanılmıştır. Google Maps ve Alanya Kent Bilgi Sisteminden elde edilen bilgiler bölgeye ait halihazır harita ile teyit edilerek taşınmazların doğru konumları tespit edilmiştir. CBS ile taşınmazlara ait verilerin saklandığı bir veri tabanı oluşturulmuş ve konumsal analizler yapılmıştır. Bölgeye ait kadastr haritası, hâlihazır harita, uygulama imar planı ve uydu görüntüsü tedarik edilmiştir. Toplamda 125 tane taşınmaza ait veriler elde edilerek haritada konumları belirlenmiştir. Taşınmazın değerini etkileyen konumsal özellikler kriterleri hâlihazır harita ve uydu görüntüsü yardımıyla tespit edilerek harita üzerine işaretlenmiştir. Taşınmazların konumsal özellikler kriterlerine olan mesafeleri yol güzergâhları dikkate alınarak Network-OD Cost Matrix modülü ile ArcGIS 10.6.1 kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analiz ile her bir konumsal özellik kriterinin (deniz, eğitim alanları, ulaşım merkezleri, sağlık alanları, yeşil alanlar, dini tesisler, mezarlık alanları, AVM alanları ve spor alanları) çalışma alanındaki taşınmazlara olan mesafeleri elde edilmiş ve bu mesafeler içinden en kısa olan mesafe belirlenmiştir.

Taşınmazın değerini etkileyen kriterler iki ana başlık altında toplanmıştır. Bunlar; yapısal özellikler ve konumsal özelliklerdir. Yapısal özellikler; yapının yaşı, bulunduğu kat, kullanım alanı, oda sayısı, balkon, asansör, daire imkânları ve manzara, konumsal özellikler; denize, eğitim alanlarına, ulaşım merkezlerine, sağlık alanlarına, yeşil alanlara, dini tesislere, mezarlık alanlarına, AVM alanlarına ve spor alanlarına uzaklık olarak belirlenmiştir. Bu kriterlere ait hiyerarşik yapı oluşturulmuştur. Daha sonra AHP tekniğine uygun olarak bir anket formu hazırlanmıştır. Anket uygulamalarında örneklem büyüklüğü daha alt örneklem büyüklüğünü seçmek gerekir [36]. Bu anket çalışması taşınmaz değerlendirme ve taşınmazın değerini etkileyen kriterler hakkında bilgi sahibi olabilecek ve AHP tekniğine göre hazırlanan anket formunu cevaplayabilecek kamu ve özel sektörde çalışan harita mühendisleri, inşaat mühendisleri, şehir plancılar, mimarlar, gayrimenkul değerlendirme uzmanları ile emlakçılar olmak üzere üç kategoriye ayrılarak uygulanmıştır. Her kategoriden en az 30 kişi olmak üzere toplamda 160 kişiye uygulanan bu anket formuna katılanların %31'lik kısmı kamuda %69'luk kısmı özel sektörde çalışmaktadır. Meslek gruplarına göre ise %18 harita mühendisi, %27 inşaat mühendisi, %12 mimar, %7 şehir plancısı, %23 emlakçı ve % 13 gayrimenkul değerlendirme uzmanından oluşmaktadır.

Anket sonuçlarının değerlendirilmesinde Expert Choice programı kullanılmıştır. Expert Choice programında öncelikle hiyerarşik yapı oluşturulur. Hiyerarşik yapıya uygun olarak en üst seviyede amaç belirlenir. Hiyerarşik yapının alt seviyelerinde amacı etkileyen kriterler ve alt kriterler belirlenir. AHP yönteminin temeli kriterlerin karşılıklı olarak kıyaslanmasına dayanır. Expert Choice programında anket sonuçları dikkate alınarak 1-9 skalasına göre ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulur. AHP tekniğine göre sentezleme işlemi yapılır, kriterlere ait ağırlıklar elde edilir ve Tutarlılık Oranı hesaplanır. Elde edilen sonuçların tutarlı olması için Tutarlılık Oranı ≤ 0.10 olmalıdır. Anket sonuçları programa girilerek kriterleri ait ağırlıklar ve Tutarlılık Oranları elde edilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

Taşınmazın değerini etkileyen yapısal ve konumsal kriterlerin ikili karşılaştırılmasına dayalı olarak hazırlanan anket sonuçlarının Expert Choice programı ile değerlendirilmesi sonucu kriterlere ait ağırlıklar elde edilmiştir. Expert Choice programında öncelikle yapılan çalışmanın amacı belirlenmiştir. Taşınmaz değerlendirme olarak belirlenen amaç doğrultusunda hiyerarşik yapı oluşturulmuştur. Ana kriterler olarak yapısal özellikler ve konumsal özellikler, alt kriterler olarak yapısal özellikler ana kriteri altında yapının yaşı, bulunduğu kat, kullanım alanı, oda sayısı, balkon, asansör, daire imkanları ve manzara kriterleri; konumsal özellikler ana kriteri altında denize, eğitim alanlarına, ulaşım merkezlerine, sağlık alanlarına, yeşil alanlara, dini tesislere, mezarlık alanlarına, AVM alanlarına ve spor alanlarına uzaklık kriterleri girilerek Expert Choice programında hiyerarşik yapı oluşturulmuştur. Ankete katılan kişi sayısı kadar katılımcı sayısı belirlenmiş ve programda ikili karşılaştırma matrislerine anket sonuçları girilmiştir. Toplamda 160 katılımcının anket sonuçlarının değerlendirilmesi ile Expert Choice programında kriterlere ait ağırlıklar ve tutarlılık oranları elde edilerek programdan alınan çıktılar tablolar halinde aşağıda verilmiştir.

Elde edilen ağırlıklar incelendiğinde: konumsal özelliklere ait ağırlık 0.55 iken yapısal özelliklere ait ağırlık 0.45'tir. Yapısal özelliklere ait kriterler incelendiğinde önem derecesi en büyük olan kriterin oda sayısı (0.185) olduğu görülmektedir. Konumsal özellikler de ise önem derecesi en büyük olan sağlık alanlarına uzaklık (0.298) kriteridir.

Tablo 4 ve Tablo 5'te taşınmazın değerini etkileyen kriterlere ait ağırlıklar ve tutarlılık oranları verilmiştir. Her bir ikili karşılaştırma matrisleri için hesaplanan tutarlılık oranları 0,10'dan küçüktür ve elde edilen sonuçlar tutarlıdır. Tablo 5'te verilen yapının yaşı, bulunduğu kat, kullanım alanı, oda sayısı, balkon, asansör, daire imkânları ve manzara kriterlerine ait ağırlıkların normalize edilmiş değerleri kullanılarak kriterlere karşılık gelen AHP puanları hesaplanmıştır.

Konumsal özellikler alt kriterleri olarak taşınmazların sosyal donatı alanlarına olan mesafeleri gruplandırılmıştır (Tablo 7). En yakın olan mesafeye en yüksek puan, en uzak mesafeye en düşük puan olacak şekilde mesafeler puanlandırılmıştır.

Tablo 4. Ana ve alt kriterlere ait ağırlıklar

Ana kriterlere ait ağırlıklar		Yapısal özellikler alt kriterine ait ağırlıklar		Konumsal özellikler alt kriterine ait ağırlıklar	
CR = 0.00	W ₁	CR = 0.01	W ₂	CR = 0.02	W ₃
Yapısal Özellikler	0.45	Yapının Yaşı	0.077	Denize Uzaklık	0.065
Konumsal Özellikler	0.55	Bulunduğu Kat	0.081	Eğitim Alanlarına Uzaklık	0.167
		Kullanım Alanı	0.159	Ulaşım Merkezlerine Uzaklık	0.179
		Oda Sayısı	0.185	Sağlık Alanlarına Uzaklık	0.298
		Balkon	0.131	Yeşil Alanlara Uzaklık	0.093
		Asansör	0.131	Dini Tesislere Uzaklık	0.032
		Daire İmkanları	0.141	Mezarlık Alanlarına Uzaklık	0.022
		Manzara	0.096	AVM Alanlarına Uzaklık	0.070
				Spor Alanlarına Uzaklık	0.075

Tablo 5. Yapısal özellikler kriterinin alt kriterlerine ait ağırlıklar

Yapının yaşı		Bulunduğu Kat		Kullanım Alanı		Oda Sayısı	
CR = 0.08	W ₄	CR = 0.01	W ₅	CR = 0.03	W ₆	CR = 0.07	W ₇
Yeni Bina	0.343	Birinci Kat	0.275	50-100 m ²	0.096	1+0	0.045
1-5	0.273	Ara Kat	0.502	101-150 m ²	0.224	1+1	0.075
6-10	0.162	Son Kat	0.222	151-200 m ²	0.294	2+1	0.154
11-15	0.103			201+ m ²	0.386	3+1	0.316
16-20	0.061					+3+1	0.410
21-25	0.036						
26+	0.023						
Balkon		Asansör		Daire İmkanları		Manzara	
CR = 0.05	W ₈	CR = 0.00	W ₉	CR = 0.01	W ₁₀	CR = 0.01	W ₁₁
Yok	0.107	Yok	0.126	Eşyalı	0.216	Deniz	0.669
1 Tane	0.330	Var	0.874	Havuzlu	0.475	Dağ	0.217
2 Tane	0.563			Spor Salonlu	0.309	Sokak	0.113

Tablo 6. Yapısal özellikler kriterlerine ait AHP puanları

Ana Kriter	Alt Kriter 1	Alt Kriter 2	Normalize Edilen Değer	AHP Puanı
Yapısal Özellikler (0.45)	Yapının Yaşı (0.077)	Yeni Bina	1.000	0.035
		1 - 5	0.795	0.028
		6 - 10	0.472	0.016
		11 - 15	0.301	0.010
		16 - 20	0.178	0.006
		21 - 25	0.104	0.004
		26+	0.066	0.002
	Bulunduğu Kat (0.081)	Birinci Kat	0.547	0.020
		Ara Kat	1.000	0.036
		Son Kat	0.443	0.016
	Kullanım Alanı (0.159)	50 - 100	0.250	0.018
		101 - 150	0.580	0.041
		151 - 200	0.762	0.055
		201+	1.000	0.072
	Oda Sayısı (0.185)	1+0	0.111	0.009
		1+1	0.183	0.015
		2+1	0.376	0.031
		3+1	0.771	0.064
		+3+1	1.000	0.083
	Balkon (0.131)	Yok	0.189	0.011
		1 Tane	0.586	0.035
		2 Tane	1.000	0.059
	Asansör (0.131)	Yok	0.144	0.008
		Var	1.000	0.059
	Daire İmkanları (0.141)	Eşyalı	0.445	0.028
		Havuzlu	1.000	0.063
		Spor Salonlu	0.651	0.041
Manzara (0.096)	Deniz	1.000	0.043	
	Dağ	0.325	0.014	
	Sokak	0.168	0.007	

Tablo 7. Konumsal özellikler kriterlerine ait AHP puanları

Ana Kriter	AHP Puanı										
	Mesafe (m)	Normalize Edilen Değer	Denize Uzaklık (0,065)	Eğitim Alanlarına Uzaklık (0,167)	Ulaşım Merkezlerine Uzaklık (0,179)	Sağlık Alanlarına Uzaklık (0,298)	Yeşil Alanlara Uzaklık (0,093)	Dini Tesislere Uzaklık (0,032)	Mezarlık Alanlarına Uzaklık (0,022)	AVM Alanlarına Uzaklık (0,070)	Spor Alanlarına Uzaklık (0,075)
Konumsal Özellikler (0,55)	0-99	1,00	0,036	0,092	0,098	0,164	0,051	0,018	0,012	0,039	0,041
	100-199	0,95	0,034	0,087	0,094	0,156	0,049	0,017	0,011	0,037	0,039
	200-299	0,90	0,032	0,083	0,089	0,148	0,046	0,016	0,011	0,035	0,037
	300-399	0,85	0,030	0,078	0,084	0,139	0,043	0,015	0,010	0,033	0,035
	400-499	0,80	0,029	0,073	0,079	0,131	0,041	0,014	0,010	0,031	0,033
	500-599	0,75	0,027	0,069	0,074	0,123	0,038	0,013	0,009	0,029	0,031
	600-699	0,70	0,025	0,064	0,069	0,115	0,036	0,012	0,008	0,027	0,029
	700-799	0,65	0,023	0,060	0,064	0,107	0,033	0,011	0,008	0,025	0,027
	800-899	0,60	0,021	0,055	0,059	0,098	0,031	0,011	0,007	0,023	0,025
	900-999	0,55	0,020	0,051	0,054	0,090	0,028	0,010	0,007	0,021	0,023
	1000-1499	0,40	0,014	0,037	0,039	0,066	0,020	0,007	0,005	0,015	0,017
	1500-1999	0,25	0,009	0,023	0,025	0,041	0,013	0,004	0,003	0,010	0,010
	2000-2999	0,15	0,005	0,014	0,015	0,025	0,008	0,003	0,002	0,006	0,006
	>3000	0,05	0,002	0,005	0,005	0,008	0,003	0,001	0,001	0,002	0,002

Taşınmazın değerindeki etkisini belirleyebilmek için puanlandırılan bu mesafelerin normalize edilmiş değerleri kullanılmıştır. Taşınmazlara ait toplam AHP değerleri her bir taşınmazın sahip olduğu yapısal ve konumsal kriterlerine karşılık gelen ağırlıklar toplanarak hesaplanmıştır. Yapısal özellikler kriterlerine ait toplam AHP puanları **Tablo 6**'da, konumsal özellikler kriterlerine ait toplam AHP puanları ise **Tablo 7**'de verilmiştir.

Yapısal özelliklere ait AHP puanları, yapısal özellikler ana kriterine ait ağırlık ve yapının yaşı, bulunduğu kat, kullanım alanı, oda sayısı, balkon, asansör, daire imkânları ve manzara alt kriterlerine ait ağırlıklar ile bunların alt kriterlerine ait ağırlıkların normalize edilen değerleri çarpılarak hesaplanmıştır.

Konumsal özelliklere ait AHP puanları, konumsal özellikler ana kriterine ait ağırlık ve denize uzaklık, eğitim alanlarına uzaklık, ulaşım merkezlerine uzaklık, sağlık alanlarına uzaklık, yeşil alanlara uzaklık, dini tesislere uzaklık, mezarlık alanlarına uzaklık, AVM alanlarına uzaklık ve spor alanlarına uzaklık alt kriterlerine ait ağırlıklar ile mesafelerin puanlama yöntemi ile normalize edilen değerleri çarpılarak hesaplanmıştır.

Taşınmazın değerini etkileyen kriterlerin AHP yöntemi kullanılarak ağırlıkları belirlendikten sonra ağırlıklar arasında dönüşüm yapılır. Elde edilen sonuçlar ile her bir taşınmazın özelliğine göre toplam AHP puanları hesaplanır. Bu AHP puanlarının değere dönüştürülmesi gerekir. AHP puanlarının ve satış fiyatlarının ortalaması esas alınarak AHP puanları AHP değerlerine dönüştürülmüştür. Elde edilen AHP değerleri ile satış fiyatları arasındaki ilişkiyi incelemek için ortalama yaklaşıklık değeri hesaplanmıştır (**Denklemler(9)**).

$$\text{Ortalama yaklaşıklık \%} = \frac{\sum_{i=1}^n 1 - \left[\frac{|xp - xi|}{xi} \right]}{n} * 100 \quad (9)$$

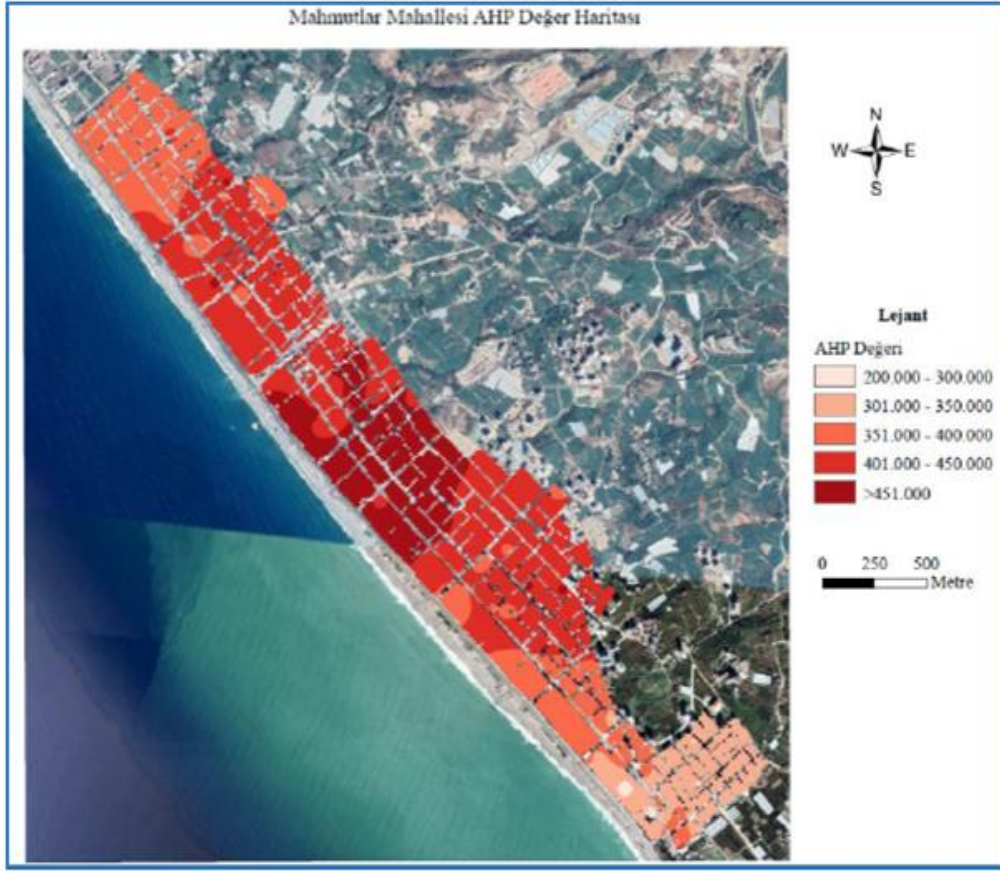
Formülde verilen xp: satış fiyatlarını, xi: AHP değerlerini, n: taşınmaz sayısını, i:1,2,3,...,n ifade etmektedir. AHP yöntemi ile elde edilen taşınmaz değerleri ile satış fiyatlarının ortalama yaklaşıklık oranı %83.85'tir. AHP ile elde edilen değerler ile piyasa değerleri örtüşmektedir.

Taşınmaz değer haritalarının üretilmesinde enterpolasyon yöntemlerinden biri olan Ters Mesafe Ağırlıklı enterpolasyon yöntemi (Inverse Distance Weighting - IDW) yöntemi kullanılmıştır. IDW bilinen örnek noktalara ait değerler yardımıyla örneklenmeyen noktalara ait hücre değerlerinin belirlenmesi için kullanılan bir enterpolasyon tekniğidir. Tahmin edilen değerler, komşu noktaların uzaklığı ve büyüklüğünün bir fonksiyonu olup, mesafenin artması ile tahmini yapılacak hücre üzerindeki etki azalır. IDW yöntemi komşu noktalardan tahminler ürettiği için lokal bir ara değer kestirim yöntemidir ve enterpole edilecek yüzeyde yakındaki noktaların uzakdaki noktalara göre daha fazla ağırlığa sahip olması esasına dayanırılır.

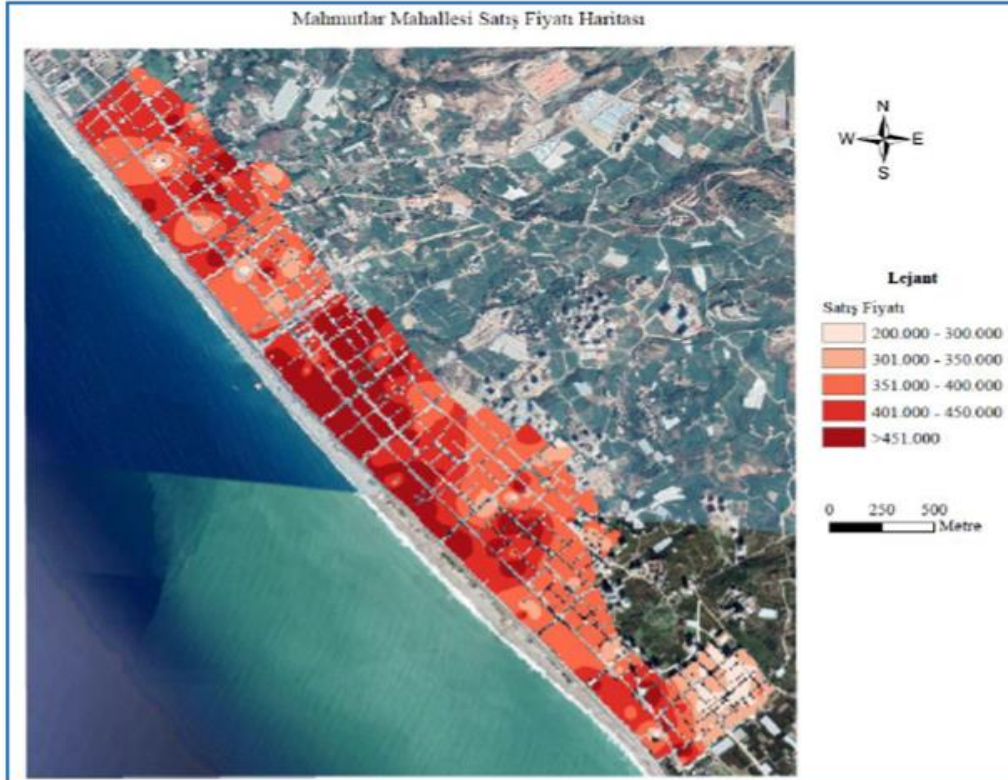
Mahmutlar Mahallesinde yapılan bu çalışma sonucu taşınmazlara ait elde edilen AHP değerleri ile piyasada satış fiyatlarına ait CBS kullanılarak haritalar üretilmiştir (**Şekil 2-3**).

Çalışma bölgesi içerisindeki satış fiyatları incelendiğinde en küçük satış değerine sahip olan taşınmazın değeri 210000 TL iken en büyük satış değerine sahip olan taşınmazın değeri 700000 TL'dir. AHP yöntemi sonucu elde edilen AHP değerleri incelendiğinde, en küçük değere sahip olan taşınmazın değeri 269059 TL iken en büyük değere sahip olan taşınmazın değeri 495027 TL'dir.

Taşınmaz değerlerinin mekânsal değişimi ve dağılımı haritalar ile görselleştirilmiştir. Bu mekânsal dağılıma göre 200000-350000 TL aralığında değere sahip olan taşınmazlar bölgenin iç kesimlerinde yer alırken 350000 TL'den daha fazla değere sahip olan taşınmazlar kıyı kesimlerinde yer almaktadır.



Şekil 2. Mahmutlar Mahallesi AHP değer haritası (TL)



Şekil 3. Mahmutlar Mahallesi satış fiyat haritası (TL)

AHP ile elde edilen değerlerin satış fiyatları ile uyumlu olduğu ortalama yaklaşıklık değerinin %83.85 olarak hesaplanması ile belirlenmiştir.

Taşınmaz değer haritaları incelendiğinde ise satış fiyatı ile AHP değeri arasındaki farkların sebebi konumsal özellikler kriterlerinden kaynaklanmaktadır. Satış fiyatı haritasında en büyük değerlerin olduğu bölgeler denize yakınlık kriterinden etkilenirken, AHP değer haritasındaki en büyük değerlerin olduğu bölgeler sağlık alanı kriterinden etkilenmektedir. Aynı şekilde en küçük değerler arasındaki farklar konumsal özellikler kriterinin etkisinin yapısal özellikler kriterinden daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Taşınmaz değerlerinin mekânsal dağılımları incelendiğinde mahallenin kıyı kesimleri ile orta kısımlarında taşınmaz değerlerinin en yüksek olduğu görülmektedir.

4 Sonuçlar

Alanya ilçesi Mahmutlar Mahallesi için yapılan bu çalışmada, öncelikle bölge incelenerek taşınmazın değerini etkileyen kriterler tespit edilmiştir. Bu kriterlerin taşınmazın değerine ne derece etki ettiklerini tespit etmek amacıyla AHP yöntemi kullanılmıştır. AHP yöntemi öznel yargıların sayısal değerlere dönüştürülebildiği bir yöntemdir. AHP yönteminde uzman görüşlerine başvurularak kriterlerin karşılıklı olarak 1-9 skalasına göre değerlendirilmesi istenir. Bu amaçla anket formu hazırlanmış ve çalışmanın Mahmutlar Mahallesinde yapılacağı belirtilmiştir. Bölgeyi tanıması, taşınmaz değerlendirme konusunda bilgi sahibi olması ve AHP yöntemine uygun olarak hazırlanan soruları cevaplayabilmesi için anket çalışması Antalya ilinde; mühendis, mimar, şehir plancı, değerlendirme uzmanı ve emlakçı kitlesi seçilerek yapılmıştır. Anket sonuçları Expert Choice programı ile değerlendirilerek kriterlere ait ağırlıklar hesaplanmıştır. Taşınmazın değerini etkileyen konumsal özelliklerin yapısal özelliklere göre daha etkili olduğu görülmüştür. CBS teknolojisi kullanılarak network analizleri gerçekleştirilmiş ve taşınmazların konumsal özellikler kriterleri ile arasındaki mesafeler belirlenmiştir. Kriter ağırlıkları ile taşınmazların özelliklerine göre her bir taşınmaz için toplam AHP puanı hesaplanmış ve AHP puanları ile satış fiyatları arasında oluşturulan bağlantı ile AHP puanları değere dönüştürülmüştür.

AHP ve CBS entegrasyonu kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışma ile taşınmazın değeri üzerinde konumsal özellikler kriterinin (0.55) yapısal özellikler kriterinden (0.45) daha etkili olduğu görülmüştür. Yapısal özellikler kriterlerinden oda sayısı kriteri (0.185) en etkili kriter olurken yapının yaşı kriteri (0.077) etkisi en az olan kriterdir. Konumsal özellikler kriterlerinden en etkili kriter sağlık alanlarına uzaklık (0.298) kriteri iken etkisi en az olan kriter mezarlık alanlarına uzaklık (0.022) kriteridir. AHP yöntemi kullanılarak elde edilen taşınmaz değerleri ile piyasa değerleri ortalama yaklaşıklık değerinin %83.85 hesaplanması ile uyumlu bulunmuştur.

AHP yöntemi, sözel verileri kullanarak matematiksel modeller oluşturduğu için taşınmaz değerlemede kullanılması uygun bir yöntemdir. Elde edilen sonuçlar CBS

teknolojisi ile görselleştirilip haritalar üretilmiştir. Taşınmaz değerlerinin çalışma bölgesindeki mekânsal dağılımları bu haritalar ile irdelenmiştir. Bir turizm kenti olan Alanya'da gerçekleştirilen bu çalışmada, taşınmaz değerlendirme uygulaması objektif kriterler ile AHP yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmesi, bölgedeki olumsuz piyasa koşullarının dengelenmesi ve CBS kullanılarak üretilen taşınmaz değer haritaları ile taşınmaz değerlerinin mekânsal dağılımlarının incelenmesi ile literatüre katkı sağlamaktadır. Ayrıca bu çalışma turizm kentlerinde gerçekleştirilecek mahalle ya da bölgesel bazlı taşınmaz değerlendirme çalışmaları için rehber niteliğindedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 11

Kaynaklar

- [1] A. Açlar ve V. Çağdaş, Taşınmaz (Gayrimenkul) Değerlemesi, HKMO, ISBN 975-395-551-0, Ankara, 2008.
- [2] Ş. Yalçır, Bulanık mantık metodolojisi ile taşınmaz değerlendirme modelinin geliştirilmesi ve uygulaması: Konya örneği, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2007.
- [3] S. Timur, Coğrafi bilgi sistemleri destekli taşınmaz değer haritalarının oluşturulması: İstanbul İli, Şişli İlçesi örneği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
- [4] M. Çete, Türkiye için bir arazi idare sistemi yaklaşımı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2008.
- [5] N. Erdem, Türkiye'de taşınmaz değerlendirme alanında yapılan lisansüstü tezlerin içerik analizi, Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 6 (1), 112-26, 2018. <https://doi.org/10.21541/apjes.332681>
- [6] H. Tanaka and R. Shibasaki, Creation of spatial information database for appraising the real estate, 22. Assian Conference On Remote Sensing, Singapore, pp. 372-5, 2001.
- [7] T. Yomraloğlu, R. Nişancı, M. Çete ve E. Candaş, Dünya'da ve Türkiye'de taşınmaz değerlendirme, Türkiye'de Sürdürülebilir Arazi Yönetim Çalıştayı, İstanbul, 2011.
- [8] Ş. Arıcı, G. Özkan ve A. Erdi, Kentsel alanlarda taşınmaz değerlerinin belirlenmesi ve Konya örneği, Selçuk Üniversitesi Jeo. ve Foto. Müh. Öğretiminde 30. Sempozyumu, Konya, sayfa 127-39, 2002.
- [9] Z. Şenyıldız, Türkiye için taşınmaz değerlemesine yönelik bütüncül bir yönetim modelinin tasarlanması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017.
- [10] C. Ulvi, Taşınmaz değerlemede yapay zeka tekniklerinin kullanılabilirliği ve yöntemlerin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya, 2018.

- [11] U. Çağatay, Kentsel taşınmaz değer haritaları ve uygulama alanları üzerine bir değerlendirme, *Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 1 (1), 25-41, 2012.
- [12] M. Özbay, Gayrimenkul değerlendirme projelerine AHP yöntemiyle bir yaklaşım, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- [13] A. Yılmaz, Çok ölçütlü karar destek sistemleri ile taşınmaz değerlendirme ve oran çalışması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- [14] S.P. Sarathy, Organizational innovations in the real estate industry using AHP, *The International Journal of Organizational Innovation*, 4 (1), 5-26, 2011.
- [15] E.E.M. Safian and A.H. Nawawi, Combining AHP with GIS in the evaluation of locational characteristics quality for purpose-built offices in Malaysia, 6th International Real Estate Research Symposium, pp. 24-5, Malaysia, 2012.
- [16] F. Bünyan Ünel and Ş. Yalpir, Positional determination of real estates with analytic hierarchy process, *International Conference on Mathematical and Computational Applications*, pp. 326-36, Manisa, 2013. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4951.2484>
- [17] B. Akkaynak, Gayrimenkul değerlendirme ve gayrimenkul değerlendirme üzerine bir uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Mersin, 2014.
- [18] F. Bünyan Ünel and Ş. Yalpir, Determination of the locational, physical and legal status of parcels using the AHP method and GIS in real estate valuation, *WIT Transactions on Information and Communication Technologies*, 63, 369-78, 2014. <https://doi.org/10.2495/CEEIT140461>
- [19] S. Kavas and Y.İ. Topçu, AHP based decision model for appraising residential real estates in an abstracted zone, *International Symposium of the Analytic Hierarchy Process*, Washington, 2014.
- [20] D. Koziol-Kaczorek, The use of combined multicriteria method for the valuation of real estate, *Optimum. Studia Ekonomiczne* Nr, 5 (71), 208-18, 2014. <https://doi.org/10.15290/ose.2014.05.71.16>
- [21] Ş. Yalpir, Forecasting residential real estate values with AHP method and integrated GIS, In conference proceedings of People, Buildings and Environment, pp. 694-706, Czech Republic, 2014.
- [22] L.A. Gutierrez-Bucheli, J.A. Vallejo-Borda and J.S. Ponz-Tienda, Application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) in the construction industry: A case study in the selection of the plot for a real estate project, VII Elagec, Colombia, 2016.
- [23] S.K. Gürbüz, Analitik hiyerarşi proses yöntemi ile konut seçimi: Isparta'da bir uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Isparta, 2016.
- [24] Ş. Yalpir ve M. Ekiz, Eşdeğerlilik esaslı arazi ve arsa düzenlemesinde analitik hiyerarşi prosesinin kullanımı, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (1), 59-75, 2017. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.297731>
- [25] A.Ş. Yılmaz, Gayrimenkul değerlendirme ve AHP yöntemiyle konut değerini belirleme metodu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017.
- [26] B. Demirel, A. Yelek, H.M. Alağaç ve T. Eren, Taşınmaz değerlendirme kriterlerinin belirlenmesi ve kriterlerin önem derecelerinin çok ölçütlü karar verme yöntemi ile hesaplanması, *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 8 (2), 665-82, 2018.
- [27] Ç. İpek ve Y. Şahin, AHP temelli gri ilişkisel analiz yöntemi ile konut seçimi, *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Elektronik Dergisi*, 9 (25), 153-72, 2018.
- [28] F. Bünyan Ünel and Ş. Yalpir, Valuations of building plots using the AHP method, *International Journal of Strategic Property Management*, 23 (3), 197-212, 2019. <https://doi.org/10.3846/ijspm.2019.7952>
- [29] Ö. Aydın, S. Öznehir ve E. Akçalı, Ankara için optimal hastane yeri seçiminin analitik hiyerarşi süreci ile modellenmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 14 (2), 69-86, 2009.
- [30] M. Dağdeviren, D. Akay ve M. Kurt, İş değerlendirme sürecinde analitik hiyerarşi prosesi ve uygulaması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19 (2), 131-8, 2004.
- [31] T.L. Saaty, Decision Making with The Analytic Hierarchy Process, *Int. J. Services Sciences*, 1 (1), 83-98, 2008. <https://doi.org/10.1504/IJSSci.2008.01759>
- [32] T.L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York, 1980. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-50244-6>
- [33] A. Eleren, Markaların tüketici tercih kriterlerine göre analitik hiyerarşi süreci yöntemi ile değerlendirilmesi: Beyaz eşya sektöründe bir uygulama, *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, 14 (2), 47-64, 2007.
- [34] <https://tr.wikipedia.org/wiki/Alanya>, Erişim 30.09.2019.
- [35] TUİK, Erişim 15.09.2020, http://www.tuik.gov.tr/pretablo.do?alt_id=1056
- [36] Ş. Büyüköztürk, Örneklem yöntemleri, Erişim 8 Ekim 2019, <http://w3.balikesir.edu.tr/~msackes/wp/wp-content/uploads/2012/03/bay-final-konulari.pdf>





Enerji talep tahmini için metodoloji geliştirme: 2030 yılı Türkiye örneği

Developing methodology for energy demand estimation: 2030 year case of Turkey

Harika Ülkü¹ , Şükran Yalpir^{1,*} 

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya, Türkiye

Özet

Dünya genelinde çeşitli etkenlerden dolayı her geçen gün elektrik enerjisine olan talep artmaktadır. Artan bu ihtiyacı karşılamak adına geleceğe yönelik verimlilik noktasında plan ve yatırımlara gereksinim vardır. Elektrik üretimi, iletilmesi, dağıtılması, sistemlerin birbirleri arasındaki entegrasyonu ve üretilen bu enerjinin hangi şebeke bağlantısından tüketiciye ulaştırılması gerektiği düşünüldüğünde güvenilir talep tahminleri önem arz etmektedir. Ülkemize kritik noktalarda fayda sağlayabilmek ve talep tahmini sonucuna farklı bir bakış yaratabilmek adına çalışmada yapay sinir ağları ve çoklu regresyon analizi yöntemleri kullanılarak Türkiye'nin iller bazında 2009-2018 yıllarına ait verileriyle 2030 yılı elektrik enerjisi ihtiyaç tahminleri için senaryolar üretilmiştir. Nüfus, ortalama hane halkı büyüklüğü, eğitim durumu, Gayri Safi Yurtiçi Hâsıla, ihracat, ithalat, sanayi girdi ve elektrik enerji tüketim miktarı modellerde çıktı verisi olarak kullanılmıştır. Modeller ile Türkiye'nin 81 iline ait 2030 yılı elektrik enerjisi talebinin tahmin performans analizlerinde ortalama %98 mutlak başarı elde edilmiş ve coğrafi bilgi sistemlerinden faydalanılarak sonuç haritaları üzerinde tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Coğrafi bilgi sistemleri, Çoklu regresyon analizi, Elektrik enerjisi talep tahmini, Yapay sinir ağları

1 Giriş

Ülkeler arası rekabetin en önemli unsuru olan enerji, günlük yaşamın vazgeçilmez bir parçasıdır. Çeşitli sektörlerde de zorunlu bir faktör olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda bir ülkenin refah seviyesinin yükseltilmesinde aracı olan ekonomik ve sosyal kalkınma potansiyelini yansıtan temel göstergelerden biridir. Dünyada hızlı nüfus artışı, sanayileşme ve gelişmekte olan teknoloji ile beraber enerjiye olan talep her geçen gün artmaktadır. Dolayısıyla enerji üretim ve tüketimiyle ekonomik ve sosyal kalkınma arasında anlamlı bir ilişki vardır [1].

Hayatımızı anlamlı kılan ve devletlerin gelişmişlik seviyelerinin belirlenmesinde önemli rol oynayan enerjinin, öz kaynakları doğada bulunduğu haliyle kullanışlarına göre yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olarak çeşitlilik göstermektedir (Şekil 1). Bu öz kaynakların herhangi bir değişim görmemiş hali birincil enerji kaynağı olarak ifade edilirken uygun yöntemler kullanılarak birincil enerji kaynaklarının dönüştürülmesi sonucu elde edilen enerji kaynaklarına ise ikincil enerji kaynakları denilmektedir.

Hem dünya genelinde hem de ülkemizde incelenen enerji kaynaklarının arz, üretim ve tüketim değerleri göz önüne alındığında, fosil yakıtların payının her geçen gün azaldığı

Abstract

The demand for electrical energy is increasing day by day due to various factors throughout the world. Plans and investment for productivity in the future are needed to meet this need increasing. Reliable demand estimations are important in matters considered such as electricity generation, transmission, distribution, integration with each other of systems, how much energy in power plants should be produced and the consumer should be delivered from which grid connection the generated energy. Using artificial neural networks and multiple regression analysis methods in the study, scenarios were produced for the 2030 year electrical energy needs estimates with the 2009-2018 year dates in provinces of Turkey to benefit our country at critical points and create a different perspective on the demand estimation result. Population, average household size, education level, gross domestic product, exports, imports, industrial were used as the input data of models and electrical energy consumption were used as the output data of models. An average of %98 absolute success in the models was obtained in estimation performance analysis of the 2030 year electricity energy demand with Turkey's 81 province. Utilizing geographic information systems was discussed on result maps.

Keywords: Geographic information systems, Multiple regression analysis, Electrical energy demand estimation, Artificial neural networks

görülse de üstünlüğünü koruduğu ve gelecekte de koruyacağı ikinci bölümde enerjinin durumu adı altında verilen istatistiki bilgilerde de gözlenmektedir. Fakat elektrik enerjisinde, enerjinin üretildiği kaynakların önemini yanı sıra talep, arz, iletim, dağıtım gibi konular da önemlidir [3].

Bu noktada elektrik enerji piyasasını da kapsayan planlama ve maliyet analizi gibi çalışmalarda geleceğe yönelik önünü görebilme noktasında talep tahmini öne çıkmaktadır. Birbirinden farklı konularda gerçekleştirilen talep tahmini çalışmaları; Amerika'da otomobil sektöründe [4], kâğıt fabrikasında üretilen kâğıt ürünlerin gelecek tahmininde [5], şehrin su talebinin belirlenmesinde [6] ve İstanbul havalimanının gelecek yıllardaki yolcu ve yük talebinin planlaması [7] gibi sanayi ve kent gelişimini ilgilendiren alanlarda rastlanılmaktadır.

Ayrıca buğday verimliliğinde yapılan tahmin çalışması [8] ve Türkiye'deki gıda sektöründe [9] gelecek tahmini için yapılan çalışmalarda bulunmaktadır.

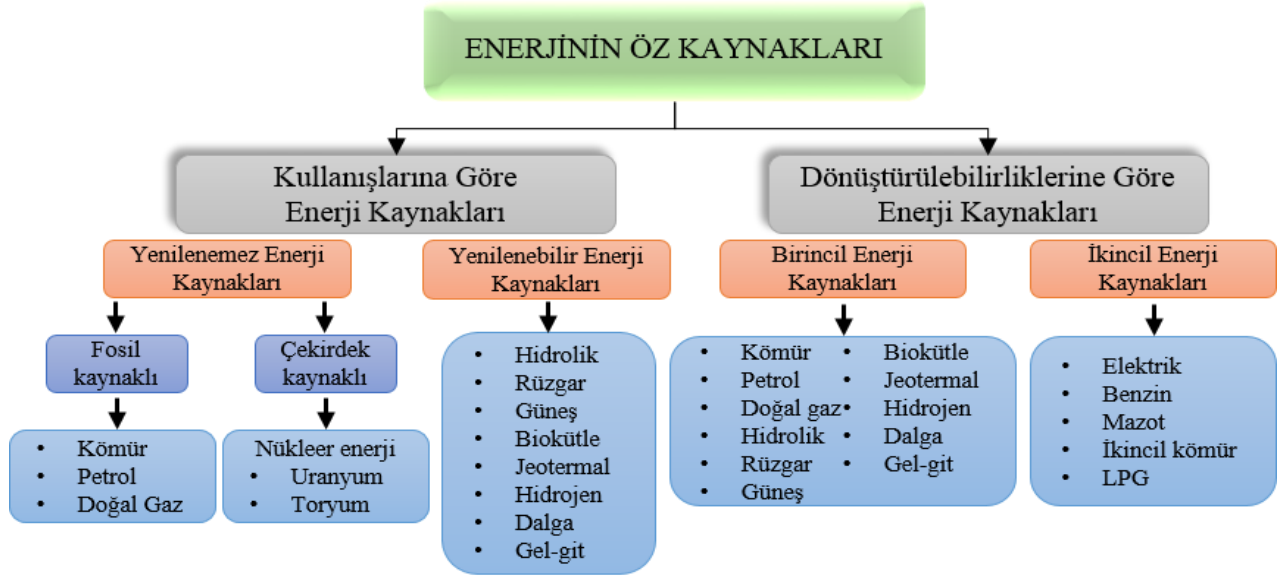
Tıpkı bu sektörlerde olduğu gibi geleceğe yönelik elektrik enerjisi talebi ve sanayi sektöründe enerji talebi konularında da uygulamalar mevcuttur [10, 11].

Elektrik enerjisi depolanamayan, üretildiği anda tüketilmesi gereken bir enerji türü olduğundan talep tahmininin yapılması elektrik enerjisi piyasasında da oldukça

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: syalpir@ktun.edu.tr (Ş. Yalpir)

Geliş / Recieved: 21.10.2020 Kabul / Accepted: 17.12.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngmuh.814134



Şekil 1 Enerjinin öz kaynaklarının sınıflandırılması [1, 2]

önemlidir. Eğer tahmin edilen talep arzın altında ise sistemde kısıtlamalara neden olacaktır. Diğer yandan talep tahmini arzdan fazla olursa elektrik tüketimine fazla ücret ödenecektir. Bu nedenle arzın karşılanması için tüketim talebinin tahmin doğruluğu önemlidir [12].

Geçmiş dönemlere ait veriler kullanılarak geleceği tahmin etmek için çeşitli yapay zekâ ve istatistiksel yöntemlerinden faydalanılmaktadır. Geçmişe ait bilginin mevcut olması, bilginin sayısal olarak ifade edilebiliyor olması ve değişkenin geçmişte gösterdiği yapının gelecekte de devam edeceği düşüncesine sahip olması matematiksel modellerin oluşturulmasına yardımcı olur ve bu ilişkiler sayesinde gelecek tahminini nasıl şekillendireceği tespit edilmeye çalışılır [13-15]. Yapay sinir ağları (YSA) modeli [16-18], ARIMA [19], ANFIS [20], bulanık mantık [21], regresyon modeli [22, 23], genetik algoritma [24, 25], zaman serileri yöntemi [26] ve yapay arı kolonisi algoritması yaklaşımı [27] elektrik enerjisi talep tahmini çalışmalarında kullanılan yöntemlere örnek olarak verilebilir. Hamzaçebi ve Kutay [3]; çalışmalarında 2 farklı yöntem uygulamış ve sonuçlarını karşılaştırmıştır. Çalışmada 1970-2002 yıllarına ait verileri kullanarak 2003-2010 yılları arasında uzun dönemli elektrik enerjisi tüketim tahmini yapılmıştır. YSA yöntemini kullanarak Box-Jenkins modelleri ve regresyon tekniği ile sonuçları karşılaştırılmış olan çalışmada YSA'nın elektrik enerjisi tüketiminde iyi bir tahmin aracı olduğu sonucuna varılmıştır.

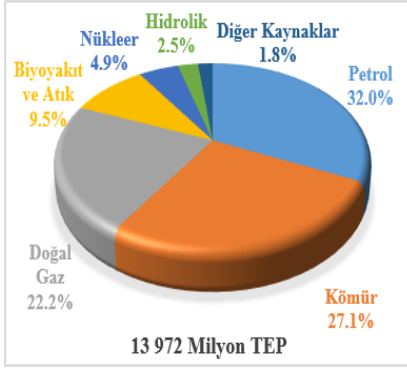
Genel anlamda enerji talep tahmini çalışmalarına bakıldığında, ülkelerin toplam enerji tüketimleri ile gelecek toplam talep miktarlarına ulaşıldığı gözlenmektedir. Hâlbuki ülkelerin nüfus başta olmak üzere sanayi ve diğer pek çok etken göz önüne alındığında kentlerin taleplerinde farklılıklar oluşacaktır. Bu sebeple çalışmada, enerji talep tahminini etkileyen etkenler ile her ilin ayrı ayrı değerlendirilmesi yapılmıştır. Ayrıca taleplere göre enerji üretiminde alternatif kaynaklar değerlendirmeye alınarak karar vericiler tarafından kullanılmasını amaçlayan bir altlık

veri üretiminde kullanılacak uygun yöntemin belirlenmesini sağlayacaktır.

Çalışmada; YSA ve çoklu regresyon analizi (ÇRA) yöntemleri kullanılarak Türkiye'nin 2030 yılı elektrik enerji tüketimi için talep tahminleri gerçekleştirilmiştir. Türkiye'nin 81 iline ait 10 yıllık verileri kullanılarak gelecek 12 yıllık enerji ihtiyaç tahminleri için senaryolar üretilmiştir. Literatürde sıkça kullanılan değişkenlere ek olarak elektrik enerjisi talebine etki eden farklı değişkenler saptanmış ve çalışmaya ilave edilerek modeller kurulmuştur. Türkiye'nin her bir iline ait enerji talebini tahmin etmek için 2009-2018 yılları arasındaki nüfus miktarı, ortalama hanehalkı büyüklüğü, eğitim durumu, Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GSYH), ihracat, ithalat ve sanayi modellerde girdi verisi olarak ve elektrik enerji tüketimi (MWh) çıktı verisi olarak kullanılmıştır. Her iki modelinde tahmin performansı ortalama yaklaşıklık oranı (%AA) ve determinasyon katsayısı olan R^2 değerlerine göre analiz edilmiştir. Aynı zamanda modellerden elde edilen senaryo sonuçları Coğrafi Bilgi Sistemlerine (CBS) entegre edilerek Türkiye siyasi haritasında görselleştirilmiştir. Modellerden elde edilen Türkiye'nin 2030 yılı elektrik enerji talep sonuçları haritalandırılarak il bazında karşılaştırmalar yapılmış ve uygun yöntem tartışması gerçekleştirilmiştir.

2 Enerjinin genel durumu

Dünyada enerjinin durumu incelendiğinde, 2017 yılında toplam enerji üretiminin 14,034 milyon TEP (milyon ton eşdeğer petrol) miktarına ulaştığı gözlenmiştir. Aynı yıl içerisinde birincil enerji arz miktarı ise 13,972 milyon TEP olarak hesaplanmıştır. Şekil 2'de görüldüğü gibi dünyada sırasıyla petrol, kömür, doğal gaz başta olmak üzere fosil kaynaklar birincil enerji arzında en büyük paya sahip enerji kaynaklarıdır. Diğer kaynaklar olarak adlandırılan %1,8'lik paya sahip kaynaklar ise jeotermal, rüzgâr, gelgit/okyanus, ısı ve diğeri olarak ifade edilmektedir [28, 29].

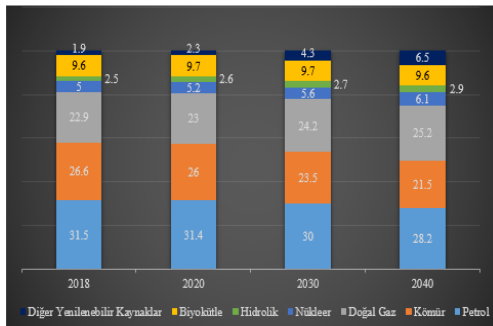


Şekil 2. 2017 yılına ait kaynak bazında toplam küresel birincil enerji arz oranları

Toplumsal yaşamı sürdürülebilir kılmak için neredeyse yaşamın her alanında kullandığımız enerji vazgeçilmez bir girdidir. 2019 yılında yayınlanan BP Statistical Review of World Energy raporuna göre 2017 yılında küresel birincil enerji tüketim miktarı 13.4746 milyon TEP olarak belirtilmiştir. Türkiye 152.7 milyon TEP miktarı ile küresel enerji tüketiminin %1,13'lük kısmında yer almaktadır. Dünyada tüketilen çok sayıda enerji kaynağı mevcut olmasına karşın, en fazla enerji %85 ile fosil kaynaklarından sağlanmaktadır [30].

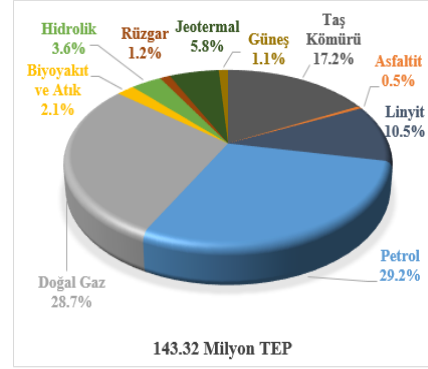
Ulaştırma sektöründe temel enerji kaynağı olarak kullanılan petrol %34.19 oranla küresel birincil enerji tüketiminde en büyük paya sahip olduğu gözlenmektedir. Petrolü takip eden dünya geneli enerji tüketiminde yüksek miktara sahip olan kömür ve doğal gaz kaynakları ise büyük ölçüde elektrik üretiminde kullanılmaktadır [31].

Uluslararası enerji ajansı (IEA), British Petroleum (BP), Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü (OPEC) gibi farklı kurum ve kuruluşlar tarafından 2040 yılına kadar yapılan çeşitli projeksiyonlarda fosil kaynaklı yakıtlara düşen paylar günümüzde olduğu gibi ilk sıralarda yerini koruyacağı öngörülmektedir. Fosil yakıtlara olan bağımlılığımız ülke politikalarında radikal değişiklikler olmadığı sürece kısa ve orta vadeli projeksiyonlarda kayda değer bir azalma göstermeyecektir. Fakat Şekil 3'te de görüldüğü gibi her geçen gün birincil enerji kaynakları arasında fosil kaynakların payını azaltacağı ve buna bağlı olarak en hızlı büyüme oranına sahip olan yenilenebilir enerji kaynaklarının 2040 yılında %19'luk bir paya ulaşacağı beklenmektedir [31, 32].



Şekil 3. Dünya birincil enerji talep projeksiyonlarının % oranı

Ülkemizin enerji durumu incelendiğinde ise 2018 yılında birincil enerji arzı toplam 143,32 milyon TEP miktarındadır. Dünya geneli arz verilerinde olduğu gibi ülkemizde de %86.21'lik oran ile fosil yakıtların üstünlüğü söz konusudur (Şekil 4). Toplam 19.775 milyon TEP miktarı ile yenilenebilir enerji kaynakları ise %13.79'luk kısmına sahip enerji kaynaklarıdır [33].



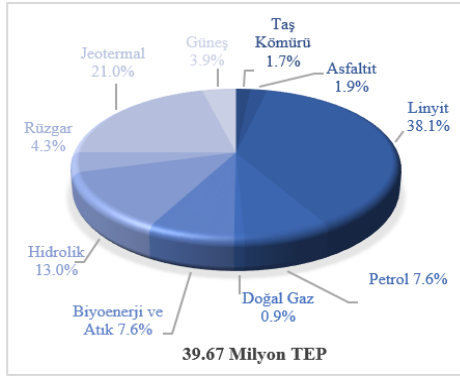
Şekil 4. 2018 yılına ait Türkiye genelinde kaynak bazında birincil enerji arz oranları

Türkiye birincil enerji arz dağılımındaki 2018 yılı yerli üretim ve ithal edilen kaynakların payında; yerli üretimin 39.67 milyon TEP miktarına sahip olduğu ve üretimdeki payı yüksek olan kaynakların linyit, jeotermal ve hidrolik şeklinde sıralandığı gözlenmektedir (Şekil 5). İthal edilen birincil enerji miktarı ise 115.052 milyon TEP olarak hesaplanmıştır. Bu bağlamda dışa bağımlı olduğumuz kaynakların sadece fosil yakıtlar olduğu açık bir şekilde belirtilmektedir [33].

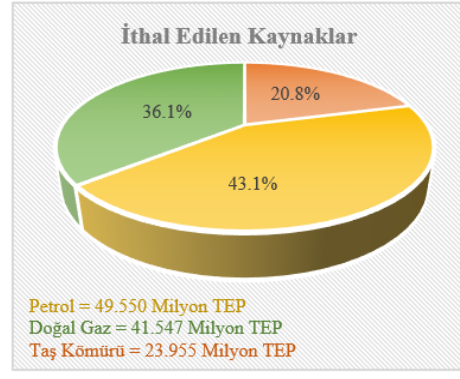
2017 yılında birincil enerji tüketim miktarı 152,7 milyon TEP iken %0.52'lik bir artış ile 2018 yılı enerji tüketimi 153.5 milyon TEP olarak hesaplanmıştır. 2018 yılı birincil enerji durumu incelendiğinde 49.6 milyon TEP petrol, 40.7 milyon TEP doğal gaz ve 42.3 milyon TEP kömür miktarı ile fosil yakıtlar ilk sırada yer alırken toplam yenilenebilir kaynakların miktarı ise 22 milyon TEP' tir (Şekil 6) [30].

2017 yılında birincil enerji tüketim miktarı 152,7 milyon TEP iken %0.52'lik bir artış ile 2018 yılı enerji tüketimi 153.5 milyon TEP olarak hesaplanmıştır. 2018 yılı birincil enerji durumu incelendiğinde 49.6 milyon TEP petrol, 40.7 milyon TEP doğal gaz ve 42.3 milyon TEP kömür miktarı ile fosil yakıtlar ilk sırada yer alırken toplam yenilenebilir kaynakların miktarı ise 22 milyon TEP' tir (Şekil 6) [30].

BP Statistical Review of World Energy raporuna [30] göre 2018 yılında Avrupa genelinde 21 ülke arasında birincil enerji tüketimi sıralamasında 323.9 milyon TEP miktarı ve %15.79'luk payı ile en çok enerji tüketen ülke Almanya'dır. Ardından 242.6 milyon TEP miktarı ile %11.82'lik paya sahip olan Fransa gelmektedir. Türkiye ise bu ülkeler arasında %7.48 oranı ile altıncı sırada yer almaktadır. 21 Avrupa ülkesinde enerji tüketimi nüfusa göre değerlendirilecek olursa; 2018 yılında yaklaşık olarak 80.81 milyon nüfusa sahip olan ülkemiz 153.5 milyon TEP birincil enerji tüketirken nüfusu bizden az olan Fransa ve İtalya sırasıyla 242.6 milyon TEP ve 154.5 milyon TEP enerji tüketmektedir

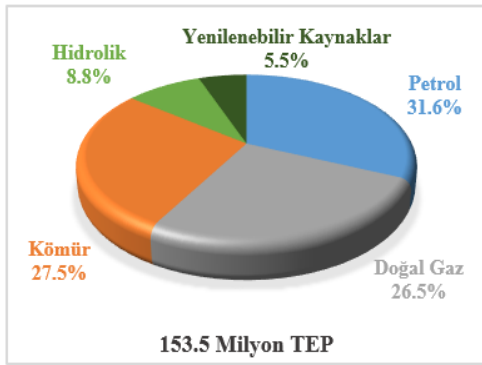


(a)



(b)

Şekil 5. 2018 yıllarına ait Türkiye birincil enerji arz dağılımında yerli üretim (a) ve ithal edilen kaynaklar (b)



Şekil 6. 2018 yılına ait Türkiye genelinde kaynak bazında birincil enerji tüketim oranları

Yapılan bu karşılaştırmada Türkiye'nin nüfusundan daha az nüfusa sahip olan Fransa ve İtalya enerji tüketiminde Türkiye'nin önüne geçmektedir. Nüfusun ülkelerin enerji tüketimini artırmasında temel etken olduğu düşünülse de böyle bir durum söz konusu iken tam anlamıyla enerji tüketiminde talebin nüfusa bağlı olmadığı bir etki gözlenmektedir.

2.1 Elektrik enerjisi durumunu ve talebi etkileyen kriterler

Dünyada enerjinin üretimi ve tüketimi, ülkelerin sanayileşme ve ekonomik-sosyal kalkınmaya yönelik yaptıkları yatırımlarla ilişkilidir. Dünyadaki bütün ülkeler gelişmişlik statüsünü ileriye taşıyabilmek adına ülkeler arası rekabetin ve bağımsızlığın en önemli unsuru olan enerjiye olan yatırımlarını her geçen gün arttırmaktadır. Elektrik enerjisi de bu hususta ülkelerin en önem verdiği yatırım kaynaklarından biridir.

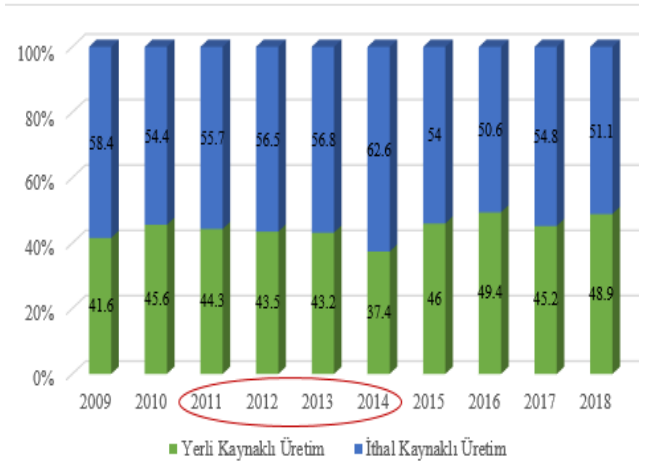
Dünya genelinde elektrik enerjisinin durumu incelendiğinde ise 2017 yılına ait toplam elektrik enerjisi üretim miktarının %3.7 oranında artış göstererek 2018 yılında 26,614.8 TWh miktarına ulaştığı gözlenmektedir. Dünyada elektrik enerjisi üretimi için en yaygın kullanılan kaynağın kömür olduğu ve toplam yenilenebilir enerji kaynaklarının ikinci sırada yer aldığı elektrik enerjisi üretim oranları ile açıklanmaktadır (Tablo 1). Ülkelerin elektrik enerjisi üretiminde kullandığı kaynaklara bakıldığında, kullanılan kömürün sırasıyla Hindistan, Çin ve Türkiye'de,

nükleer enerjinin ABD'de, petrolün Japonya'da, doğal gazın Rusya'da ve yenilenebilir enerjinin ise Kanada'da en fazla paya sahip olduğu görülmektedir [30].

Bazı ülkelerin elektrik üretim miktarları ise ülkelerin nüfusu ve kişi başına GSYH değerleri ile birlikte değerlendirilen ülkeler arasında en az nüfusa sahip olan Kanada'nın nüfusu ülkemizden fazla olan Almanya ile karşılaştırıldığında neredeyse aynı ekonomik ölçüte sahip oldukları ve yakın anlamda dünyadaki elektrik üretimi payına sahip olduğu gözlenmektedir (Tablo 2)

Ülkemizde ise 2017 yılına ait toplam elektrik enerjisi üretim miktarı 297.3 TWh'dır. Bu üretim miktarı %1.7 oranında artış göstererek 2018 yılında 302.5 TWh enerji üretilmiş ve bu üretimde fosil kaynakların payı %68 iken yenilenebilir kaynaklar toplam 98 TWh üretim miktarı ile %32'lik bir paya sahip olduğu görülmektedir (Tablo 1) [30].

Ülkemizde 2009-2018 yılları arası 10 yıllık yerli ve ithal üretim oranlarında 2011'den 2014 yılını kapsayan 4 yıllık süreçte elektrik ithalat miktarında sürekli artışlar gözlenmiştir (Şekil 7) [36]. Ülkemizde oluşan bu durumu elektrik enerjisi üretimindeki maliyetleri, tüketici fiyatları ve komşu ülkelerdeki elektrik fiyatının yanı sıra o dönemde devletlerin enerji konusunda benimsediği politikaların incelenmesiyle bu ilişkiler anlamlandırılabilir [37]



Şekil 7. Türkiye elektrik enerjisi üretiminde yerli ve ithal kaynaklı üretim oranları

Tablo 1. Bazı ülkelerin 2018 yılı kaynak bazında elektrik enerjisi üretim oranları (%)

Ülkeler	Kömür	Petrol	Doğal Gaz	Nükleer	Yenilenebilir Enerji	Diğer Kaynaklar
Japonya	33.0	5.7	36.8	4.7	18.4	1.4
Almanya	35.3	0.8	12.8	11.7	34.9	4.5
ABD	27.9	0.6	35.4	19.0	16.8	0.3
Kanada	9.1	0.5	9.0	15.2	66.1	0.1
Çin	66.5	0.2	3.1	4.1	25.8	0.2
Hindistan	75.4	0.6	4.8	2.5	16.7	0.0
Rusya	16.0	1.0	46.9	18.4	17.2	0.4
Türkiye	36.9	0.2	30.5	-	32.1	0.3
Dünya	38.0	3.0	23.2	10.2	25.1	0.6

Tablo 2. Bazı ülkelerin 2018 yılı elektrik enerjisi üretim ve tüketim değerleri [34, 35]

Ülkeler	Nüfus (Milyon)	GSYH/kişi (\$/kişi)	Elektrik Üretimi (TWh)	Dünyadaki Üretim Payı (%)	Elektrik Tüketimi (TWh)	Dünyadaki Tüketim Payı (%)	Kişi Başına Elektrik Tüketimi (MWh/kişi)
Çin	1393	9770.85	7111.8	26.7	6833.1	27.6	4.9
ABD	327.2	62794.59	4460.8	16.8	4288.8	17.3	13.1
Hindistan	1353	2009.98	1561.1	5.9	1309.4	5.3	1
Rusya	144.5	11288.87	1110.8	4.2	999.4	4.0	6.9
Japonya	126.3	39289.96	1051.6	4.0	1012.8	4.1	8
Kanada	37.06	46232.99	654.4	2.5	572.1	2.3	15.4
Almanya	82.79	47603.03	648.7	2.4	567.8	2.3	6.9
Türkiye	80.81	9370.18	302.5	1.1	272.5	1.1	3.4
Dünya	7594	11312.44	26614.8	100	24738.9	100	3.3

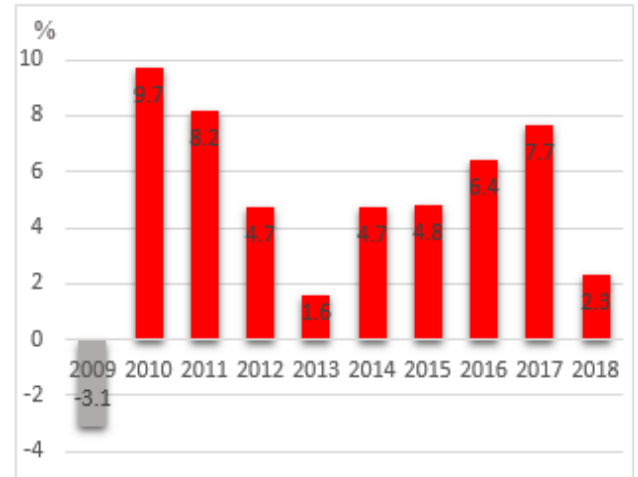
Elektrik enerjisi tüketiminin dünyada ve Türkiye'deki durumu incelendiğinde, IEA verilerine göre küresel elektrik enerjisi tüketimi 2018 yılında 24,738.9 TWh olarak hesaplanmıştır. Ülkemiz ise dünya genelinde yüzölçümü ve nüfusu itibarıyla kayda değer bir duruma sahiptir ve 272,5 TWh elektrik tüketimine ulaşmıştır (Tablo 2).

Elektrik enerjisi tüketim değerleri incelendiğinde tüketimi tam anlamıyla tek bir etkene bağlamanın doğru olmadığı Tablo 2'de görülmektedir. Bu durumu Kanada ve Hindistan örneği ile açıklamak mümkün olacaktır. Kanada'ya bakıldığında nüfusu ülkemize kıyasla düşük olmasına rağmen elektrik tüketim miktarının neredeyse 2 katı olduğu görülmektedir. İki ülke arasındaki bu durumu gelir seviyeleri ile açıklamak mümkün olacaktır. En düşük gelir ölçütüne sahip Hindistan'da ise nüfusu ile değerlendirildiğinde dünya geneli kişi başı elektrik tüketim miktarının altında bir değere sahip olduğu gözleniyor.

Ayrıca Tablo 1 ve Tablo 2 arasında ilişki kurulduğunda kişi başına düşen elektrik tüketiminin 15.4 MWh olan Kanada'da tüketim için sağladığı en büyük üretim kaynağının yenilenebilir enerji olduğu bilgisi çıkartılabilir. Ekonomik ölçütü düşük ve kişi başına tüketilen elektriğin 1 MWh olduğu Hindistan'da ise en büyük üretim kaynağının kömür olduğu gözlenmektedir.

Ülkemiz ise neredeyse dünya geneli kişi başı elektrik tüketim sınırında yer almaktadır ve son 10 yılda yıllık elektrik tüketim artış hızı ortalama %4.7 seviyelerinde gözlenmiş (Şekil 8) [36]. Çeşitli nedenlerden dolayı elektrik enerjisi talebindeki artış hızı yıllara göre değişiklik gösterdiği görülmektedir (Şekil 8). Ayrıca bölgesel,

mevsimsel ve anlık gibi durumlarda tüketim miktarında değişiklik olabilmektedir.



Şekil 8. Türkiye'nin elektrik enerjisi tüketimindeki değişim oranları

Aynı gün içinde bile farklılıklar gösteren elektrik enerjisi talebinin anlık olarak karşılanması gerektiğinden elektrik enerjisi üretimi için talep miktarının tahmini gereklidir [14]. Talep miktarının güvenilir bir şekilde planlanabilmesi için talebi etkileyen kriterlerin belirlenmesi önemlidir. Talebi etkilediği düşünülen elektrik talep tahmin modelinin girdi verisi olarak kullanılacak kriterler;

- Ekonomik büyüme ve gelişmeler
 - Nüfus ve demografik değişiklikler
 - Kişi başına düşen elektrikli alet sayısındaki değişimler
 - Elektrikten yararlanan nüfus oranı
 - Şehirleşme oranı
 - Elektrik enerjisi fiyatları ve politikaları
 - Ülkelerin coğrafi özellikleri
- şeklinde sıralanabilir [38].

Çalışmalarda ise girdi verisi olarak kullanılan elektrik enerjisi talep tahminini etkileyen kriterlere örnek olarak Tablo 3’de yer verilmiştir. Bu çalışmalar incelendiğinde farklı yöntemler, değişkenler ve dönemler kullanıldığı aynı zamanda ülke geneli ele alınarak gelecek enerji talebi tahmini yapıldığı gözlenmiştir.

Tablo 3. Bazı çalışmalarda kullanılan elektrik enerjisi talebini etkileyen kriterler

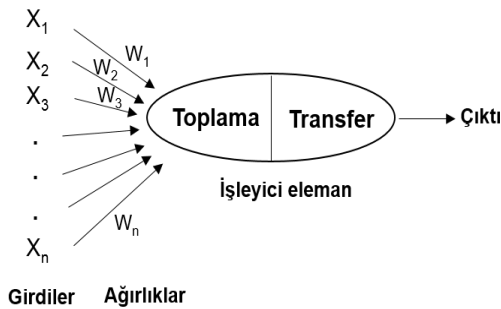
Yazarlar	Kriterler
[16]	Milli gelir, GSYİH, tüketici fiyat endeksi
[17, 39]	GSMH, nüfus, ithalat, ihracat
[22]	Nüfus, GSYİH, kişi başına GSYİH
[24, 40]	GSYİH, nüfus, ithalat, ihracat
[41]	GSYİH, elektriğin ortalama fiyatı, nüfus
[42]	Kurulu güç kapasitesi, brüt elektrik üretimi, nüfus, toplam abone sayısı
[43]	Brüt elektrik üretimi, kurulu kapasite, toplam abonelik, nüfus

3 Materyal ve metot

3.1 Yapay sinir ağları (YSA) yöntemi

Gelişen teknolojiyle insanlığı taklit etme çabalarının en son ürünlerinden bir tanesi olan YSA teknolojisi, basit biyolojik sinir sisteminin çalışma şeklini örnek olarak tasarlanan bir modeldir. Nöronlar içeren sinir hücreleri taklit edilir ve bu nöronlar çeşitli şekillerde birbirine bağlanarak ağ oluşturulmaktadır. Bu ağlar öğrenme, hafızaya kaydetme ve tanımlanan girdi ve çıktı verileri arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarma gibi yeteneğe sahiptirler [44].

Biyolojik sinir sisteminden esinlenerek yapay sinir hücresinin matematiksel modelde işleyici eleman olarak tanımlanan nöronlar sayesinde girdi verileri kullanılarak çıktı verisi üretilmektedir (Şekil 9).



Şekil 9. Basit bir yapay sinir hücresinin yapısı

Biyolojik sinir ağı performansları son derece karmaşık olayları ilişkilendirebildiğinden YSA modeli bilgisayar

ortamına kazandırılmış ve endüstriyel, finansal, askeri ve savunma, sağlık, haberleşme ve ulaşım gibi birçok uyulama alanında kullanımına sıklıkla yer verilmektedir. Model, verilerin eğilimlerini tanımlayabilme imkânı sunduğu için tahmin çalışmalarında da kullanımı uygundur [9]. Yapılan çalışmalarda YSA'nın sağladığı avantaj ve dezavantajlar Tablo 4’te verilen bilgiler ile özetlenebilmektedir.

Tablo 4. YSA yönteminin avantaj ve dezavantajları [13]

YSA'nın avantajları	YSA'nın dezavantajları
Doğrusal olmama	YSA yönteminin donanıma bağlı olması
Öğrenme	Belirli bir kural olmadığından probleme uygun ağ yapısının belirlenmesi için deneme yanılma yolunun uygulanması
Genelleme	Ağın davranışlarının açıklanamaması.
Uyulanabilirlik	Ağın eğitiminin ne zaman sonlanacağına dair karar vermek için bir yöntem olmaması
Hata toleransı	Geniş veri seti gereksinimi
Paralellik	Modelleme yapılarına rağmen uygulamanın zor ve karmaşık olması
Eksik verilerle çalışma	YSA yönteminin donanıma bağlı olması
Adaptasyon	

3.1.1 YSA metodolojisi

Model kurulurken öncelikle girdi (İthalat, ihracat, sanayi, nüfus, GSYİH... vb.) ve çıktı (elektrik enerjisi tüketim değeri) verileri belirlenir ve ağa tanıtılmadan önce normalize edilmesi gerekmektedir. Girdi ve çıktı verilerinden oluşturulan veri setinin %70’i ağın eğitiminde %30’u ise ağın test edilmesindeki işlem adımları için ayrılmalıdır. Eğitim ve test verisi olarak düzenlendikten sonra ağ mimarisi oluşturulmaktadır. Ağ mimarisinin oluşturulmasında gizli katman sayısı, katmandaki nöron sayısının belirlenmesi ve ağ parametrelerinin saptanması gerekir. Ağ mimarisinin oluşturulmasına yardımcı olan tüm bu işlemler farklı kombinasyonlar gözden geçirilerek ağın performans sonuçlarına göre belirlenmektedir. Ayrıca ağdaki girdi verilerinin ağırlıkları kullanıcı tarafından bilinmemektedir. Kurulan model tarafından rastgele belirlenir.

Daha sonra eğitim verileri ağa tanıtılır ve öğretilir. Bu işlem sırasında her bir bağlantının ağırlığı öğrenme kuralına göre güncellenir ve yeni ağırlıklara göre ağ tekrar çıktı üretebilmektedir. Tüm bu yenileme işlemlerinin sonlandırılması iki şekilde yapılabilir. Ağın eğitilmesi belli bir iterasyon değerine ulaştığında ya da hata değeri kabul edilebilir bir sonuç verdiğinde eğitim sonlandırılır. İstenilen bu şartlar sağlanmıyorsa veri seti gözden geçirilmeli ve ağ mimarisi tekrar kurulmalıdır.

Ağın eğitimi kabul edilebilir bir şekilde tamamlandığında test verilerinden yararlanılarak ağ test edilir ve tahmin performansı ölçülür. Eğer test sonucu kabul edilebilir bir başarıya ulaşırsa yeni girdi verileri ağa tanıtılır ve çıktı verileri elde edilir. Eğer test sonucu kabul edilebilir bir başarıya sahip değil ise işlemler tekrarlanmalıdır.

3.2 Çoklu regresyon analizi (ÇRA)

Regresyon analizi, çalışmalarda model doğrulama yöntemi olarak sıklıkla karşılaşılan istatistiksel bir analiz yöntemidir. Bu analiz yöntemi bağımlı ve bağımsız değişkenlerin olduğu bir konu üzerinde sebep-sonuç ilişkisini belirleyerek matematiksel bir denklem türetir ve gelecek tahmini yapılmasına yardımcı olur [45].

Çoklu regresyon analizinde (ÇRA), oluşturulan modeldeki bağımsız değişkenlerin her biri bağımlı değişkendeki değişimi anlamlandırmaya çalışır ve ÇRA modelinin matematiksel olarak formülü,

$$y_i = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_nx_n + \varepsilon \quad (1)$$

y_i : Bağımlı değişken (elektrik enerjisi tüketim değeri)

x_n : Bağımsız değişkenler (İthalat, ihracat, sanayi, nüfus, GSYİH... vb.)

ε : Bozulma ve hata terimi

β_0 : Sabit katsayı

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$: Değişken katsayıları şeklinde ifade edilmektedir.

ÇRA modelinin sonucunda bulunan F ve R² değerleri model kontrolü için önemlidir. ANOVA testi sonucunda çıkan F değeri oluşturulan modelin anlamlı olup olmadığı noktasında yardımcı olmaktadır. F değerinin 0.05'ten düşük olması gerekmektedir. R² değeri ise bağımsız değişkenler tarafından bağımlı değişkenin % kaçının açıklandığını ifade etmektedir. R² değerinin 1'e yakın olması modeldeki bağımlı değişkenin, bağımsız değişkenler tarafından o kadar iyi açıklandığını anlamına gelmektedir [46].

4 Uygulama

Çalışmada Türkiye'nin ekonomisine yönelik olan elektrik enerjisi tüketim değişkenine ait talep tahmini yapılmıştır. Türkiye'nin 2030 yılı talep tahmini için YSA ve ÇRA yöntemine göre elektrik enerjisi tüketim tahmini modelleri oluşturulmuştur. YSA ve ÇRA yönteminin tahmin gücü için performans analizleri gerçekleştirilerek her iki modelde de ortak olan test verilerinin tahmin sonuçları ile gerçek değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 10).

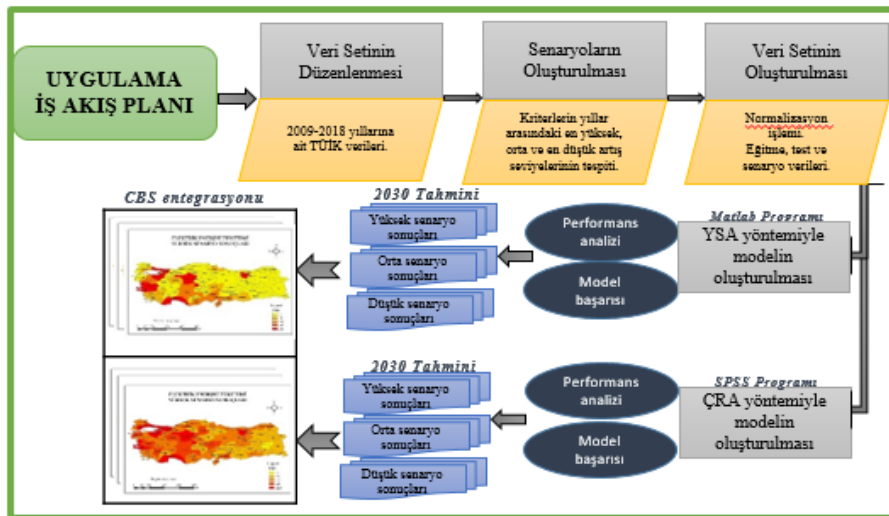
4.1 Çalışmada kullanılan veri seti

Türkiye'nin 2009-2018 yıllarına ait elektrik enerjisi talep tahminini etkileyen nüfus miktarı, ortalama hanehalkı büyüklüğü, eğitim durumu, GSYH, ihracat, ithalat, sanayi girdi verisi olarak ve elektrik enerjisi tüketim verileri çıktı verisi olarak çalışmada kullanılmıştır. Her bir kriter TÜİK verilerinden 81 il için elde edilmiş ve bu kriterler ele alınırken Her bir ilin 10 yıllık verileri ile veri seti düzenlenmiştir. Bu verilerden genel anlamda nüfus, ortalama hanehalkı büyüklüğü eğitim durumu, GSYİH değerleri yıldan yıla artış gösterirken, ihracat, ithalat ve sanayide bazı illerde ve bazı dönemlerde düşüş gözlemlenmektedir. Çıkış değişkenimiz ise elektrik enerjisi tüketim verisi 2008-2009 geçiş dönemine ait verilerde küçük düşüşler olduğu gözlemlenmektedir.

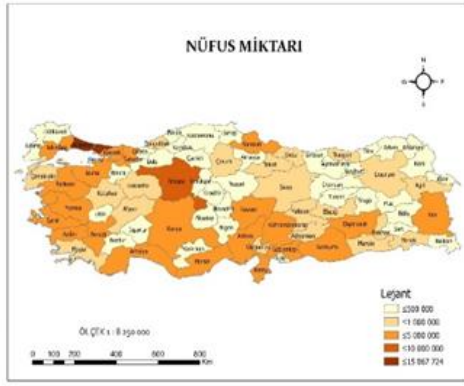
Çalışma modelinde kullanılan girdi ve çıktı verileri değerlendirilmek üzere CBS ortamında hazırlanarak haritaya aktarılmıştır. Girdi ve çıktı verilerinin 2018 yılına ait değerleri genel durumu göstermek amacıyla Şekil 11 ve Şekil 12'teki haritalarda gösterilmektedir.

Modelde kullanılan girdi ve çıktı verilerinin yoğun olması, veri setini karmaşık bir hale sokmaktadır. Veri setini yakından tanıyabilmek ve mevcut durumunu izleyebilmek adına her bir kriter ayrı ayrı CBS ortamına entegre edilmiştir. Böylece veri setinin yoğunluğunun çözümlenmesinde CBS'den araç olarak faydalanılmış ve modele etki eden tüm kriterlerin mevcut durumunu Türkiye haritasında görsel bir ifade ile sunma imkânı vermiştir.

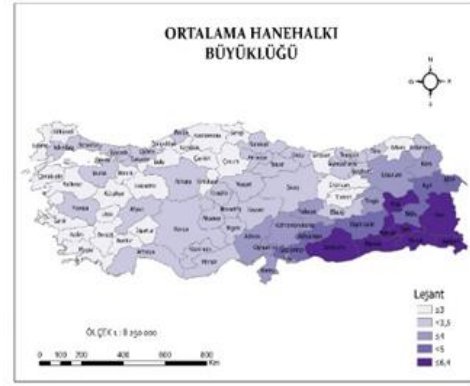
Uygulamada 2030 yılı elektrik enerjisi tahmininin belirlenmesine yardımcı olan tüketime etki eden her bir kriterin yıllar arasındaki en yüksek, orta ve düşük artış seviyeleri belirlenerek senaryolar oluşturulmuştur. Senaryolarda veri setinde yer alan enerjisi talep tahminini etkileyen nüfus miktarı, ortalama hane halkı büyüklüğü, eğitim durumu, GSYH, ihracat, ithalat ve sanayi girdi verilerinin 10 yıllık artış hızlarının, 81 ile ait % değişim oranları tespit edilmiştir. Her bir giriş verisinin en yüksek, ortalama ve en düşük oranlarına göre 81 il için 3 ayrı senaryo oluşturulmuştur.



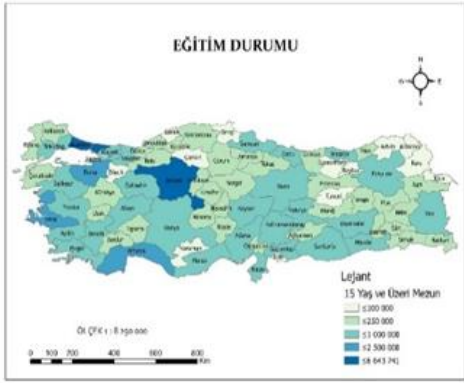
Şekil 10. Uygulamada kullanılan iş akış planı



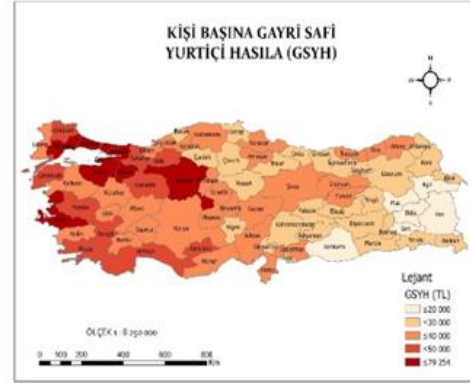
(a)



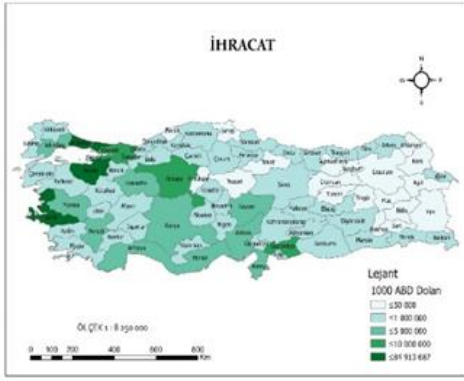
(b)



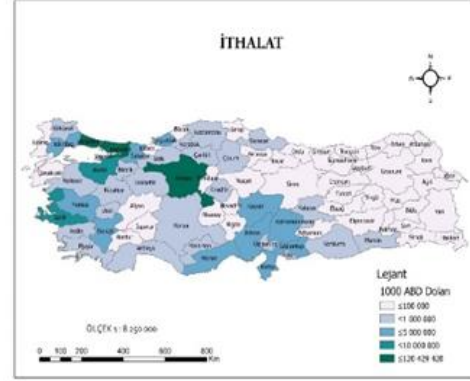
(c)



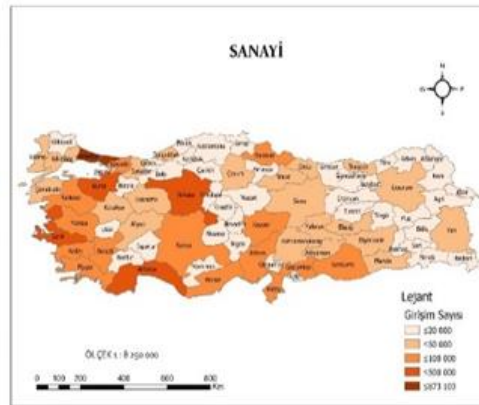
(d)



(e)

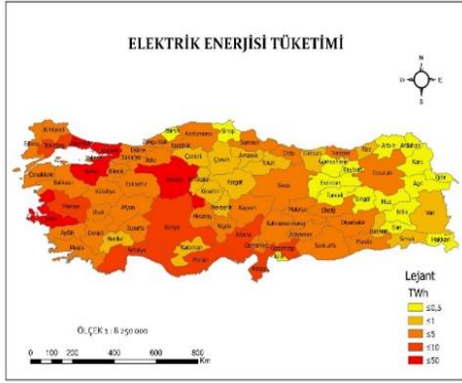


(f)



(g)

Şekil 11. Modelin girdisi olan elektrik enerjisi talep tahminini etkileyen kriterlerin 2018 yılı haritası



Şekil 12. Modelin çıktısı olan elektrik enerjisi tüketiminin 2018 yılı haritası

Bu senaryolar daha sonra veri setine dâhil edilmiştir. Düzenlenen veri setindeki değerler birbiri ile orantılı olmadığından, veriler arasında aşırı derecede büyük ve küçük değerler olduğundan verilerin YSA ve ÇRA yöntemlerine entegre edilebilmesi için belirli bir aralığa getirilmesi gerekmektedir. Girdi ve çıktı verilerinden oluşan veri setinin modellerde kullanımı için [1, 2] aralığında normalizasyon işlemi yapılmıştır (Denklem (2)).

$$X_n = (X_r - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}) + 1 \quad (2)$$

Burada X_r , kriterin gerçek değeri ve X_{max} , X_{min} 'de kriterlerin en büyük ve en küçük değerleridir.

Veri setinin eğitime ve test olarak modelin oluşması için ayrılması gerekmektedir. Eğitimde yer alan veriler ile model oluştururken test verileri ile modelin tahmin başarısı ortaya çıkmaktadır. Çalışmada enerji tahmininde gelecekte olabilecek ihtiyaçlara göre oluşturulan senaryolarda normalizasyona dahil edilerek giriş verilerinin senaryo veri seti oluşturulmuştur. Bu nedenle tüm normalize edilmiş değerlerin modelde eğitime başarılı olması için sistematik olarak eğitim verileri oluşturmak yerine rastgele ama tüm veri içeriklerini yansıtacak şekilde normalize veri setinde;

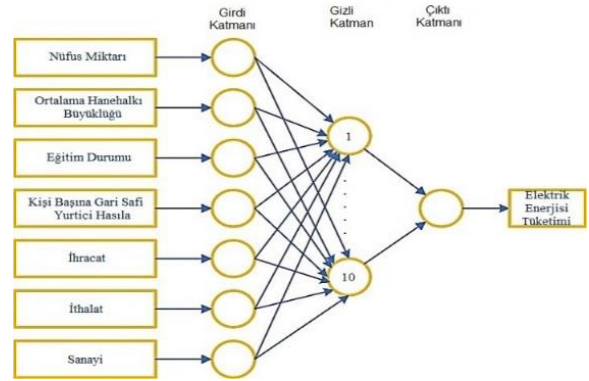
- 2009, 2011, 2012, 2013, 2015, 2016, 2017 yıllarına ait 567x8 il verileri eğitime,
- 2010, 2014, 2018 yıllarına ait 243x8 il verileri testte
- 2030 yılı için düşük, orta ve yüksek verilerin artışına göre düzenlenen 243x7 il senaryo verilerinde,

kullanılmak üzere üç alt gruba ayrılmıştır. Eğitim veri seti YSA ve ÇRA'da modelin oluşmasında, test verileri her iki modelin tahmin başarılarını test etmede kullanılmıştır. 2030 yılına ait senaryo verileriyle ise oluşan modellerle gelecek tahmin değerlerine bakılmıştır.

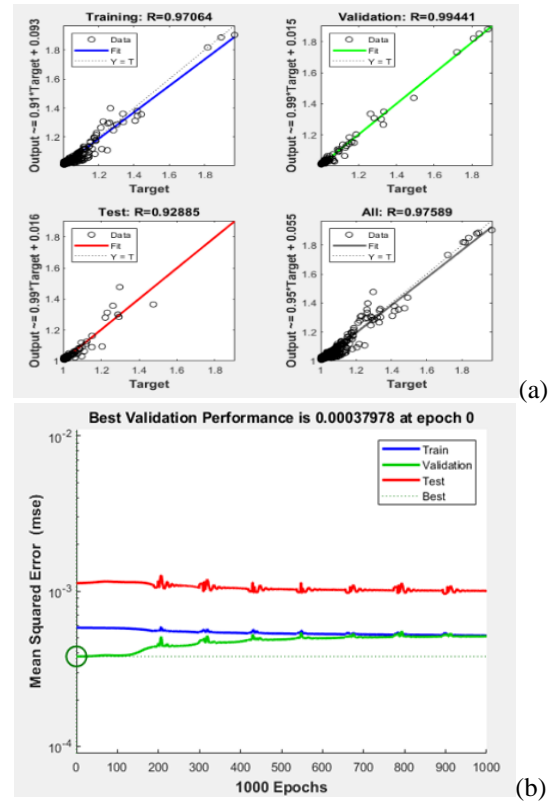
4.2 Yapay sinir ağları (YSA) uygulaması

Çalışmada gerçekleştirilen yöntemlerden biri olan YSA metoduna göre oluşturulan metodolojide yedi input ve bir output ile model kurulmuştur. Çalışmada kullanılan 7 kriterli YSA'nın yapısı Şekil 13'te gösterilmektedir. YSA ile

problemin başarılı bir şekilde çözümlenebilmesi için ağ topolojisinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. YSA topolojisinin seçimi problemin türüne göre değişiklik gösterebilmektedir. Fakat ileri geri yayılım ağları neredeyse tüm problemlerin çözümünde kullanılmaktadır [47]. Bu çalışmada ağır topolojisi ileri beslemeli geri yayılım üzerine oluşturulmuştur. Katman ve nöronların sayılarının belirlenmesinde, farklı kombinasyonlar deneyerek performansına göre karar verilmiştir. Çalışma sonucunda 1 katmanlı ve 10 nöron sayısına sahip olan ağ uygun bulunmuştur (Şekil 13). Ağın eğitime başarısı geri dönüş değerleri 1000 iterasyon sonucunda $R=0,97064$ olarak elde edilmiştir (Şekil 14.a,b)



Şekil 13. Yapay sinir ağı modeli



Şekil 14. YSA modelinin eğitilmesi sonucu regresyon değerleri (a) ve modelin ortalama kare hatası ile en iyi doğrulama performans değeri arasındaki ilişki (b)

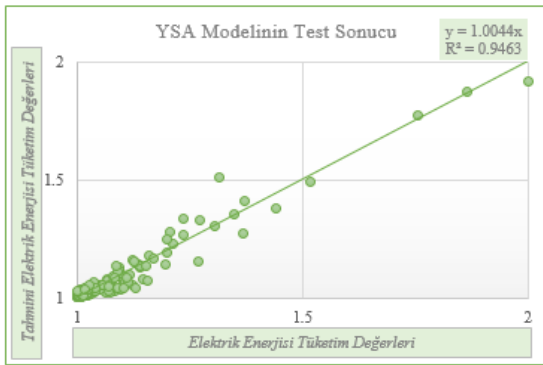
YSA'nın performanslar sonucunda eğitim verileri ile oluşan model başarısı kabul edilir olduğundan test verileri ağa tanımlanır. Ağ bu test verileri sonucunda bize tahmini bir çıktı üretmektedir. Elde edilen sonuçların doğruluk derecesi gerçek çıktı verileri ile değerlendirilmek üzere oluşturulan YSA modelinin performansı ölçülür. Modelin doğruluğu ortalama yaklaşıklık oranı (%AA) ve determinasyon katsayısına (R^2) göre incelenmiştir.

$$\%AA = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - \frac{|Xp - Xi|}{Xp})}{n} \times 100 \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Xp - Xi)^2}{\sum (Xi - \bar{X})^2} \quad (4)$$

Denklemlerde belirtilen X_p elektrik enerjisi tüketiminin tahmin değeri, X_i gerçek elektrik enerjisi tüketim değeridir. $i: \{1.2.3...n\}$ ise veri setinde bulunan 81 ilin numaralandırılmasıdır.

YSA modeli ile elde edilen ortalama yaklaşıklık oranı %98 mutlak başarı ile elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan elektrik enerjisi tüketim değerleri ile modelden elde edilen tahmini elektrik enerjisi tüketim değerleri arasında en iyi uyum eğrisi ($y=x$ eğrisi) ile gösterilmektedir. R^2 değeri 1'e yakın olduğunda model başarılı sayılır ve çalışma modelinin R^2 değeri 0,9463 olarak elde edilmiştir (Şekil 15).



Şekil 15. YSA modelinin $y=ax$ ve R^2 değeri

4.3 Çoklu regresyon analiz (ÇRA) uygulaması

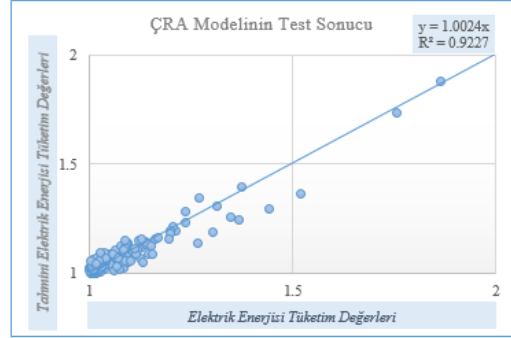
Çalışmada yapılan tahmin başarısını ölçmek için kullanılan başka bir yöntemde ÇRA yöntemidir. YSA yönteminde olduğu gibi aynı veri seti ile ÇRA modeli oluşturulmuştur. Yedi bağımsız değişken girdi ve bir bağımlı değişken olan çıktı verisine çoklu regresyon modeli uygulandığında elde edilen denklem aşağıdaki gibidir.

$$Y = -3.303 + 1.361 * X_1 + 0.768 * X_2 + 5.472 * X_3 - 2.81 * X_4 - 0.078 * X_5 - 0.416 * X_6 - 0.018 * X_7 \quad (5)$$

Nüfus miktarı (X_1), GSYH (X_2), ihracat (X_3), ithalat (X_4), sanayi (X_5), eğitim durumu (X_6), ortalama hanehalkı büyüklüğü (X_7) değişkenleri YSA modelinde olduğu gibi ÇRA'da da bağımsız değişken ve elektrik enerjisi tüketimi (Y) bağımlı değişken olarak kullanılmıştır. Elde edilen regresyon modelinin performansını belirlemek için test

verileri regresyon denklemi ile hesaplanmıştır. Daha sonra gerçek olan elektrik enerjisi tüketim değeri ile kıyaslanmıştır. Oluşturulan modelin başarısını ölçmek için YSA modelinde olduğu gibi % AA, R^2 gibi performans analizleri yapılmıştır.

Bu modelden elde edilen ortalama yaklaşıklık oranı %98 mutlak başarı ile elde edilmiş ve R^2 sonucu 0.9227 olarak bulunmuştur (Şekil 16).



Şekil 26. ÇRA modelinin $y=ax$ ve R^2 değeri

5 Bulgular ve tartışma

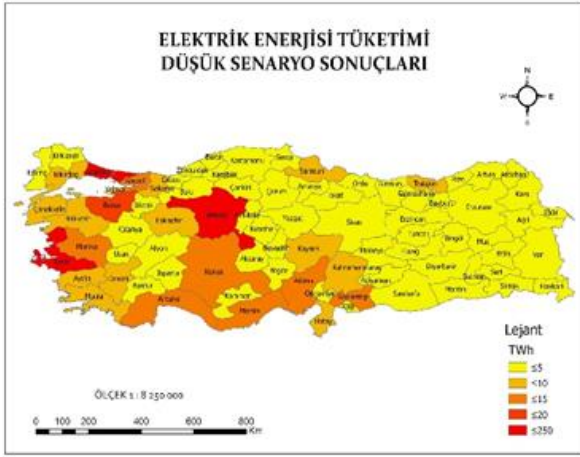
Küçükali ve Barış [21], Lin [48], Ervural [49]' e göre %10'dan daha az olan tahmin hatasına sahip modeller yüksek doğruluk derecesine sahip tahmin modelleri olarak ifade edilmektedir. YSA ve MRA modellerinin %2 tahmin hatasına sahip olması bu çalışmanın elektrik enerjisi tüketim tahmininde literatüre göre her iki modelde başarılı olarak kabul edilmektedir.

Türkiye'nin 10 yıllık verileri kullanılarak modelin başarısı test edildikten sonra gelecek 2030 yılı elektrik enerjisi tahmini için üretilen senaryolar ile enerji talep tahmini gerçekleştirilmiştir. Üç farklı senaryonun YSA ve ÇRA modellerine göre tanımlanmasıyla elde edilen Türkiye'nin 81 iline ait 2030 yılı elektrik enerjisi tüketim tahmini sonuçlarının haritası Şekil 17, 18'de üretilmiştir.

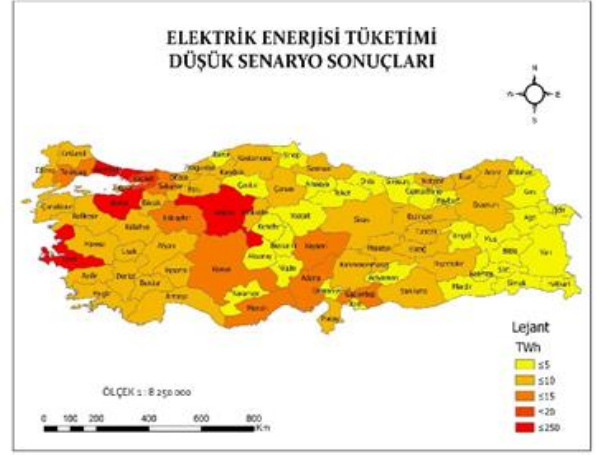
Modellemeler sonucu oluşan Türkiye'nin enerji talep tahmin haritalarına bakıldığında, genel anlamda İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve Antalya'nın daha fazla taleple öne çıktığı görülmektedir. Bu illerin sadece nüfus olarak değerlemeye alınması durumunda Bursa ve Antalya'nın dikkat çekmesi anlaşılacaktır. Çalışma il bazında gelecek tahmini için yedi farklı etkenin göz önüne alınarak değerlendirilmesinde etkin bir kullanım altlığı olabileceğini göstermektedir.

Ülkemizde il bazında yapılmış olan elektrik enerjisi talep tahmini çalışması bulunmamaktadır. Fakat bakanlık tarafından her iki yılda bir hazırlanan Türkiye'nin genel Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyonu Raporuna göre yıllık bazda talep tahmin modeli düşük, referans/orta ve yüksek senaryolar şeklinde kurulmuş ve tahmin edilmiştir. Bakanlığın sunmuş olduğu sonuçlar ile iller bazında uygulanan bu çalışmanın sonuçlarını toplayarak genel anlamda Türkiye'nin 2030 yılı toplam tüketim talebi kıyaslanabilmektedir. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından sunulan Türkiye'nin 2030 yılı projeksiyon sonuçları ve çalışmada modellenen il bazındaki model sonuçlarının toplamına göre karşılaştırma

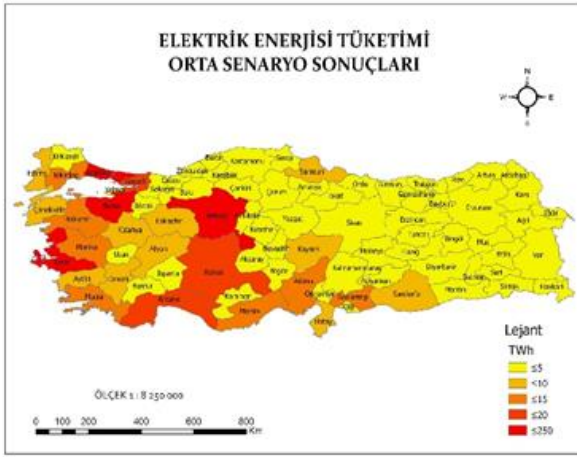
yapıldığında YSA ile enerji talep tahmininde daha sağlıklı sonuçlar elde edildiği gözlemlenmektedir (Tablo 5).



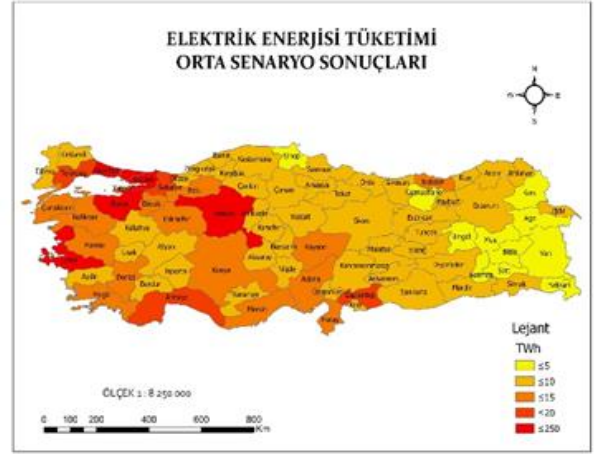
(a)



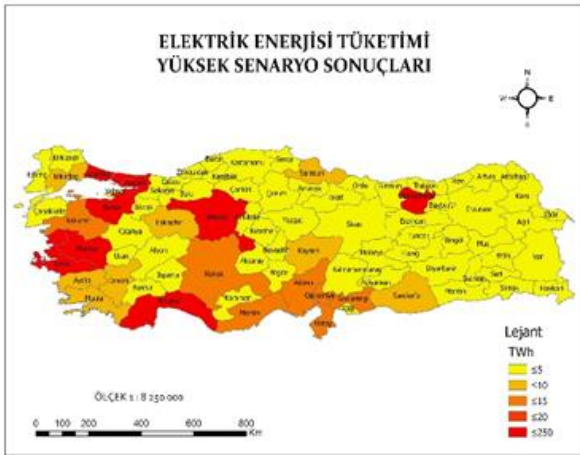
(a)



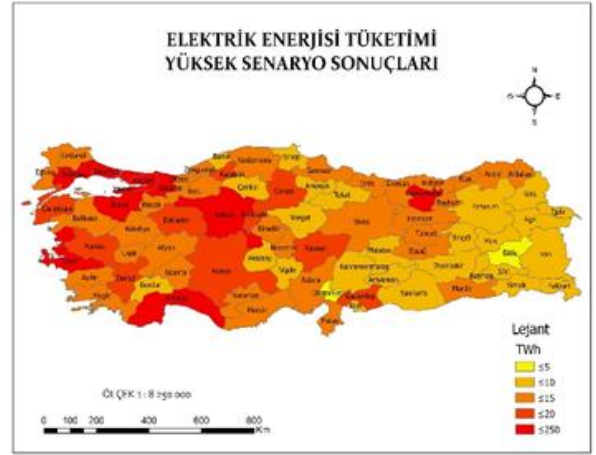
(b)



(b)



(c)



(c)

Şekil 17. YSA modeli ile Türkiye'nin 2030 yılı elektrik enerjisi tüketim tahmini haritası

Şekil 18. ÇRA modeli ile Türkiye'nin 2030 yılı elektrik enerjisi tüketim tahmini haritası

Tablo 5. Türkiye'nin 2030 yılı elektrik enerjisi talep projeksiyonu sonuçları

2030 Yılı Sonuçları	Senaryolar (TWh)		
	Düşük	Referans/Orta	Yüksek
ETKB raporu	453.0	481.7	515.4
YSA modeli	453.0	456.2	493.4
ÇRA modeli	1293.3	762.1	595.8

YSA modeli ile ETKB'nin raporuna göre 2030 yılı toplam enerji talep tahminlerinin ÇRA ya göre daha yakın bulunmasının sebebi: ÇRA yönteminin lineer olmasından dolayı sürekli verilerde sistematik artış gösterdiği ilkesine göre hareket ederek model oluşmasıdır. Hâlbuki YSA insan beynini taklit ederek sonuç ürettiğinden daha makul tahmin değerleri elde etmiştir. Oluşan talep haritalarına bakıldığında da ÇRA yöntem tahminlerinde gelecekte olması beklenenden daha fazla ilin talebinin arttığı gözlemlenmektedir.

6 Sonuçlar

Bu çalışma sonucunda yapay zekâ yöntemlerinden olan YSA modeli ve istatistiksel analiz yöntemi olan ÇRA modeli kurularak Türkiye'nin iller bazında 2030 yılı elektrik enerjisi talep tahmini gerçekleştirilmiştir. 81 ile ait elektrik enerjisi talep tahmini sonuçları toplanarak elde edilen ülke geneli toplam talep sonuçlarına bakıldığında, YSA yöntemi ile yapılan model sonuçlarının bakanlığın elde ettiği sonuçlara daha yakın olduğu gözlenmiştir. Fakat bu çalışma sonucunda elde edilen enerji ihtiyaç haritaları tek başına bir anlam ifade etmemektedir. Oluşturulan bu üç senaryonun haritası yenilenebilir ya da alternatif enerji kaynaklarının ilgili potansiyel haritaları ile beraber incelenmelidir. Ancak iki durum beraber gözlemlenirse enerjinin yerinde üretimi ve tüketimiyle ekonomik anlamda ülkemize kazanım sağlayacaktır.

Tablo 6'da örnek olarak verilen ülkemizin 2018 yılı elektrik enerjisi durumu incelendiğinde, yaşanan iç tüketim ve kayıplardan dolayı üretilen enerji miktarının azaldığı görülmektedir. Bu çalışma sonucu üretilen çıktı haritaları ile enerjinin en fazla üretimini sağlayacak alanla birlikte üretilecek enerjinin en fazla potansiyelinde alternatif kaynaklar dikkate alınarak geliştirilebilir. Böylece enerji kaynağının yerinde üretimi ile kullanıma sunmak kayıpların önüne geçilmesine ve üretilen enerjinin etkin kullanımına katkı sağlayacaktır.

Tablo 6. Türkiye'nin elektrik enerjisi üretim-tüketim dengesi [36]

2018 yılı	TWh
Brüt Üretim	304.8
İç Tüketim	14.3
Net Üretim	290.5
İthalat	2.5
Şebekeye Verilen	293.0
İletim Kaybı	5.1
Dağıtım Kaybı	29.8
İhracat	3.1
Net Tüketim	254.9

18 Ocak 2018 tarihli Elektrik Mühendisleri Odası açıklamalarına göre Türkiye'de 2018 yılında elektrik şebekesindeki beklenen kayıp-kaçak toplam üretimin %14.2'si olarak gerçekleştiği belirtilmiştir. Bu oran Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD) ortalaması olan %6.4'ten ve seçilmiş ülkelerden önemli oranda yüksektir. Bu nedenle bu çalışma sonuçlarının bu oranı minimize etmede altlık olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca çalışma sonucu:

- Bu tür bir çalışmanın çıktıları kalkınma planlarının hazırlanmasında
- Yenilenebilir enerji kurulumlarının hangi bölgelerde öncelikli planlanması gerektiği konusunda
- Karar destek sisteminde etkili olan yöneticilere destek sağlamada kullanılabilir.

Ayrıca çalışma, sadece kaynak enerji kurulumları konusunda destek sağlamayacaktır. İhtiyaç duyulması halinde elektrik enerjisinin iletim ve dağıtım şebeke merkezlerinin yer seçimi konusunda gerekli projelerde önemli bir etken olarak kullanılabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir

Benzerlik oranı (iThenticate): %3

Kaynaklar

- [1] E. Koç ve M.C. Şenel, Dünyada ve Türkiye'de enerji durumu-genel değerlendirme. Mühendis ve Makina, 54(639), 32-44, 2013.
- [2] E. Koç ve K. Kaya, Enerji kaynakları-yenilenebilir enerji durumu. Mühendis ve Makina, 56(668), 36-47, 2015.
- [3] C. Hamzaçebi ve F. Kutay, Yapay sinir ağları ile Türkiye elektrik enerjisi tüketiminin 2010 yılına kadar tahmini. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 19(3), 227-233, 2004.
- [4] R. L. Carlson and M. M. Umble, Statistical demand functions for automobiles and their use for forecasting in an energy crisis. The Journal of Business, 53(2), 193-204, 1980. <http://dx.doi.org/10.1086/296080>.
- [5] E. Gavcar, S. Şen ve A. Aytekin, Türkiye'de kullanılan kağıt-karton türlerinin talep tahminlerinin belirlenmesi. Turkish Journal of Agriculture and forestry, 23, 203-211, 1999.
- [6] S. L. Zhou, T. A. McMahon, A. Walton and J. Lewis, Forecasting operational demand for an urban water supply zone. Journal of Hydrology, 259(1-4), 189-202, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00582-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00582-0).
- [7] M. Atay, Y. Eroğlu ve S. U. Seçkiner, Yapay sinir ağları ve adaptif nörobülün sistemleri ile 3. İstanbul Havalimanı talep tahmini ve Türk Hava Yolları iç hat filo optimizasyonu. Endüstri Mühendisliği Dergisi, 30(2), 141-156, 2019.
- [8] W. E. Griffiths, L. S. Newton and C. J. O'Donnell, Predictive densities for models with stochastic repressors and inequality constraints: forecasting local-area wheat yield. International Journal of Forecasting, 26(2), 397-412, 2010.

- [9] M. Karahan, İstatistiksel tahmin yöntemleri: yapay sinir ağları metodu ile ürün talep tahmini uygulaması. Doktora tezi, Konya Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Türkiye, 2011.
- [10] Z. Dilaver and L. C. Hunt, Industrial electricity demand for Turkey: a structural time series analysis. *Energy Economics*, 33(3), 426-436, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2010.10.001>.
- [11] A. Kialashaki and J. R. Reisel, Development and validation of artificial neural network models of the energy demand in the industrial sector of the United States. *Energy*, 76, 749-760, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.072>.
- [12] E. Boltürk, Elektrik talebi tahmininde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2013.
- [13] D. Aydın, Yapay sinir ağları yardımı ile talep tahmin analizi ve deniz taşımacılığı sektöründe bir uygulama. Yüksek lisans tezi, İstanbul Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Türkiye, 2012.
- [14] İ. Uygun, Yapay sinir ağları yardımıyla enerji sektöründe talep tahmini. Yüksek lisans tezi, İstanbul Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Türkiye, 2015.
- [15] P. Masaebi, Yapay sinir ağları ile İran elektrik tüketim tahmini. Yüksek lisans tezi, Trabzon Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2016.
- [16] H.T. Pao, Comparing linear and nonlinear forecasts for Taiwan's electricity consumption. *Energy*, 31(12), 2129-2141, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.08.010>.
- [17] K. Kavaklioglu, H. Ceylan, H. K. Ozturk and O.E. Canyurt, Modeling and prediction of Turkey's electricity consumption using Artificial Neural Networks. *Energy Conversion and Management*, 50(11), 2719-2727, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.06.016>.
- [18] H. A. Es, F.Y. Kalender ve C. Hamzaçebi, Yapay sinir ağları ile Türkiye net enerji talep tahmini. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(3), 495-504, 2014. <https://doi.org/10.17341/gummfd.41725>.
- [19] E. Erdogdu, Electricity demand analysis using cointegration and ARIMA modelling: A case study of Turkey. *Energy Policy*, 35(2), 1129-1146, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.02.013>.
- [20] Ö. Demirel, A. Kakilli ve M. Tektaş, Anfis ve Arma modelleri ile elektrik enerjisi yük tahmini. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(3), 601-610, 2010.
- [21] S. Kucukali and K. Baris, Turkey's short-term gross annual electricity demand forecast by fuzzy logic approach. *Energy Policy*, 38(5), 2438-2445, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.12.037>.
- [22] V. Bianco, O. Manca and S. Nardini, Electricity consumption forecasting in Italy using linear regression models. *Energy*, 34(9), 1413-1421, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.034>.
- [23] K. Kavaklioglu, Modeling and prediction of Turkey's electricity consumption using Support Vector Regression. *Applied Energy*, 88(1), 368-375, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.021>.
- [24] Y. Vecihi, Genetik algoritma ile Türkiye net elektrik enerjisi tüketiminin 2020 yılına kadar tahmini. *International Journal of Engineering Research and Development*, 3(2), 37-41, 2011.
- [25] H. K. Ozturk, H. Ceylan, O. E. Canyurt and Arif Hepbasli, Electricity estimation using genetic Algorithm approach: a case study of Turkey. *Energy*, 30(7), 1003-1012, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.08.008>.
- [26] H. A. Amarawickrama and L. C. Hunt, Electricity demand for Sri Lanka: a time series analysis. *Energy*, 33(5), 724-739, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.12.008>.
- [27] F. Gurbuz, C. Ozturk and P. Pardalos, Prediction of electricity energy consumption of Turkey via artificial bee colony: a case study. *Energy Systems*, 4(3), 289-300, 2013.
- [28] International Energy Agency, IEA statistics: World energy balances overview 2019. <http://www.iea.org>, Accessed 6 April 2020.
- [29] International Energy Agency, IEA statistics: Key world energy statistics 2019. <http://www.iea.org/statistics/>, Accessed 6 April 2020.
- [30] British Petroleum (BP), BP statistical review of world energy 2019. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-statsreview-2019-full-report.pdf>, Accessed 6 April 2020.
- [31] Türkiye Petrolleri, 2018 yılı ham petrol ve doğal gaz sektör raporu. Türkiye Petrolleri Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı, Mayıs 2019.
- [32] Organization of the Petroleum Exporting Countries, Energy demand. <https://wo.opec.org/chapter.php?chapterNr=100>, Accessed 6 April 2020.
- [33] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Denge tablosu 2017-2018. <https://enerji.gov.tr/enerji-isleri-genel-mudurlugu-denge-tablolari>, Erişilen tarih 8 Nisan 2020.
- [34] The Worlds Bank , <https://datatopics.worldbank.org/world-development-indicators/>, Accessed 15 December 2020.
- [35] International Energy Agency, <https://www.iea.org/>, Accessed 15 December 2020.
- [36] Türkiye Elektrik İletim A.Ş., Elektrik enerjisi üretimi-tüketimi-kayıplar 2017. <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>, Erişilen tarih 8 Nisan 2020.
- [37] O. Türkyılmaz ve Y. Bayrak, Türkiye'nin enerji görünümü 2018. TMMOB Makina Mühendisleri Odası, MMO/691, Ankara.
- [38] Ö. Gültekin, Bursa ili orta dönem elektrik talep tahmini. Yüksek lisans tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2009.
- [39] C. Hamzaçebi, Forecasting of Turkey's net electricity energy consumption on sectoral bases. *Energy Policy*,

- 35(3), 2009-2016, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.03.014>.
- [40] K. Kavaklioglu, Principal components based robust vector autoregression prediction of Turkey's electricity consumption. *Energy Systems*, 10(4), 889-910, 2019.
- [41] Z. Mohamed and P. Bodger, Forecasting electricity consumption in New Zealand using economic and demographic variables. *Energy*, 30(1), 1833-1843, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.08.012>.
- [42] M. Bilgili, B. Sahin, A. Yasar and E. Simsek, Electric energy demands of Turkey in residential and industrial sectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 404-414, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.005>.
- [43] F. Kaytez, M. C. Taplamacioglu, E. Cam and F. Hardalac, Forecasting electricity consumption: A comparison of regression analysis, neural networks and least squares support vector machines. *Electrical Power and Energy Systems*, 67(1), 431-438, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.12.036>.
- [44] H. Yurtoğlu, Yapay sinir ağları metodolojisi ile öngörü modellenmesi: bazı makroekonomik değişkenler için Türkiye örneği. DPT-Uzmanlık Tezi, yayın no:DPT:2683, Ekonomik Modeller ve Stratejik Araştırmalar Genel Müdürlüğü, 2005.
- [45] F. O. Hocaoglu, K. Kaysal ve A. Kaysal, Yük tahmini için hibrit (YSA ve regresyon) model. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 3(2), 33-39, 2015.
- [46] F. B. Ünel, Taşınmaz değerlendirme kriterlerine yönelik coğrafi veri modelinin geliştirilmesi. Doktora tezi, Konya Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2017.
- [47] D. Anderson and G. McNeill, Artificial neural networks technology. New York: Rome Laboratory, ELIN: A011, 1992.
- [48] C. Lin and P. Hsu, Forecast of non-alcoholic beverage sales in Taiwan using the grey theory. *Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics*, 14(4), 3-12, 2002.
- [49] B. C. Ervural, I. U. Sarı ve B. Koçyiğit, Kural tabanlı bulanık yaklaşımla talep tahmini ve hızlı tüketim sektöründe bir uygulama. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 83-93, 2018.





Kabuk yoğunluğu değişiminin gravimetrik jeoit belirlemeye etkisi

Effect of crust density variation on gravimetric geoid determination

Fahrettin Doğdu^{1,*}, Ramazan Alpay Abbak²

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 42250, Konya, Türkiye

² Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, 42250, Konya, Türkiye

Özet

Jeodezinin en önemli amaçlarından biri ± 1 cm doğruluklu jeoit modelini belirlemektir. Dünyanın birçok bölgesinde henüz bu doğruluğa ulaşılamamıştır. Bu, kısmen bölgelerin topografik kitlelerinin yoğunluğunun bilinmemesinden kaynaklıdır. Genelde yoğunluk değeri global ortalama olan 2.67 gr/cm^3 alınır. Ancak ortalama yoğunluk değeri, topografik kitlelerin gerçek değerinden yaklaşık %10 ile %20 arasında farklıdır. Yukarıda bahsedilen optimum jeoit doğruluğuna ulaşmak için gravimetrik jeoit belirlemede yoğunluk değişiminin de hesaba katılması gerekir. Bu yoğunluk değerini elde etmenin yollarından biri küresel, bölgesel ya da yerel kabuk modellerini kullanmaktır. İlgili bölge için üretilen yerel yoğunluk modeli, topografik kitlelerin modellenmesi için en uygun yoldur. Daha önce yapılan çalışmalara göre özellikle dağlık bölgelerde yoğunluğun jeoide etkisi anlamlıdır. Çalışma alanımızda küresel ve bölgesel modellerden belirlenen yoğunluk değerleri, küresel ortalama değerden yaklaşık $\pm \%10$ oranında daha farklıdır. Bu farkın Konya Kapalı Havza'sında gravimetrik bölgesel jeoit belirlemeye ne ölçüde etki ettiği araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Gravimetrik jeoit belirleme, KTH metodu, Topografik düzeltme, Yoğunluk etkisi

1 Giriş

Yeryüzündeki noktaların ortometrik yükseklikleri jeoitten itibaren ölçüldüğünden, günümüz jeodezicilerinin en önemli amaçlarının biri, jeoidin yüksek doğruluklu olarak belirlenmesidir. Yersel veriler ve uydulardan üretilen gravite verilerinin birlikte analiz edilmesi ile yüksek doğruluklu gravimetrik jeoit belirlenebilir. Gravimetrik jeoit modellerinin oluşturulması aşamasında gravite verilerinin yanı sıra topografik yükseklikler de gereklidir. Çünkü jeoit belirlemede topografyanın değişimi önemli etkenlerden biridir. Stokes formülüyle jeoit belirlemede, jeoidin dışında bir topografik kitle bulunmadığı kabul edilir. Ortaya çıkan hata topografik düzeltmeler ile giderilir. Bu düzeltmeyi getirebilmek için jeoidi oluşturulacak bölgenin yer kabuğu yoğunluğuna ihtiyaç vardır. Jeoit belirleme çalışmalarında bu yoğunluk değeri için genelde global ortalama bir değer olan 2.67 gr/cm^3 kullanılır. Ancak bu değer, her bölge için geçerli olan bir yoğunluk değeri değildir. Çalışma sahasında kabuk yoğunluğu bilinebilirse, sabit bir değer yerine bilinen bu yoğunluk değeri kullanılabilir.

Yer kabuğu yoğunluğunun jeoit belirlemeye etkisi birkaç uluslararası çalışmada incelenmiştir. Hunegnaw [1]'de hedeflenen 1 cm doğruluklu jeoit modeline özellikle dağlık bölgelerde henüz ulaşamadığını bunun da kısmen sınır

Abstract

One of the most important goals of geodesy is to determine the geoid model with an accuracy of ± 1 cm. This accuracy has not been achieved in many regions of world yet. This is partly due to the unknown density of the topographic masses of the regions. In general, the density value is taken as 2.67 gr/cm^3 , which is a global average. However, the average density value differs from the actual density of the topographic masses by approximately %10 to %20 per cent. To achieve the optimum geoid accuracy mentioned above, it is necessary to take into account the density variation in the determining gravimetric geoid as well. One of the ways to achieve the density value is to use global, regional and local crust models. The local density model produced for the region of interest is the most convenient way for the modeling the topographic masses. According to the previous studies, the effect of density on the geoid is significant particularly in mountainous regions. The density values obtained from global and regional models in our study area differs approximately $\pm \%10$ percent from the global average. It was investigated to what extent this difference affects gravimetric regional geoid determination in Konya Closed Basin.

Keywords: Gravimetric geoid determination, KTH method, Topographic correction, Density effect

yüzeyinin üzerinde bulunan topografik kitlelerin yoğunluğunun bilinmemesi gerçeğinden kaynaklandığını söylenmiştir. Optimum jeoit doğruluğuna ulaşmak için gravimetrik jeoit belirlemede yer kabuğu değişiminin hesaba katılmasının zorunlu görüldüğünün söylendiği çalışmada, bölgelerin jeolojik haritalarından elde edilecek yoğunluk modelinin topografik kitlelerin yaklaşık yoğunluğuna ulaşmanın bir yolu olduğu belirtilmiştir. Çalışmada İsveç'in kuzeybatısındaki nispeten yüksek bir bölgeyi kaplayan kaya tipinin laboratuvar ortamında analizi sonucunda elde edilen yer kabuğu yoğunluğunun bölgenin yerel jeoidinin belirlenmesinde anlamlı bir etki yaptığı görülmüştür. Bununla birlikte Etiyopya gibi yer şekillerinin çok düzensiz olduğu dağlık bir bölgede bu etkinin çok daha yüksek olacağı anlatılmıştır. Sjöberg [2], stokes integrali ile gravimetrik jeoit belirlemede topografik kitlelerin etkisinin Stokes entegrasyonundan önce giderilmesi gerektiğini bunun da entegrasyona getirilecek topografik düzeltme ile yapılması gerektiğini belirtmiştir. Söz konusu çalışmada topografik düzeltme değerinin yoğunluk değişimlerinden önemli ölçüde etkileneceğini ve bu etkinin 660 m'nin üzerindeki topografik yüksekliklerde cm düzeyinde olacağı belirtilmiştir. Çalışmaya göre topografyanın yüksekliği 1000, 2000 ve 5000 metreye ulaştığında yoğunluk değişiminin Stokes

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fahrettindogdu@gmail.com (F. Doğdu)

Geliş / Received: 10.06.2020 Kabul / Accepted: 24.08.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.750987

integraline getirilen topografik düzeltmeye etkisinin sırasıyla 2.2 cm, 8.8 cm ve 56.8 cm'ye ulaşacağı, Everest'te ise 178 cm seviyesinde olacağından bahsedilmektedir. Kiamehr [3], İran coğrafyasında yer kabuğu yoğunluğunun değişiminin jeoit belirlemeye olan etkisini incelediği çalışmasında, topografyanın jeoidin üzerindeki varlığının Stokes'in jeoit modellemeye ilişkin temel varsayımını ihmal ettiğini ve jeoit belirlemede kullanılan 2.67 gr/cm³ değerinin yer kabuğu yoğunluğunun gerçek ortalama değerinden yaklaşık %10 ila %20 arasında farklılık gösterdiğini belirtmiştir. İran coğrafyasında yer kabuğu yoğunluğu kısa mesafede büyük değişiklikler gösterdiğinden jeoit bu bölgede en çok topografik yoğunluğun farklılığından etkilenmektedir. Sayısal sonuçların, jeoit yüksekliğindeki gerçek ve izostatik yoğunluk modellerinden kaynaklanan farklılıkların santimetre hassasiyetinde kesin bir jeoit belirlemede göz ardı edilemeyecek şekilde 22 ve 29 cm'ye ulaşabileceğini göstermiştir. Çalışmanın özünde topografik yoğunluk değişikliklerinin etkisinin yeterince önemli olduğunu ve yüksek doğruluklu bir jeoit modelinin belirlenmesinde özellikle dağlık bölgelerde dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Kullandığı yer kabuğu yoğunluk verilerini iki boyutlu jeolojik haritalardan türetmiştir. Çalışmanın sonuç kısmında dağlık ve topografyanın az değişim gösterdiği bölgelerde sabit bir yoğunluk değerinin yeterli olabileceği söylenmektedir. Varga [4], CRUST 1.0 ve EPCRUST yer kabuğu modellerini kullanarak Hırvatistan toprakları için bir yer kabuğu yoğunluğu modeli geliştirmiş ve bu modelden elde ettiği yoğunluk verilerini kullanarak bölgenin jeoidini oluşturmuştur. Bu değerler ile üretilen jeoidin, sabit 2.67 gr/cm³ yoğunluk değeri kullanılarak üretilen jeoide göre daha yüksek doğruluklu olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmada, KTH tekniğiyle jeoit belirleme aşamasında topografik düzeltmede yeryuvarının ortalama yoğunluk değeri değişken olarak alınmıştır. İlk olarak, yoğunluk değeri küresel sabit olarak kabul edilen 2.67 gr/cm³ alınarak jeoit belirlenmiştir. Sonrasında bu değer için sırayla global yer kabuğu modeli CRUST 1.0 ve bölgesel model EPCRUST çalışma alanı için elde edilen yoğunluk değerleri kullanılarak bölgenin yerel jeoidi belirlenmiştir. Jeoit belirleme Linux tabanlı LSMSSOFT yazılımı ile yapılmıştır [5]. Son olarak jeoit modellerinin doğrulukları GNSS-Nivelman verileri ile mutlak olarak analiz edilmiştir.

2 KTH Yöntemi

Stokes integrali ile gravite anomalilerinden yeryuvarının gravite alanının hesaplanması işleminde tüm yeryuvarına ait yersel gravite verileri gereklidir. Ancak eldeki gravite gözlemlerinin sınırlı sayıda olması, Stokes integralinin global yerine bölgesel olarak değerlendirilmesini zorunlu kılar. Bu yöntem ile istenen doğrulukta sonuçları üretebilmek için Stokes integrali, çalışma alanında yeniden düzenlenir. Bununla birlikte Stokes integralinin global yerine bölgesel ölçekte yeniden düzenlenmesinden kaynaklanan bir kesme hatası ortaya çıkar. Bu kesme hatasının en aza indirilmesi için bir takım teknikler geliştirilmiştir. Bu teknikler deterministik ve stokastik olarak iki gruba ayrılır. Deterministik yöntemde yalnızca kesme

hatası en aza indirgenmeye çalışılırken stokastik yöntemlerde kesme hatasının yanında küresel yer potansiyel modellerden ve yersel verilerden kaynaklı hatalar en aza indirgenmeye çalışılır [6].

1981 yılında İsveçli bilim insanı Lars E. Sjöberg, söz konusu kesme hatasını küçültmek için İsveç Kraliyet Teknoloji Enstitüsü'nde bir yöntem geliştirmiş ve geliştirdiği bu yönteme de enstitünün isminin kısaltması olan KTH adını vermiştir [7]. KTH yöntemi stokastik bir yöntemdir. KTH yaklaşımında veri hatalarını göz önünde bulundurarak kesme hatasını en aza indiren modifikasyon katsayıları en küçük kareler yöntemi ile kestirilir. Bu nedenle KTH yaklaşımı Stokes fonksiyonunun en küçük kareler yöntemi ile modifikasyonu (LSMS: Least Squares Modification of Stokes) olarak da isimlendirilir [6].

KTH yöntemine göre yaklaşık jeoit yüksekliği,

$$\tilde{N} = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma_0} S^L(\psi)\Delta g d\sigma + \frac{R}{2\gamma} \sum_{n=2}^M b_n \Delta g_n^{KYM} \quad (1)$$

ile hesaplanır [8]. Burada R yeryuvarının ortalama yarıçapı, γ elipsoit üzerindeki normal gravite, $S^L(\psi)$ yerel Stokes fonksiyonu, Δg gravite anomalisi, M yer potansiyel modelin kullanılan en büyük açınım derecesi, b_n modifikasyon parametresidir. Eşitlikten anlaşılacağı üzere gravite anomalisinin doğruluğu yaklaşık jeoit yüksekliğinin doğruluğuna doğrudan etki yapar. Ek olarak KTH yöntemi, yaklaşık jeoit yüksekliğine bazı düzeltmeler getirerek kesin değere ulaşır. Bu düzeltmelerden sonra jeoit yüksekliğinin kesin değeri,

$$N = \tilde{N} + \delta N_{top} + \delta N_{atm} + \delta N_{DWC} + \delta N_{ell} \quad (2)$$

eşitliği ile bulunur [8]. Eşitlikte \tilde{N} yaklaşık jeoit yüksekliği, δN_{top} topografik düzeltme, δN_{atm} atmosferik düzeltme, δN_{DWC} indirgeme düzeltmesi, δN_{ell} ise elipsoidal düzeltmedir.

2.1 Topografik düzeltme

KTH tekniğinde jeoit yüksekliği hesaplanırken fiziksel yeryüzü ile jeoit arasında kitle olmadığı varsayımı yapılır. Bu varsayımın getirdiği hatanın giderilmesi için yaklaşık jeoit yüksekliğine topografik düzeltme değeri eklenir. Bu düzeltmenin hesabı;

$$\delta N_{top} = -\frac{2\pi G\rho H_p^2}{\gamma} \left(1 + \frac{2H_p}{3R}\right) \quad (3)$$

formülü ile yapılır [9]. Burada ρ yeryuvarının kabuk yoğunluğu, G evrensel çekim sabiti, H_p hesap noktasının topografik yüksekliği, R yeryuvarının ortalama yarıçapı ve γ hesap noktasındaki normal gravitedir. Buradaki yoğunluk değeri ya sabit (2670 kg/m³) ya da kabuk modelinden elde edilir.

2.2 Atmosferik düzeltme

Jeoit yüzeyinin dışında kalan atmosferin etkisi yok sayılamayacağından atmosferik düzeltme, jeoit yüksekliği hesabında bulunmalıdır. Bu düzeltme;

$$\delta N_{atm} = -\frac{GR\rho^a}{\gamma} \iint_{\rho^a} S^L(\psi)H_P d\sigma \quad (4)$$

formülü ile hesaplanır [10]. Burada G evrensel çekim sabiti, R yeryuvarının ortalama yarıçapı, ρ^a deniz yüzeyindeki atmosferik yoğunluktur. ρ^a değeri genellikle 1.23 kg/m³ kabul edilir.

2.3 Elipsoidal düzeltme

Stokes yaklaşımı R yarıçaplı bir küre üzerinde uygulanırken, jeoit yükseklikleri elipsoit yüzeyinden ölçülür. Bu nedenle KTH metodunda yaklaşık jeoit yüksekliğine elipsoidal düzeltme eklenmelidir. Elipsoidal düzeltme;

$$\delta N_{ell} = [(0.0036 - 0.0109\sin^2\varphi)\Delta g + 0.0050\tilde{N}\cos^2\varphi]Q_0^L \quad (5)$$

formülü ile hesaplanır [11]. Burada Δg gravite anomalisi ve Q_0^L Moledensky kesme katsayısıdır.

2.4 İndirgeme düzeltmesi

Fiziksel yeryüzü ile jeoit arasındaki düzensiz kitle dağılımından ötürü gravite anomalisi, yükseklik ile doğrusal bir değişim göstermez. Bundan dolayı indirgeme düzeltmesinin yaklaşık jeoit yüksekliğine eklenmesi gerekir. Bu düzeltme;

$$\delta N_{DWC} = \delta N_{dwc}^{(1)} + \delta N_{dwc}^{L1,Far} + \delta N_{dwc}^{L2} \quad (6)$$

formülü ile hesaplanır [12]. Buradaki indirgeme düzeltmesini oluşturan bileşenler,

$$\delta N_{dwc}^{(1)} = \frac{\Delta g}{\gamma} H_P + 3\frac{\tilde{N}}{r_P} H_P - \frac{1}{2\gamma} \frac{\partial \Delta g}{\partial r} \Big|_P H_P^2 \quad (7)$$

$$\delta N_{dwc}^{L1,Far} = \frac{R}{2\gamma} \sum_{n=2}^M b_n \left[\left(\frac{R}{r_P} \right)^{n+2} - 1 \right] \Delta g_n \quad (8)$$

$$\delta N_{dwc}^{L2} = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma_0} S^L(\psi) \left[\frac{\partial \Delta g}{\partial r} \Big|_P (H_P - H_Q) d\sigma_Q \right] \quad (9)$$

şeklinde sıralanır. Eşitlikte $r_P = R + H_P$, P noktasının küresel yarıçapını ve H_P , hesap noktasının topografik yüksekliğini gösterir.

3 Sayısal araştırma

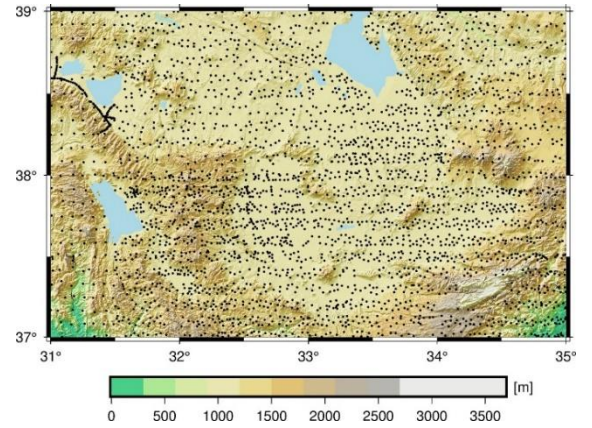
Bu uygulamada Konya Kapalı Havzası'nda KTH tekniği ile gravimetrik jeoit belirleme işlemi yapılmıştır. KTH yönteminde getirilen topografik düzeltmede geçen yoğunluk bilgisi için global kabuk modelleri kullanılmıştır.

3.1 Çalışma alanı

Sayısal uygulama için Konya Kapalı Havzasını kaplayan bölge uygulama sahası olarak seçilmiştir. Çalışma sahası $37^\circ \leq \varphi \leq 39^\circ$ kuzey paralelleri, $31^\circ \leq \lambda \leq 35^\circ$ doğu meridyenleri arasında kalan yaklaşık 80 000 km²'lik bir alanı kaplamaktadır (Şekil 1). Çalışma alanının güneyinde Toros dağları, kuzeyinde Tuz Gölü bulunmaktadır. Bölgenin ortalama yüksekliği 1250 m iken, söz konusu yükseklikler Göksu vadisinde 700 metreden, Toros Dağları'nda yaklaşık 3500 metreye kadar çıkmaktadır. Bu bölgede jeoit, topografya ve kabuk yoğunluğu değişimleri fazla olduğundan çalışma alanı olarak seçilmiştir.

3.2 Yersel veriler

Çalışmada kullanılacak gravite verileri Abbak [13] tarafından gerçekleştirilen proje kapsamında Harita Genel Müdürlüğü'nden elde edilmiştir. Gravite değerleri International Gravity Standardization Net 71 (IGSN71) datumundadır. Coğrafi koordinatlar World Geodetic System 1984 (WGS84) datumundadır. Yükseklikler için düşey datum Antalya mareograf istasyonudur. Her nokta için gravite bilgisi sırasıyla, gravite noktasının enlemi, boylamı, ortometrik yüksekliği ve gravite değeridir. Toplam gravite nokta sayısı 3350'dir. Gravite verilerinin doğruluğu ve sıklığı hesaplanacak bölgesel jeoidin hassasiyetini doğrudan etkileyecektir. Ancak mevcut verilerin doğruluğu 8-10 mGal düzeyindedir. Verilerin sıklığı 25 km² ye bir nokta düşecek şekildedir (Şekil 1).

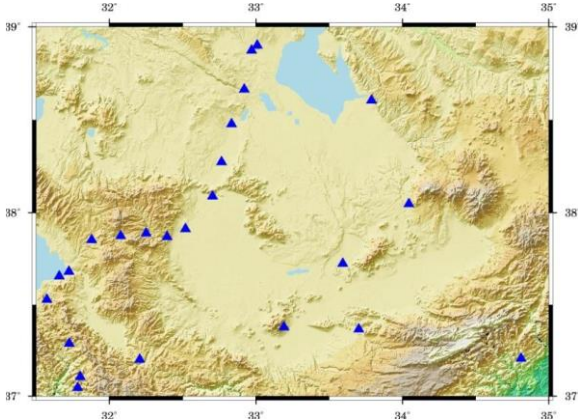


Şekil 1. Çalışma alanının topografik durumu ve mevcut gravite verileri

GNSS-Nivelman gözlemleri jeoit modellerinin değerlendirilmesinde ve geçerliliğinin kontrolünde sıkça kullanılan verilerdir. Çalışma alanında yer alan Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı 1999 (TUDKA99) birinci derece nivelman ağına bağlı ortometrik yükseklikleri bilinen 24 adet GNSS-Nivelman noktasına ait veriler kontrol verisi olarak kullanılmıştır (Şekil 2). Noktaların GNSS ile belirlenen elipsoidal yüksekliklerin doğruluğu 2 cm, nivelmanla belirlenen ortometrik yüksekliklerin doğruluğu 3 cm'dir. Yüksek presizyonlu iki ölçme tekniği yardımıyla belirlenen 24 adet GNSS-Nivelman jeoit yüksekliğinin duyarlılığı 4 cm'nin altındadır.

3.3 Sayısal yükseklik modeli

Sayısal yükseklik modeli seçilirken doğruluğu, çözünürlüğu ve güncelliği göz önüne alınmalıdır. Bu çalışmada, daha önce aynı çalışma sahasında sayısal yükseklik modelleri ile yapılan çalışmalarda yüksek doğruluk veren SRTM1 modeli kullanılmıştır [14].



Şekil 2. Modellerin doğruluk analizinde kullanılacak GNSS-Nivelman noktaları

SRTM1 modelinin global düşey doğruluğu 16 m olup yatay ve düşey datum olarak sırasıyla WGS84 elipsoidini ve EGM96 jeoidini referans alır. SRTM1 modeli ücretsiz olarak internet adresinden indirilmiştir [15].

3.4 Küresel yerpotansiyel model

CHAMP, GRACE ve GOCE gibi alçak yörüngeli uydular yardımıyla yeryuvarı gravite alanı bilgilerinden elde edilen global yer potansiyel modeller ICGEM internet sayfasında yayınlanmaktadır [16]. ICGEM internet sayfasında 170'den fazla global yer potansiyel model mevcuttur ve ücretsiz olarak ulaşılabilir. ICGEM, modellerin küresel harmonik katsayılarını da gfc uzantılı metin belgeleri olarak kullanıma sunmaktadır. Bu çalışmada, daha önce aynı çalışma sahasında global yer potansiyel modellerle yapılan bölgesel analize göre en yüksek doğruluklu sonuç veren ITU_GGC16 modeli kullanılmıştır. Modelin açım derecesi ve sırası 280 olup, GRACE ve GOCE uydularının izleme verileriyle modellenmiştir [17].

3.5 Yoğunluk modelleri

Kabuk yoğunluğu modelleri, iki (2B) veya üç (3B) boyutlu olabilir. Çalışma alanlarındaki her nokta için, iki boyutlu kabuk modelleri bir değer sağlarken, üç boyutlu kabuk modelleri, katman sayısına bağlı olarak birkaç değer sağlar. İki boyutlu kabuk modelleri, genellikle iki konumsal veri ve ortalama kabuk yoğunluğu içerir. 2B kabuk modelleri, dikey boyutta sadece bir katmana sahipken, 3B kabuk modellerinde birden fazla katman vardır. Her katman kabuk yapısının belirli bir bölümüne karşılık gelir. Örneğin, tortular, üst kabuk, orta kabuk, alt kabuk katmanları gibi.

Kabuk yoğunluğunu belirlemek için iki olasılık vardır. Global/bölgesel kabuk modellerini kullanmak veya yersel verilerden yerel model oluşturmaktır. Global ve bölgesel kabuk modellerinden en bilinenleri, Kaliforniya Üniversitesi

tarafından tüm yeryuvarı için üretilmiş kabuk modeli olan CRUST 1.0 modeli ve İtalyan Ulusal Jeofizik ve Volkanoloji Enstitüsü tarafından 20° ile 80° paralelleri, -40° ile 60° meridyenleri arasındaki bölge için üretilen EPCRUST modelidir. Bu global/bölgesel modellerin zayıf yönü çözünürlüklerinin düşük olmasıdır. Bunun dışında, kullanıcı doğrulama için jeofiziksel verilere sahip değilse, bu modellerin güvenilirliği de düşüktür. İkinci olasılık, kısıtlayıcı parametreleri olan bazı inversiyon algoritmaları kullanarak yersel gravite verilerinden bir yerel kabuk modeli oluşturmaktır. 3B kabuk modelinin geliştirilmesi hem kuramsal hem de pratik açıdan karmaşık ve zordur. Bu işlem için, jeolojik, jeofiziksel ve jeodezik veri türlerinin bir araya getirilmesi ve birleştirilmesi gerekir. 2B kabuklu modelleri 3B kadar gerçekçi olmasa da, geliştirilmesi daha basittir. CRUST 1.0 ile EPCRUST modellerinin başlıca özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

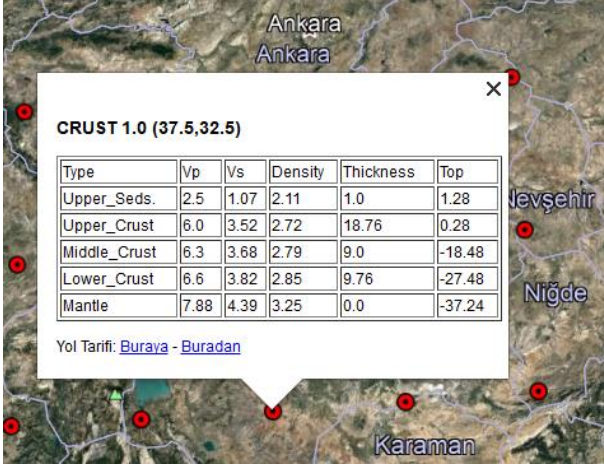
Tablo 1. Üç boyutlu kabuk modellerinin temel özellikleri

Model	Parametreler	Katmanlar	Kapsam	Çözünürlük
CRUST 1.0	Moho derinliği, Vs, Vp, ρ	su, buz, üst tortu, orta tortu, alt tortu, üst kabuk, orta kabuk, alt kabuk	Dünya	1°
EPCRUST	Vs, Vp, ρ	tortular, üst kabuk, alt kabuk	Avrupa Plakası	30'

Küresel kabuk modeli CRUST1.0, 2013 yılında farklı sismik veri tabanlarından (yüzey dalgaları, serbest salınım, dalga seyhat sürelerinden) geliştirilmiştir. Sekiz katmandan oluşur: su, buz, 3 kat tortu örtü ve üst, orta ve alt kristal kabuk. Her tabaka için kayma dalgası hızı (Vs), basınç dalgası hızı (Vp) ve yoğunluk (ρ) verilmiştir. Bu model 1°x1° çözünürlüktedir. Her 1°'lik hücrede, 8 katman için sınır derinliği, sıkıştırma ve kayma hızı ve yoğunluk verir. CRUST 1.0 küresel kabuk modeli internet sitesinde tüm yeryuvarı genelinde 1° enlem ve boylam aralıklarındaki kabuk yoğunluğu, kabuk kalınlığı, Moho derinliği gibi veriler xyz uzantılı metin dosyaları olarak ücretsiz sunulmaktadır [18]. Ayrıca, Google Earth yazılımı ile entegre olacak şekilde tüm yeryuvarının 1° aralıklı yoğunluk değerleri kmz uzantılı Google Earth dosyası şeklinde kullanıcıyla paylaşılmaktadır (Şekil 3). Bu modelde Konya Kapalı Havzası'nı kapsayan 8 adet nokta bulunmaktadır. Bu noktaların yüksekliğinden ortalama deniz düzeyine kadar olan katmanlardaki ortalama yoğunluk değerleri hesaplanmıştır.

Avrupa kıtası için geliştirilen bölgesel kabuk modeli EPCRUST, tüm Avrupa plakasını kapsayan 2011 yılında üretilmiş bir kabuk modelidir. Tortular, üst ve alt kabuk katmanları için yoğunluk (ρ), basınç dalgası hızı (Vp) ve kayma dalgası hızı (Vs) verilerini içerir. 30 derece dakikası çözünürlüğündedir. EPCRUST modelinin internet sitesi, kullanıcıların e-posta adreslerine tortu, alt kabuk ve üst

kabuk katmanlarındaki yoğunluk verisini ve bu katmanların kalınlığını içeren xyz uzantılı dosyayı göndermektedir [19]. Bu modelde çalışma alanını kapsayan 45 noktanın yoğunluğu belirlenmiştir.



Şekil 3. CRUST1.0 yer kabuğu modelinde kullanıcıya sunulan veriler

Bu iki küresel ve bölgesel modelden elde edilen yoğunluk değerleri enterpolasyonla 0.02° aralıklı gridlere dönüştürülmüş ve farklarının istatistiği yapılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Üç boyutlu kabuk modellerinin temel özellikleri

Model	Min.	Maks.	Ortalama	Standart sapma
EPCRUST - CRUST 1.0	-17.4	279	72	106

3.6 Karşılaştırma

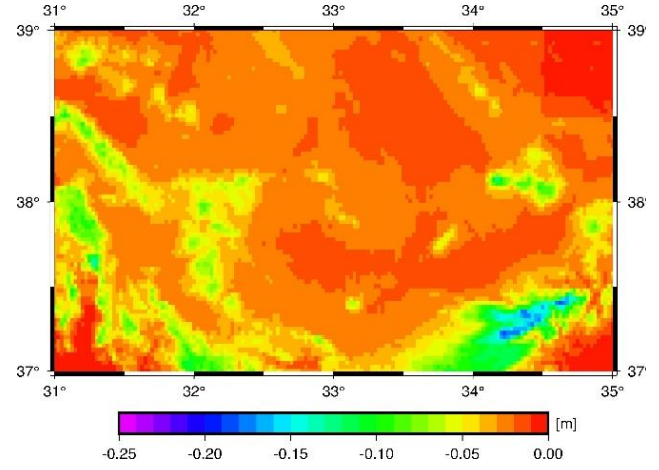
Konya Kapalı Havzası'nda LSMSSOFT yazılımı yardımıyla bölgesel gravimetrik jeoit belirleme işlemi yapılmıştır. Bu aşamada yazılım, yaklaşık jeoit yüksekliğine getirilen topografik düzeltme değerindeki yoğunluk değerinin sabit bir değer yerine grid sayısı kadar yoğunluk bilgisi girilebilecek şekilde yeniden düzenlenmiştir. İlk olarak SRTM1 sayısal yükseklik modeli verileri, çalışma alanının 1° dışını da kapsayan 36° ≤ φ ≤ 40° kuzey paralelleri, 30° ≤ λ ≤ 36° doğu meridyenleri arasında alınmış ve daha sonra 0.02° aralıklı grid merkezlerinde bir yükseklik değeri (60000 adet) elde edilmiş ve programa çağrılmıştır. Sonrasında çalışmada kullanılacak olan küresel yerpotansiyel modeli ITU_GGC16 programa girilmiştir. Son olarak bölge için mevcut olan gravite verileri (g), grid merkezlerinde boşlukta gravite anomalilerine (Δg_{fA}) dönüştürülmüş ve yazılıma gönderilmiştir.

KTH yöntemi ile jeoit belirlerken ilk olarak küresel sabit yoğunluk olan $\rho=2.67 \text{ gr/cm}^3$ değeri kullanılarak daha sonra çalışma alanı için CRUST 1.0 modelinden elde edilen yoğunluk değerleri, üçüncü olarak EPCRUST modelinden elde edilen yoğunluk verileri ile jeoit belirlenmiştir. Jeoit belirleme işlemi sonucunda çalışma alanında 0.02° aralıklı 20000 noktada jeoit yükseklikleri elde edilmiştir. EPCRUST ve CRUST 1.0'dan elde edilen yaklaşık yer kabuğu yoğunluğu değerleri kullanılarak elde edilen iki jeoit

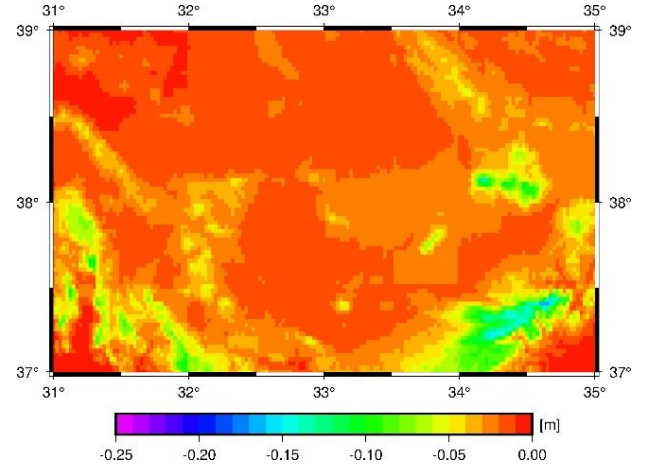
modelinin jeoit yükseklikleri ile 2.67 gr/cm^3 değeri ile oluşturulan jeoit modelinin jeoit yükseklikleri arasındaki farklar Tablo 3'de gösterilmiştir. Ayrıca bu jeoit yüksekliği farklarını gösteren haritalar GMT yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve Şekil 4 ve 5'te gösterilmiştir. Modeller arasındaki büyük jeoit yüksekliği farklarının çoğunlukla bölgenin engebeli ve yükseltisi fazla olan yerlerinde olduğu görülmüştür.

Tablo 3. Modeller arası jeoit yüksekliği farkları [cm]

Fark	Min	Max	Ortalama	Standart Sapma
$\rho=2.67 \text{ gr/cm}^3$ - EPCRUST	-18.08	0	-2.56	1.78
$\rho=2.67 \text{ gr/cm}^3$ - CRUST 1.0	-19.36	0	-3.09	2.13



Şekil 4. Sabit yoğunluk modeli ve Crust 1.0 modeli ile belirlenen jeoit yüksekliklerinin farklarının dağılımı



Şekil 5. Sabit yoğunluk modeli ve EPCRUST modeli ile belirlenen jeoit yüksekliklerinin farklarının dağılımı

Jeoit modellerinin oluşturulmasının ardından GNSS-Nivelman verileri kullanılarak, bu üç modelin doğruluk analizi yapılmıştır (Tablo 4). Sayısal sonuçlar, bölgede küresel sabit kabul edilen 2.67 gr/cm^3 değeri kullanılarak

oluşturulan yerel jeoidin, CRUST1.0 ve EPCRUST kabuk modellerinden elde edilmiş yoğunluk değerleri ile oluşturulan jeoide göre daha doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Tablo 4. Jeoit modellerinin doğruluk testi [cm]

Model	Min	Max	Ortalama	Standart sapma
Sabit Değer ($\rho=2.67$ gr/cm ³)	-17.34	10.41	0.04	6.85
EPCRUST	-17.74	10.04	0.04	6.91
CRUST 1.0	-17.88	9.9	0.11	6.99

4 Sonuç ve neriler

Bu çalışmanın temel amacı bölgesel jeoit modeli belirlemede kullanılan ortalama yoğunluk değeri 2.67 gr/cm³ yerine ile ilgili bölgelerdeki gerçek yoğunluk değerinin kullanılmasının belirlenen jeoide ne lde etki ettiğinin incelenmesidir. Farklı yoğunluk değerlerinin hesaplanan gravimetrik jeoit modelinin doğruluğuna yaptığı katkılar sayısal olarak ortaya konmuştur.

Sayısal uygulama sonucunda elde edilen karesel ortalama hata değerlerine bakılınca, küresel ve bölgesel kabuk modellerinden elde edilen yoğunluk verileri ile belirlenen bölgesel jeoidin doğruluğunun, sabit olarak kabul edilen $\rho=2.67$ gr/cm³ değeri ile belirlenen jeoide göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin, küresel yer kabuğu modellerinin çözünürlüğünün yeterli olmadığı şeklinde değerlendirilmektedir. CRUST 1.0 modelinde çalışma alanına giren 8 nokta varken EPCRUST modelinde çalışma alanına giren 45 adet nokta vardır. EPCRUST modelinin çözünürlüğünün daha yüksek olması nedeniyle CRUST 1.0 modeline göre daha doğru sonuçlar vermiştir. Ayrıca bu modellerden elde edilen yoğunluk verilerini doğrulayacak jeolojik haritaların olmaması da diğer bir eksikliktir.

Çalışma alanı olan Konya Kapalı Havzası genel olarak ova ve platolar ile kaplıdır. Güney ve güney batısında dağlık alanlar bulunur. Güney sınırını Toros Dağları'ndan Geyik Dağları ve Bolkar Dağları izer. Havza genel olarak dzliklerden oluşur. Konya Kapalı Havzasının jeolojik durumundan ötürü, yer kabuğu yoğunluğunun, jeoit yüksekliklerine olan etkisinin dağlık alanlara oranla daha sınırlı bir seviyede olduğu söylenebilir. Ayrıca kontrol aşamasında kullanılan GNSS-nivelman noktalarının çalışma alanının düz ve yüksekliği daha düşük noktalarında bulunması da kabuk yoğunluğu değişiminin jeoit yüksekliklerine olan etkisini belirlemede yetersiz kalmıştır. Konya Kapalı Havzasında yapılan bu çalışmada modeller arası jeoit yüksekliği farklarının bölgenin yüksek kesimlerinde maksimum seviyeye çıktığı görülmüştür.

Sabit yoğunluk değeri ile bölge için küresel kabuk modellerinden elde edilen yoğunluk değerleri arasında yaklaşık %15-%20 değişim olduğu ve bu değişimin jeoit yüksekliklerinde anlamlı bir fark oluşturduğu görülmüştür. Bununla birlikte küresel kabuk modellerinin çözünürlükleri düşük olduğundan, bu modellerden elde edilen yoğunluk değerleri, gerçek yoğunluk değerlerinden farklıdır. Küresel kabuk modeli verilerinin yanında jeofiziksel ve jeolojik

verilerinden oluşturulacak yerel kabuk modeli ile daha doğru sonuçlara ulaşılabileceği değerlendirilmektedir.

ıkar atışması

Yazarlar çıkar atışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %16

Kaynaklar

- [1] A. Hunegnaw, The effect of lateral density variation on local geoid determination. Bollettino di Geodesia er Scienze Affini, 60(2), 125-144, 2001.
- [2] L. E. Sjöberg, The effect on the geoid of lateral topographic density variations. Journal of Geodesy, 78, 34-39, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00190-003-0363-0>
- [3] R. Kiamehr, The impact of lateral density variation model in the determination of precise gravimetric geoid in mountainous areas: A case study of Iran. Geophysical Journal International, 167, 521-527, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03143.x>
- [4] M. Varga, The application of crustal models in regional modelling of the earth's gravity field. Doctoral Thesis, University of Zagreb Faculty of Geodesy, Zagreb, Croatia, 2018.
- [5] R. A. Abbak and A. Üstün, A software package for computing a regional gravimetric jeoit model by the KTH method. Earth Science Informatics, 8(1), 255-265, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0149-3>
- [6] R. A. Abbak, Fiziksel Jeodezi Teori ve Uygulama (nc baskı). Atlas Akademi Yayınları, Konya, Türkiye, 2020.
- [7] L. E. Sjöberg, Least squares combination of satellite and terrestrial data in physical geodesy. Ann. Geophys., 37(1), 25-30, 1981.
- [8] L. E. Sjöberg, A general model for modifying stokes formula and its least-squares solution. Journal of Geodesy, 77, 459-464, 2003a. <https://doi.org/10.1007/s00190-003-0346-1>
- [9] L. E. Sjöberg, The topografic bias by analytical continuation in physical geodes. Journal of Geodesy, 87, 345-350, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00190-006-0112-2>
- [10] L. E. Sjöberg, The IAG approach to the atmospheric geoid correction in Stokes formula and a new strategy. Journal of Geodesy, 73, 459-464, 1999. <https://doi.org/10.1007/s001900050254>
- [11] A. Ellmann, L. E. Sjöberg, Elipsoidal correction for the modified Stokes formula. Bold. Geod. Sci. Aff., 63, 153-172, 2004.
- [12] L. E. Sjöberg, A solution to the downward continuation effect on the geoid determination by Stokes formula. Journal of Geodesy, 77, 94-100, 2003b. <https://doi.org/10.1007/s00190-002-0306-1>
- [13] R. A. Abbak, Global yer potansiyel modellerin spektral yöntemlerle değerlendirilmesi ve jeoit belirleme için yerel olarak iyileştirilmesi. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2011.
- [14] H. T. Arlı İl, R. A. Abbak, Accuracy analysis of ASTER and SRTM digital dlevation models: A case

- study in Turkey. International Multidisciplinary Scientific Geoconference, 47-52, Bulgaria, 2017. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/22>
- [15] SRTM, Shuttle Radar Topography Mission. <http://www2.ipl.nasa.gov/srtm> Erişim tarihi: 25.02.2020
- [16] ICGEM, International Center of Global Earth Models. <http://icgem.gfz-postdam.de/ICGEM> Erişim tarihi: 14.02.2020
- [17] O. Akyilmaz, A. Üstün, C. Aydın, N. Arslan, S. Doğanalp, C. Güney, H. Mercan, S. O. Uygur, M. Uz and O. Yağcı, ITU_GGC16 The Combined Global Gravity Field Model Inculuding GRACE & GOCE Data 1Up to Degree and Order 280. GFZ Data Services, Technical report, 2016. <https://doi.org/10.5880/icgem.2016.005>
- [18] G. Laske, G. Masters, Z. Ma and M. Pasyanos, Update on CRUST1.0-A 1 Degree Global Model of Earth's Crust. Geophys. Res. Abstracts 15, Abstract EGU2013-2658, 2013.
- [19] L. Molinari and A. Morelli, Epcrust: A reference crustal model for the european plate. Geophys. J. Int., 185(1), 352-364, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.04940.x>



T en-kesitli betonarme kirişlerin şekil değiştirme esaslı hasar sınırlarının araştırılması

Investigation of deformation based damage limits of reinforced concrete t beams

Rohullah Jamal ^{1,*} , S. Bahadır Yüksel ¹ 

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya / Türkiye

Özet

Yapısal elemanların deprem performansının belirlenmesi için, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'de (TBDY, 2018) T en-kesitli betonarme kirişler için öngörülen şekil değiştirme esaslı hasar sınırları analitik olarak incelenmiştir. Betonarme T en-kesitli kiriş modelleri için moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen veriler kullanılarak kırılma durumları ve elastik ötesi davranışları incelenmiştir. TBDY, (2018)'de verilen hasar sınır değerleri betonarme T en-kesitli kiriş modelleri için hesaplanmıştır. Şekil değiştirme değerleri TBDY (2018)'de tanımlanmış olan Göçmenin Önlenmesi (GÖ), Kontrollü Hasar (KH) ve Sınırlı Hasar (SH) performans seviyeleri için araştırılmıştır. GÖ ve KH performans düzeyleri için plastik dönme hasar sınırları; akma eğriliği, kopma eğriliği, plastik mafsals uzunluğu, kesme açıklığı ve boyuna donatı çapının fonksiyonudur. Basınç donatısı oranının artırılmasının; T en-kesitli betonarme kirişlerin akma momentine (M_y), kırılma momentine (M_u), kırılma eğriliğine (k_u) ve plastik dönme sınırları ($\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(GÖ)}$) üzerine pozitif etkisinin olduğunu ispatlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Moment-eğrilik, Performans düzeyi, Hasar sınırları, Birim şekil değiştirme sınırları, Plastik dönme

Abstract

Deformation based damage limits for T cross-section reinforced concrete beams, which were mandated in Turkish Building Earthquake Code, 2018 (TBDY, 2018) were analytically investigated to be able to determine the earthquake performance of structural members. The failure stages and nonlinear behavior of T cross-section beams were investigated by using the data obtained from moment-curvature relations. Damage limit values given in TBDY, (2018) were calculated for the designed concrete T cross-section beam models. The deformation limits were calculated for the levels of collapse prevention (GÖ), controlled damage (KH) and limited damage (SH) performance levels as defined in TBDY, (2018). Three different damage limits and the correspondence strain limits were investigated for the T cross-section beams. Damage limits of plastic rotations for GÖ and KH performance levels are functions of yield curvature, ultimate curvature, plastic hinge length, shear length and the diameter of the longitudinal reinforcement. Increasing the compression reinforcement ratios has positive effect on the yield moment (M_y), maximum moment (M_u), maximum curvature (k_u) and limit values of plastic rotations ($\theta_p^{(KH)}$ and $\theta_p^{(GÖ)}$).

Keywords: Moment-curvature, Performance level, Damage limits, Strain limits, Plastic rotation

1 Giriş

Depreme dayanıklı tasarım yönetmelikleri şiddetli bir deprem etkisinde yapının elastik ötesi davranışı sergilemek için, açığa çıkan enerjinin sönmülenebilmesine izin vermektedir. Bu tasarım seçeneğinin yaygınlaşması temel nedeni ekonomik sebepler olduğunu düşünmektedir. Sismik yükler altında elastik ötesi zorlanan bir yapısal elemanların tasarımında, sünek davranışı gösterilmesi ve sismik enerjinin tüketilmesi gerekmektedir. Yapı taşıyıcı sisteminin doğrusal sınır ötesindeki kapasitesinin de dikkate alındığı hesap yöntemleri son yıllarda yaygınlaşmıştır. Yapının dayanım ve yer değiştirme kapasitelerini ortaya çıkaran, göçme aşamasına kadar oluşacak hasarlarının adım adım izlenebildiği doğrusal olmayan hesap yöntemleri kullanılarak, yapı davranışı daha iyi anlaşılabilir. Yapı performansı, amaçlanan deprem istemi etkisinde yapıda oluşması beklenen hasar durumu ile ilişkilidir. Sağlanan kapasite ile deprem istemine ait veriler yapının tasarım ve güçlendirmesine yönelik performans düzeyinin belirlenmesinde kullanılmaktadır [1]. Yönetmeliklerde uygulanan kuvvetli kolon-zayıf kiriş prensibi, kolon kiriş birleşimi kesme güvenliği yaklaşımı, kapasite tasarımı gibi tasarım kuralları, elastik ötesi davranış sergileyen yapının potansiyel hasar bölgelerinin yaygın olarak kiriş mesnet

kesitlerinde gerçekleşmesine neden olur. Bu nedenle betonarme kirişlerin çevrimsel yükler altında plastik dönme kapasitesi yaygın olarak inceleme konusu olmuştur [2, 3].

Performansa dayalı tasarım temelde üç parametreden oluşmaktadır. Bunlar kapasite, talep ve performanstır [4]. Talep, sismik hareketlerin yapıdan karşılama istediği yer değiştirme ve kesit tesirleri olarak tanımlanabilir. Performans ise yapının kapasitesinin sismik talepleri hangi oranda karşılayabileceği ile ilgilidir [5]. Performansa dayalı tasarım en genel haliyle, bir yapının tasarım depremi etkisinde belirli bir yapısal performans, bir başka deyişle hasar öngörülerek şekil değiştirmeye dayalı tasarım yöntemleri de kullanılarak tasarlanmasıdır. Şekil değiştirme esaslı tasarım yöntemleri; malzemenin elastik ötesi davranışını hesaba katmaktadır [6]. Performans esaslı yaklaşımların en önemli aşamalarından birisi yapısal elemanlardaki hasar düzeylerinin belirlenmesidir. Bu nedenle hasarla doğrudan ilişkili olan şekil değiştirmeleri esas alan yöntemler, kuvvet esaslı olanlara göre çok daha güvenilir sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte hasarı belirlemek için esas alınan şekil değiştirme parametresi de büyük önem taşımaktadır [7].

Mevcut veya güçlendirilmiş binaların deprem etkisi altında yapısal performanslarının belirlenmesi ve güçlendirme hesapları için kullanılacak doğrusal olmayan

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: jamal.rohullah@gmail.com (R. Jamal)

Geliş / Received: 08.04.2020 Kabul / Accepted: 31.08.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngmuh.715778

hesap yöntemlerinin amacı, verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme ve plastik dönme talepleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet taleplerinin hesaplanmasıdır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018)'de tanımlanan yapı elemanlarında hasar sınırları ve hasar bölgeleri (kesit hasar durumları) sünek elemanlar için kesit düzeyinde üç hasar durumu ve hasar sınırı tanımlanmıştır. Bunlar Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçme Öncesi Hasar (GÖ) durumları ve bunların sınır değerleridir. Sınırlı hasar ilgili kesitte sınırlı miktarda elastik ötesi davranışı, kontrollü hasar kesit dayanımının güvenli olarak sağlanabileceği elastik ötesi davranışı, göçme öncesi hasar durumu ise kesitte ileri düzeyde elastik ötesi davranışı tanımlanmaktadır [8].

Bu çalışmada tablalı betonarme kirişlerin TBDY (2018)'e göre betonarme elemanlar için öngörülen şekil değiştirme esaslı hasar sınırları analitik olarak incelenmiştir. Betonarme kiriş modelleri tasarlanmıştır. İlk olarak gerçek malzeme davranışları esas alınarak elde edilen moment-eğrilik ilişkilerinden kiriş kesitlerinin elastik ötesi davranışları incelenerek değerlendirilmiştir. Çalışmada; C30/C40/C50 beton sınıfı ve farklı çekme ve basınç donatısı oranlarına sahip tablalı betonarme kirişlerin moment-eğrilik ilişkileri Mander modeli (Mander vd. 1988) dikkate alınarak SAP 2000 [9] programı ile elde edilmiştir. Değişen parametrelerin kiriş davranışı üzerindeki incelenen etkileri kesitin mukavemeti ve süneklik açısından değerlendirilmiştir. Tasarlanan betonarme kirişlerde, farklı parametrelerin moment eğrilik ilişkisi ve süneklik üzerindeki etkisi hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Tip-1, 2 ve 3 olan betonarme tablalı kirişlerde değişen parametreler beton sınıfı ve basınç donatısı oranıdır. Tüm elemanlarda 8mm çapında 50mm aralığında etriyeler ele alınarak hasar sınırları TBDY 2018'e göre hesaplanmıştır. Betonarme kirişlerin şekil değiştirme değerleri TBDY (2018)'de tanımlanmış olan göçme önlenmesi (GÖ), kontrollü hasar (KH) ve sınırlı hasar (SH) performans seviyeleri için hesaplanmıştır. Yer değiştirme taleplerine karşılık gelen kiriş hasarları elde edilmiş ve hasar sınırları değerlendirilmiştir. Farklı performans düzeyleri için kirişlerin plastik mafsallık bölgelerinde akma dönme değerleri ve plastik dönme değerleri hesaplanmıştır.

1.1 TBDY 2018'e göre izin verilen şekil değiştirme sınırları

GÖ, KH ve SH performans düzeyi için yapılacak performans değerlendirmesinde kullanılmak üzere, yüksek binalar ve yeni betonarme bina elemanlarında yayılı plastik davranış modeline göre hesaplanan beton ve donatı çeliği toplam birim şekil değiştirmeleri için izin verilen sınırlar aşağıda tanımlanmıştır. GÖ, KH ve SH performans düzeyleri için beton birim kısalması $\epsilon_c^{(GÖ)}$, $\epsilon_c^{(KH)}$ ve $\epsilon_c^{(SH)}$, donatı çeliği birim şekil değiştirmesi $\epsilon_s^{(GÖ)}$, $\epsilon_s^{(KH)}$ ve $\epsilon_s^{(SH)}$ ve plastik dönme sınırı $\theta_p^{(GÖ)}$, $\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(SH)}$ değerleri dikdörtgen en-kesitli kolon, kiriş ve perdeler için Tablo 1'de verilen denklemler ile hesaplanmaktadır.

Tablo 1'de verilen $\epsilon_c^{(GÖ)}$, $\epsilon_c^{(KH)}$ ve $\epsilon_c^{(SH)}$ sırasıyla GÖ, KH ve SH performans düzeyi için izin verilen beton birim şekil değiştirmesidir. $\epsilon_s^{(GÖ)}$, $\epsilon_s^{(KH)}$ ve $\epsilon_s^{(SH)}$ sırasıyla GÖ, KH ve SH performans düzeyi için izin verilen donatı birim şekil değiştirmesini gösterilmektedir. $\theta_p^{(GÖ)}$, $\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(SH)}$ sırasıyla GÖ, KH ve SH performans düzeyi için izin verilen dönme açılarıdır. Tablo 1'de verilen denklemlerde ω_{we} , ϵ_{su} , k_u , k_y , L_p , L_s ve d_b sırasıyla etkin sargı donatısının mekanik donatı oranını, donatının çekme dayanımına karşı gelen birim uzamayı, maksimum eğriliğini, akma eğriliğini, plastik mafsallık uzunluğunu, kesme açıklığını ve boyuna donatı çapını göstermektedir.

Göçme önlenmesi performans düzeyi için izin verilen beton birim kısalması ($\epsilon_c^{(GÖ)}$) denklemindeki ilk terim (0.0035) sargısız betonun birim kısalmasına karşı gelmektedir. ω_{we} ; etkin sargı donatısının mekanik donatı oranı Denklem (1) ile hesaplanmıştır.

$$\omega_{we} = \alpha_{se} \rho_{sh, min} \frac{f_{ywe}}{f_{ce}} \quad (1)$$

Denklem (1)'de, α_{se} sargı donatısı etkinlik katsayısını, $\rho_{sh, min}$ dikdörtgen kesitte iki yatay doğrultuda hacimsel enine donatı oranının küçük olanını, f_{ywe} enine donatının ortalama akma dayanımını göstermektedir. Sargı donatısı etkinlik katsayısı (α_{se}) ve kesitte hacimsel enine donatı oranı (ρ_{sh}) Denklem (2) ile hesaplanmıştır.

$$\alpha_{se} = \left(1 - \frac{\sum a_i^2}{6b_o h_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right), \quad \rho_{sh} = \frac{A_{sh}}{b_k s} \quad (2)$$

Denklem (2)'de A_{sh} ve ρ_{sh} gözönüne alınan doğrultuda enine donatının alanını ve hacimsel oranını, b_k dik doğrultudaki çekirdek boyutunu (en dıştaki enine donatı eksenleri arasındaki uzaklık), s enine donatı aralığını, b_o ve h_o sargı donatısı eksenlerinden ölçülen sargılı beton boyutlarını, a_i bir etriye kolu veya çiroz tarafından mesnetlenen boyuna donatıların eksenleri arasındaki uzaklığını göstermektedir. Etkin kesit rijitlikleri kullanılarak yapılan hesapta SH performans düzeyi için taşıyıcı sistemde plastik mafsallık oluşumuna izin verilmemektedir.

$$\theta_y = \frac{k_y L_s}{3} + 0.0015 \eta \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s}\right) + \frac{k_y d_b f_{ye}}{8 \sqrt{f_{ce}}} \quad (3)$$

Akma durumu için yer değiştirmiş plastik mafsallık eksen dönmesi θ_y Denklem (3) ile hesaplanmıştır. Kiriş ve kolonlarda η katsayısı, $\eta = 1$, perdelerde ise $\eta = 0.5$ 'dir.

f_{ce} ve f_{ye} ise betonun ortalama (beklenen) basınç dayanımı ile donatının ortalama akma dayanımını göstermektedir. TBDY (2018)'de $f_{ce} = 1.3 f_{ck}$ ve $f_{ye} = 1.2 f_{yk}$ olarak tarif edilmiştir.

Tablo 1. Betonarme elemanları için izin verilen şekil değiştirme üst sınırların denklemleri [8]

Göçme Öncesi Hasar (GÖ)	Betonarme Elemanları İçin İzin Verilen Şekil Değiştirme ve İç Kuvvet Sınırları Kontrollü Hasar (KH)	Sınırlı Hasar (SH)
$\varepsilon_c^{(GÖ)} = 0.0035 + 0.04\sqrt{\omega_{we}} \leq 0.018$	$\varepsilon_c^{(KH)} = 0.75\varepsilon_c^{(GÖ)}$	$\varepsilon_c^{(SH)} = 0.0025$
$\varepsilon_s^{(GÖ)} = 0.40\varepsilon_{su}$	$\varepsilon_s^{(KH)} = 0.75\varepsilon_s^{(GÖ)}$	$\varepsilon_s^{(SH)} = 0.0075$
$\theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3} \left[(k_u - k_y)L_p \left(1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s} \right) + 4.5k_u d_b \right]$	$\theta_p^{(KH)} = 0.75\theta_p^{(GÖ)}$	$\theta_p^{(SH)} = 0$

f_{ck} ve f_{yk} sırasıyla betonun karakteristik basınç dayanımı ve donatı çeliğin karakteristik akma dayanımıdır.

2 Materyal ve metod

Bu çalışmada betonarme kiriş elemanlarının deprem performansının belirlenmesi için TBDY, (2018)'de verilen kurallara göre sabit geometriye ve farklı parametrelere sahip 3 tip toplam 33 adet T en-kesitli betonarme kiriş modeli tasarlanmıştır (Tablo 3, 4 ve 5). Tasarlanan betonarme tablalı kirişlerde gerçek malzeme davranışları esas alınarak farklı beton basınç dayanımı ve basınç donatı oranına göre moment-eğrilik ilişkilerinden; akma eğriliği (k_y), akma momenti (M_y), göçme öncesi eğriliği (k_u), göçme öncesi eğilme momenti (M_u) ve eğrilik sünekliği (μ) değerleri hesaplanmıştır. Betonarme kiriş modellerinin moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen sonuçlara göre kiriş kesitlerinin davranışları incelenmiştir. Tasarlanan betonarme tablalı kiriş modellerinde yapılan performans değerlendirmesinde GÖ, KH ve SH performans seviyeleri için şekil değiştirme ve iç kuvvet sınır değerleri hesaplanmıştır. Betonarme kiriş elemanlarında sargı donatısı oranı ve çekme donatısı oranı sabit tutularak, farklı parametre olarak basınç donatısı oranı ve beton basınç dayanımına göre hesaplanan beton ve donatı çeliği birim şekil değiştirmeleri, plastik mafsallı akma dönmeleri ve plastik dönmeleri hesaplanarak kiriş kesitlerinin performans düzeyleri araştırılmıştır.

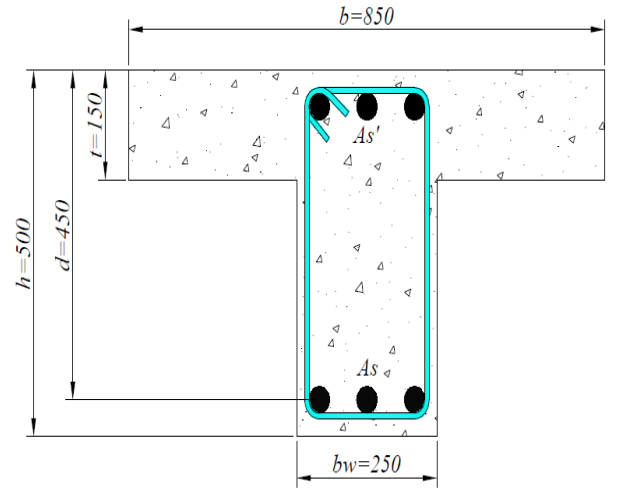
Betonarme T en-kesitli kiriş kesit hesabı ve tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli husus, elde edilen kesitteki donatı oranının, dengeli donatı orandan küçük olmasını sağlamaktır. Betonarme T en-kesitli kirişlerde sünek davranışın sağlanabilmesi için, çekme donatısı oranı Denklem (4) ile sınırlandırılmıştır. Denklem (4)'te ρ ; çekme donatı oran, ρ' ; basınç donatı oranıdır.

$$\bar{\rho}_b = 0.85 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \left[k_1 \frac{600}{600 + f_{yd}} + \left(\frac{t}{d} \right) \left(\frac{b}{b_w} - 1 \right) \right], \quad (4)$$

$$\rho_{max} = 0.85\rho_b, (\rho - \rho') \leq \rho_{max}$$

Denklem (4)'te f_{cd} , f_{yd} , k_1 , t , d , b , ve b_w sırasıyla beton tasarım basınç dayanımı, boyuna donatı tasarım akma dayanımı, eşdeğer dikdörtgen basınç bloğu derinlik katsayısı, tabla kalınlığı, kiriş faydalı yüksekliği, kiriş genişliği ve tabla genişliğidir.

Betonarme kiriş modellerinin tasarımında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018)'de verilen hükümler dikkate alınmıştır. Kesit geometrisi ve donatı düzeni Şekil (1)'de verilmiştir. T en-kesitli betonarme kiriş modellerinde çekme donatısı oranı $\rho = \rho_{max} = 0.85\bar{\rho}_b$ olacak şekilde sabit alınmış ve basınç donatısı oranlarının ($\rho'_s = 0, 0.1\rho, 0.2\rho, 0.3\rho, 0.4\rho, 0.5\rho, 0.6\rho, 0.7\rho, 0.8\rho, 0.9\rho$ ve ρ) değerleri değiştirilerek parametrik bir çalışma yapılmıştır. Betonarme kiriş modellerinde C30, C40 ve C50 beton sınıfı ve B420C donatı sınıfı dikkate alınmıştır.



Şekil 1. Tasarlanan kiriş modellerinin en-kesit detayları

Betonarme kesitlerde süneklik, kesitin dayanımında önemli bir azalma olmadan yapabileceği doğrusal ötesi deformasyon kapasitesi olarak tanımlanır. Sayısal olarak ise süneklik, eğrilik süneklik katsayısı (μ) Denklem (5) ile hesaplanmaktadır. Eğrilik süneklik katsayısı, kesitin kırılma anında yaptığı eğriliğin (k_u), çekme donatısının aktığı anda kesitte oluşan eğriliğe (k_y) oranıdır [10].

$$\mu = \frac{k_u}{k_y} \quad (5)$$

Betonarme T en-kesitli kirişlerin tasarımında kullanılan malzeme özellikleri Tablo (2)'de verilmiştir. Betonarme kirişlerin çekme ve basınç donatısı oranları ve alanları, beton ve donatı çeliği için hesaplarda ve malzeme modellerinde kullanılan parametreler sırasıyla Tablo (3), (4) ve (5)'te özetlenerek verilmiştir.

Tablo 2. Malzeme modellerinde kullanılan parametreler [8]

Malzeme	Parametre	Değer
Beton Sınıfı: C30,40,50	Sargısız betonun maksimum gerilmeye ulaştığı birim şekil değiştirme değeri (ϵ_{co})	0.002
	Sargısız betonun nihai birim şekil değiştirmesi (ϵ_{cu})	0.0035
Donatı Çeliği: B420C	Karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck})	30,40,50MPa
	Donatı çeliğinin akma birim şekil değiştirmesi (ϵ_{sy})	0.0021
	Donatı çeliğinin pekleşme birim şekil değiştirmesi (ϵ_{sp})	0.008
	Donatı çeliğinin kopma birim şekil değiştirmesi (ϵ_{su})	0.08
	Donatı çeliğinin karakteristik akma dayanımı (f_{yk})	420MPa
	Donatı çeliğinin karakteristik kopma dayanımı (f_{su})	550MPa

Tablo 3. Tip-1 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait donatı oranları ve alanları

Kesit No	Sargı Donatısı	Beton sınıfı (MPa)	A_s (mm^2)	A'_s (mm^2)	ρ	ρ'	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$
T1-0				0		0.0000	0.85
T1-1				583		0.0052	0.77
T1-2				1166		0.0104	0.68
T1-3				1749		0.0155	0.60
T1-4				2332		0.0207	0.51
T1-5	Φ8/50mm	30	5830	2915	0.0518	0.0259	0.43
T1-6				3498		0.0311	0.34
T1-7				4081		0.0363	0.26
T1-8				4664		0.0415	0.17
T1-9				5247		0.0466	0.09
T1-10				5830		0.0518	0.00

Tablo 4. Tip-2 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait donatı oranları ve alanları

Kesit No	Sargı Donatısı	Beton sınıfı (MPa)	A_s (mm^2)	A'_s (mm^2)	ρ	ρ'	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$
T2-0				0		0.0000	0.85
T2-1				755		0.0067	0.77
T2-2				1510		0.0134	0.68
T2-3				2266		0.0201	0.60
T2-4				3021		0.0269	0.51
T2-5	Φ8/50mm	40	7552	3776	0.0671	0.0336	0.43
T2-6				4531		0.0403	0.34
T2-7				5286		0.0470	0.26
T2-8				6041		0.0537	0.17
T2-9				6797		0.0604	0.09
T2-10				7552		0.0671	0.00

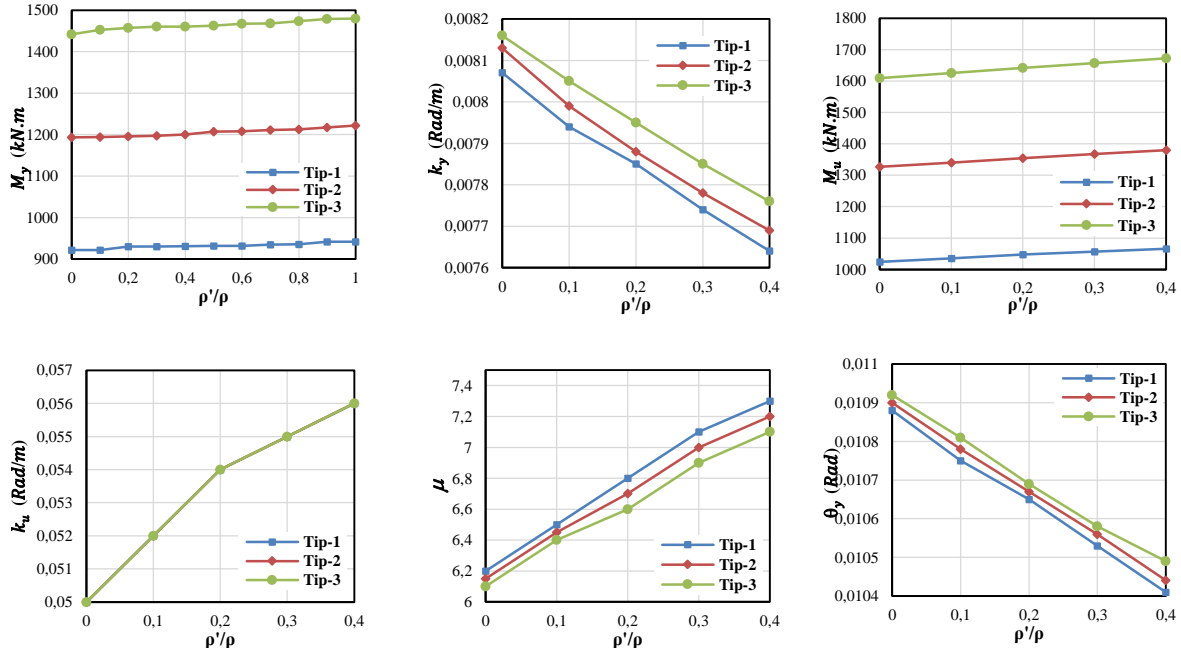
Tablo 5. Tip-3 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait donatı oranları ve alanları

Kesit No	Sargı Donatısı	Beton sınıfı (MPa)	A_s (mm^2)	A'_s (mm^2)	ρ	ρ'	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$
T3-0				0		0.0000	0.85
T3-1				916		0.0081	0.77
T3-2				1833		0.0163	0.68
T3-3				2749		0.0244	0.60
T3-4				3665		0.0326	0.51
T3-5	Φ8/50mm	50	9163	4581	0.0814	0.0407	0.43
T3-6				5498		0.0489	0.34
T3-7				6414		0.0570	0.26
T3-8				7330		0.0652	0.17
T3-9				8247		0.0733	0.09
T3-10				9163		0.0814	0.00

3 Bulgular ve tartışma

Tablalı betonarme kiriş modelleri için farklı parametrelere göre moment-eğrilik analizlerinden elde edilen sonuçları kullanılarak kiriş modelleri için M_y , k_y , M_u , k_u , ve μ değerleri hesaplanmıştır. Betonarme kiriş modellerinin moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen veriler kullanılarak kiriş kesitlerinin davranışları incelenmiştir. Yığılı plastik davranış modeline göre tablalı

betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre akma durumu için θ_y değerleri Denklem (3) ile hesaplanmıştır. Tip 1, 2 ve 3 olarak tasarlanan ve detayları sırasıyla Tablo 3, 4 ve 5'te verilen tablalı betonarme kiriş modelleri için moment-eğrilik analizlerinden M_y , k_y , M_u , k_u , μ ve θ_y değerleri hesaplanarak Şekil 2'de özetlenmiştir. Şekil 2'de M_y , M_u değerleri; kNm , K_y , K_u değerleri; Rad/m ve etkin eğilme rijitliği; kNm^2 biriminde verilmiştir.



Şekil 2. Betonarme kolonların farklı parametrelere göre hesaplanan k_y , M_y , k_u , M_u , μ ve θ_y değerlerinin ρ'/ρ oranına göre ilişkileri

Betonarme kirişlerin farklı performans düzeyleri için farklı parametrelere göre $\rho'/\rho - \varepsilon_c$, $\rho'/\rho - \varepsilon_s$ ve $\frac{\rho'}{\rho} - \theta_p$ ilişkileri Şekil 3'te verilmiştir. Betonarme tablalı kiriş kesitlerinin analiz ve hesap sonuçlarından elde edilen değerler karşılaştırmalı olarak Şekil (4)'te verilmiştir. Betonarme kiriş modellerinden elde edilen göçme önlenmesi (GÖ), kontrollü hasar (KH) performans düzeyi için izin verilen sargılı beton birim kısalması ($\varepsilon_c^{GÖ}$, ε_c^{KH}) değerlerinin (ρ/ρ') oranına göre değişimleri Şekil (4)'te verilmiştir. GÖ ve KH performans düzeyi için izin verilen plastik dönme açıları ($\theta_p^{GÖ}$, θ_p^{KH}) çekme donatısı oranının basınç donatısı oranına (ρ/ρ') göre grafikleri Şekil (4)'te verilmiştir. Akma durumu için dönme açısı (θ_y) değerlerinin ρ/ρ' oranına göre karşılaştırmalı grafikleri Şekil (4)'te verilmiştir. TBDY (2018)'e göre SH performans düzeyi için izin verilen sargılı beton birim kısalması değeri $\varepsilon_c^{SH} = 0.0025$ olacak şekilde sabit olarak verilmiştir. Farklı performans düzeyi için $\varepsilon_s^{(GÖ)} = 0.4\varepsilon_{su}$, $\varepsilon_s^{(KH)} = 0.75\varepsilon_s^{(GÖ)}$ ve $\varepsilon_s^{(SH)} = 0.0075$ olarak sabit değerler tanımlanmıştır.

Farklı performans düzeyi için verilen plastik dönme hasar sınırları (θ_p); k_y , k_u , L_p , L_s ve d_b 'nin fonksiyonudur. Sınırlı hasar performans düzeyinde taşıyıcı sistemlerde plastik mafsal oluşmasına izin verilmediği için farklı parametrelere göre betonarme kiriş kesitlerinde $\theta_p^{(SH)} = 0$ elde edilmiştir.

4 Sonuçlar

Araştırma bulgular bölümünde betonarme T en-kesitli kirişlerin sonuçları maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

Betonarme T en-kesitli kirişlerde sabit beton basınç dayanımı ve çekme donatısı oranı için basınç donatısı oranının artması ile moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen akma momenti (M_y), kırılma momenti (M_u) ve kırılma eğriliği (k_u) değerleri artmaktadır.

Sabit beton basınç dayanımı ve çekme donatısı oranına sahip T en-kesitli betonarme kirişlerde basınç donatı oranının artması ile akma eğriliği (k_y) ve plastik mafsal akma dönmesinin (θ_y) değerleri azalmaktadır.

Basınç donatı oranının artması ile T en-kesitli kirişlerin eğrilik süneklik (μ) değerleri artmaktadır.

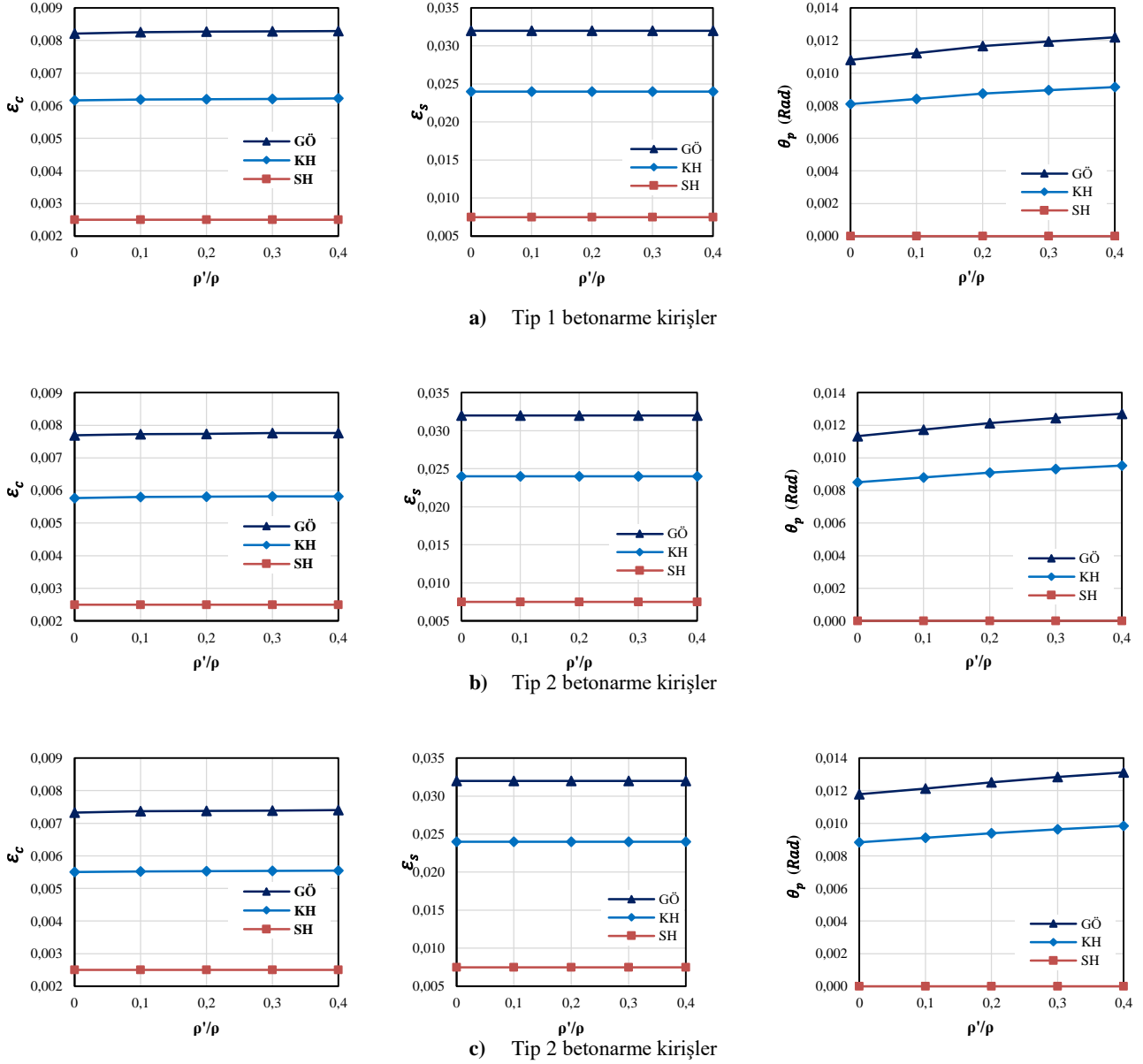
Sabit çekme donatısı oranı ve beton basınç dayanımı için artan basınç donatı oranı ile $\varepsilon_c^{(KH)}$ ve $\varepsilon_c^{(GÖ)}$ değerleri artmaktadır.

Sabit çekme donatısı oranı ve beton basınç dayanımı için artan basınç donatısı oranı ile $\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(GÖ)}$ değerleri artmaktadır.

Sabit basınç donatısı ve çekme donatısı oranına sahip betonarme T en-kesitli kirişlerde artan beton basınç dayanımı ile akma momenti (M_y) ve kırılma momenti (M_u) değerleri artmaktadır.

Sabit basınç ve çekme donatısı oranına sahip betonarme kirişlerde, beton basınç dayanımının artması ile akma eğriliği (k_y) artmakta ve kırılma eğriliği (k_u) değerleri yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.

Sabit basınç donatısı ve çekme donatısı oranına sahip betonarme kirişlerinde artan beton basınç dayanımı ile hesaplanan eğrilik sünekliği (μ) değerleri azalmaktadır. Betonarme kirişlerde TBDY, 2018'e göre hesaplanan plastik mafsal akma dönmesinin (θ_y) değeri; sabit çekme donatısı



Şekil 3. Betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre karşılaştırmalı $\epsilon_c - \rho'/\rho$, $\epsilon_s - \rho'/\rho$, $\theta_p - \rho'/\rho$ grafikleri

ve basınç donatısı oranları için, artan beton basınç dayanımı ile artmaktadır.

Sabit çekme ve basınç donatısı oranı için artan beton basınç dayanımı ile $\epsilon_c^{(KH)}$ ve $\epsilon_c^{(GÖ)}$ değerleri azalmaktadır.

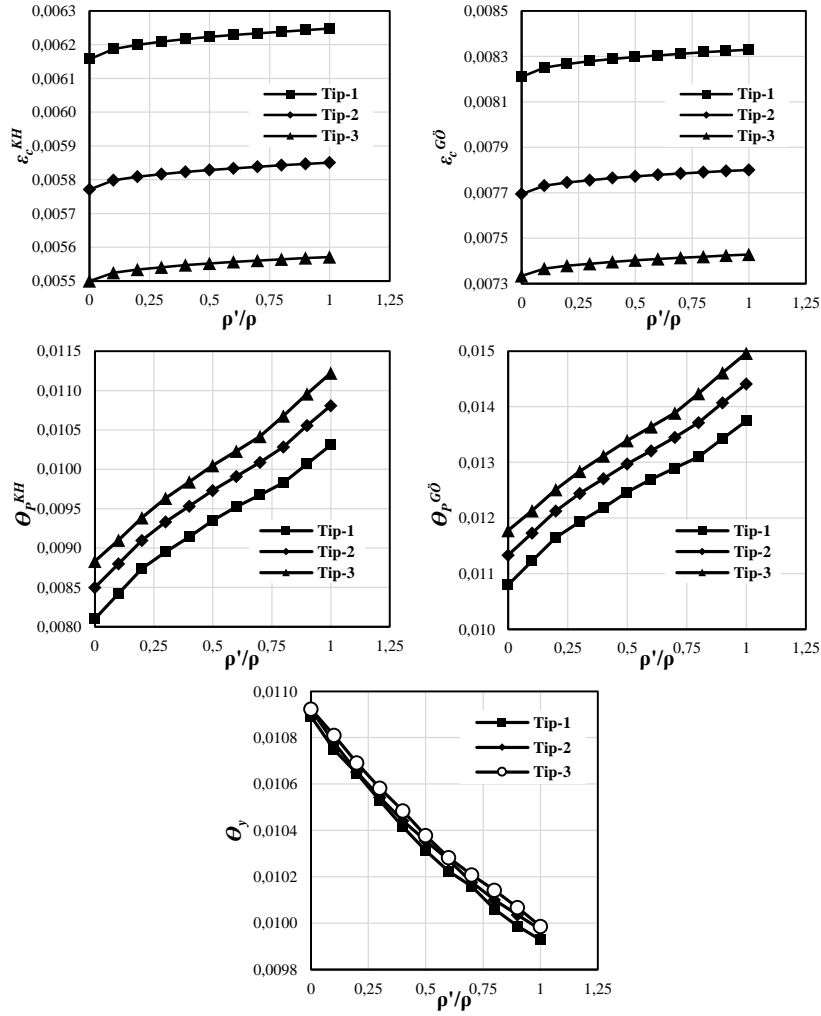
Sabit çekme ve basınç donatısı oranı için artan beton basınç dayanımı ile $\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(GÖ)}$ değerleri artmaktadır.

TBDY (2018)'de donatı çeliği için GÖ ve KH performans düzeylerinde verilen hasar sınırları

$(\epsilon_s^{(KH)}, \epsilon_s^{(GÖ)})$, donatı çeliğinin çekme dayanımına karşı gelen birim uzama değerini sabit katsayılar ile çarparak elde edilmektedir. SH performans düzeyi için verilen hasar sınırı ise sabit bir değer olarak verilmektedir ($\epsilon_s^{(SH)} = 0.0075$).

$\epsilon_c^{(SH)}$ Performans düzeyi için verilen hasar sınırı TBDY 2018'e göre sabit değer olarak verilmektedir ($\epsilon_c^{(SH)} = 0.0025$).

GÖ ve KH performans düzeyi için verilen plastik dönme hasar sınırları θ_p , k_y , k_u , L_p , L_s ve d_b 'nin fonksiyonudur. Dolayısıyla basınç donatısı oranı, sargı donatısı oranı ve çekme donatısı oranı gibi k_y ve k_u değerlerini etkileyen parametreler θ_p 'yi de etkilemektedir. SH performans düzeyinde taşıyıcı sistemlerde plastik mafsıl oluşmasına izin verilmediği için betonarme kiriş kesitlerinde $\theta_p^{(SH)} = 0$ elde edilmiştir.



Şekil 4. Betonarme kirişlerinin ϵ_c^{KH} , $\epsilon_c^{GÖ}$, θ_p^{KH} , $\theta_p^{GÖ}$ ve θ_y değerlerinin (ρ/ρ') oranına göre değişimi

Basınç donatısı oranının artırılması, betonarme kirişlerin akma momentine (M_y), kırılma momentine (M_u), kırılma eğriliğine (k_u), kontrollü hasar ve göçmenin önlenmesi performans düzeyi beton birim kısalmasına ($\epsilon_c^{(KH)}$ ve $\epsilon_c^{(GÖ)}$), kontrollü hasar ve göçme önlenmesi performans düzeyleri için izin verilen plastik dönme sınırlarına ($\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(GÖ)}$) ve eğrilik sünekliğine (μ) etkili olduğu ispatlanmıştır.

Beton basınç dayanımı artırılması, T en-kesitli betonarme kirişlerin akma momentine (M_y), kırılma momentine (M_u), akma eğriliğine (k_y), kontrollü hasar ve göçme önlenmesi performans düzeyleri için izin verilen plastik dönme sınırlarına ($\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(GÖ)}$) ve akma durumu için yer değiştirmiş eksen dönmesi üzerine (θ_y) etkili olduğunu ispatlanmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %12

Kaynaklar

- [1] S. İbrahim Keykan, Betonarme Yapı Sistemlerinde Yapısal Performans Düzeyini Belirleyen bir Bilgisayar Programı Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- [2] A. J. Bigaj, Structural dependence of rotation capacity of plastic hinges in RC beams and slabs, PhD Thesis, Delft University, the Netherlands, 1999.
- [3] A. J. Bigaj, and J. Walraven, Size effects on plastic hinges of reinforced concrete members, Heron, 47(1), ISSN 0046-7316, 53-75, 2002.
- [4] Z. Celep ve N. Kumbasar, Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı. Beta Dağıtım, İstanbul, 2004.
- [5] Ö. Çavdar, E. Bayraktar ve A. Çavdar, Mevcut perdeli betonarme bir yapının doğrusal olmayan yöntemle deprem performansının belirlenmesi. International Burdur Earthquake & Environment Symposium (IBEES2015), sayfa 233-241, Burdur, Türkiye, 7-9 May 2015.

- [6] C. Aydemir, M. S. Kırçıl, B. Hancıoğlu ve M. Zorbozan, Betonarme kolonların hasar sınır eğriliklerinin belirlenmesi. İMO Teknik Dergi, 22 (109), 5613-5642. 2011.
- [7] H. Ulutaş, DBYBHY (2007) ve TBDY (2018) Deprem yönetmeliklerinin kesit hasar sınırları açısından kıyaslanması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Sayı 17, 351-359, Aralık 2019. <https://doi.org/10.31590/ejosat.620827>.
- [8] TBDY, 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, 2018.
- [9] SAP2000. Structural software for analysis and design, Computers and Structures, Inc. Version 20.0.0. USA.
- [10] N. Çağlar, A. Akkaya, A. Demir ve H. Öztürk, Farklı kesit geometrilerine sahip betonarme kolonların davranışının incelenmesi, ISITES2014, 2095-2105, Karabük/Türkiye. 2004.



Betonarme perde duvarların farklı yapı malzemeleri açısından değerlendirilmesi

Evaluation of RC shear walls in terms of different construction materials

Abdulkadir Cüneyt Aydın^{1,*} , Barış Bayrak¹ 

¹ Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25030, Erzurum Türkiye

Özet

Perde duvarlar yüksek yanıl rijitliklerinden dolayı deprem, rüzgâr gibi yatay kuvvetlerini karşılamada en çok tercih edilen yapı elemanlarıdır. Gelişen teknoloji ile birlikte hem yapı malzemelerindeki hem de deney düzeneklerindeki gelişmeler ışığında perde duvarların farklı yöntemlerle incelenmesine olanak sağlanmıştır. Bu çalışma kapsamında uzun yıllar boyunca betonarme perde duvarlar için genel kabul görmüş parametreler yerine yenilikçi malzemeler ve deney koşulları bakımından ele alınmıştır. Betonarme perde duvarlar gerek lifli beton, hafif veya yüksek dayanımlı beton, FRP donatılar gibi malzemeler gerekse de donma-çözülme, korozyon, güçlendirme gibi amaçlarla irdelenmiştir. Yüksek katlı binalarda kullanımı neredeyse zorunlu hale gelen betonarme perde duvarların önümüzdeki yıllar içerisinde geleneksel çelik donatı düzeninin yerine daha yüksek mekanik ve durabilite özelliklerine sahip donatılara, geleneksel betonun yerine geleneksel betonun zayıflıklarının giderileceği özel çimento esaslı kompozitlerle üretileceği aşikârdır. Bununla birlikte tipik beton ve donatılı perde duvarlar yerine kompozit malzemelere kayacağı da beklenilmektedir. Çalışma kapsamında betonarme perde duvarların yapı malzemeleri perspektifinde davranışları ele alınmıştır.

Anahtar kelimeler: Perde duvar, Beton, Betonarme, Tasarım

Abstract

Shear walls are the most preferred structural elements to resist the horizontal loads due to high lateral stiffness. With the advancing technology, it has allowed the shear walls to be examined with different methods in the light of developments in both building materials and experimental setups. RC shear walls have been examined in terms of both the materials such as fiber concrete, lightweight concrete, high-strength concrete, fiber-reinforced polymer (FRP) bars, freeze-thaw resistance, corrosion resistance, and strengthening. It is expected that RC shear walls will be produced with reinforcements with higher mechanical and durability characteristics in the coming years, instead of the conventional steel reinforcement arrangement. It is obvious that instead of conventional concrete, it will be produced with special type cement-based composites, where the weaknesses of conventional concrete will be eliminated. The paper presents the behavior of RC shear walls within the constructional materials perspective.

Keywords: Shear wall, Concrete, Reinforced concrete, Design

1 Giriş

Dünya genelinde son altmış yıl içerisinde yapısal hasarlara sebep olan doğal afetlerin yarısından fazlasına depremlerin neden olduğu görülmektedir. Depremleri heyelanlar, seller, toprak kaymaları, yangınlar ve çığ afetleri takip etmektedir. Yerkabuğu içerisindeki kırılmalar nedeniyle ani olarak ortaya çıkan titreşimlerin dalgalar halinde yayılarak geçtikleri ortamı ve yeryüzünü sarsma olayına deprem denir. Depremler yer kabuğundaki ani şekil değiştirme enerjisinin açığa çıkmasının ardından plakaların bir biri üzerinde kayması ile meydana gelen doğal afetlerdir. Dünyadaki en yoğun deprem kuşakları; yeryüzündeki depremlerin %81'inin olduğu Pasifik Deprem Kuşağı, %17'sinin olduğu Alp-Himalaya Deprem Kuşağı'dır. Türkiye de Alp-Himalaya Deprem Kuşağında yer alan bir ülke olduğu için dünya genelinde depremselliği yüksek olan ülkelerden birisidir [1]. Dünya üzerinde yaşanan depremler üç ana kuşak üzerinde meydana gelmektedir (Şekil 1).

1. Pasifik Deprem Kuşağı: Şili'nin kuzeye doğru Güney Amerika kıyıları, Orta Amerika, Meksika, ABD'nin batı kıyıları ve Alaska'nın güneyinden Aleut Adaları, Japonya, Filipinler, Güney Pasifik Adalarını ve Yeni Zelanda'yı kapsayan ve dünya üzerindeki depremlerin yaklaşık %81'inin meydana geldiği deprem kuşağıdır.
2. Alp-Himalaya Deprem Kuşağı: İspanya'dan başlayıp, Fas, Cezayir, Tunus, Fransa, İtalya, Yunanistan, Türkiye,

İran, Azerbaycan, Afganistan, Pakistan' ı içine alarak Hindistan' a kadar uzanan deprem kuşağıdır.

3. Atlantik Deprem Kuşağı: Atlantik Okyanusu boyunca uzanan deprem kuşağıdır.

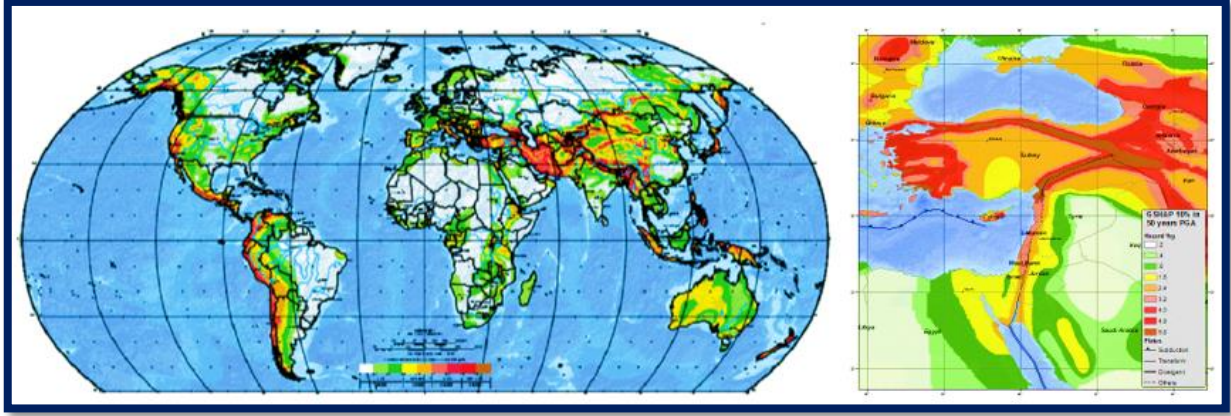
Şekil 1'den de görüldüğü gibi gerek dünya genelinde gerekse de ülkemizde deprem kaçınılmaz bir gerçektir. Ülkemizin %66'sı, nüfusun %70'i ve sanayi tesislerinin %75'i deprem riskinin fazla olduğu bölgelerinde yer almaktadır. Son yüz yılda yaşanan depremlerde yaklaşık 100000 kişi hayatını kaybetmiş, 170000 kişi yaralanmış ve 700000 konut ağır hasara uğramıştır. Ülkemizin deprem bölgesi haritası incelendiği zaman, nüfusumuzun %95'nin deprem riski olan bölgelerde yaşadığı, büyük sanayi tesislerinin %98'i ve barajların %93' ünün deprem riski olan bölgelere bulunduğu görülmektedir [1,2]. Bu bilgiler ışığında yüksek deprem riski altındaki hem ülkemizde hem de dünya genelinde yapılacak binaların depreme karşı dayanıklı olarak tasarlanması bir zorunluluktur. Fakat bütün yapının deprem sonucunda hiçbir hasar görmeden atlatması ekonomik bir çözüm olmayacaktır.

Bu amaçla tasarlanan binaların, hafif şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan sistem elemanlarının hasar görmemesi, orta şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda oluşabilecek hasarın sınırlı ve onarılabilir olması ve şiddetli depremlerde ise can

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: acaydin@atauni.edu.tr (A. C. Aydın)

Geliş / Recieved: 11.08.2020 Kabul / Accepted: 16.09.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.751562



Şekil 1. Dünya ve Türkiye deprem kuşağı haritaları

güvenliğinin sağlanması amacı ile kalıcı yapısal hasar oluşumunun sınırlandırılması amaçlanmalıdır.

Diğer bir husus da yıllar içerisinde gelişen teknoloji, iş imkânları, sosyal-ekonomik sebepler, kırsal alt yapı yetersizliği vb. sebeplerden dolayı nüfusun büyük bölümü kırsal alanlardan şehirlere göç etmiştir. Günümüzde dünya nüfusunun yaklaşık %55'i şehirlerde yaşamaktadır. Hatta Birleşmiş Milletler Ekonomik ve Sosyal İşler Dairesi raporuna göre bu oranın 2050 yılına kadar %68'e kadar çıkması ön görülmektedir. Şehirlerde yoğunlaşan bu nüfusun barınma ihtiyacını giderebilmek için yüksek katlı binalara duyulan ilgi ve ihtiyaç giderek artmıştır. Bu ilgi ve ihtiyaç beraberinde yüksek katlı binaları ülkelerin simgesi ve gelişmişlik düzeyini gösteren birer faktör haline getirmiştir. Fakat bu durum beraberinde daha narin yapı elemanlarının tasarlanmasına ve bu narin yapı elemanlarına etki edecek yatay kuvvetlere karşı (özellikle deprem ve rüzgâr kuvvetler) oldukça dikkat edilmesine sebep olmuştur. Ayrıca betonarme yapılar servis ömürleri boyunca kendi ağırlıkları, deprem, rüzgâr, sabit yükler, hareketli yükler, sünme, rötre, toprak itkisi vb. iç ve dış yük etkilerine maruz kalırlar. Yapıya etki eden bu yüklerden özellikle yatay kuvvet oluşturan deprem, rüzgâr ve yanal toprak itkisinin karşılanabilmesi için yanal rijitliği fazla olan geometri yapı elemanlarına ihtiyaç vardır. Yatay yükler etkisindeki kolonlarda fazla eğilme momentinden kaynaklanan özellikle üst kat kolonlarında ikinci mertbe momentleri artmaktadır. Dolayısıyla bina üst katlarına doğru yatay yer değiştirmeler yüksek mertebelerde olabilmektedir. İkinci mertbe momentlere sebep olan bu yatay yer değiştirmelerinin sınırlandırılması gerekmektedir. Bundan dolayı kolonlara nazaran yatay rijitlikleri çok daha fazla olan perde duvarlar tercih edilmelidir [3]. Yani perde duvar kavramı karşımıza çıkmaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY) [4] perde duvar tanımı "plandaki uzun kenarının kalınlığı oranı en az 6 olan düşey taşıyıcı elemanlar" olarak tanımlanır. Bu oran bazı yönetmeliklerde [5] 4 olarak karşımıza çıkabilmektedir. Hatta yaklaşık 1 yıl öncesine kadar bu oran TBDY gereği 7 olarak belirlenmesine rağmen yenilenen yönetmelik gereği 6'ya düşürülmüştür.

Deprem riski fazla bölgelerdeki orta ve yüksek katlı binalarda kullanılan perde duvarlar yapı malzemelerindeki

gelişmeler neticesinde çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Gerek akademik çalışmalarda gerekse de uygulamada en genel hali ile çelik ve betonarme perde duvarlar mevcuttur. Kesin çizgilerle ayrılmamasına rağmen; T, L ve U dikdörtgen kesitli, dolu gövdeli, boşluklu, bağ kirişli, kompozit (iki veya daha fazla farklı malzemenin birlikte kullanılması) perde duvar sınıfları karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışma kapsamında özellikle yapı malzemesi perspektifinde betonarme perde duvar davranışı üzerinde durulmuştur.

2 Betonarme perde duvar davranışı

Betonarme perde duvarlar sistemlerin elastik enerji tüketme kapasitesi, çerçevesi sistemlerden yüksek olmasına rağmen elastik ötesi enerji tüketme kapasitesi çerçevesi sistemlere göre daha fazladır. Dolayısıyla çerçevesi sistemler sadece perde duvarlardan oluşan sistemlere nazaran daha sünek davranmaktadır. Etkin deprem kuşağında bulunan ülkemizde deprem riskinin fazla olduğu bölgelerde hastane, itfaiye binası, yurt, okul ve müze gibi binaların perde duvarlı yapılması yapı güvenliği ve insan sağlığı için oldukça önem arz etmektedir. Hatta orta düzey deprem riskinin olduğu bölgelerde de perde duvarların kullanılması oldukça önemlidir [6].

Betonun düşük çekme dayanımından dolayı yüksek katlı binalarda çatlaklar kaçınılmaz bir olaydır. Aynı zamanda yapıya etki eden yükler, yapının deformasyonu, sünme, rötre, sıcaklık, temeldeki oturmalar gibi betonarme bir yapının çatlak oluşmasında doğrudan etkili birçok faktör vardır. Betonarmenin avantajlarından dolayı özellikle yüksek yapılarda yanal yükleri karşılaması için kullanılan perde duvarların rijitlik karakteristikleri de önemlidir. Perde duvarın rijitliğini etkileyebilecek birçok faktör vardır. Fakat bunlardan en önemlileri; betonun kesme ve elastisite modülü, atalet momenti, etkili kesme alanı, perde duvar yükseklik/uzunluk (H/L) oranı, çatlakların varlığı ve yeri, yüklenme tipi, donatı oranı ve düzeni parametreleridir. Bahsedilen parametrelerin çokluğundan dolayı betonarme bir perde duvarın rijitliğini ön görmek oldukça zordur. Hatta bu konuda Amerika Beton Enstitüsü (American Concrete Institute (ACI)) şartnamesinde de kesin bir formül kullanılmamakla beraber deneysel sonuçlara dayanan formüller önerilmektedir [7].

2.1 Perde duvar dayanımını etkileyen faktörler

Betonarme perde duvarların davranışını anlamak için perde duvar davranışını etkileyen parametrelerin tanımlanıp yorumlanması gerekmektedir. Ayrıca bu parametrelerin perde duvar göçme modu ve dayanımı üzerindeki etkilerinin anlaşılması gerekmektedir.

2.1.1 Perde duvar yükseklik/uzunluk oranı

Betonarme perde duvarların davranışını etkileyen en önemli parametrelerden birisi perde duvarın yüksekliğinin plandaki uzunluğuna oranıdır (H/L). Orta veya yüksek binalarda uzun perde duvarlar tipik mafsallı kolon-kiriş gibi davranırlar. Bu tarz perde duvarlarda eğilme momenti hâkim olduğundan dolayı düktiliteyi sağlamak nispeten kolaydır. Fakat kısa binalarda, kısa perde duvarlar kullanılacağı için düşük H/L oranı olacaktır. Yüksekliğin az olmasından dolayı yüksek orandaki kesme kuvveti perde duvar alt bölümlerinde (plastik mafsallı bölge diyebiliriz) büyük değerlerde eğilme momentine neden olacaktır. Bu yüzden kısa perde duvarların davranışında kesme kuvveti daha belirleyici olmakla birlikte gerekli enerji sönümlenme kapasitesini elde etmek daha zor bir problem haline gelecektir. Düşük H/L oranıyla ilişkili olan bu yüksek kesme kuvvetleri diyagonal çekmeye, basınca veya kayma gerilmelerine sebep olacaktır. Böylece kısa perde duvarlarda görülebilecek kesme göçme modunun gevrek kırılma şeklinde olacaktır. Dolayısıyla perde duvarın enerji sönümlemesi için gerekli olacak inelastik deformasyon azalacak ve bu da gevrek kırılmaya sebep olacaktır.

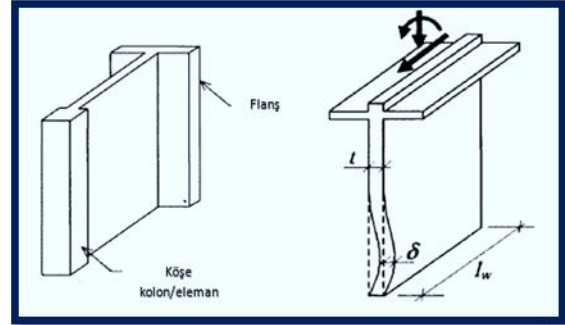
Perde duvarlar için H/L oranının yanı sıra M perde tabanındaki eğilme momentini, V kesme kuvvetini, L perde boyunu göstermek üzere $M/(VL)$ parametresi perde duvar davranışı için önemli bir parametredir. Eğer $M/(VL) \leq 1$ ise perde duvar kısa perde duvar olarak nitelendirilebilir. Bu tarz perde duvarlarda kesme göçmesi görülmektedir. Eğer $1 \leq M/(VL) \leq 2$ arasında ise bu tarz perde duvarlarda eğilme ile kesme göçmesinin beraber görülmekte ve orta yükseklikte perde duvar (intermediate shear wall) olarak değerlendirilebilir. $M/(VL) > 2$ olduğu perde duvarlar konsol perde duvar olarak adlandırılır ve bu tarz perde duvarlar da eğilme göçmesi görülmektedir.

Yanal yüklerin karşılanmasıyla etkili olan perde duvarlar ya düktil bir davranış ya da rijit bir davranış sergilerler. Düktil perde duvarlarda eğilme momenti hâkim iken rijit perde duvarlarda kesme yükleri hâkim olmaktadır. Orta veya alçak yükseklikteki binalarda hem etkinliğinden hem de ekonomik olmasından dolayı rijit davranış sergileyen perde duvar kullanımı uygundur. Rijit perde duvarlarda yükseklik/uzunluk oranı 2'den küçük olan kısa perde duvarlar olarak tanımlanabilir. Bu tür perde duvarlarda göçme modu üzerinde kesme kuvvetleri hâkim olmaktadır [8].

2.1.2 Perde duvar köşe kolon/eleman

Betonarme perde duvarlardaki bu köşe elemanlar, perde duvar bir/iki köşesinde gerekli durumlarda perde duvar gövde bölgesinden farklı şekilde donatılan elemanlardır (Şekil 2). Perde duvarlara saplanan kirişlerin daha etkili bir şekilde ankastrenlenmesine olanak

sağlamaktadırlar. Ayrıca bu köşe elemanlar eğilme donatılarının burkulmasını önleyerek ve potansiyel plastik mafsallı bölgedeki basınç altındaki betonun daha etkili bir şekilde sargılanmasını sağlar. Köşe elemanlar başlıklı bir şekilde veya yoğun donatılı şekilde oluşturulabilirler. Perde duvarlarda sıkça kullanılan köşe elemanlar yoğun donatılı olmaktadır. Böylece plastik mafsallı bölgede betondaki basınç şekil değiştirmelerini ve donatıdaki akımayı engelleyerek daha düktil bir davranış elde edilmesine olanak sağlar.



Şekil 1. Perde duvar köşe elemanı

2.1.3 Betonun elastisite ve kesme modülü, atalet momenti ve etkili kesme alanı

Betonun kesme ve elastisite modülü malzeme açısından iki etkili parametre olmasının yanı sıra atalet momenti ve etkili kesme alanı da geometrik olarak etkili iki parametredir. Bu dört parametre yanal yük etkisinde bir betonarme perde duvarın rijitliğini hesaplama da kullanılabilir. Ayrıca elastisite modülü ve atalet momenti eğilme rijitliğini hesaplamak için kesme modülü ve kesme alanı kesme rijitliğini hesaplamada kullanılır.

2.1.4 Çatlakların varlığı ve yeri

Genel olarak bakıldığı zaman çatlakların hemen hemen hepsi perde duvarların rijitliğini ve dayanımını azaltır. Bu azalma oranı da çatlakın boyu, genişliği, türü ve yerine bağlı olarak değişmektedir. Bunun yanı sıra agrega boyutuna, perde duvar geometrisine ve etki eden yanal kuvvetin büyüklüğüne de bağlıdır.

Bilindiği üzere betonun düşük çekme dayanımından dolayı eğilmenin hâkim olduğu bir perde duvarda eğilme çatlaklarından dolayı perde duvarın eğilme dayanımı azalmaktadır. Bununla birlikte kesme kuvveti ve eğilme momentinin birlikte etki etmesi durumunda yine betonun düşük çekme dayanımından dolayı eğilme ve kesme çatlakları oluşacaktır. Sadece kesme kuvvetinin etki etmesi durumuna bakıldığı zaman ise, betonun homojen bir malzeme olmasından dolayı perde duvarın kesme dayanımı oldukça karmaşık bir durumdur. Birçok sebepten dolayı betonarme yapılarda kesme göçmesi betonun kesme dayanımının çekme dayanımından daha büyük olduğu için diyagonal çekme çatlaklarından kaynaklanmaktadır. Rötne ve sıcaklığın etkisi ile oluşan makro ve mikro çatlaklardan dolayı perde duvarların rijitlik ve dayanımı betonun malzeme özelliklerinin bir fonksiyonudur.

Perde duvarlarda çatlaklar oluştuğundan sonra bu çatlakların ara yüzeylerinde basınç veya çekme olup olmadığına bakılmaksızın perde duvar kesme dayanımının oranı agregaların mekanik kenetlenmesine bağlıdır. Bu mekanik kenetlenmeden dolayı kesme dayanımı agreganın boyutu ve yüzey pürüzlülüğüne de bağlıdır. Bunun yanı sıra çatlak genişliği de kesme dayanımı için önemli bir parametredir. Böylece küçük agrega boyutu ile üretilen betondaki eğilme, eğilme ile kesme ve hatta mikro çatlaklar büyük agrega boyutu ile üretilen betonlardan daha düşük kesme dayanımına sahip olduğu da unutulmamalıdır.

2.1.5 Bağlantı noktalar

Betonarme perde duvarlarda yatay yapı bağlantıları dayanım zincirinin en zayıf halkası olabilir. Literatürdeki çalışmalar, kayma gerilmelerinin sebep olduğu göçme perde duvarın bir unsurudur. Özellikle zayıf yapı bağlantı noktalarından dolayı büyük miktarda kesme gerilmeleri çatlaklara sebep olabilir. Ayrıca bağlantı noktaları eksenel çekme, basınç veya kesme kuvvetinden kaynaklanan eğilme momentlerine maruz kalır. Perde duvarın dayanımı ve enerji sönümlemesi üzerinde rol oynar. Bu yüzden bu bağlantı noktalarının etkinliği yeterli donatının sağlanmasıyla ilişkilidir.

2.1.6 Yükleme tipi

Perde duvarlara etki eden yanal yük kesme gerilmelerine neden olur. Bu kesme gerilmeleri de perde duvar kesiti boyunca üniform olarak dağılır. Perde duvarlardaki düşey yükler ise ölü ve/veya hareketli yüklerden oluşur. Düşey yüklerin sebep olduğu çekme veya basınç kuvvetleri eğilme momentine neden olabilir. Eğilme, kesme ve eksenel yükler perde duvarların dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir.

Betonarme perde duvarlardaki hasar genellikle betonun zayıf özelliklerine, yetersiz donatıya ve yüksek oranda eksenel yük seviyesine ve az da olsa perde kalınlığına bağlıdır. Eksenel yük seviyesi çatlak dağılımı, göçme modu ve duvarın düktilitesini etkiler [9].

2.1.7 Yatay ve düşey donatı

Perde duvardaki düşey donatı oranı ve dağılımı perde duvarların nihai dayanımı ve rijitliğinin azalmasına neden olan çatlak dağılımı ve yayılması üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Yatay donatılar ise perde duvar kesme dayanımı üzerinde etkiye sahiptir.

Yatay donatıların H/L oranı özellikle 0.5 ve daha az olduğu betonarme perde duvarlarda perdenin dayanımına katkısının olmamasına rağmen ilgili yönetmeliklerde minimum yatay donatı bulundurulması şart koşulmuştur. Bunun yanı sıra perde duvarlardaki yatay ve düşey donatılar çatlak genişliğini azaltmada ve çatlak dağılımını engellemede rol oynarlar. Yatay donatı miktarının artması hem düktiliteyi hem de dayanımı arttırmaktadır.

2.1.8 Perde duvar temeli

Betonarme perde duvarların en kritik bölgesinden bir tanesi de temeldir. Temel devrilme momentine karşı koyabilmelidir. Yanal yüklerin neden olduğu devrilme momenti ve kayma gerilmelerini karşılayabilecek şekilde ankastrelenmelidir.

2.2 Perde duvar davranışı

Perde duvar davranışı kolon, kiriş ve yüksek kirişlerin davranışından farklıdır. Bu farklılık perde duvarların geometrisinden, sınır elemanlardan ve yüklemekten kaynaklanmaktadır. Perde duvarlar kolonlara göre daha narin elemanlar olmakla birlikte, kiriş ve yüksek kirişlere göre de farklı yüklemelere maruz kalabilirler.

Perde duvarlarda literatüre bakıldığı zaman genellikle dört tür kırılma şekli karşımıza çıkmaktadır. Diyagonal çekme göçmesi; beton yüzeyinde eğimli çatlaklar oluşur. Fakat beton yüzeyinde dökülme veya donatıda akmanın meydana gelmediği gevrek bir kırılma türüdür. Diyagonal basınç göçmesi; beton yüzeyinde dökülmeler gözlemlenir ve aynı zamanda bazı donatılarda akma meydana gelir. Bu tarz göçme şekli düşük dayanımlı beton kullanıldığında veya donatı oranının fazla olduğu durumlarda ortaya çıkar. Ani ve hızlı bir göçme şeklidir. Diyagonal basınç ve çekmenin birlikte görülmesi; donatıların çoğunda akmanın meydana gelmesi ve betonda ezilmenin oluşması durumudur. Diyagonal çekme ve basınç gerilmeleri birlikte etki eder. Perde duvar dönmesi; perde tabanında görülen dönme şeklinde oluşan göçme şeklidir.

2.2.1 Eğilme davranışı

Eksenel yük ve eğilme momentine maruz kalan bir perde duvar Şekil 3' de görülmektedir. Perde duvarlar donatılandırılırken donatı dağılımı kolayca öngörülemeyi için, perde duvarların eğilme dayanımının hesaplanması kolon ve kirişlere göre daha zahmetlidir. Bu yüzden perde duvarların eğilme dayanımı bir bilgisayar programıyla veya ilgili çizelgelerle hesaplanabilir.

Eğilme donatısının akıp akmaması histerik davranış için güzel bir kaynak olabilir. Yüksek perde duvarlarda donatıdaki akma perde tabanındaki plastik mafsallarda sınırlı olabilir. Bu bölgede betonun gevrek bir malzeme olmasından dolayı enerji sönümlemeye katkısı çok az olacaktır. Yeterli düktiliteyi sağlamak için plastik mafsallarda bölgedeki iç kuvvetler donatı ile sağlanmaktadır.

2.2.2 Kesme davranışı

Betonarme perde duvarların kesme dayanımı devrilme momentinden kaynaklanan eksenel çekme kuvvetinin etkisiyle oldukça önemlidir. Perde duvardaki bu gerilmeler karşılanmazsa, perde düşey eksenine ile 45 derece açı yapacak şekilde diyagonal çatlaklar oluşabilir. Donatıdaki akma meydana gelmeden önce perdede diyagonal basınç göçmesi olmaması için bu kesme gerilmeleri mutlaka kontrol altına alınmalıdır. Perde duvarların kesme dayanımı (V_n), donatının kesme dayanımı (V_s) ve betonun kesme dayanımının toplamıdır.

$$V_n = V_c + V_s \quad (1)$$

Betonun kesme dayanımı

$$V_c = v_c b d \quad (2)$$

$$v_c = 0.27 \sqrt{f_c} + (N_u / 4A_g) \quad (3)$$

Burada V_c beton kesme gerilmesi, b eleman genişliği ve d anlamlı yüksekliği, f_c beton basınç dayanımını, N_u aksel yükü ve A_g kesit alanını temsil etmektedir.

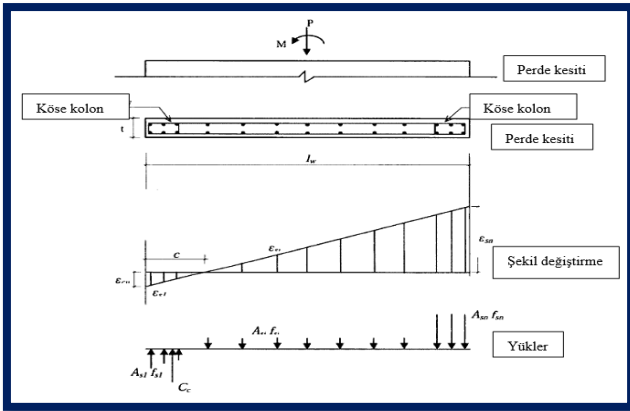
Donatının kesme dayanımı

$$V_s = A_s f_y \left(\frac{d}{s} \right) \quad (4)$$

burada A_s donatı alanını, f_y donatı akma dayanımını, s iki donatı arasındaki mesafeyi göstermektedir.

Eğilme çatlakları ve diyagonal çatlaklar düşey donatının da akması ile artan diyagonal çatlak genişliği ile birleşir. Daha sonra bu çatlaklar beton içerisinde veya agrega fazında ilerlemeye devam edecektir. Sonuç olarak yatay donatılardaki kesme gerilmeleri artarak perde duvar kesme dayanımına ulaştığında, perde tabanında plastik mafsallar oluşacaktır. Aksel çekme ve eğilmenin birlikte etkimesi ile perde duvar eğilme donatılarında (düşey donatılar) akmanın artması ile daha yüksek deplasmanlar oluşacaktır. Dolayısıyla perde duvardaki kesmenin olumsuz etkisi kesme gerilmelerinin artması ile doğru orantı, aksel basınç kuvveti ve perde duvar H/L oranı ile ters orantılıdır.

Giriş bölümü ve diğer bölümlerin ana metinleri, "Times New Roman" yazı tipi ve 10 punto ile hazırlanmalıdır. Paragraf başlarına 0.50 cm girinti bırakılarak başlanmalıdır. Paragraflar arasında satır aralığı veya paragraf boşluğu kullanılmamalıdır.

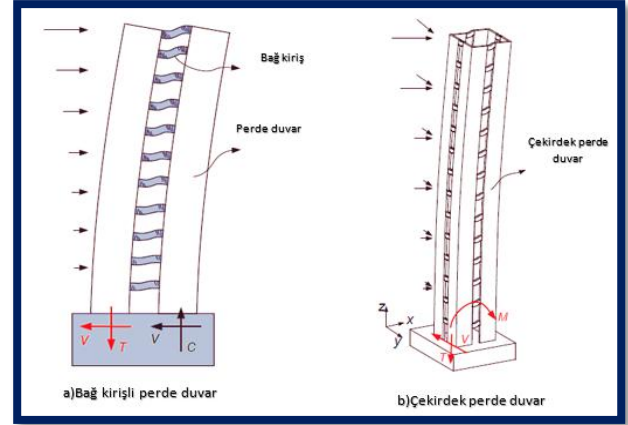


Şekil 3. Eğilme ve aksel yük altında perde duvar

2.2.3 Çekme kuvveti

Betonarme perde duvarların özellikle yüksek katlı binalarda yanal yüklerin hemen hemen hepsini karşıladığı bilindik bir gerçektir. Dolayısıyla perde duvar kesme kuvveti, eğilme momenti ve az da olsa aksel basınç kuvveti karşılamaktadırlar. Yukarıda bahsedilen kuvvetlerden başka perde duvarlar güçlü zemin hareketleri altında aksel çekme kuvveti ve kesme kuvveti kombinasyonuna da maruz kalabilirler. 2010 yılındaki Şili depreminde çekme ve kesme kuvveti kombinasyonunun betonarme perde duvarların göçmesinde kritik bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Bu olaya örnek vermek gerekirse; yüksek bağ kiriş oranına sahip bağ kirişli bir perde duvarda perde parçalarından bir tanesi yanal yük nedeniyle çekme

kuvvetine maruz kalmaktadır (Şekil 4.a). Diğer bir örnek ise çekirdek perde duvarlar çift yönlü zemin hareketlerine maruz kaldıklarından perde duvar yan parçaları X doğrultusundaki yanal yükten dolayı yüksek oranda devrilme momenti ve bu devrilme momentinden kaynaklı çekme gerilmeleri oluşabilmektedir. Ayrıca Y doğrultusundaki yanal yükten dolayı da kesme kuvvetine maruz kalacaklardır (Şekil 4.b).



Şekil 4. Perde duvarlarda çekme kuvveti

Geçmiş yıllarda betonarme perde duvarlar üzerinde yapılan çalışmalar [10,11] göstermiştir ki, aksel çekme kuvveti perde duvar dayanımını azaltmakta ve de yanal kuvvetler perde yüksekliği boyunca tekrar dağılmaktadır. Bundan dolayı yüksek katlı binalarda sismik dizayn yapılırken bağ kirişli perde duvarların çekme gerilmelerine maruz kalabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Perde duvara etki edecek aksel çekme oranı (EÇÖ), aksel basınç oranından (EBO=Eksenel basınç kuvveti/($f_c A_g$)) farklı olmaktadır. Aksel basınç oranı sadece perde duvar kesit alanı ve beton basınç dayanımına bağlı tek bir formülle ifade edilirken, aksel çekme oranı hem beton hem de donatı için ifade edilmektedir.

$$EÇÖ_{\text{beton}} = \frac{T_n}{\left(A_c + \frac{A_s E_s}{E_c} \right) f_t} \quad (5)$$

$$EÇÖ_{\text{donatı}} = \frac{T_n}{A_s f_y}$$

Burada T_n aksel çekme kuvvetini, A_c ve A_s sırasıyla perde duvar beton kesit ve düşey donatı (köşe kolon düşey donatıları da dâhil) alanını, E_s ve E_c sırasıyla beton ve donatı elastisite modülünü, f_y ve f_t sırasıyla donatı akma ve beton çekme dayanımını göstermektedir.

Betonarme perde duvarlarda çekme kuvveti hesaplanırken çatlak oluşmadan önceki ve çatlak oluşuktan sonraki olmak üzere iki durum göz önünde bulundurulmalıdır. Birinci durumda çatlak oluşmadan önce çekme kuvveti hem beton hem de düşey donatı tarafından karşılanmaktadır. Yani perde duvar çekme kapasitesi ($T_{\text{çekme}}$) kritik çekme kuvveti (T_{cr}) değerinden küçüktür ($T_{\text{çekme}} < T_{cr}$). Bu durumda perde duvar çekme kapasitesi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$T = (E_s A_s + E_c A_c) \varepsilon_{sm} \quad (6)$$

$$T_{cr} = \left(\frac{f_t}{E_c} - \varepsilon_{t,sh} \right) (E_s A_s + E_c A_c) \quad (7)$$

$$\varepsilon_{t,sh} = \frac{\rho n}{1 + (n - 1)\rho} \varepsilon_{sh} \quad (8)$$

$$\mu_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} \quad (12)$$

ε toplam şekil değiştirmeyi, ε_y donatının aktığı andaki şekil değiştirmeyi göstermektedir.

Buradan da anlaşılacağı üzere donatılandırılmamış betonun basınç altında şekil değiştirme düktilitesi oldukça sınırlıdır. Bu yüzden şekil değiştirme betonun düktilitesinin artırılması için uygun bir şekilde donatılandırılmalıdır.

2.2.4.2 Dönme düktilitesi

İnelastik yapı deformasyonunun en önemli unsurlarından bir tanesi de plastik mafsal bölgesindeki dönmedir. Dönme (eğrilik) aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$\mu_\theta = \frac{\theta_m}{\theta_y} \quad (13)$$

θ_m maksimum dönmeyi θ_y akma anındaki dönmeyi göstermektedir.

2.3 Betonarme perde duvarların plastik mafsal yaklaşımı ile değerlendirilmesi

Perde duvarların davranışı üzerinde plastik mafsal bölgesinin oldukça belirleyici bir etkisi vardır. Plastik mafsal eğilme etkisindeki taşıyıcı elemanlarda deformasyon ve yük taşıma kapasitesini belirleyen plastik deformasyonların yığıldığı bölge olarak tanımlanır. Yığılmalı plastik mafsal kabulünde ise perde duvarların inelastik davranışı plastik mafsal bölgesi boyunca değil de plastik mafsal uzunluğu diye tabir edilen bölgede yoğunlaştığı yaklaşımı ile değerlendirilmektedir. Plastik mafsal bölgesindeki betonda meydana gelecek çatlaklar perde duvarın göçme mekanizması üzerinde etkili olmaktadır.

Perde duvarlarda plastik mafsal yaklaşımı ile değerlendirilmesi için perde duvar davranışında belirleyici rol oynayan plastik mafsal bölgesindeki davranış oldukça önemlidir. Dolayısıyla perde duvarlarda plastik mafsal bölgesinin tanımlanması oldukça önemli fakat bir o kadar da zor bir iştir. Fakat gerek literatürde gerekse de ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde perde duvarların plastik mafsal uzunluğu hakkındaki formüller arasında farklılıklar mevcuttur. Bununla birlikte geçmiş yıllarda yürütülen deneysel programlar ışığında araştırmacılar kendi deney sonuçlarını baz alarak formülasyonlar üretmişlerdir.

Betonarme perde duvarlarda sık donatı düzeninden dolayı problemlerle karşılaşmaktadır. Bu problemin önüne geçebilmek için birkaç yaklaşım mevcuttur. Bu yaklaşımlardan biri Rad ve Adebar [12] tarafından önerilen düktil duvar yaklaşımıdır. Düktil duvar yaklaşımında perdenin yüksekliği boyunca herhangi bir noktada donatının akmasının olabileceği yaklaşımıdır. Fakat bu yaklaşımda perde yüksekliği boyunca donatıların düktil bir şekilde detaylandırılmaları gerektiği için ekonomik değildir. Diğer bir yaklaşım ise perde tabanında plastik mafsal bölgesine ilaveten, perde orta bölgesinde de plastik mafsal oluşmasına izin verilen yaklaşımdır [13]. Bu yaklaşımla perde duvar orta noktasında ikinci mertebe momentlerin sebep olabileceği

Burada E_s ve E_c sırasıyla çelik ve betonun elastisite modülünü, A_s düşey donatı kesit alanını, A_c perde duvar beton kesit alanını, ε_{sm} eksenel çekme kuvvetine karşılık gelen şekil değiştirmeyi, $\varepsilon_{t,sh}$ betondaki büzülmeden dolayı donatıda oluşan ve betonla donatı arasındaki şekil değiştirmeyi, ρ düşey donatı oranını, $n=E_s/E_c$, ε_{sh} 0.0004 ile 0.0008 arasında değişen katsayıyı göstermektedir.

İkinci durumda çatlak oluştuğundan sonra perde duvarda çatlak oluşan ve oluşmayan bölgelere ayrılmaktadır. T_y düşey donatının akma noktasına karşılık gelen çekme kuvvetini göstermek üzere $T_{cr} < T < T_y$ durumudur. Çatlak oluşan bölgelerde çekme kuvvetleri düşey donatılar tarafından karşılanırken çatlak olmayan bölgelerde beton ile donatı arasındaki adreansın da etkisiyle oluşan matris tarafından karşılanır. Bu durumda perde duvar çekme kapasitesi çatlak olmayan ve çatlak oluşan bölge olmak üzere iki şekilde hesaplanır. Çatlak olmayan bölgedeki çekme kuvveti:

$$T = (E_s A_s + E_c^{cr} A_c) \varepsilon_{sm} \quad (9)$$

$$E_c^{cr} = \frac{\sigma_{ct}}{\varepsilon_{sm}} = \frac{f(\varepsilon_{sm})}{\varepsilon_{sm}} \quad (10)$$

formülleri ile hesaplanır. Burada E_c^{cr} betonun sekant elastisite modülünü, σ_{ct} betonun ortalama çekme gerilmesini, ε_{sm} betonun ortalama çekme şekil değiştirmesini göstermektedir.

Çatlak oluşan bölgedeki çekme kuvveti ise aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$T = A_s \sigma_s = A_s f(\varepsilon_{sm}) \quad (11)$$

Burada σ_s çatlak oluşan bölgedeki donatıda oluşan çekme gerilmelerini göstermektedir.

2.2.4 Düktilite

Bir yapıdaki hasarı minimum seviyeye indirmek için yapı elastik ötesi deformasyon yapabilme kapasitesine sahip olmalıdır. Başka bir deyişle düktilite elemanın yük altındaki büyük deformasyonlar yapabilme kabiliyeti veya enerji sönmeme yeteneği olarak da tanımlanabilir. Yapı elemanın düktilitesi karşımıza şekil değiştirme, dönme veya deplasman olarak çıkabilir.

2.2.4.1 Şekil değiştirme düktilitesi

Şekil değiştirme dayanımda önemli bir azalma olmaksızın malzeme veya elemanın inelastik davranmasıdır. Şekil değiştirme düktilitesini aşağıdaki formülle tanımlamışlardır.

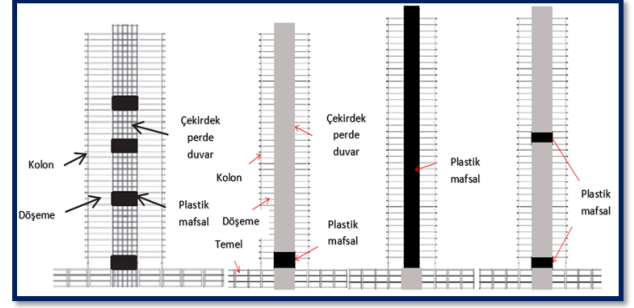
hasar önlenabilir. Bir diğer yaklaşım ise plastik mafsalların perde tabanında olduğu geleneksel plastik mafsallı yaklaşımdır.

Dazio vd. [14] çalışmalarında donatı oranının, kullanılan boyuna donatının duktilite özelliklerinin betonarme perde duvarların deformasyon kapasitesine ve göçme mekanizmasına etkisini incelemişlerdir. Bununla birlikte betonarme perde duvarların plastik mafsallı analizini yapmışlardır. Boyuna donatı oranının azalması ile perde duvarlarda eğilme-kesme çatlakları da azalmıştır. Boyuna donatı duktilite özelliklerinin çatlak oluşumu ve çatlak dağılımı üzerinde etkisi mevcuttur. Ayrıca donatı oranının azalması ile perde duvarın deformasyon kapasitesinin azaldığını belirtmişlerdir. Hatta bu olay donatının duktilite özelliklerinin azalması ile perde duvarın deformasyon kapasiteleri daha da azalmıştır.

Ahmed [15] perde duvarlarda plastik mafsallı üzerine yapmış olduğu çalışmada 40 katlı, ortası çekirdek perde duvarlı model binada dört farklı plastik mafsallı yaklaşımı ile perde duvar davranışını değerlendirmiştir. Birinci yaklaşımda 120 m yüksekliğindeki model binada klasik mafsallı yaklaşımı ile plastik mafsalların perde tabanında oluşmasına izin verecek şekilde modellemiştir (SPH (single plastic hinge model)). Model binada bu yaklaşım ile plastik mafsalları temel seviyesinden sonra birinci ve ikinci kat seviyelerine yerleştirmiştir. İkinci yaklaşımda plastik mafsalların tüm perde yüksekliği boyunca modellemiştir (DW (ductile wall)). Üçüncü yaklaşımda plastik mafsalların perde orta noktasında (20 ve 21. katın arasına) ve de perde tabanında oluşmasına izin verecek şekilde modellemiştir (DPH (dual plastic hinge)). Dördüncü yaklaşımda ise yazarın önerdiği çoklu plastik mafsallı yaklaşımını (MPH (multi plastic hinge)) modellemiştir. Bu yaklaşımda periyoda ve frekansı farklı dört moda göre maksimum momentin olduğu perde duvar boyunca dört farklı bölgeye (1-2, 12-13, 21-22 ve 28-29 kat seviyesi orta noktaları) plastik mafsallı tanımlamıştır (Şekil 5). Plastik mafsallı yerleştirmeden kasıt bu bölgelerin inelastik, diğer bölgelerin elastik davranış sergileyecek şekilde modellenmesidir. Dört farklı plastik mafsallı yaklaşımı zaman tanım alanında yöntemle sismik kuvvetler altında denenmiştir. Deplasman, plastik mafsallı dönme açısı, kesme deformasyon açısı, eğilme momenti kapasitesi ve kesme kuvveti kapasitesi incelenmiştir. Çalışma sonucunda önerilen çoklu plastik mafsallı yaklaşımının kesme ve eğilme momenti hasarı daha az olmuştur. MPH yaklaşımı ile hesaplanan eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri SPH yaklaşımı ile hesaplanan değerlerle karşılaştırıldığında sırasıyla %33 ve %17 daha düşüktür. Ayrıca MPH yaklaşımı ile DPH yaklaşımı karşılaştırıldığı zaman perde yüksekliğinin 1/3 ve 2/3 seviyesinde eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri sırasıyla %40 ve %25 daha düşüktür.

2.4 Betonarme perde duvarlarda lifli beton uygulamaları

Betonarme perde duvarlarda yürütülen çalışmaların bir bölümü de kullanılan malzeme (beton) üzerine yoğunlaşmıştır. Kendiliğinden yerleşen beton [16], yüksek dayanımlı beton, yüksek performanslı beton, lifli beton vb. ve bu özel beton türlerinin birlikte kullanılması karşımıza



Şekil 5. Perde duvar plastik mafsallı yaklaşımları

çıkılmaktadır. Özellikle geçtiğimiz yıllarda lifli betonların artan bir trendi vardır. Çelik, karbon, cam, polipropilen vb. malzemelerin yüksek çekme dayanımı, enerji sönümleme kapasitesinden ve duktilitesinden dolayı tercih edilen malzemelerdir. Ganesan ve Indira [17] perde yükseklik/uzunluk oranı 3 olan yüksek performanslı ve çelik lifli yüksek performanslı betondan ürettikleri perde duvarların tekrarlı tersinir yüklemeler altında davranışını incelemişlerdir. Çelik lif oranının hacimce %0.25 ve %0.5 olarak tercih etmişlerdir. Yüksek performanslı betona %0.25 ve %0.5 oranında çelik lif eklenmesinin referans numunesine göre (lif katkısız numune) ilk çatlak oluşumu için gereken yükü sırasıyla 1.84 ve 1.76 kat artmıştır. Dolayısıyla çelik lif eklenmesi perde duvarların yük taşıma kapasitesini arttırdığı yorumunu yapabiliriz. Bununla birlikte lifli yüksek performanslı perde duvarlar referans numunesine göre daha fazla enerji sönümleme kapasitesine sahip olmuşlardır. Fakat çelik lif oranını arttırmak enerji sönümleme kapasitesini düşürmüştür. Yani %0.25 lif eklenen numune referans numunesine göre %48 daha fazla enerji sönümlemesine karşın lif oranının %0.5'e çıkarılması bu oranı %41 seviyesine düşürmüştür. Ayrıca çelik lif eklenmesi maksimum çatlak genişliğini de azaltmıştır.

Carrillo vd. [18] çalışmalarında hafif betonlar ürettikleri düşük beton dayanımına sahip betonarme perde duvarların sismik davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Bununla birlikte yazarlar perde duvar kalınlığını seçerken özellikle Latin Amerika ülkelerinde bir veya iki katlı binalarda tercih edilen 100 mm perde kalınlığını seçmişlerdir. Hafif betonlu perde duvarların rijitlik, enerji sönümleme kapasiteleri, kesme dayanımları ve deformasyon kapasiteleri gibi performanslarını belirleyen parametreleri normal dayanımlı perde duvarlarla kıyaslamışlardır. Bunun için on adet normal dayanımlı (beton basınç dayanımı ortalama 20 MPa) ve on adet düşük dayanımlı (beton basınç dayanımı ortalama 15 ile 20 MPa arasında) perde duvar ürettirmişlerdir. Perde duvarlar sarsma tablası üzerinde test edilmiştir. Ayrıca boyuna donatı oranının (%0.125 ve %0.250), boyut etkisinin (0.5 ve 1.0 ve 2.0) ve yükleme tipinin (sarsma tablası, monolitik artan ve tekrarlı tersinir yükleme) normal ve hafif betonlu perde duvar davranışına etkisini incelemişlerdir. Hem normal hem de düşük dayanımlı betonlu perde duvarların hemen hemen hepsinde diyagonal basınç kırılmaları gözlemlenmiştir. Normal betonun hafif betona nazaran mekanik özelliklerinin daha fazla olmasına rağmen (örneğin elastisite modülü %11, basınç dayanımı genel olarak 38 MPa'dan fazla) kesme

dayanımı, rijitlik, enerji sönmleme kapasitesi, deformasyon kapasitesi parametreleri hafif betonlu perde duvarlarda daha yüksek çıkmıştır.

Zhao vd. [19] çalışmalarında lifli betonla ürettiği bağ kirişli betonarme perde duvarların sismik davranışını deneysel olarak incelemiştir. Perde duvarların üretiminde hacimce %1 ve %2 oranında çelik lif kullanılmıştır. Geleneksel betonla lifsiz üretilen kontrol numunesinin yanı sıra donatı oranı değiştirilmeden hacimce %1 ve %2 çelik lifli beton kullanılan bağ kirişli perde duvarlar üretilmiştir. Perde duvarların dayanım, deformasyon ve rijitlik azalması, enerji sönmlemesi ve çatlak dağılımı parametreleri incelenmiştir. Çelik lif kullanımı bağ kirişli perde duvarlarda çatlak dağılımı üzerinde oldukça olumlu bir etkiye sahiptir. Bununla birlikte lif oranının artırılması çatlak dağılımını azaltmıştır. Çelik lif kullanılması deformasyon ve yanal rijitlik kapasitesini arttırmıştır.

Lu vd. [20] çelik lifli yüksek dayanımlı betondan ürettikleri perde duvarların tekrarlı tersinir yüklemeye altında davranışını incelemiştir. Perde duvarların üretiminde ayrıca köşe kolon bölgelerine I profiller kullanmışlardır. Yüksek dayanımlı betonda çelik lif oranının (hacimce %1,%1.5 ve %2) perde duvar davranışına etkisini deneysel olarak incelemiştir. Lif kullanımı perde duvarlardaki çatlak dağılımı üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Çatlak dağılımı üzerinde en etkili lif oranının hacimce %1.5 olduğu perde duvarda elde edilmiştir. Çelik lif kullanımı ilk çatlak görüldüğü yük seviyesini arttırmıştır. Ayrıca lif oranının %1 ve %1.5 oranında kullanılması nihai yük dayanımını pek fazla etkilememesine rağmen %2 oranına çıkarılması taşıma kapasitesini arttırmıştır. Benzer şekilde lif kullanılması düktilité üzerinde artırıcı bir etkiye neden olmuştur. En fazla artış %2 lif oranının kullanıldığı perde duvarda elde edilmiştir. Yüksek dayanımlı betonda hacimce %2 oranında çelik lif kullanılması en iyi sonuçların elde edilmesine neden olmuştur.

Hung ve Hsieh [21] ultra yüksek performanslı betondan imal edilen perde duvarların tekrarlı tersinir yüklemeye altında davranışlarını incelemiştir. Ultra yüksek performanslı betona hacimce %0.75 ve %1.5 oranında çelik lif eklenmesi ile üretilen betonarme perde duvarların davranışını değerlendirmişlerdir. %0.75 oranında çelik lif eklenmesi enerji sönmleme kapasitesi, deformasyon kapasitesini arttırmıştır. Fakat çelik lif eklenmesi özellikle kesme dayanımını arttırmıştır. Çelik lif oranının %1.5 oranına çıkarılması söz konusu değerlerin azalmasına neden olmuştur.

2.5 Betonarme perde duvarların kompozit malzeme açısından değerlendirilmesi

Çelik plakalı perde duvarlar genellikle deprem riskinin fazla olduğu bölgelerde iyi bir yanal yük taşıma performansı sergilediği için tercih edilebilir. Bu tür perde duvarlar bu avantajının yanı sıra düşük bir yangın dayanımının olması önemli bir dezavantajdır. Artan sıcaklık ile perde duvar içerisindeki çelik plakanın burkulma dayanımı gittikçe azalacaktır [22]. Bu da yanal rijitliğin ve dayanımın düşmesine sebep olacaktır. Bu sorunun önüne geçebilmek için yani çelik plakanın gerek yangından korumak gerekse

de burkulmasını önlemek için kompozit perde duvar sistemi fikri ortaya çıkmaktadır.

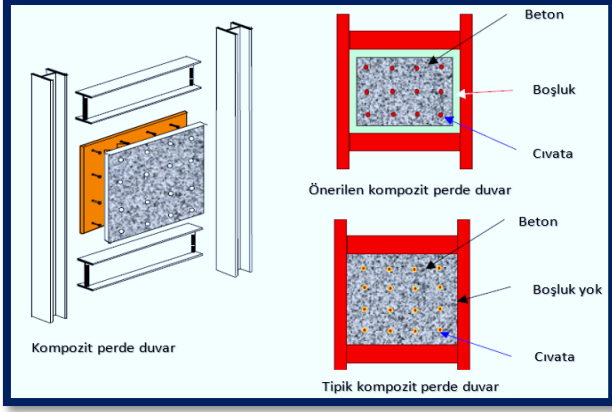
Artık günümüzde ülkelerde gelişen teknoloji, artan nüfus, şehrin simgesi vb. sebeplerden dolayı ultra yüksek binaların yapımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ultra yüksek binalarda perde duvarlar özellikle sismik kuvvetlerin karşılanması için çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu tarz binalarda ise perde duvarlar klasik dolu gövdeli perde duvarların yanı sıra bina merkezinde konumlandırılan çekirdek perde duvar (core wall) uygulaması yapılabilmektedir.

California Berkeley Üniversitesi'nde Astanesh-Asl [23] çelik ve beton kompozit perde duvarlarda yenilikçi bir yaklaşımla bir çalışma yürütmüştür. Geleneksel beton ve çelikten oluşturulan kompozit perde duvarların yanı sıra beton ile çelik plaka arasına boşluk bırakılarak oluşturulan perde duvar sisteminin sismik davranışını incelemiştir. Perde duvar kalınlığı, çelik plaka kalınlığı, yatay ve düşey donatı oranı ve kolon kiriş boyutlarının aynı olduğu geleneksel ve yenilikçi perde duvarların davranışını karşılaştırılmıştır (Şekil 6). Sismik yükler altında Astanesh-Asl tarafından önerilen kompozit perde duvarın geleneksel kompozit perde duvara göre daha düktil davranış sergilemiştir. Fakat perde duvarın dayanımına baktığımız zaman geleneksel kompozit perde duvarın dayanımı daha fazla değere ulaşmıştır. Geleneksel ve önerilen kompozit perde duvarların rijitlikleri hemen hemen aynı değere ulaşmıştır. Her iki perde duvar sisteminde de çelik plakaların akmadan önce burkulması önlenmiştir. Bu iki tip perde duvar sistemi arasındaki en önemli fark beton bölümünde gözlemlenmiştir. Geleneksel kompozit perde duvardaki beton tam anlamıyla moloz yığınının dönmüştür. Hemen hemen beton bölümünün her yerinden donatılar görülebilmektedir. Önerilen perde duvar sisteminde betondaki zarara sınırlı ölçüde olmuştur. Sonuç olarak yazar bu iki kompozit perde sisteminin dayanımda ciddi bir azalma olmadan yanal yük kapasitesinde oldukça iyi olduğu belirtilmiştir.

Park ve Yun [24] çalışmalarında çelik bağ kirişli hibrid perde duvarların enerji sönmleme kapasitelerini, göçme mekanizmalarını, dayanımlarını, histeristik tepkilerini ve etkili ankraj boylarını incelemiştir. Çalışmalarında bağ kirişlerin serbest açıklıklarını 300, 400, 600 mm ve bağ kiriş yüksekliklerini de 350 ve 244 mm olarak tasarlamışlardır (Şekil 7). Serbest açıklığı en kısa olan numunenin diğer iki numuneye nazaran daha yüksek bir enerji yutma kapasitesine eriştiğini bildirmişlerdir. Çelik bağ kirişli perde duvarlar dizayn edilirken hem kesme kuvveti hem de eğilme momentine karşılık serbest açıklık boyunun kısa tutulması gerektiğini vurgulamışlardır.

Çelik ve beton kompozit perde duvarlar genellikle duvar kesitinin üst kısmına yapı çeliğinin ilave edilmesi şeklinde donatılandırılırlar. Bu perde duvarlar özellikle deprem gibi yanal yükler altında düşük deplasman seviyelerinde yanal yüklerle karşı koyan yapı elemanları olarak bilinirler. Bu tarz kompozit perde duvarların dizayn ilkeleri için özel uygulamaların ve şartnamelerin gerektiği unutulmamalıdır. Bu şartnamelerde sismik yükler altındaki perde duvarların köşe elemanları saran etriyelere gereksinimleri ve eksenel yük seviyeleri gibi limitler belirtilir. Bununla birlikte

Eurocode-8’de üç tip kompozit perde duvar tanımlanmıştır (Şekil 8). Çelik ve beton kompozit perde duvarların, beton ve çelik arasındaki birleşim, kesme çivisi (shear stud) ve beton ile çeliğin non-linear davranışından dolayı perde duvarın da davranışı non-lineerdir [25].



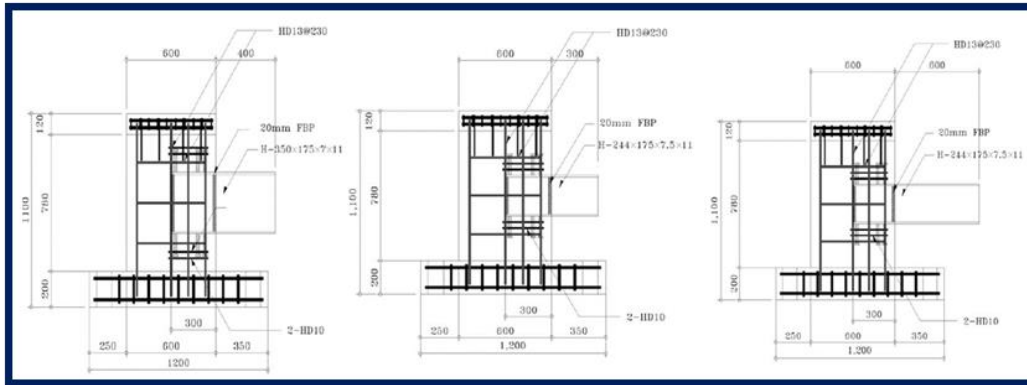
Şekil 6. Astaneh-Asl [23] deney numuneleri

Dan vd. [25] deneysel çalışmalarında kompozit perde duvar elemanlarının doğrusal olmayan (non-linear) davranışının analizi ve çelik profiller ile beton arasındaki bağlantıya odaklanarak farklı şekillerde çelik profillerin duvarların davranışına (çatlak oluşuncaya kadar ki perde duvar performansı, maksimum yük, deformasyon kapasitesi, enerji sönümleme kapasitesi) etkisini incelemiştir. Bu amaçla bir adet referans numune olmak üzere altı adet 1/3 ölçekli çelik + beton kompozit perde duvar üretmişlerdir. Perde duvarların köşe kolon bölgelerinde; birinci perde duvarda iki adet kutu profil, ikinci perde duvarda I profil, üçüncü perde duvarda iki adet I profile ek olarak bir adet de orta bölgede I profil, dördüncü perde duvarda iki adet H profil ve beşinci perde duvarın dış yüzeyine iki adet I profil yerleştirilmek üzere üretilmişlerdir. Çalışma sonucunda

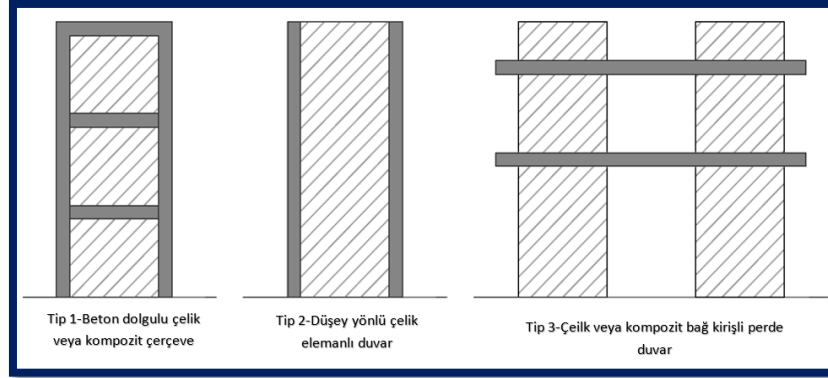
çelik profilin şekli, kesit alanındaki pozisyonu perde davranışı üzerinde etkili olmuştur. Perde duvarlarda çelik profil eklenmesi duvarların daha düktil davranmasına neden olmuştur. Bununla birlikte köşe kolon bölgelerine kutu profil yerleştirmenin diğer numunelere nazaran yük taşıma kapasitesini daha fazla arttırmıştır. Bunun yanı sıra beşinci numunenin daha fazla enerji sönümlediği belirtilmiştir.

Nie vd. [26] çelik ve beton kompozit perde duvar alışmalarında yeni bir uygulama üzerinde durmuşlardır. İki çelik plaka arasında betonla doldurulmuş ve perde duvar köşelerinde çelik tüplerden köşe kolonlar oluşturmuşlardır. Beton ile çelik plakaları çivilerle (stud) bağlamışlardır. Ayrıca perde duvar gövdesinde bölmeler oluşturmak için düşey berkitmeler ve bu berkitmeleri de bir birine bağlayan birleşim levhaları kullanmışlardır. Önerilen kompozit perde duvarda çelik plakaların kesit alanı, beton basınç dayanımı, köşe kolonlardaki çelik plakanın kalınlığı, perde duvar kenarlarındaki çelik plaka kalınlığı ve kesme açıklığı oranı parametrelerinin yüksek eksenel yük altında sismik davranışları incelenmiştir. Önerilen perde duvar sistemindeki bütün numuneler oldukça iyi bir enerji sönümleme kapasitesi ve ötelenme oranı performansı sergilemişlerdir. Önerilen perde duvar sisteminde yüksek dayanımlı beton kullanılması da davranış üzerinde olumlu bir etkiye neden olmuştur.

Beton ve çelik kompozit perde duvarların avantajlarından bir kaç da özellikle Japonya ve Çin gibi deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerde yüksek rijitlik ve düktilitesidir. Bu tarz perde duvarlara uygulanan yeni bir yaklaşım ise kompozit perde duvarların iç bölgelerine yerleştirilen diagonal destekleyici aparatlardır. Bu aparat sayesinde Astaneh ve Zhao’ nun [27] deneysel çalışmalarına göre çelik donatının burkulması, betonun ezilmesi ve çekme çatlaklarının sayısı azalmaktadır. Çelik ve beton kompozit perde duvarların yaygın bir şekilde kullanılmasına rağmen çelik ve beton kombinasyonunun karmaşıklığı bu tip perde duvarların davranışının anlaşılmasını zorlaştırmaktadır



Şekil 7. Park an Yun [24] çalışmalarındaki perde duvar numuneleri



Şekil 8. Eurocode 8'e göre beton çelik kompozit perde duvarlar

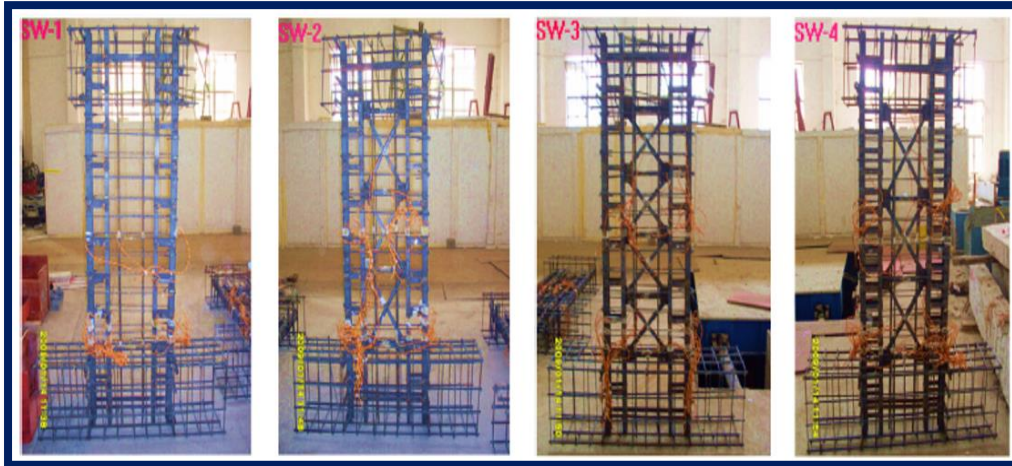
Lan vd. [28] çelik ve beton kompozit perde duvar sistemine farklı bir şekilde yaklaşmışlardır. Perde geometrisi ve yatay ile düşey donatıların sabit kalmak koşuluyla imal ettikleri dört adet kompozit perde duvarın tekrarlı-tersinir yükler altında denenmiştir.

Kompozit perde duvarlar sağ ve sol köşelerine karşılıklı U profillerden oluşturmuşlardır. Dört adet perde duvardan bir tanesi kontrol numunesi olarak imal edilmiştir. Diğer iki perde duvar sırasıyla üç ve dört tane "X" çelik profil kullanmışlardır. Dördüncü perde duvar ise ikinci perde duvarla aynı sayıda "X" çelik profil kullanılmasının yanı sıra köşe kolonlarda kullanılan çelik profil oranı azaltılmıştır (Şekil 9). Kompozit perde duvarlarda "X" çelik profillerin eklenmesi gerek maksimum yatay kuvvet kapasitesinde gerekse de maksimum yatay kuvvete karşılık gelen deplasman değerlerinde artışa sebep olmuştur. Böylece "X" çelik profillerin eklenmesi perde duvarların daha duktıl bir davranış sergilemesine neden olmuştur. "X" çelik profillerin sayısının artırılması (SW2 numunesinde 3 adet, SW3 numunesinde 4 adet) yatay kuvvet kapasitesinde ve deplasmanda fazla bir etkiye sahip olmamasına rağmen rijitlik azalmasında oldukça etkili olmuştur. Dört adet "X" çelik profil kullanılan perde duvar üç adet "X" çelik profil kullanılan numuneye göre rijitliğinin azalması daha düşük seviyelerde kalmıştır. Ayrıca köşe kolonlardaki çelik profillerin azaltılmasının benzer şekilde rijitlik azalması

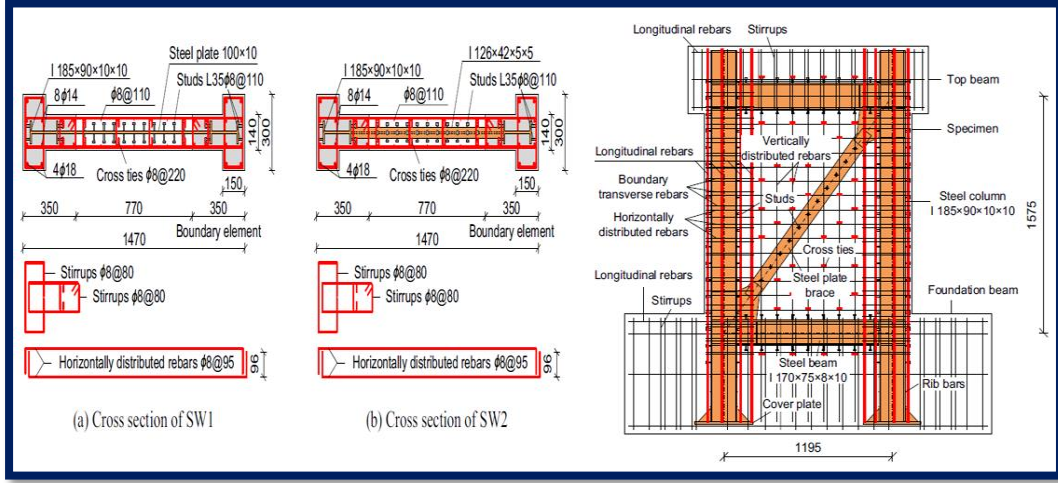
üzerinde artırıcı bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte kompozit perde duvarların çatlak dağılımları incelendiğinde "X" çelik profilin eklenmesi perde duvardaki göçme şeklini eğilme ile kesme formunda göçmesine neden olmuştur

Ji vd. [29] Çin' in Beijing kentinde 528 m yüksekliğindeki ultra yüksek bir binayı modellemişlerdir. Çalışmalarında aynı geometri ve donatıya sahip fakat tek çelik çapraz levhalı ve I profil gömülü iki farklı perde duvar durumunu modellemişlerdir (Şekil 10). İki numunede de göçme hasarının benzer şekilde geliştiğini bildirmişlerdir. Tekrarlı-tersinir yüke maruz kalan her iki numunedeki çelik çaprazlarda akma olduktan sonra burkulma meydana gelmiştir. Fakat çelik çaprazlı numunede burkulma üst kısımlarda oluşurken diğer numunede burkulma orta kısımda oluşmuştur. İki yönteminde uygulamaya yönelik olarak bir birinin alternatifi olarak kullanılabileceği bildirilmiştir.

Perde duvarların kullanım alanlarına farklı bir pencereden bakacak olursak; nükleer santraller gibi güvenliğin çok önemli olduğu yapılar karşımıza çıkmaktadır. Geçmiş yıllarda yapılan bazı çalışmalar perde duvarların nükleer santral yapılarında nükleer koruma veya sismik performansını arttırmak için kullanılması gerektiğini bildirmişlerdir. Bu amaçla Li ve Li [30] çelik ve betonarme



Şekil 9. Lan vd. [24] deney numuneleri



Şekil 10. Ji vd. [29] çalışmalarındaki perde duvarı

kompozit perde duvarların nükleer santrallerde çelik levha kalınlığının, düşey yük ve beton sınıfının sismik davranış performansını deneysel olarak ele almışlardır. Deneysel numuneleri artan yanal yük altında elastik bölgede benzer davranış sergilemişlerdir. Elastik davranışın sona erdiği andan itibaren perde duvar taban bölgelerinde başlayan çatlaklar perde duvar boyunca yayılmıştır. Bu aşamada en iyi çatlak performansını betonarme perde duvar numunesi göstermiştir. Yük-deplasman eğrisinde maksimum yük aşıldıktan sonra çelik plakalarda yerel burkulmalar ve akmalar meydana gelmiştir. Göçme esnasında çelik ve betonarme kompozit perde duvarlarda eğilme kapasitesi keskin bir şekilde düşüş göstermiştir. Artan düşey yük ise numunelerde nihai dayanımı arttırmıştır. Bununla birlikte levha kalınlığının artırılmasının rijitlik ve nihai dayanım üzerinde oldukça etkili olduğu belirtilmiştir. Levha kalınlığı daha fazla olan kompozit perde duvar daha iyi bir sismik performans sergilemiştir. Diğer yandan beton dayanımının artırılması rijitlik üzerinde etkili bir parametre olmadığı belirtilmiştir. Beton dayanımının artırılması nihai dayanımı arttırmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında kompozit perde duvarlarda (çelik ve betonarme) ilk çatlakla sebep olan kritik eğilme momenti (M_{cr}) değerinin teorik hesaplanabilmesi için ampirik bir bağıntı önerilmiştir. Teorik olarak hesaplanan M_{cr} değeri deneysel M_{cr} değeri ile karşılaştırılmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar oldukça yakındır.

Son yıllarda perde duvar sistemlerinde gelişen teknoloji ile kompozit perde duvarların kullanımı da gündeme gelmiştir. Bu kompozit perde duvarların bir örneği de perde duvar sisteminin orta bölgesine yerleştirilen çelik plaka ve bu plağın bir veya iki tarafının beton ile kaplatıldığı sistemlerdir. Hatta 2005 yılından beri Amerika Birleşik Devletleri yönetmeliğinde yer bulan bu perde duvar sistemi geleneksel perde duvarlara göre daha hafif, perde kalınlığı daha küçük ve daha pratik yapım aşamasına sahiptir. Çelik plakanın burkulması önlediği takdirde yanal yük ve rijitlik seviyesinde önemli bir artış elde edilecektir. Fakat dezavantaj olarak yapıda bazı sebeplerden dolayı (mimari vb.) boşluk bırakılması gerekmektedir. Meghdadian ve

Ghalehnovi [31] boşlukların perde duvar sismik davranışına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu amaçla kompozit perde duvarlarda bırakılan boşluğun etrafında bir numunede 45 derecelik ek donatılar yerleştirilerek kesme kapasitesini arttırmaya çalışılmıştır. Diğer numunede ise boşluğun etrafına çelik plaklar yerleştirilmiştir. Son numunede ise bu iki yöntem beraber kullanılmıştır. Numunelerde çelik plaka eklenmesi enerji sönümleme kapasitesini ve yanal deplasman kapasitesini sırasıyla %20 ve %25 arttırmıştır.

2.6 Betonarme perde duvarlarda FRP uygulamaları

Perde duvarların davranışlarının deneysel olarak incelenmesi 1970'lerde başlamış ve devam eden süreçte iyice yaygınlaşmıştır [32-37]. Geçtiğimiz son on yılda betonarme perde duvarlar üzerinde yürütülen çalışmalara odaklandığımız zaman, sadece perde duvarların yeni yapılarındaki düzenine değil aynı zamanda eski yapılarındaki perde duvarların da onarım ve/veya güçlendirilmesi üzerinde de durulmuştur [38].

Lifli polimer (FRP-fiber reinforced polymer) donatılar beton teknolojisindeki yenilikçi ve önümüzdeki yıllarda kullanımının artmasının beklendiği yapı malzemeleridir. FRP çubukları anizotropik ve akma göstermeksizin yüksek çekme dayanımına sahip malzemelerdir. FRP donatılarının birçok avantajlarından dolayı inşaat sektöründe kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. FRP çubuklarının en büyük avantajlarından bir kaçısı sahip oldukları yüksek yorulma direnci, yüksek düktilitedir. Aramid, karbon, cam vb. FRP çubukların betonarme perde duvarlarda kullanılması ile FRP çubukların göstermiş oldukları lineer gerilme-şekil değiştirme özelliğinden dolayı perde duvarların dayanım ve deformasyon kapasiteleri artmaktadır. FRP çubuklar boyuna veya enine donatı şeklinde kullanılarak özellikle perde duvarların çekme, basınç, kesme ve deformasyon kapasitelerini arttırmaktadır.

FRP çubuklar çekme altında akma göstermedikleri için dolayısıyla akma şekil değiştirmesi değeri de olmamaktadır. Tablo 1' de çelik, aramid, karbon ve cam FRP çubukların çekme kuvvetleri altındaki genel karakteristik özellikleri

gösterilmektedir. FRP çubukların çekme dayanımlarının çubuk çapı ile doğru orantılı olduğu da unutulmamalıdır. Kesme gecikmesinden dolayı bir kesitte merkezdeki FRP çubukları ile kenar bölgelerdeki FRP çubuklar aynı oranda çekme gerilmesine maruz kalmazlar. Literatürde FRP (GFRP, CFRP vb.) donatı düzeni perde duvarlarda kullanımı için herhangi bir yönetmeliğe rastlanılmamıştır.

Tablo 1. FRP çubukların mekanik özellikleri [39]

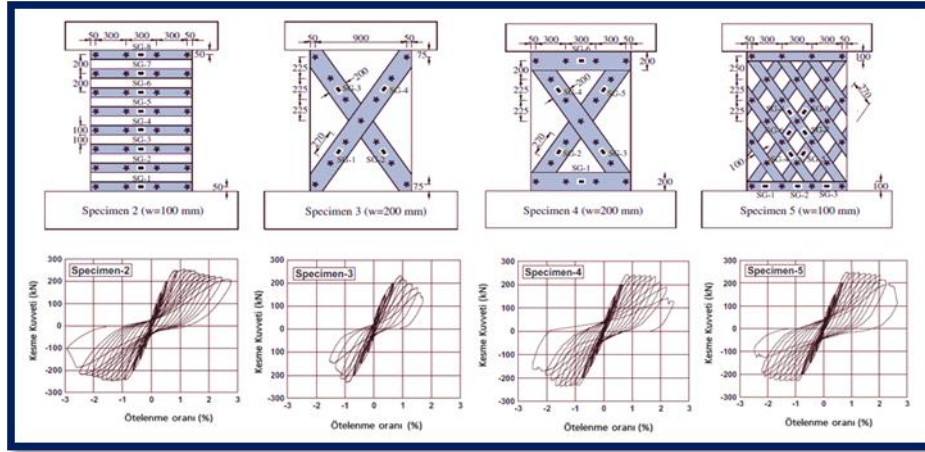
Özellik	Çelik	GFRP	CFRP	AFRP
Akma Dayanımı (MPa)	276-517	-	-	-
Çekme Dayanımı (MPa)	483-690	483-1600	600-3690	1720-2540
Elastisite Modülü (GPa)	200	35-51	120-580	41-125
Akma Şekil Değişirmesi (%)	0.14-0.25	-	-	-
Göçme Şekil Değişirmesi (%)	6-12	1.2-3.1	0.5-1.7	1.9-4.4

FRP çubukların basınç dayanımları ise çekme dayanımlarının yaklaşık %55'i kadardır. Bu husustaki bilgiler daha çok deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ışığında yorum yapılabilmektedir. Basınç altında elastisite modülleri, çekme kuvvetleri altındaki elastisite modülünün yaklaşık %80'i kadardır.

Perde duvarlarda çelik donatı yerine tercih edilebilecek alternatif bir donatı cam lif esaslı polimer (GFRP) çubuklardır. GFRP çubuklar düşük fiyat, yüksek çekme dayanımı, yüksek kimyasal direnç ve iyi bir yalıtım özelliği göstermektedirler. Fakat bu avantajlarının yanı sıra düşük aşınma direnci, basınç altında düşük darbe dayanımı ve düşük çekme elastisite modülü, alkalite gibi dezavantajları da mevcuttur. GFRP çubuklar özellikle korozyonun perde duvarlar için sorun teşkil edebileceği yapılarda kullanımı daha fazla avantaj sağlayacaktır. Mohamed [39] doktora çalışmasında çelik donatıya ilave olarak cam lif polimer esaslı donatı kullanarak betonarme perde duvarların davranışını (ötenleme oranı, enerji sönümleme kapasitesi, göçme modu, eğilmenin hâkim olduğu perde duvardaki eğilme ve kesme deformasyonu) incelemiştir. Çalışmanın ana parametresi olarak perdelerin dayanımı ve deplasman kapasitesi olarak belirlenmiştir. Ayrıca perde duvarın kesme ve eğilme deformasyonları arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için elde edilen deneysel sonuçlar faydalı olmaktadır. Cam polimer esaslı donatılı perde duvarların tekrarlı-tersinir yükler altındaki davranışını değerlendirmek için oldukça faydalı bir çalışmadır. Ayrıca cam polimer donatılı perde duvarların nihai dayanımları ve davranışlarını etkileyen anahtar faktörlerin tanımlanması ve değerlendirilmesi açısından deneysel veriler elde edilmiştir. Çalışma kapsamında üç tanesi farklı yükseklik/uzunluk oranında (2.3-2.9 ve 3.5) perde duvar ile bir adet geleneksel çelik donatılı perde duvar olmak üzere 1/1 oranında dört adet perde duvar imal edilmiştir. Çalışmanın ana parametrelerinden birini oluşturan cam donatılar perde duvarların temeli ile perde tabanı arasında konumlandırılmıştır. Bununla birlikte 12.7 mm çapında cam

polimer esaslı donatılar perde duvar köşe kolonlarında da kullanılmıştır. Cam polimer esaslı donatıların, geleneksel çelik donatılara göre daha düşük elastisite modülü olmasına rağmen çekme dayanımı ve nihai şekil değiştirme kapasiteleri oldukça fazladır ($E_{\text{çelik}}=200$ GPa, $E_{\text{camFRP}}=76$ GPa; $f_{u\text{-çelik}}=400$ MPa, $f_{u\text{-camFRP}}=1400$ MPa; $\epsilon_{u\text{-çelik}}=\%0.2$, $\epsilon_{u\text{-FRP}}=\%2.11$). Cam polimer esaslı perde duvarlar (CPPD) eğilme kapasitesinden önemli bir azalma olmaksızın kesme ve kayma dayanımı üzerinde çelik donatılı perde duvarlar göre artırıcı bir etkiye sahip olmuştur. Ayrıca ötenleme oranının limit değerler arasında kalmasında oldukça etkili olmuşlardır. Cam polimer esaslı perde duvarlar çelik donatılı perde duvarlara göre daha fazla ötenleme oranına ulaşmışlardır. Ayrıca ilk çatlağın görüldüğü yük üzerinde cam donatıların pek fazla bir etkisi olmamıştır. Bununla birlikte cam donatılı perde duvarlarda yükseklik/uzunluk oranı azaldıkça ilk çatlağın oluştuğu yük değeri de azalmaktadır. Eğilme ile kesme çatlağının oluştuğu yük değerine bakıldığında, cam lifli perde duvarlar ile çelik donatılı perde duvarlar arasında pek bir fark olmamıştır. Fakat ötenleme oranında cam donatıların daha fazla etkisi olmaktadır. Hatta yükseklik/uzunluk oranı azaldıkça ötenleme oranı artmıştır. Cam polimer esaslı donatılar perde duvarlarda yük taşıma kapasitesine nazaran ötenleme oranında daha fazla etkili olmuştur.

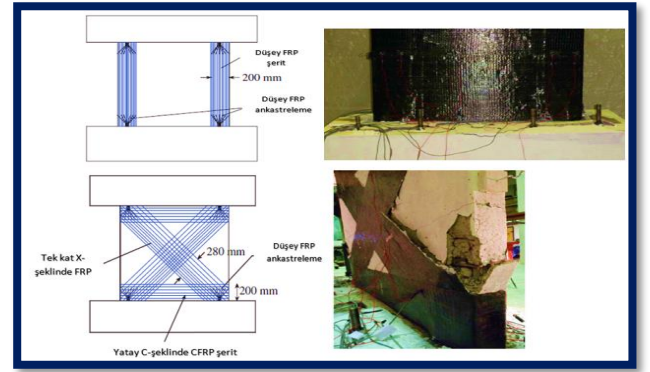
Betonarme perde duvarlarda karşımıza çıkan bir diğer çalışma alanı ise güçlendirme veya onarımdır. Özellikle büyük veya orta hasarlı depremlerden sonra betonarme perde duvarların onarım veya güçlendirilmesi önemli bir konudur. Özellikle diyagonal kesme çatlaklarının görüldüğü perde duvarlarda depremden sonra etkili bir şekilde onarım veya güçlendirme oldukça önemlidir. Karşımıza çıkan zayıflıklardan birkaç tanesi; köşe kolonların yeterli yatay donatı ile sargılanmaması, yeterli yatay donatının olmaması, donatı ile beton arasındaki aderansın zayıf olmasıdır. Bu tip perde duvarlarda depremden sonra kesme kuvveti kapasitelerinin artırılması yapı güvenliği için oldukça önem arz etmektedir. Perde duvarların güçlendirilmesi ile ilgili geçmiş yirmi yıldaki literatüre baktığımız zaman özellikle lif takviyeli polimerler (FRP) oldukça revaçtadır. Özellikle bu malzemelerin kolay uygulanabilirliği, korozyona karşı yüksek direnç ve hafif olmalarından dolayı tercih edilmektedirler. FRP malzemeler perde duvarlarda şeritler halinde sargılama şeklinde uygulanmaktadır. Bu alanda yapılan ilk çalışmalardan biri [40] FRP şeritlerin düşey şekilde sargılanması ile perde duvarların sismik davranışının incelemesidir. Bir diğer çalışmada Altin vd. [41] dört farklı (yatay, X şeklinde, X ile yatay ve X ile paralel kombinasyon) şekilde perde duvarları CFRP ile sargılayarak sismik davranışlarını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. CFRP ile güçlendirilmiş perde duvarlar hem yanal deplasman ve yük hem de enerji sönümleme kapasitesini arttırmıştır. Ayrıca güçlendirme yapılmayan numunede kesme göçmesi görülmesine karşın yatay şerit halinde CFRP uygulaması eğilme göçmesinin görülmesine neden olmuştur. Fakat X şeklinde CFRP uygulaması kesme göçmesine neden olmuştur.



Şekil 11. Altin vd. [41] perde duvar güçlendirme şekilleri ve kesme kuvveti-ötelenme oranı grafikleri

X ile yatay ve X ile paralel uygulama da ise eğilme ve kesme göçmesi beraber gözlemlenmiştir. Dolayısıyla güçlendirme yapılmayan ve X şeklinde güçlendirme yapılan perde duvarlar düktil olmayan bir davranış sergilemekle beraber, diyagonal kesme çatlakları perde tabanında yoğunlaşmıştır. Diğer numuneler ise oldukça düktil bir davranış sergilemişlerdir. Yatay şeritler halinde CFRP uygulanan perde duvar en düktil davranışı sergilemiştir. X ile paralel şerit uygulamasının kesme kuvveti kapasitesi üzerinde bir artış göstermemesi ile birlikte ötelenme oranında da oldukça az bir (yaklaşık %5) artışa neden olmuştur. Fakat düktilitenin azalmasına (%12) sebep olmuştur.

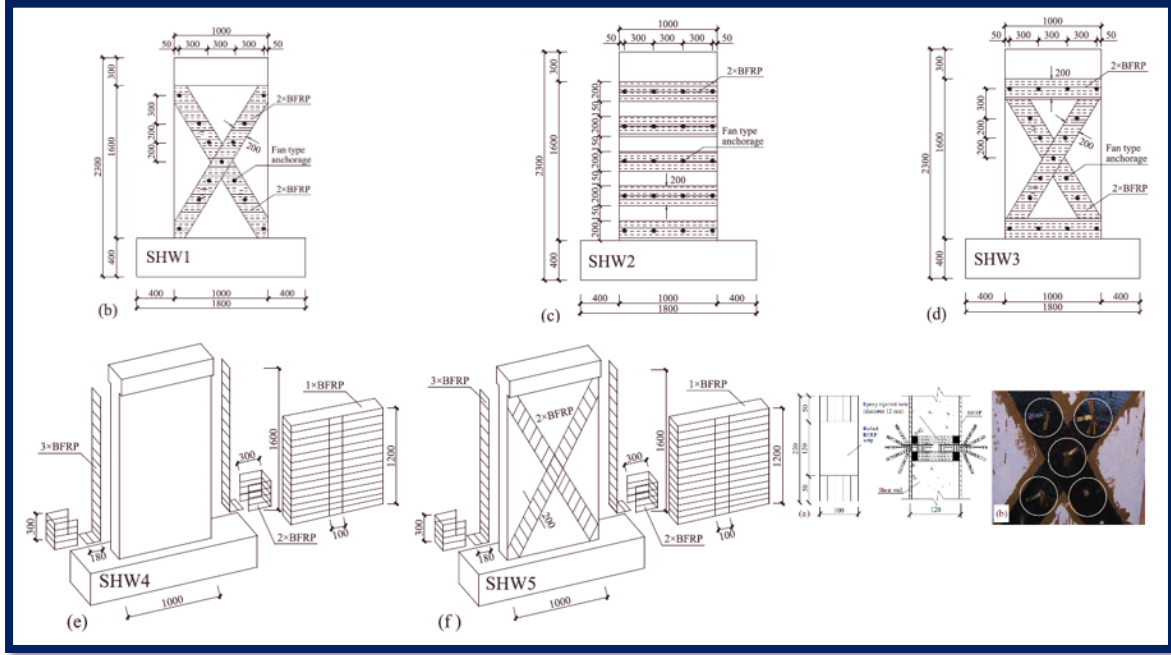
Günümüzdeki binalar büyük bir kısmı eski yönetmeliklere göre dizayn edilmiştir. Dolayısıyla perde duvarlarda bu eski yönetmeliklere göre boyutlandırılıp, donatılandırılmıştır. Fakat günümüze kadar yönetmelikler belli periyotlar halinde yenilenmişlerdir. Buna rağmen eski yönetmeliklere göre dizayn edilen perde duvarlar sismik kuvvetlere karşı koymaya devam etmektedirler. Perde duvarları güçlendirmenin yanı sıra onarımı da oldukça önem arz etmektedir. Bu amaçla çelik, beton, lif takviyeli polimerler gibi malzemeler onarım için kullanılmaktadır. Güçlendirmede olduğu gibi onarım çalışmalarının da amacı perde duvar dayanım, rijitlik, düktilite gibi karakteristik özelliklerini arttırmaktır. El-Sokary ve Galal [42] perde duvarların onarımı için karbon FRP kullanmışlardır. Onarım çalışması olduğu için aynı geometri ve donatı oranı ile ürettikleri perde duvarların önce tekrarlı tersinir yüklemeye maruz bırakılmışlardır. İkinci aşamada perde duvarlar köşe kolonların olduğu bölge düşey şeritler halinde (RW1) ve X ile yatay şeklin beraber kullanılması (RW2) ile CFRP şeritler halinde sargılanmıştır. Onarım yapılan perde duvarların yanal yük taşıma kapasitesi yaklaşık iki kat artmıştır. Fakat deplasman kapasitesi azalmıştır. Dolayısıyla CFRP ile onarım perde duvarların daha rijit davranmasına neden olmuştur. Köşe kolon bölgelerinin CFRP ile sargılandığı perde duvar RW2 numunesinden daha fazla yanal yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Fakat dikkat edilmesi gereken nokta perde duvarların CFRP ile sargılanarak onarım dayanımı arttırmasına rağmen düktiliteyi önemli ölçüde azaltmıştır.



Şekil 12. El-Sokary ve Galal [42] deney numunesi ve deney sonrası çatlak dağılımı

Mohamed vd. [43] cam lif esaslı polimer (GFRP) donatılı perde duvarlarda perde yükseklik/uzunluk oranının ve yatay donatı oranının perde duvar davranışına etkisini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında 100 mm çapında GFRP donatı kullanılmıştır. GFRP donatılı perde duvarlarda geleneksel çelik donatılı perde duvarlara göre dayanımda önemli bir azalma olmaksızın düktil bir davranış sergilemiştir. GFRP donatılı betonarme perdelerde çatlak dağılımı benzer gelişmiştir. Yükseklik/uzunluk oranının fazla olduğu numunede diyagonal çatlakların sayısı daha az gözlemlenmiştir.

Perde duvarların davranışını etkileyen faktörlerin boyut etkisini, yatay ve düşey donatı oranı ve uygulanan yük olduğu literatüre baktığımız zaman karşımıza çıkan en yaygın faktörlerdir. Boyut etkisinde literatürde genel kabul gören oran 2'dir. Perde yüksekliğinin perde uzunluğuna oranı 2'den küçük olan olanlar kısa perde duvar, 2'den büyük olanlar narin perde duvar olarak adlandırılmaktadır. Kısa perde duvarların davranışını kesme kuvvetinin hâkim olduğu derin kirişlerin davranışına benzetebiliriz. Narin perde duvarların davranışı ise klasik kiriş davranışındaki gibi yaklaşılabilir. Burada dikkat edilmesi gereken H/L oranı için TBDY' de bu tarz bir sınıflandırma olmamasıdır. Bunun yer ine perde kritik bölgesi tanımlanmaktadır. Bir diğer parametre olan donatı oranı ise perde duvar dayanımı ve



Şekil 13. Shen vd. [46] deney numuneleri

deformasyon kapasitesi üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Perde duvarlar etkiyen eksenel yükün kesme ve eğilme dayanımını arttırması, deplasmanları azaltması gibi avantajları vardır. Literatüre baktığımız zaman perde duvarlarla ilgili deneysel çalışmaların bir bölümünde eksenel yük uygulanırken bir bölümünde uygulanmamaktadır.

Mostofinejad ve Anaie [44] narin perde duvarların köşe kolonlarının FRP ile güçlendirilmesi üzerinde durmuşlardır. Köşe kolonlarda plastik mafsallık bölgesinde FRP' nin sargı sayısının arttırılması yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. Ayrıca köşe kolonlarda FRP' nin genişliğinin azaltılması rijitliği de azaltmıştır.

Delnavaz ve Hamidnia [45] perde duvarların CFRP ile güçlendirilmesi üzerinde analitik bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmanın ana parametrelerini perde duvar geometrisi ve donatıları sabit tutmak koşuluyla beton sınıfı, CFRP sargılama şekli ve sargı sayısı olarak belirlenmiştir. Beton sınıfı olarak 15.5 MPa, 25 MPa ve 45 MPa olarak seçmişlerdir. 1.2 ve 3 kat sargılama yapmışlardır. Ayrıca bir adet perde duvar sargısız olmak üzere altı farklı sargılama tekniği kullanmışlardır. CFRP ile güçlendirmenin etkinliği beton dayanımı azaldıkça artmaktadır. Sargı sayısının etkinliği ise beton dayanımının artması ile artmıştır. Çalışma kapsamında en ideal sargılama şekli olarak ise diyagonal sargılama olduğu belirtilmiştir. En düşük değerlere ise düşey şekilde paralel sargılanan perde duvarda elde edilmiştir.

Perde duvarların FRP ile güçlendirilmesinde X, U, yatay veya dikey şeritler veya bunların birbirleri ile kombinasyonları şeklinde uygulamalar literatürde mevcuttur [41,46-49].Yapılan bu çalışmalarda hem yanal yük kapasitesi hem de yanal deplasmanların üzerinde yatay şeritler halinde FRP uygulamasının en iyi yöntem olduğu belirtilmiştir. Shen vd. [50] perde duvarların güçlendirilmesi üzerinde deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmanın

ana konusu bazalt FRP' lerin perde duvarlar uygulanmasıdır. Altı adet perde duvar imal etmişlerdir. İlk numune güçlendirme yapılmadan referans numunesi olarak imal edilmiştir. Bazalt FRP' nin uygulama şekli X şeklinde, yatay, X ile yatay uygulamanın birlikte kullanılması, perde gövdesinin yatay ve yan tarafların L şeklinde sargılanması ve yine perde gövdesinin X ve t kalınlığının L şeklinde sargılanmasıdır (Şekil 13). Çalışmayı literatürdeki güçlendirme çalışmalarından ayıran bir husus da FRP' lerin perde duvarlara ankrajlama şeklidir. Yatay şeritler ile sargılamanın hem yanal yük taşıma kapasitesi hem de deformasyon kapasitesi üzerinde en olumlu etkiye sahip olduğu bildirilmiştir. Yatay ve X şeklinde sargılamanın birlikte kullanılması düktilitenin referans numunesine göre azalmasına sebep olmuştur. Fakat genel olarak bazalt FRP ile sargılama betonarme perde duvarların sismik karakteristik özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir.

Tolou-Kian ve Cruz-Nogues [51] betonarme perde duvarların sismik davranışını iyileştirmek için yenilikçi bir yaklaşım önermişlerdir. Üç farklı metotla imal ettikleri perde duvarların tekrarlı-tersinir yükler altındaki davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Perde duvarlardaki bu yenilikçi yaklaşım ile geleneksel çelik donatılı perde duvarların davranışında anahtar faktör olan iki unsurun (birincisi betonda ezilme ile kendini gösteren hasar düzeyi ikincisi ötelenme oranı) azaltılması amaçlanmıştır. Bir adet geleneksel betonarme perde duvarla birlikte, üç adet yenilikçi bir yaklaşım olarak önerdikleri (bir tanesi şekil hafızalı alaşım (shape-memory alloy (SMA)) donatılı, bir tanesi cam lifli polimer esaslı donatılı (GFRP), bir tanesi de yüksek dayanımlı çelik donatılı) perde duvarların davranışı incelenmiştir. 5 mm çapında GFRP çubuklar, 4 mm çapında nikel titanyum donatı (SMA donatı) kullanılmıştır. SMA donatılı perde duvarlar diğerlerine göre daha düktil

davranmıştır. Ayrıca ötelenme oranının en fazla olduğu numune GFRP donatılı perde duvar olmuştur. Yanal yük kapasitesine bakıldığı zaman ise SMA donatılı perde duvar en küçük değerde kalmıştır. SMA donatılı, GFRP ve yüksek dayanımlı çelik donatılı perde duvarlar geleneksel donatılı perde duvara göre sırasıyla %67, %62 ve %73 daha fazla enerji sönmüştür. Üç farklı donatılı perde duvarda da referans numunesine göre çatlak sayısının daha az fakat çatlak derinliğinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. GFRP donatılı perde duvarda çatlaklar diğerlerine göre daha sınırlı olmuştur.

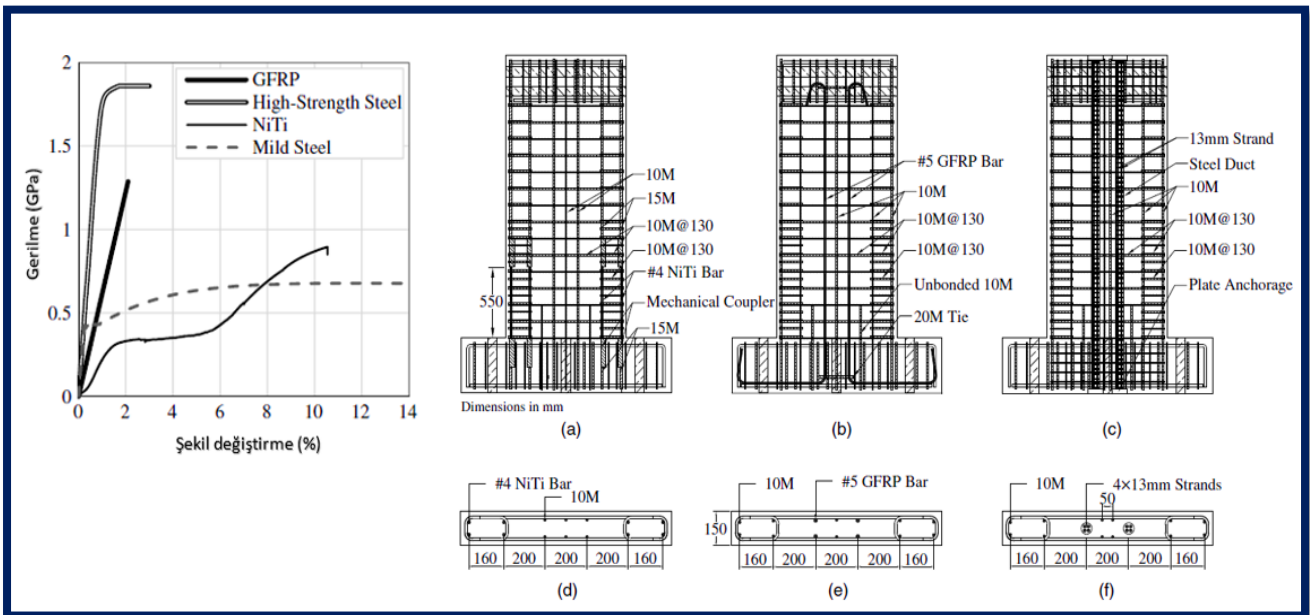
Yeh vd. [52] tarafından literatüre sunulan çalışma kapsamında boşluklu perde duvarların tekrarlı-tersinir yükler altındaki davranışı deneysel olarak incelemişlerdir. Bu amaçla bir tanesi açıklık olmayan geleneksel betonarme perde duvar, bir tanesi perde orta noktasında açıklık bulunan ve boşluk etrafında özel bir donatı düzeni bulunmayan perde duvar üretmişlerdir. Üçüncü perde duvarda boşluk etrafında özel yatay donatı düzeni (yatay donatılar 90 derece kanca yapılarak, 150 mm perde kenarına uzatılmak üzere) kullanılarak, bir adet perde duvar ise 250 mm kalınlığında karbon fiber polimer ile sarılarak imal edilmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığı zaman özel yatay donatı kullanmak ve FRP ile sarılmak perde duvardaki maksimum çatlak genişliğini ve çatlak dağılımını azaltmıştır. Yine bu iki uygulamanın kullanılması kesme dayanımı üzerinde artırıcı bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Karbon fiber polimer ile sarılan perde duvar numunesi diğerlerine göre daha sünek davranış, daha fazla ötelenme oranı ve aynı zamanda daha fazla kesme kuvveti kapasitesine sahip olmuştur. Bununla birlikte beklenen bir şekilde perde duvar elemanlarında pencere, kapı gibi boşluklar bırakmak ötelenme oranını ve kesme kuvveti kapasitesini azaltmıştır. Fakat özel yatay donatı kullanmak veya FRP ile sarılmak ötelenme oranını ve kesme kuvveti kapasitesini artırmıştır. Hatta bu iki özel uygulama ötelenme oranı ve kesme kuvveti

kapasitesini bir hayli (sırasıyla yaklaşık olarak %70 ve %76) artırmıştır. Deneysel çalışmanın yanı sıra analitik bir çalışma da yürütülmüştür. Boşluklu perde duvarlarda ACI318-14 yönetmeliğinin düşey perde duvar parçasındaki yüksekliğin kullanılarak bulunan kesme dayanımı ile deneysel sonuçların örtüşmediğini belirtmişlerdir. Bu yüksekliğin tahmin edilebilmesi için bir algoritma önermişlerdir. Önerilen bu algoritma ile hesaplanan yükseklik parçası ve kesme kuvveti dayanımının deneysel sonuçlarla daha iyi bir şekilde örtüştüğü belirtilmiştir. Deng vd. [53] betonarme perde duvarlar üzerinde yenilikçi ve farklı bir yaklaşımla ele almışlardır.

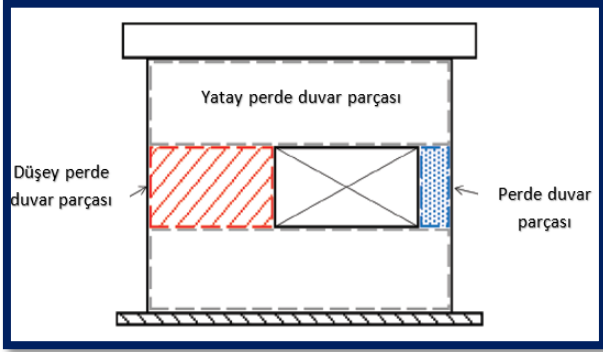
Perde duvar gövdesinde 150 mm kanal boşlukları bırakmışlardır. Daha sonra karbon ve cam FRP şeritler güçlendirdikleri bu perde duvarların sismik davranışlarını incelemişlerdir. Perde duvar gövdesinde bırakılan bu kanal boşlukları ile üç adet kolon oluşturmuşlardır. İki kenar kolon ve bir orta kolon oluşturmuşlardır. FRP sarılmasının geleneksel betonarme perde duvarların düktilite ve enerji sönmüleme kapasitesini artırmıştır. Bununla birlikte FRP ile onarım perde duvarların deformasyon kapasitesi üzerinde önemli bir katkısı olmuştur. Cam FRP ile sarılmanın numunede basınç hasarının oluşmadığı bildirilmiştir.

Arafa [54] perde duvarlarda çelik donatı düzenine alternatif olarak cam lif esaslı polimer (GFRP) donatı kullanmışlardır. GFRP donatı düzeninde yatay donatı oranının perde duvar sismik davranışına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. GFRP donatı kullanılması yanal deformasyon ve yük taşıma kapasitesini artırmıştır. Çatlak genişliği GFRP donatı kullanılarak azaltılmıştır. Bununla birlikte çatlakların sınırlandırılması (çatlak genişliği, çatlak yoğunluğu vb.) için düşey donatı düzeninden ziyade yatay donatı düzenine bağlı olarak değişmektedir.

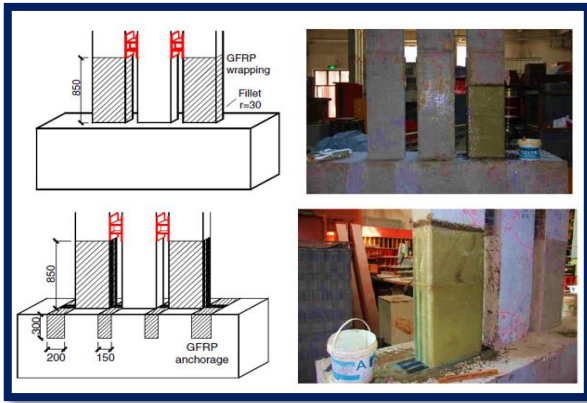
Geleneksel çelik donatılı betonarme perde duvarların yanal yük taşıma kapasiteleri oldukça yüksektir.



Şekil 14. Tolou-Kian ve Cruz-Nogues [51] deney numuneleri



Şekil 15. Boşluklu perde duvar yatay ve düşey parçaları



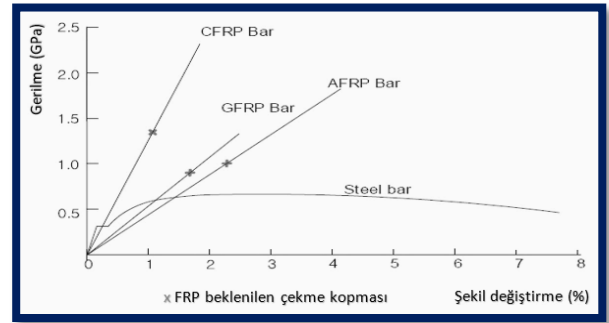
Şekil 16. Perde duvar numuneleri [53]

Fakat burada önem arz eden bir başka husus ise perde duvarların yanal yük taşıma kapasitelerinin yanında deformasyon yapabilme kapasitelerinin de yüksek olması özellikle deprem gibi yanal kuvvetlerin karşılanması için oldukça önemlidir.

Bu da enerji sönümleme kapasitesi ile bağlantılıdır. Yanal kuvvetlerin (özellikle aktif deprem bölgelerindeki deprem kuvvetleri) binalarda perde duvarlar tarafından karşılandığı bilinmektedir. Dolayısıyla perde duvarların deprem anındaki davranışı tüm taşıyıcı sistemin davranışını doğrudan etkilemektedir. Çelik donatının büyük deformasyonlar yaptıktan sonra (özellikle depremden sonra) tekrar eski haline geri dönmesi oldukça zordur. Bundan dolayı beton içerisine yerleştirilen donatıların büyük deformasyonlardan sonra tekrar eski haline gelebilmesi önemli bir konudur. Araştırmacılar bu sorunun üstesinden gelebilmek için çelik donatının yerine alternatif malzemeler arayışına girmişlerdir. Bunlardan yaygın olan birkaç tanesi karbon, çelik ve bazalt lif takviyeli polimer (CFRP, GFRP, BFRP) çubuklarıdır. 1000 MPa' dan daha büyük değerlere çıkabilen çekme dayanımları (çelik donatı ile karşılaştırıldığında iki kattan daha fazla olduğu görülmektedir) ve çekme gerilmeleri altında kopuncaya kadar akma göstermeden elastik davranış sergilemeleri bu malzemeleri oldukça ideal kılmaktadır (Şekil 17). Fakat bu malzemelerin de birkaç dezavantajı vardır. Çekme dayanımlarının yüksek olmasına karşın bu FRP çubuklar gevrek bir davranış sergilemektedirler. Ayrıca beton

içerisinde gömülmeleri ile donatı sıyrılması sorunu ile karşılaşabilmektedir. Araştırmacılar başta bahsettiğimiz perde duvar enerji sönümleme kapasitesini arttırmak için çekme dayanımı yüksek ve lineer elastik davranış sergileyen FRP çubuklarla çözüme yoluna gitmişlerdir. Fakat FRP' lerin dezavantajlarından dolayı dizayn aşamasında oldukça dikkatli olmak gerekmektedir. Zhao vd. [55] CFRP çubukları donatı olarak kullanmışlardır. Bunu iki şekilde uygulamışlardır. Birinci metotta perde duvar köşe kolonlarının da düşey yönde çelik donatı, diğer düşey donatılar ise CFRP çubuklar kullanmışlardır. İkinci metotta hem köşe kolon hem de diğer düşey donatıları CFRP çubuklar kullanmışlardır. CFRP çubukların avantajı özellikle çelik donatı aktıktan sonra ortaya çıkmıştır. Bu da perde duvarlarda oluşan çatlaklar üzerinde oldukça etkili olmuştur. İlk çatlakın görüldüğü yük seviyesi en fazla bütün düşey donatıların CFRP çubuklar olduğu numunede elde edilmiştir. Ayrıca CFRP çubuklu perde duvarlarda daha fazla sayıda çatlak oluşmuştur.

Malzeme olarak tek başlarına iyi bir çekme gerilmesi, lineer elastik davranış sergilemelerine rağmen CFRP çubuklar beton içerisine gömülmesiyle aynı verim elde edilememiştir.



Şekil 17. FRP ve çelik donatıların gerilme şekil değiştirme grafiği

Qazi vd. [56] perde duvarların CFRP ile güçlendirilmesi üzerinde durmuşlardır. Bir adet paralel CFRP şerit ile bir adet de çapraz CFRP şerit düzeni ile güçlendirdikleri perde duvarların davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. CFRP ile güçlendirilen perde duvarların dayanım ve rijitliği artmıştır. Paralel şeritlerle güçlendirilen perde duvarların dayanımı kontrol numunesine (güçlendirme yapılmayan numune) göre %23 dayanım artmıştır. Çapraz şeritlerle güçlendirilen perde duvar ise kontrol numunesine göre %30 daha fazla dayanım göstermiştir. Ayrıca CFRP ile güçlendirilen perde duvarlarda çatlak dağılımı da sınırlandırılmıştır.

Husain vd. [57] boşluklu perde duvarların Karbon FRP ile güçlendirilmesi üzerinde durmuşlardır. Özellikle deneysel veriler ile yapmış oldukları sayısal modellerin doğruluğunu kontrol etmişlerdir. Tolere edilebilir farklar elde ettikten sonra boşluklu perde duvarlarda sargılama şekli, sargı sayısı ve beton basınç dayanımının etkilerini incelemişlerdir. Literatürden seçilen iki tane betonarme boşluklu perde duvar öncelikle farklı bölgelerde ve farklı

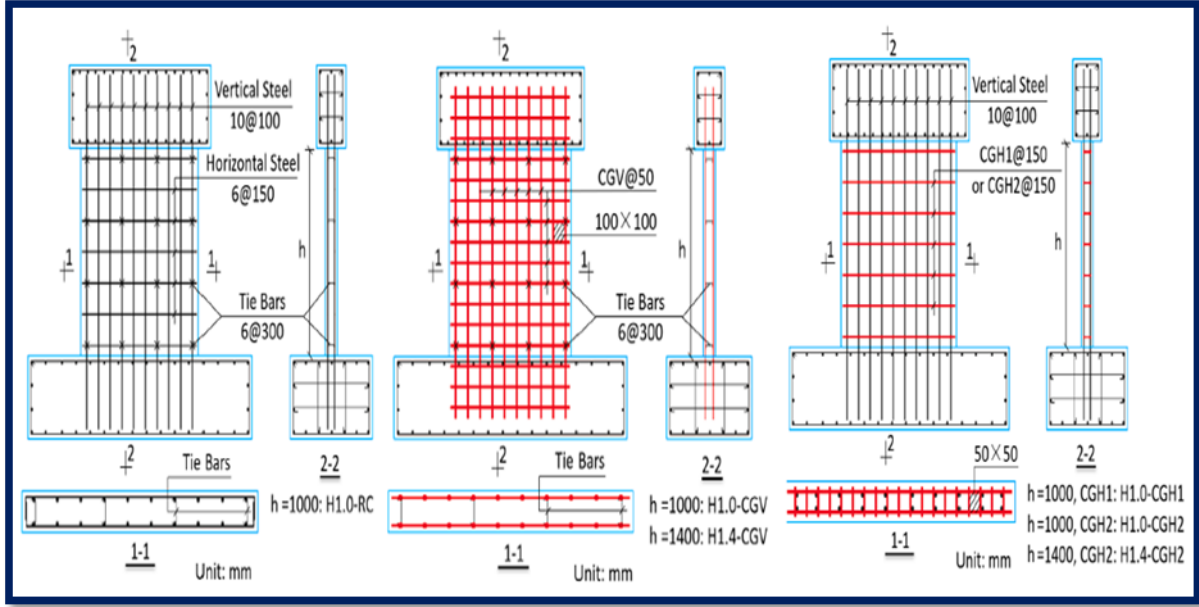
doğrultularda olmak üzere sargılama şekilleri değiştirilmiştir. İkinci olarak yine aynı perde duvarlarda iki ve üç kat sargılamanın perde davranışını nasıl etkilediği üzerinde durmuşlardır. Son olarak 30, 40 ve 50 MPa beton basınç dayanımlı perde duvarlarda sargılamanın etkisini ele almışlardır. Öncelikle boşluklu perde duvarların CFRP ile sargılanması yanıl yük kapasitesini ve deplasman kapasitesini arttırmıştır. Ayrıca CFRP' lerin boşluklar etrafında ve/veya perde genelinde uygulama şeklinin de perde dayanımı üzerinde oldukça etkili olmuştur. Sargılama sayısının artırılması ile enerji sönmleme kapasitesi, düktilite ve dayanım doğru orantılı olarak artmıştır. Bununla birlikte beton basınç dayanımının artırılması yanıl yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. Çalışma kapsamında dikkat çeken bir diğer faktör ise perde duvarlardaki boşlukların yerleridir. Düzgün simetrik boşluk perde duvarlarda kesme kuvvetlerinden kaynaklanan bağ kırışlerde gevrek kırılmalar olmuştur. Bunu bağ kırışlerdeki donatıların akması takip etmiştir. Asimetrik boşluklu perde duvarlarda ise perde tabanında düşey donatıların akması ve bunu betondaki çatlamlar ve dökülmelerin takip etmesi ile sünek bir kırılma meydana gelmiştir.

Betonarme perde duvarların karşılaştığı bir diğer zararlı çevresel etken de korozyondur. Betona gömülü donatının korozyona uğraması geçmiş yıllardan beri karşılaşılan temel problemlerden birisidir. Gerek inşaat mühendisliği gerekse de malzeme mühendisliğinde çalışan araştırmacılar donatı çeliğinin korozyona uğramasını engellemek için çalışmalar yürütmektedirler. Fakat korozyon olayı günümüzde halen daha tam olarak çözümlenmemiş bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte malzeme alanında da ciddi ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu alanda çalışan araştırmacıların bir kısmı beton içerisindeki donatıyı korozyondan korumak yerine çelik donatının alternatifi olarak kullanılabilir malzemelere yönelmişlerdir. Bu çerçevede karşımızda inşaat mühendisliğinde son yıllarda popüleritesi artan lif katkılı polimerler (FRP) çıkmaktadır. Dayanım, ağırlık, korozyona karşı diren, elastisite modülü gibi farklı parametrelere iyi özellikler gösteren FRP' ler son yıllarda beton teknolojisinde takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır. FRP esaslı malzemeleri katkısı olmaktan çıkıp perde duvar gibi yapı elemanlarında enine ve boyuna donatı olarak da kullanılmaya başlanılmıştır [43, 58]. Huang vd. [59] perde duvarlarda geleneksel çelik donatının yerine karbon FRP (CFRP) kullanmışlardır Çelik donatı yerine CFRP çubuklarını farklı konfigürasyonlarda (yatay ve dikey) yerleştirmişlerdir. Ayrıca yatay donatı oranı ve boyut etkisi (H/L) parametrelerinin de perde duvar sismik davranışına etkisini incelemişlerdir. Çelik donatının yerine CFRP donatısının kullanılması ötelenme oranını arttırdığı çalışma sonunda belirtilmiştir. Hatta CFRP donatı düzeninin yatay şekilde kullanılması yanıl deformasyonu ve taşıma gücü kapasitesini önemli ölçüde arttırmıştır. Boyut etkisinin çelik donatılı betonarme perde duvarın sismik davranışını etkilediği literatürdeki birçok çalışmada belirtilmiştir. Benzer şekilde CFRP donatılı perde duvarlarda da boyut etkisi perde duvar davranışını etkilemiştir. H/L oranının

arttırılması (%40 arttırılması) kesme göçmesinin görülmesine sebep olmuştur. Ayrıca CFRP donatılı düzeninin kullanılması çatlak genişliği ve çatlak yoğunluğunu da azaltmıştır. CFRP donatı düzeninin bir diğer avantajı da karbonun yüksek deformasyonlar altında dayanım ve elastik davranış sergilemesinden dolayı çatlak genişliği fazla olmamıştır. Yatay CFRP donatı düzeninin perde duvar davranışını (yanıl yük kapasitesi, yanıl deformasyon kapasitesi) arttırmasının yanı sıra yatay donatı oranının da bu parametreler üzerinde oldukça belirleyici bir etkisi vardır. Yatay donatı oranının arttırılması yanıl deformasyon ve yük taşıma kapasitesini arttırmıştır.

2.7 Betonarme perde duvarların yüklemeye şekillerine göre değerlendirilmesi

Yüksek oranda asimetrik bir yapıya sahip sistemin sismik davranışı her bir tekil yapı elemanın burulma davranışı yorumlanmadan gerçek bir şekilde anlaşılabilir. Bu yüzden geçtiğimiz yıllar boyunca betonarme elemanların burulma davranışı gerek deneysel gerekse de analitik olarak irdelenmiştir. Bu çalışmalar ise çoğunlukla kırış elemanlar üzerinde yoğunlaşmıştır. Yapı elemanlarının burulma davranışı ile ilgili ilk çalışmalar 1900'ü yılların başlarına dayanmaktadır. Konu ile ilgili ilk çalışmalar 1935 ve 1937 yıllarında Pavel Andersen [60,61] daha sonra ise 1951 yılında Henry J. Cowan [62] tarafından yapılmıştır. Daha sonra dairesel veya dikdörtgen kesitli kırışlerin burulma davranışı üzerine yapılan çalışmalar 1960'lı yıllarda artmıştır. Marti vd. [63] duvar tipi elemanların burulma davranışının incelendiği ilk çalışmalardan bir tanesidir. Literatürde perde duvarların burulma davranışının incelendiği az sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bir tanesi de, Peng' in [64] perde duvarların sadece burulma momenti ve burulma momentinin diğer yüklerle (eğilme, eksel yük) birlikte etki etmesi durumuna göre göçme mekanizmalarını incelediği çalışmasıdır. Çalışmanın ilk etabında, perde duvarlara sadece burulma momenti uygulanarak perde boyutu ve donatı oranının burulma davranışı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Perde duvarların rijitliğini betonda çatlak oluşumundan önce ve sonra olmak üzere ikiye ayırmıştır. Çatlak oluşmadan önceki rijitlik üzerinde perde en kesitinin etkili olduğunu donatı oranının belirleyici etken olmadığını belirtmiştir. Fakat ilk çatlak oluşuktan sonra elemanın rijitliğini belirleyen faktörün donatı oranı olduğunu bildirmektedir. Çatlama burulma momenti değerinin daha çok beton sınıfı ve perde kesitine bağlı olduğunu, bunun yanı sıra donatı oranının fazla bir etkisinin olmadığını belirtmiştir. Perde duvarların burulma dayanımı, beton sınıfı, kesit alanı ve donatı miktarı ile doğru orantılı olarak arttığını vurgulamıştır. Çalışmanın ikinci etabında burulma momenti ile birlikte eğilme ve kesme kuvvetinin etki ettirildiği perde duvarların çatlak gelişimini, hasar mekanizmasını ve burulma rijitliğini incelemiştir. Aynı boyutlara, donatı oranına ve malzeme özelliklerine sahip perde duvarlarda burulma momenti/eğilme momenti oranının (T/M) perde davranışına etkilerini incelemiştir. Deneysel sonucunda, burulma momenti varlığının perde duvar



Şekil 19. Huang vd. [59] perde duvar donatılardırılma şekli

daki plastik mafsal boyunu etkilediğini belirtmiştir. T/M oranının artması plastik mafsalın perde tabanından yukarı doğru kaymasına neden olmaktadır.

Carillo ve Alcocer [65] perde duvarların davranışını sarsma tablası üzerinde dinamik yükleme yaparak değerlendirmişlerdir. Çalışma kapsamında klasik dikdörtgen kesitli perde duvar yerine Latin Amerika ülkelerinde yaygın bir şekilde kullanılan bina türü üzerinde durmuşlardır. Bu amaçla boşluklu ve boşluksuz perde duvar ve bu perde duvarları da kendi arasında klasik çelik donatılı ve hasır donatılı olarak üretmişlerdir. Çalışmanın bir diğer parametresi de beton türü (normal ve hafif beton) ve boyuna donatı oranı (%0.125 ve %0.25) olarak belirlemişlerdir. Hasır donatı veya klasik donatı düzeni deformasyon kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Hasır donatının uzama kapasitesinin sınırlı olmasından dolayı gevrek kırılmaya sebep olmuştur.

Öztürk [66] doktora tez çalışması kapsamında fay hattına yakın bölgelerdeki yapıların ötelenme kapasitelerini incelemiştir. Dünyada en aktif fay hattın birisi üzerinde bulunan Türkiye’de meydana gelen depremler esas alınarak on farklı zemin hareketinin perde duvar davranışına etkisini incelemiştir. Zemin hareket ivmesinin artması non-linear deplasman hasarını arttırmıştır. Kesme kuvvetinden kaynaklı deplasman hasarını önlemek için perde duvar kesme dayanımının artırılması yapı güvenliği için faydalı olacaktır.

Carillo ve Alcocer [67] perde duvarlara uygulanan dinamik yüklerin üzerinde durmuşlardır. Yüksek yanall rijitliklerinden dolayı deprem kuvvetlerinin karşılanmasında en etkili yapı elemanı olan betonarme perde duvarlar deneysel çalışmalarında deprem kuvvetlerinin simüle eden yüklerle yüklenmesi oldukça önemlidir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığı zaman bu yüklemeler genellikle tekrarlı tersinir şekilde perde üst noktasında

uygulanmaktadır. Bir diğer yöntem ise sarsma tablası deney metodudur. Bu yöntemle perde duvarlar sarsma tablası üzerinde deprem kuvvetleri benzeri yüklere maruz bırakılmışlardır. Her iki yöntemin de avantaj ve dezavantajları vardır. İki deney yöntemi bir biri ile kıyaslandığı zaman; sarsma tablası yönteminde tablanın taşıyabileceği yük bakımından perde duvarların ağırlığı sınırlandırılmaktadır. Bu da büyük ölçeklerde çalışmalara imkân vermeyecektir. Fakat bunun yanı sıra deprem kuvvetlerinin gerçeğe daha yakın şekilde elde edildiği yöntem sarsma tablasıdır. Tekrarlı tersinir yükleme metodunda ise deney esnasında çatlakların gözlemlenmesi, deplasmanların kontrolü vb. olayların takibi daha kolaydır. Carillo ve Alcocer [67] sarsma tablası yöntemi ile tekrarlı tersinir yüklem deney yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Bu iki yükleme yönteminin perde duvar göçme modu, çatlak oluşumu ve dağılımı, dayanım ve enerji sönmleme kapasitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca perde geometrisi (boşluklu ve dolu gövdeli), beton türü (normal ve hafif beton), donatı oranı (%0.125 ve %0.250), donatı tipi (sargılı donatı ve hasır donatı) parametreleri belirlenmiştir. Hasır donatı ile üretilen perde duvarlarda diyagonal çekme göçmesi (gevrek bir kırılma), sargılı donatılı perde duvarlarda ise diyagonal çekme ve basınç (sünek göçme) gözlemlendiği belirtilmiştir. Tekrarlı tersinir yüklemede çatlakların sayısı ve boyu sarsma tablasındakilere göre daha fazla olmuştur. Tekrarlı tersinir yüklenen perde duvarlarda maksimum kesme kuvveti daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Deformasyon kapasitesi sarsma tablasındaki perde duvarlarda daha yüksek oranlarda elde edilmiştir.

Ji vd. [69] perde duvarların az da olsa maruz kalabileceği çekme kuvveti üzerinde durmuşlardır. Çalışmanın odak noktasını aksenal çekme kuvveti ile birlikte etki eden kesme kuvvetinin betonarme perde duvarların dayanım ve rijitliğini nasıl etkilediği olarak belirlemişlerdir. Bu amaçla altı adet

bağ kirişli perde duvarın tekrarlı-tersinir yüklemeye maruz bırakılmışlardır. Çekme kuvvetinin etki etmediği numunede diyagonal çekme göçmesi, çekme kuvvetinin artması ile de kayma-kesme göçmesinden kayma göçmesine doğru gidilmiştir. Ayrıca aksel çekme kuvvetinin artması ile kesme dayanımı lineer olarak azalmıştır. Bununla birlikte yanal rijitlik aksel çekme kuvvetinin artması ile artış göstermiştir. Hatta çekme kuvvetinin en fazla olduğu numune referans numunesine (çekme kuvvetinin olmadığı numune) göre %20 oranında artmıştır.

Öztürk [70] klasik bir çerçeve ve perde duvarlı sistemde perde duvarların taban kesme kuvveti kapasitesini arttırmak ve deplasman hasarlarını azaltmayı amaçlamıştır. İki farklı taban kesme sabitine sahip perde duvarın çerçeve sistemde davranışa etkisini irdelemiştir. Taban kesme kuvveti sabitinin artması maksimum non-lineer deplasmanlarını azaltmıştır.

Bağ kirişli perde duvarların sismik yükler altında davranış genellikle perde üst noktasından yatay olarak uygulanan tekrarlı-tersinir yükler altında değerlendirilmiştir. Fakat perde duvarların sismik performansının değerlendirilmesi için sarsma tablası yöntemi uygulanmıştır. Zhang vd. [71] bağ kirişli perde duvarların sismik davranışını değerlendirmek için sarsma tablası deney yöntemini uygulamışlardır. Donatı düzeni ve boşluk oranının perde davranışına etkisini incelemişlerdir. Boşluk oranının artması özellikle çatlak dağılımı üzerinde olumsuz bir etkiye sebep olmuştur. Donatı düzeni olarak tek ve çift sıralı çapraz donatı düzeni kullanılmıştır. Çift donatı düzeni uygulanan bağ kirişli perde duvarın kesme deformasyon kapasitesi daha fazla olmuştur.

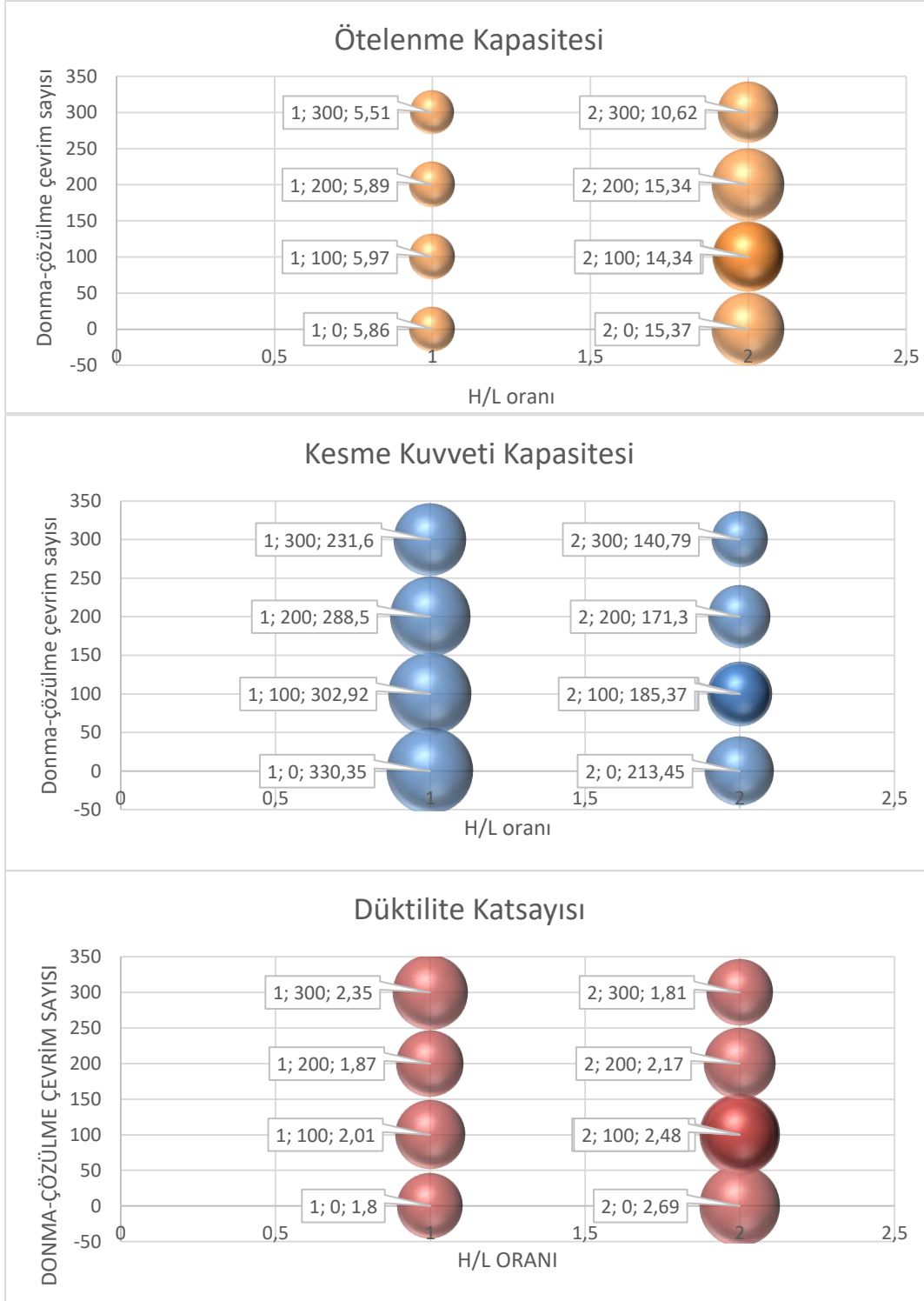
2.8 Betonarme perde duvarların durabilite açısından değerlendirilmesi

Yang vd. [72] perde duvarları sismik yükleme yapmadan önce donma çözölmeye maruz bırakılmışlardır. Betonarme perde duvarları çevre koşullarının da etkisini sismik davranış etkileyeceğini dikkate almışlardır. Diğer bir ifadeyle geçmiş yıllarda mekanik parametreleri incelenen perde duvarlar durabilite açısından ele alınmıştır. Gerek dünya genelinde gerekse de ülkemizin bazı bölgelerinde gece ve gündüz sıcaklık farkı oldukça fazla olabilmektedir. Ayrıca bu sıcaklık farkları periyodik olarak da devam edebilmektedir. Bu bölgelerdeki betonarme binaların özellikle dış cephelerindeki başta perde duvarlar olmak üzere taşıyıcı yapı elemanları bu sıcaklık değişimlerinden doğrudan etkilenmektedir. Beton içerisindeki mevcut nemli suyun donduğu ve beton boşluklarına artan bir basınç uyguladığı Power [73] tarafından daha önce belirtilmiştir. Bu basıncın betonun çekme gerilmelerinden büyük olması durumunda da boşluklar daha da genişleyecek ve betonda hasara neden olacaktır. Bu etkiler beton içerisindeki suyu özellikle donma çözölmeye maruz olduğu bölgelerde anahtar parametre haline getirmektedir. Yang vd. [72] betonarme perde duvarlarda mekanik yüklerle birlikte çevresel koşulları da göz önünde bulundurarak deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Diğer perde duvar parametreleri (beton sınıfı, donatı oranı vb.) sabit olmak şartıyla donma çözölmeye çevrim sayısının perde duvar sismik davranış üzerindeki

etkisini incelemişlerdir. Donma-çözölmeye çevrim sayısının artırılması kısa perde duvarlarda yanal yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde azaltmıştır. Diyagonal çekme kırılması gözlemlenen perde duvarlarda çevrim sayısının artması basınç kırılmalarına sebep olmuştur.

Shen vd. [74] perde duvarların korozyonu konusunu ele almışlardır. Korozyona maruz bıraktıkları betonarme perde duvarların yenilikçi bir inorganik malzeme olan bazalt FRP ile sargılayıp güçlendirmişlerdir. Bazalt esaslı bir malzeme tercih etmelerinin nedeni, karbon FRP' ye nispeten daha ekonomik, daha yüksek mukavemet ve fiziksel (hafiflik) özelliği, daha yüksek çekme dayanımı ve daha kolay uygulanabilirliğidir. Bunların yanı sıra VFRP daha düktil bir malzeme olması da (deprem anında daha iyi aderans özelliği göstermesi ve cam FRP' ye göre daha iyi asidik direnç göstermesi) tercih edilme sebebidir. Deprem sonrası yapı elemanlarında onarım ve güçlendirme aşamasında da diğer FRP malzemelerine göre daha ekonomik bir olarak sağlamaktadır. Deneysel program kapsamında yedi adet H/L oranı 1.6 olan betonarme perde duvar imal edilmiştir. Üretilen perde duvarların bir tanesi referans numunesi, üç tanesi de farklı (%3-%9-%15) korozyona maruz bırakılmıştır. Diğer üç adet perde duvar ise önce korozyona maruz bırakılıp daha sonra BFRP ile güçlendirilmiştir. Aksel yüklerle birlikte tekrarlı tersinir yüklemeye maruz bırakılan perde duvarların göçme modları, histeresik davranışları, rijitlik karakteristikleri, düktiliteleri, enerji sönümlenme kapasiteleri, dayanımları ve de FRP sargılama uygulamasının etkinliğini deneysel olarak incelemişlerdir. Korozyon seviyesindeki artış doğal olarak perde kesme dayanımını azaltmıştır. BFRP ile perde duvarların güçlendirilmesi dayanımları bütün numunelerde arttırmıştır. Fakat korozyon seviyesindeki artış onarılan perde duvarların kesme dayanımındaki artışı azaltmıştır. Benzer şekilde korozyon seviyesindeki artış ötelenme oranını, düktiliteyi ve enerji sönümlenme kapasitesini azaltmıştır.

Bilindiği üzere perde duvarlar özellikle yüksek katlı binalarda veya deprem riskinin fazla olduğu bölgelerde yanal rijitlikleri, dayanım ve enerji sönümlenme kapasitelerinden dolayı tercih edilmektedirler. Geçmişten günümüze kadar araştırmacılar birçok parametrenin perde duvar davranışına etkisini incelemişlerdir. Burada dikkat çekilmek istenen nokta sismik kuvvetlere maruz kalan betonarme perde duvarlar Rusya, Kuzey Amerika ülkeleri, Kuzeybatı Çin gibi gölgelerde çok düşük sıcaklıklara maruz kalabilmektedir. Ayrıca bu gibi bölgelerde gündüz ve gece arasında sıcaklık farkı oldukça fazla olabilmektedir. Böylece donma çözölmeye maruz kalan perde duvarlara ayrıca deprem kuvvetleri de etki etmektedir. Rong vd. [75] donma çözölmeye maruz kalan perde duvarların davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel program kapsamında donma çözölmeye çevrim sayısı, basınç dayanımı, aksel yük seviyesi parametreleri ele alınmıştır. Farklı çevrim sayısında donma çözölmeye maruz bırakılan perde duvarlar daha sonra tekrarlı tersinir yükler altında deneye tabi tutulmuştur. Deneysel çalışma ışığında donma çözölmeye çevrim sayısının artması ilk yatay çatlak ve düşey yöndeki donatı sıyrılması daha erken ortaya çıkmıştır. Beton dayanımının artması ise tam tersi yönde etki etmiştir. İlk



Şekil 20. Yang vd. [72] ve Rong vd. [75] deney sonuçlarının karşılaştırılması

yatay çatlak ve donatı sıyrılması daha geç meydana gelmiştir. Eksenel yük seviyesindeki artış ve donma çözülme çevrim sayısının artması perde duvarların düktilitesini azaltmıştır. Çevrim sayısının iki ve üç kat artırılması (diğer parametreler sabit tutulmak kaydıyla) düktilite indeksini

sırasıyla %12,5 ve %27 oranında azaltmıştır. Eksenel yük seviyesinin artırılması çevrim sayısına benzer etki yaratmıştır. Dolayısıyla düktilitenin azalması perde duvarların daha gevrek bir davranış sergilemelerine sebep olmuştur.

Şekil 20' de iki farklı deneysel program çerçevesinde yürütülen çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel numunelerinde yatay ve düşey donatı oranı, eksenel yük seviyesi ve beton sınıfı aynı veya bir birine sonucu etkilemeyecek kadar yakındır. H/L oranı 2 olan perde duvarlarda donma çözülme çevrim sayısı arttıkça kesme kuvveti kapasitesi azalmıştır. Benzer şekilde H/L oranı 2 olan perde duvarlarda da çevrim sayısının artırılması kesme kuvveti kapasitesini azaltmıştır. Farklı H/L oranlarındaki perde duvarlardaki azalış bir birine oldukça yakındır. H/L=1 ve H/L=2 maksimum çevrim sayılı (300 çevrim) perde duvarların kesme kuvveti kapasitesi referans numunesine göre (donma çözülme çevrim sayısı sıfır olan numune) sırasıyla %30 ve %34'lük bir azalış göstermiştir. Ayrıca H/L oranının iki katına çıkarılması perde kesme kuvveti kapasitesini azaltmıştır. H/L=1 perde duvarlarda çevrim sayısının artması ötelenme kapasitesi üzerinde etkili olmuştur. Fakat bu etki kesin bir artış ya da azalış şeklinde olmamıştır. Çevrim sayısının 100 ve 200'e çıkarılması ötelenme kapasitesini referans numunesine göre sırasıyla %1.87 ve %0.51 oranında arttırmasına rağmen 300 çevrimde %5.97 oranında azaltmıştır. H/L=2 perde duvar grubunda çevrim sayısının artırılması ötelenme kapasitesini azaltmıştır. Çevrim sayısının artırılması 100, 200 ve 300'e çıkarılması ötelenme kapasitesinin sırasıyla %6.70, %0.2 ve %30 oranında azalmasına sebep olmuştur. Betonarme perde duvarların nihai dayanımındaki ötelenme miktarının akma dayanımı anındaki ötelenme miktarına oranlanması ile düktilite katsayısı hesaplanmıştır. H/L=1 perde duvar grubunda çevrim sayısının artması düktilite katsayısını sırasıyla %11.67, %3.89 ve %30.56 oranında arttırmıştır. H/L=2 perde duvar grubunda ise çevrim sayısının artması düktilite katsayısının azalmasına neden olmuştur.

3 Sonuç

Betonarme perde duvarlarla ilgili sunulan literatür özetine bakıldığında zaman; betonarme perde duvarlar 1940'lardan beri araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Gelişen gerek beton teknolojisi gerekse de deney düzeneği teçhizatları ile perde duvarlar farklı malzemeler (lifli beton, kendiliğinden yerleşen beton, kompozit perde duvarlar) ile farklı yüklemeler (eksenel basınç, eksenel çekme, tekrarlı-tersinir yüklenme, sarsma tablası) altında deneylere tabi tutulmuşlardır. Boşluksuz perde duvarlarla başlayan akademik çalışmalar zamanla betonarme bağ kirişli perde duvarlar ve boşluklu perde duvarlara kaymıştır. Daha sonradan kompozit ve çelik perde duvarlar araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Günümüzde beton teknolojisi ise lifli ve hibrid lifli ve atık malzemelerin (plastik atık, elektronik atıklar vb.) beton üretiminde değerlendirilmesine kaymaktadır. Beton teknolojisindeki bu gelişmelerin bundan sonraki akademik çalışmalarda perde duvar gibi yapı elemanlarında kullanılacağı yazarlar tarafından öngörülmektedir.

Betonarme perde duvar davranışının yenilikçi malzemeler ile modellenmesi için kullanılan malzemelerin karakteristik özelliklerinin de (basınç, çekme, eğilme dayanımı, elastisite modülü vb.) ele alınacağı kapsamlı bir deney planı ile mümkün olacaktır. Özellikle

sayısal modellemeler muhtemel parçalı denklemler ile düzenlenerek etkinliği belirsiz parametrelerin maksimum kesme kuvveti, düktilite indeksi gibi değerlere katkısı irdelenmelidir. Yüzey işlemleri yapılmış, geleneksel çelik donatıya göre farklı karakteristik özellikler sergileyen GFRP, CFRP vb. donatılar veya betonarme donatısının zamanla değişen aderans özellikleri üzerine ve bu değişimin düktil davranışa etkisi üzerine çalışmalar yapılması gerekmektedir.

Ayrıca betonarme perde duvarların tipik beton ile donatının kullanılmasının yerine gerek beton açısından; geleneksel beton yerine tabakalı kompozit kavramının bağlayıcı esaslı kompozit (cement based composite), kendi kendini kontrol edebilen veya başlangıçtaki şekline geri dönebilen kompozit tabakalı yaklaşıma bırakması veya birleştirilmesi, gerekse de donatı açısından; çelik profiller, bağ kirişli perde duvarlarda kullanılan metalik, viskoz gibi sönmüleyicilere bırakılması düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %2

Kaynaklar

- [1] A. Ünal, TDY 2007'ye göre tasarlanmamış betonarme çerçevelerin düzlem dışı perde duvarla güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2012.
- [2] E. Baş, FRP sargılı perde duvarın yükler altındaki davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2015.
- [3] H. Şahin, K.E. Alyamaç, and A.S. Erdoğan, Perde çerçeveli yapılarda zemin sınıfı ve kat adedi dikkate alınarak gerekli perde oranının tespiti, SDU International Journal of Technological Science, 5, 1, 2013.
- [4] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2019
- [5] ISO/DIS 15673, Standart for the simplified design of structural reinforced concrete for buildings, International Organization for Standardization, Santafe de Bogota, Columbia, pp 220, 1998.
- [6] M. S. Döndüren, and A. Karaduman, Deprem bölgelerindeki yüksek katlı betonarme yapılarda taşıyıcı sistem seçiminin kesit tesirlerine etkisi, Selçuk-Teknik Dergisi, 9, 2, 131-43, 2010.
- [7] C.M. Chan, F. Ning, and N.C. Mickleborough, Lateral stiffness characteristics of tall reinforced concrete buildings under service loads, The Structural Design of Tall Buildings, 9, 5, 365-83, 2000. [https://doi.org/10.1002/10991794\(200012\)9:5<365::AID-TAL158>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/10991794(200012)9:5<365::AID-TAL158>3.0.CO;2-B)
- [8] I. Bali, and S.J. Hwang, Strength and deflection prediction of double-curvature reinforced concrete squat walls, Structural Engineering and Mechanics, 27, 4, 501-521, 2007. <https://doi.org/10.12989/sem.2007.27.4.501>

- [9] Y. R. Dong, Z.D Xu, K. Zeng, Y. Cheng, and C. Xu, Seismic behavior and cross-scale refinement model of damage evolution for RC shear walls, *Engineering Structures*, 167, 13-25, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.096>
- [10] T. Paulay, and A.R. Santhakumar, Ductile behavior of coupled shear walls, *Journal of the Structural Division*, 102, 1, 93-108, 1976.
- [11] A. E. Aktan, and V. V. Bertero, Seismic response of R/C frame-wall structures, *Journal of Structural Engineering*, 110, 8, 1803-21, 1984.
- [12] B.R. Rad, and P. Adebar, Dynamics shear amplification in high-rise concrete walls: effect of multiple flexural hinges and shear cracking, *Proceeding of the 14th World Conference on Earthquake*, Beijing, China, 2008.
- [13] M. Panagiotou, and J. I. Restrepo, Dual-plastic hinge design concept for reducing higher-mode effects on high rise cantilever wall buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38, 12, 1359-80, 2009. <https://doi.org/10.1002/eqe.905>
- [14] A. Dazio, K. Beyer, and H. Bachmann, Quasi-static cyclic tests and plastic hinge analysis of RC structural walls, *Engineering Structures*, 31, 7, 1556-71, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.018>
- [15] M. Ahmed, Multiple plastic hinge concept for high-rise reinforced-concrete core wall buildings, *Proceeding of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 169, 6, 688-701, 2016.
- [16] M. Kurt, T. Kotan, M. S. Gül, R. Gül, and A. C. Aydın, The effect of blast furnace slag on the self-compactibility of pumice aggregate lightweight concrete, *Sadhana*, 41, 2, 253-64, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12046-016-0462-2>
- [17] N. Ganesan, and P. V. Indira, High performance fibre reinforced cement concrete slender structural walls, *Advances in Concrete Construction*, 2, 4, 309, 2014. <http://dx.doi.org/10.12989/2014.2.4.309>
- [18] J. Carrillo, J. M. Lizarazo, and R. Bonett, Effect of lightweight and low-strength concrete on seismic performance of thin lightly-reinforced shear walls, *Engineering Structures*, 93, 61-69, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.022>
- [19] J. Zhao, G. Cai, A. S. Larbi, Y. Zhang, H. Dun, H. Degée, and B. Vandoren, Hysteretic behaviour of steel fibre RC coupled shear walls under cyclic loads: Experimental study and modelling, *Engineering Structures*, 156, 92-104, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.006>
- [20] X. Lu, Y. Zhang, H. Zhang, H. Zhang, and R. Xiao, Experimental study on seismic performance of steel fiber reinforced high strength concrete composite shear walls with different steel fiber volume fractions, *Engineering Structures*, 171, 247-59, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.068>
- [21] C. C. Hung, and P. L. Hsieh, Comparative study on shear failure behavior of squat high-strength steel reinforced concrete shear walls with various high-strength concrete materials, In *Structures*, 23, 56-68, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.11.002>
- [22] M. Maali, M. Kılıç and A. C. Aydın, Experimental model of the behaviour of bolted angles connections with stiffeners, *International Journal of Steel Structures*, 16, 3, 719-33, 2016. <https://doi.org/10.1007/s13296-015-0183-0>
- [23] A. Astaneh-Asl, Seismic behavior and design of composite steel plate shear walls, Moraga (CA): Structural Steel Educational Council, 2002.
- [24] W. S. Park, and H. D. Yun, Seismic behaviour and design of steel coupling beams in a hybrid coupled shear wall systems, *Nuclear Engineering and Design*, 236, 23, 2474-84, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2006.03.008>
- [25] D. Dan, A. Fabian, and V. Stoian, Theoretical and experimental study on composite steel-concrete shear walls with vertical steel encased profiles, *Journal of constructional steel research*, 67, 5, 800-13, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.12.013>
- [26] J. G. Nie, H. S. Hu, J. S. Fan, M. X. Tao, S. Y. Li, and J. Liu, Experimental study on seismic behavior of high-strength concrete filled double-steel-plate composite walls, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 88, 206-219, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.05.001>
- [27] A. Astaneh-Asl, and Q. Zhao, Cyclic behavior of steel shear wall systems, In *Proceedings, Annual Stability Conference*, Structural Stability Research Council, 2002.
- [28] W. Lan, J. Ma, and B. Li, Seismic performance of steel-concrete composite structural walls with internal bracings, *Journal of Constructional Steel Research*, 110, 76-89, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.02.015>
- [29] X. Ji, T. Leong, J. Qian, W. Qi, and W. Yang, Cyclic shear behavior of composite walls with encased steel braces, *Engineering Structures*, 127, 117-28, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.08.041>
- [30] X. Li, and X. Li, Steel plates and concrete filled composite shear walls related nuclear structural engineering: Experimental study for out-of-plane cyclic loading, *Nuclear Engineering and Design*, 315, 144-54, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.02.019>
- [31] M. Meghdadaian, and M. Ghalehnovi, Improving seismic performance of composite steel plate shear walls containing openings, *Journal of Building Engineering*, 21, 336-42, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.11.001>
- [32] A. E. Cardenas, and D. D. Magura, Strength of high-rise shear walls-rectangular cross section, *Special Publication*, 36, 119-50, 1972.
- [33] F. Barda, J. M. Hanson, and W. G. Corley, Shear strength of low-rise walls with boundary elements, *Special Publication*, 53, 149-202, 1977.
- [34] A. E. Cardenas, H. G. Russell, and W. G. Corley, Strength of low-rise structural walls, *Special Publication*, 63, 221-42, 1980.

- [35] R. G. Oesterle, A. E. Fiorato, J. D. Aristizabal-Ochoa, and W. G. Corley, Hysteretic response of reinforced concrete structural walls, ACI Special Publication, 63, 243-73, 1980.
- [36] T. Paulay, M. J. N. Priestley, and A. J. Syngé, Ductility in earthquake resisting squat shear walls, In Journal Proceedings, 79, 4, 257-69, 1982.
- [37] R. G. Oesterle, J. D. Aristizabal-Ochoa, K. N. Shiu, and W. G. Corley, Web crushing of reinforced concrete structural walls, In Journal Proceedings, 81, 3, 231-41, 1984.
- [38] K. I. Christidis, and K. G. Trezos, Experimental investigation of existing non-conforming RC shear walls, Engineering Structures, 140, 26-38, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.063>
- [39] N. A. A. R. Mohamed, Strength and drift capacity of GFRP-reinforced concrete shear walls, Doktora Tezi, Université de Sherbrooke, Kanada, 2013.
- [40] J. Lombard, D. T. Lau, J. L. Humar, S. Foo, and M. S. Cheung, Seismic strengthening and repair of reinforced concrete shear walls, In Proc., 12th World Conf. on Earthquake Engineering, pp. 1-8, 2000.
- [41] S. Altin, Ö. Anil, Y. Koprarnan, and M. E. Kara, Hysteretic behavior of RC shear walls strengthened with CFRP strips, Composites Part B: Engineering, 44, 1, 321-29, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.009>
- [42] H. El-Sokkary, K. Galal, I. Ghorbanirenani, P. Léger, and R. Tremblay, Shake table tests on FRP-rehabilitated RC shear walls, Journal of Composites for Construction, 17, 1, 79-90, 2013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.19435614.0000312](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.19435614.0000312)
- [43] N. Mohamed, A. S. Farghaly, B. Benmokrane, and K. W. Neale, Experimental investigation of concrete shear walls reinforced with glass fiber-reinforced bars under lateral cyclic loading, Journal of Composites for Construction, 18, 3, A4014001, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.19435614.0000393](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.19435614.0000393)
- [44] D. Mostofinejad, and M. Mohamadi Anaei, Strengthening of slender RC shear wall with FRP sheets, Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering, 39, C2, 385-94, 2015.
- [45] A. Delnavaz, and M. Hamidnia, Analytical investigation on shape configuration of CFRP strips on lateral loading capacity of strengthened RC shear wall, Structural Concrete, 17, 6, 1059-70, 2016. <https://doi.org/10.1002/suco.201500196>
- [46] K. K. Antoniadés, T. N. Salonikios, and A. J. Kappos, Tests on seismically damaged reinforced concrete walls repaired and strengthened using fiber-reinforced polymers, Journal of Composites for Construction, 9, 3, 236-46, 2005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900268\(2005\)9:3\(236\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900268(2005)9:3(236))
- [47] K. K. Antoniadés, T. N. Salonikios, and A. J. Kappos, Evaluation of hysteretic response and strength of repaired R/C walls strengthened with FRPs., Engineering structures, 29, 9, 2158-71, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.11.021>
- [48] H. Ko, and Y. Sato, Bond stress-slip relationship between FRP sheet and concrete under cyclic load, Journal of Composites for Construction, 11, 4, 419-26, 2007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900268\(2007\)11:4\(419\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900268(2007)11:4(419))
- [49] B. Li, and C. L. Lim, Tests on seismically damaged reinforced concrete structural walls repaired using fiber-reinforced polymers, Journal of composites for construction, 14, 5, 597-608, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.19435614.0000110](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.19435614.0000110)
- [50] D. Shen, Q. Yang, Y. Jiao, Z. Cui, and J. Zhang, Experimental investigations on reinforced concrete shear walls strengthened with basalt fiber-reinforced polymers under cyclic load, Construction and Building Materials, 136, 217-229, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.102>
- [51] M. J. Tolou Kian, and C. Cruz-Noguez, Reinforced Concrete Shear Walls Detailed with Innovative Materials: Seismic Performance, Journal of Composites for Construction, 22, 6, 04018052, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.19435614.0000893](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.19435614.0000893)
- [52] R. L. Yeh, C. C. Tseng, and S. J. Hwang, Shear strength of reinforced concrete vertical wall segments under seismic loading, ACI Structural Journal, 2018. <https://doi.org/10.14359/51702377>
- [53] K. Deng, P. Pan, S. Shen, H. Wang, and P. Feng, Experimental study of FRP-reinforced slotted RC shear walls under cyclic loading, Journal of Composites for Construction, 22, 4, 04018017, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.19435614.0000855](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.19435614.0000855)
- [54] A. Arafa, A. S. Farghaly, and B. Benmokrane, Effect of web reinforcement on the seismic response of concrete squat walls reinforced with glass-FRP bars, Engineering Structures, 174, 712-23, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.092>
- [55] Q. Zhao, J. Zhao, J. T. Dang, J. W. Chen, and F. Q. Shen, Experimental investigation of shear walls using carbon fiber reinforced polymer bars under cyclic lateral loading, Engineering Structures, 191, 82-91, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.052>
- [56] S. Qazi, L. Michel, and E. Ferrier, Seismic behaviour of RC short shear wall strengthened with externally bonded CFRP strips, Composite Structures, 211, 390-400, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.12.038>
- [57] M. Husain, A. S. Eisa, and M. M. Hegazy, Strengthening of reinforced concrete shear walls with openings using carbon fiber-reinforced polymers, International Journal of Advanced Structural Engineering, 11, 2, 129-50, 2019. <https://doi.org/10.107/s40091-019-0216-6>
- [58] S. Ghazizadeh, and C. A. Cruz-Noguez, Damage-resistant reinforced concrete low-rise walls with hybrid GFRP-steel reinforcement and steel fibers, Journal of Composites for Construction, 22, 2, 04018002, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.19435614.0000834](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.19435614.0000834)



- [59] Z. Huang, J. Shen, H. Lin, X. Song, and Y. Yao, Shear behavior of concrete shear walls with CFRP grids under lateral cyclic loading, *Engineering Structures*, 211, 110422, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110422>
- [60] P. Andersen, Experiments with concrete in torsion, In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 60, 5, 641-52, 1935.
- [61] P. Andersen, Rectangular concrete sections under torsion, In *Journal Proceedings*, 34, 9, 1-12, 1937.
- [62] H. J. Cowan, Test of the torsional strength and deformation capacity of rectangular reinforced concrete beams. *Concrete and Constructional Engineering*, 46, 2, 51-5, 1951.
- [63] P. Marti, P. Leesti, and W. U. Khalifa, Torsion tests on reinforced concrete slab elements, *Journal of Structural Engineering*, 113, 5, 994-1010, 1987. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339445\(1987\)113:5\(994\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(1987)113:5(994))
- [64] X. N. Peng, Study of torsional behaviour of reinforced concrete shear walls, *Doktora Tezi*, Hong Kong Polytecnic University, Hong Kong, 2012.
- [65] J. Carrillo, and S. M. Alcocer, Seismic performance of concrete walls for housing subjected to shaking table excitations, *Engineering structures*, 41, 98-107, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.025>
- [66] B. Öztürk, Seismic drift response of building structures in seismically active and near-fault regions, PhD Dissertation, Purdue University, W. Lafayette, Indiana, USA
- [67] J. Carrillo, and S. M. Alcocer, Experimental investigation on dynamic and quasi-static behavior of low-rise reinforced concrete walls, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 42, 5, 635-52, 2013. <https://doi.org/10.1002/eqe.2234>
- [68] H. El-Sokkary, and K. Galal, Seismic behavior of RC shear walls strengthened with fiber-reinforced polymer, *Journal of Composites for Construction*, vol. 17, 5, 603-613, 2013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.19435614.0000364](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.19435614.0000364)
- [69] X. Ji, X. Cheng, and M. Xu, Coupled axial tension-shear behavior of reinforced concrete walls, *Engineering Structures*, 167, 132-42, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.015>
- [70] B. Öztürk, Investigation of seismic behavior of reinforced concrete shearwall building frames subjected to ground motions from the 1999 Turkish Earthquakes, 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, Beijing, China, 2008.
- [71] J. Zhang, W. Zheng, C. Yu, and W. Cao, Shaking table test of reinforced concrete coupled shear walls with single layer of web reinforcement and inclined steel bars, *Advances in Structural Engineering*, 21, 15, 2282-98, 2018. <https://doi.org/10.1177/1369433218772350>
- [72] W. Yang, S. S. Zheng, D. Y. Zhang, L. F. Sun, and C. L. Gan, Seismic behaviors of squat reinforced concrete shear walls under freeze-thaw cycles: a pilot experimental study, *Engineering Structures*, 124, 49-63, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.013>
- [73] T. C. Powers, A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete, *American Concrete Institute*, 16, 4, 245-72, 1945
- [74] D. Shen, Q. Yang, C. Huang, Z. Cui, and J. Zhang, Tests on seismic performance of corroded reinforced concrete shear walls repaired with basalt fiber-reinforced polymers, *Construction and Building Materials*, 209, 508-21, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.109>
- [75] X. L. Rong, S. S. Zheng, Y. X. Zhang, X. Y. Zhang, and L. G. Dong, Experimental study on the seismic behavior of RC shear walls after freeze-thaw damage, *Engineering Structures*, 206, 110101, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110101>





A comparative study on the sodium sulfate resistance of concrete with the supplementary cementitious materials

Tamamlayıcı çimentolu malzemelerle betonun sodyum sülfat direnci üzerine karşılaştırmalı bir çalışma

Işıl Sanrı Karapınar^{1,*} , Hasan Biricik¹ 

¹ Maltepe University, Civil Engineering Department, 34857, Istanbul, Turkey

Abstract

Sulfate attack is one of the main factors causing durability problems in concrete. In this study, in order to evaluate the physical/chemical interaction of sulfate resistance, concrete mixtures with silica fume, blast furnace slag, fly ash, limestone filler, hydrated lime and Portland cement are investigated by conducting a series of experiments. Five different series of concrete mixtures containing the specified supplementary cementitious materials were developed with a water-binder ratio of 0.33 and a total binder content of 400 kg/m³. The concrete samples were exposed to lime-saturated water and sodium sulfate solution of 50 g/l for 365 days. The evaluation of sulfate resistance was done by the determination of compressive strength and change in weight. The improvement of the resistance to sulfate attack is assessed concerning the ratio of the mineral additives and results indicated that using the selected supplementary cementitious materials in the concrete mixtures significantly improves the durability performance.

Keywords: Sulfate attack, Sulfate resistance, Compressive strength, Concrete, Durability

1 Introduction

In recent years, there is a great demand to minimize the quantity of Portland cement used in the construction industry because of the significant amounts of CO₂ release. Therefore, a large number of studies have been conducted about how environmental-friendly binders can be an alternative to Portland cement-based binders. For this purpose, the engineering properties of concretes containing different binder materials have received particular attention. Among these properties, concrete durability is a major concern, especially for structural design.

Sulfate attack is a severe and rapid degradation mechanism which may cause durability problems and induce critical damage in concrete structures [1]. The ingress of sulfate ions from the environment induces the sulfate attack. It results in expansion, weight loss, cracking, spalling and as a consequence, decrement in the mechanical properties of the Portland cement concrete. Sulfate resistance depends on many factors like cement composition, permeability of concrete, water/cement ratio, exposure conditions and period [2-9]. In order to improve the resistance of concrete to sulfate attack, permeability reduction is identified as the major parameter. One of the most common ways to achieve lower permeabilities is replacing cement with supplementary cementitious materials [10-12]. By the use of adequate amounts of supplementary cementitious materials as cement

Özet

Sülfat etkisi betonda dayanıklılık sorunlarına neden olan ana faktörlerden biridir. Bu çalışmada, sülfat direncinin fiziksel/kimyasal etkileşimini değerlendirmek için silis dumanı, yüksek fırın çürüfö, uçucu kül, kalker filleri, kireç ve Portland çimentosu ile elde edilen beton karışımları bir dizi deney yapılarak araştırılmıştır. Belirtilen tamamlayıcı çimentolu malzemeleri içeren, beş farklı seri beton karışımı, su/bağlayıcı oranı 0.33 ve toplam bağlayıcı içeriği 400 kg/m³ alınarak üretilmiştir. Beton örnekleri, 365 gün boyunca kirece doymuş suya ve 50 g/l sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakılmıştır. Sülfat direncinin değerlendirilmesi, numunelerin basınç dayanımı ve ağırlık değişiminin belirlenmesi ile yapılmıştır. Sülfat etkisine karşı direncin iyileştirilmesi, mineral katkı maddelerinin oranına göre değerlendirilmiş ve sonuçlar, beton karışımlarında seçilen tamamlayıcı çimentolu malzemelerin kullanılmasının, dayanıklılık performansını önemli ölçüde geliştirdiğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Sülfat etkisi, Sülfat direnci, Basınç dayanımı, Beton, Dayanıklılık

replacement material, the amount of calcium aluminate (C₃A) and calcium hydroxide (CH) decreases which plays a significant role to prevent the formation of destructive compounds such as gypsum and ettringite [13]. Therefore, in order to mitigate the potential durability problems related to sulfate attack and serve as green cement, supplementary cementitious materials usage is proposed. Accordingly, there are investigations on the assessment of sulfate attack induced Portland cement concretes, geopolymer-based concretes and mortars produced with supplementary cementitious materials [14-18]. These evaluations are usually based on such criteria as changes in compressive strength, length, weight, and microstructure.

Among the traditional supplementary cementitious materials, it is known that slag efficiently improves the sulfate resistance depending on the cement replacement level. On the other hand, the effect of the other mineral additives is an interest. Therefore, the purpose of this study is to discuss the role of the selected supplementary cementitious materials in reducing the sulfate attack in concrete. The results of the resistance to sulfate attack are presented in terms of the change in compressive strength and weight for the concrete mixtures containing different ratios of silica fume, blast furnace slag, fly ash, limestone filler, and hydrated lime.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: isilkarapinar@maltepe.edu.tr (I. Sanrı Karapınar)
Geliş / Received: 18.06.2020 Kabul / Accepted: 19.09.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021
doi: 10.28948/ngumuh.754221

2 Materials and methods

2.1 Materials

In order to investigate the influence of different supplementary cementitious materials on the sulfate resistance of concrete, the following component materials were used in the experiments.

- Cement: Portland cement (PC) CEM I 42.5R used in this study was produced by Istanbul AkcanSA Cement Corp. The physical and chemical properties are given in Table 1.
- Aggregate: In the production of concretes, crushed limestone (4/8 and 8/16 mm) and sea sand (0/4 mm) were used as coarse and fine aggregates. In accordance with TS 706 [19], the aggregate mixing ratio was adjusted remaining between A16 and B16 standard curves.
- Mineral additives: Silica fume (SF), blast furnace slag (BFS), fly ash (FA), limestone filler (LS), and hydrated lime (HL) were used as supplementary cementitious materials in the concrete mixtures. The physical and mechanical properties of each are presented in Table 1.
- Mixing water: Tap water was used.

2.2 Method

In order to conduct the experiments to assess the sulfate resistance of concrete mixtures with different supplementary materials, silica fume (SF), blast furnace slag (BFS), fly ash

(FA), limestone filler (LS) and hydrated lime (HL) were replaced with Portland cement (PC). Five different series of concrete mixtures were developed with a water–binder ratio of 0.33 and a total binder content of 400 kg/m³. The reference concrete samples composed of ordinary Portland cement were designated as PC and the rest of the mixtures were designated as PC1, PC2, PC3, and PC4. In order to obtain the same workability with the reference samples, PC, 0.9% Glenium 27 was used in the other mixtures. The chemical compositions and mixture proportions of concretes are presented by mass in Table 2 and Table 3, respectively. In Table 3, %H indicates the air content of the specimens.

For each group, 30 concrete specimens were prepared and cast in steel moulds with dimensions of 7/7 cm. The specimens were demoulded after 24 h of casting and cured in lime-saturated water at 20 ± 2 °C for up to 28 days. After 28 days of curing, half of the specimens from each group were immersed in lime-saturated water and half of them were immersed in a Na₂SO₄ solution of 50 g/l. For all the concrete specimens, the changes in compressive strength and weight were monitored for 365 days. Every 14 days, the specimens were taken out, weighed, and sulfate solutions were renewed. The 28th day was accepted as the curing initiation and the compressive strength and weight changes were determined on the 28th, 56th, 90th, 180th, and 365th days thereafter. Specimens from each mixture were categorized into five series and labelled. Specimens cured in lime-saturated water were labelled with the letter W, specimens cured in Na₂SO₄ solution were labelled with the letter N.

Table 1. Chemical composition and physical properties of Portland cement and cementitious materials

Chemical Properties	PC (%)	SF (%)	BFS (%)	FA (%)	LS (%)	HL (%)
SiO ₂	19.86	83.84	35.80	51.50	0.20	0.19
Al ₂ O ₃	5.50	0.46	13.78	23.08	0.13	0.13
Fe ₂ O ₃	3.55	1.32	1.17	6.07	0.05	0.06
CaO	64.27	1.35	39.06	10.53	98.7	97.8
MgO	1.19	4.84	5.95	2.42		
SO ₃	2.66	1.30	1.31	1.32		
Na ₂ O	0.23	0.53	-	0.77		
K ₂ O	0.76	3.63	-	2.54		
CaCO ₃ +MgCO ₃	-	0.75	-			
Cl ⁻	-	0.14	-	0.0028		
Loss on ignition	1.81	2.47	0.71	1.06		
Physical Properties						
Specific gravity (gr/cm ³)	3.14	2.21	2.93	2.20	2.62	2.21
SSA (m ² /g)	0.399	13.855	0.550	4.033	0.360	6.67
Retained on 90µm sieve%	-	-	-	-		
Retained on 45µm sieve%	0.5	-	0.6	0.4		

Table 2. Mixture proportions of concrete specimens (%)

Sample Series	PC	BFS	SF	FA	LS	HL
PC	100	-	-	-	-	-
PC1	50	42	8	-	-	-
PC2	50	38	8	-	4	-
PC3	50	38	8	-	-	4
PC4	50	38	-	8	-	4

Table 3. Mixture proportions of PC and cementitious materials (kg/m³)

Sample Series	PC	Water	Sand	Crushed stone No: I	Crushed stone No: II	SF	BFS	FA	HL	LS	G27	%H
PC	397	131	919	443	644	-	-	-	-	-	3.2	0.6
PC1	195	129	903	435	633	31.2	163.8	-	-	-	3.5	2.3
PC2	192	127	889	428	623	31	146	-	15	-	3.5	3.8
PC3	198.5	131	919	443	644	32	151	-	-	16	3.6	0.6
PC4	198.5	131	919	443	644	-	151	32	-	16	3.6	0.5

3 Results and discussions

3.1 Compressive strength change

The change in the compressive strength of the concrete specimens was checked during a period of 365 days. The compressive strength results of the five different series of concrete specimens immersed in lime-saturated water and sodium sulfate solution are presented in Table 4 and 5, respectively.

As can be seen from Table 5, all the concrete specimens exposed to the Na₂SO₄ solution for 365 days have an increment in the compressive strength compared to the corresponding 28-day compressive strength of the reference specimens, PCN. At the age of 90 days, PC2N and PC3N series showed a slight decrement in compressive strength compared to the same age compressive strength of the reference specimens, PCN.

Also, by comparing the results of the compressive strengths of the specimens immersed in lime-saturated water and Na₂SO₄ solution, it is observed that all the specimens immersed in the Na₂SO₄ solution showed a decrement compared to the corresponding specimens immersed in lime-saturated water. After 56 days of exposure to the Na₂SO₄ solution, all the specimens containing supplementary cementitious materials showed a decrement in compressive strength except PC1N. Specimen series of PC1N showed a decrement after 90 days of exposure to the Na₂SO₄ solution. After 365 days of immersion in the Na₂SO₄, the decrement in the compressive strength of PCN is 28%, PC1N is 2.5%, PC2N is 14%, PC3N is 11% and PC4N is 8.3%. In order to evaluate each group of concrete specimens immersed in lime-saturated water and Na₂SO₄ solution, compressive strength results of the reference specimen series and each group containing supplementary cementitious materials during 365 days are presented in Figure 1 and 2, respectively.

Table 4. Change in the compressive strength of concrete specimens immersed in lime-saturated water

Exposure days	Compressive Strength (MPa)				
	PCW	PC1W	PC2W	PC3W	PC4W
0	0	0	0	0	0
28	44.5	44.5	44.5	44.5	44.5
28+28	55.6	50	47.9	48.5	58.6
56	59.9	53.7	56.7	63.5	61.9
90	63.6	60.4	57.5	63.3	65.5
180	65.4	68.7	59.9	68.4	67.9
365	68.9	71.4	60.5	69.9	68.5

Table 5. Change in the compressive strength of concrete specimens immersed in Na₂SO₄ solution

Exposure days	Compressive Strength (MPa)				
	PCN	PC1N	PC2N	PC3N	PC4N
0	0	0	0	0	0
28	44.5	44.5	44.5	44.5	44.5
28+28	52.9	54.2	47.8	51.3	60.7
56	55	64.7	56.4	55.2	58.2
90	59.8	65.8	53.4	57.9	60.9
180	51	66.8	56.3	59.3	63.1
365	49.6	69.6	51.8	62	62.8

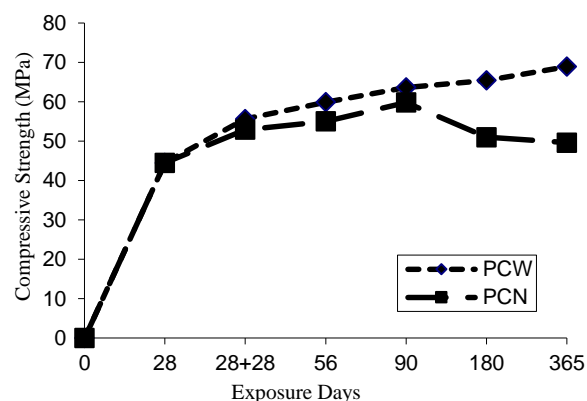


Figure 1. Compressive strength change for PCW and PCN

When Figure 1 is examined, the compressive strength values of the reference concrete specimens immersed in lime-saturated water showed a steady increase with time. After the first 28th day, specimens kept in the sulfate solution showed a steady decrease until the end of curing. In addition to the increase in the decline of the compressive strengths after the 90th day, blisters and spalling were observed on the surface of the reference specimens. On the other hand, the other concrete series exposed to Na₂SO₄ solution had neither blisters nor spalling on their surfaces. Figure 3 shows the physical condition of the reference specimens and the specimens containing the specified supplementary cementitious materials at the end of 365 days.

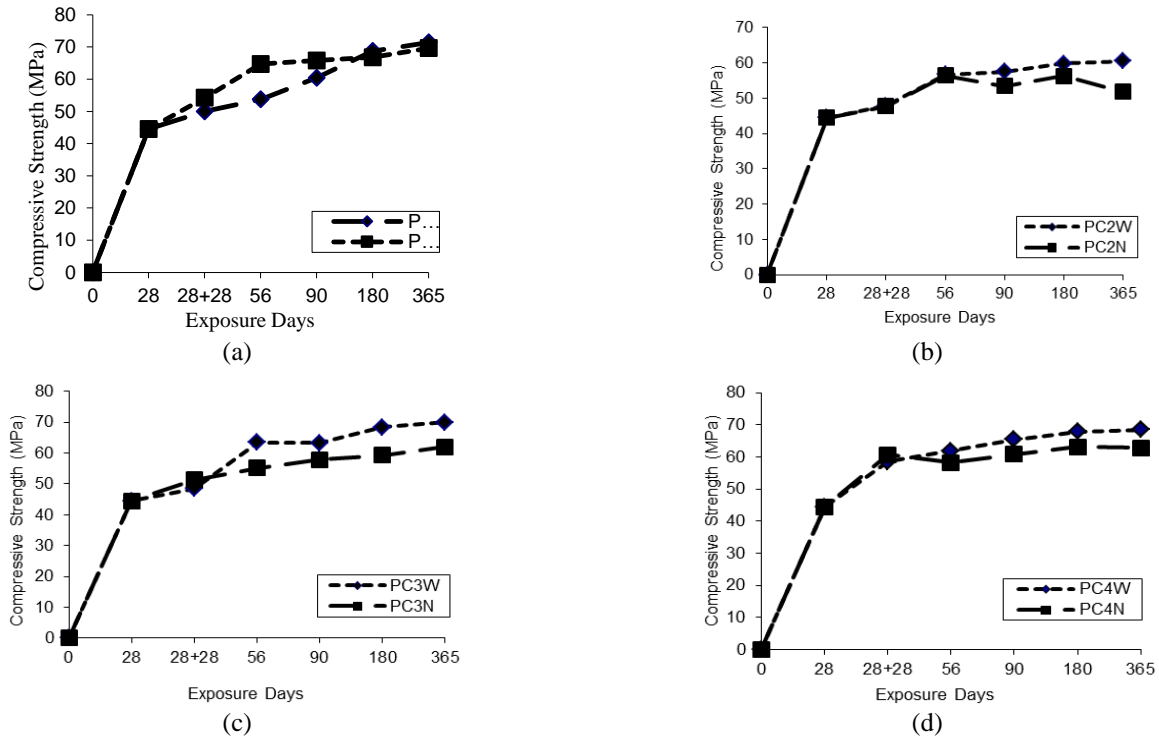


Figure 2. Compressive strength change for; (a) PC1W and PC1N, (b) PC2W and PC2N, (c) PC3W and PC3N (d) PC4W and PC4N



Figure 3. The appearance of the concrete specimens after the immersion in Na₂SO₄ solution for 365 days

3.2 Weight Change

Weight change in the concrete specimens immersed in lime-saturated water and Na₂SO₄ solution was monitored for 365 days. At the end of the testing period, it is seen that the specimens exposed to Na₂SO₄ solution gained more weight compared to the specimens immersed in lime-saturated water. On the other hand, as can be seen from Table 6, the highest weight gain is monitored in the PCW and PCN reference series as %2.14 and %2.44, respectively.

Table 6. Change in the weight of concrete specimens immersed in lime-saturated water and Na₂SO₄ solution

Sample Series	Weight change (%)	Sample Series	Weight change (%)
PCW	2.14	PCN	2.44
PC1W	1.64	PC1N	1.74
PC2W	1.06	PC2N	2.06
PC3W	1.64	PC3N	1.82
PC4W	1.68	PC4N	2.29

All the concrete specimens immersed in lime-saturated water and Na₂SO₄ solution showed a general steady weight gain for the whole testing period. In Figure 4, the relation between the relative weight change and exposure days is given for the reference specimen series in both lime-saturated water and Na₂SO₄ solution whereas the same relation is presented for all the specimens containing supplementary cementitious materials in Figure 5.

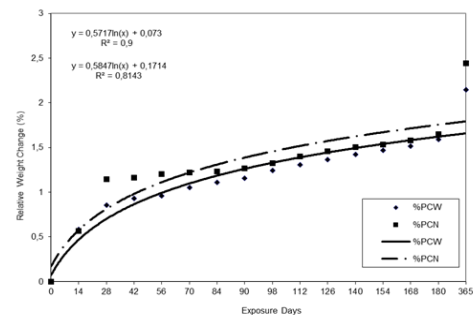


Figure 4. Relation between relative weight change and exposure time for PCW and PCN

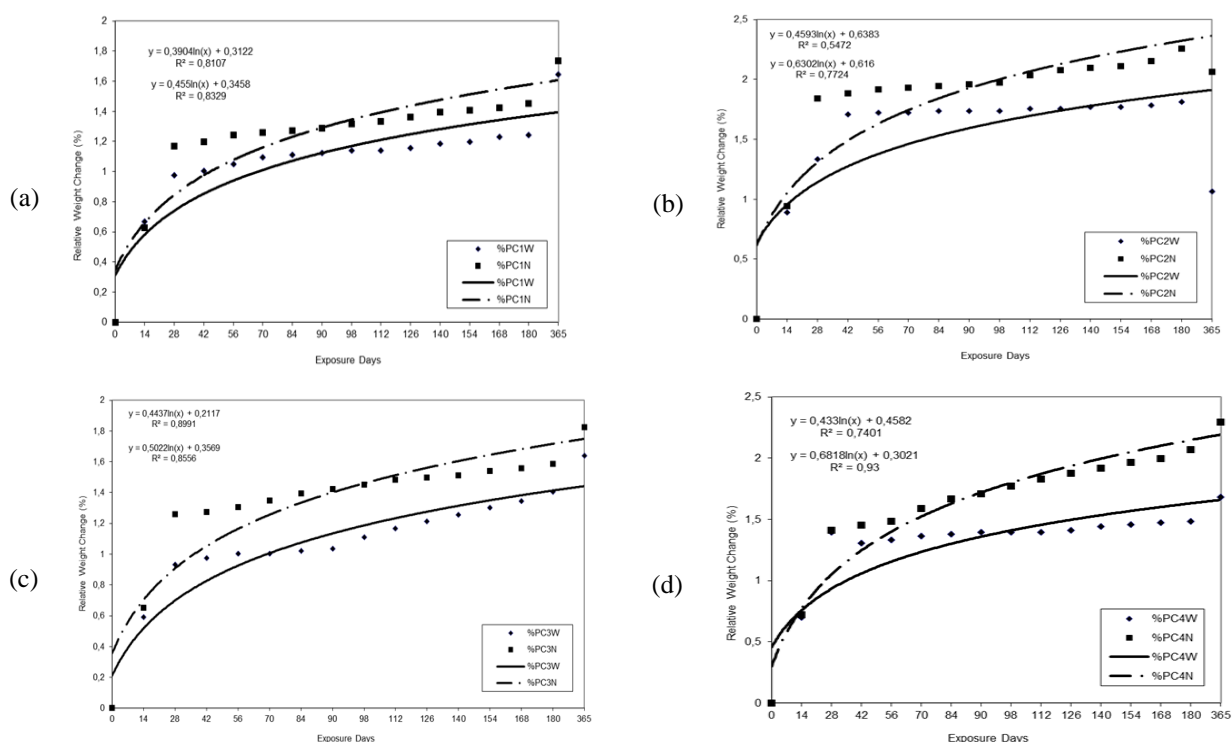


Figure 5. Relation between relative weight change and exposure time for; (a) PC1W and PC1N, (b) PC2W and PC2N, (c) PC3W and PC3N, (d) PC4W and PC4N

4 Conclusion

In this study, the influence of Na_2SO_4 solution on the different concrete specimen series prepared by Portland cement (PC) and the specified supplementary cementitious materials (SF, BFS, FA, LS, HL) was investigated for 365 days and evaluated by the comparison with the reference concrete series.

When the results are compared, it is concluded that all concrete specimens containing the specified supplementary cementitious materials have an increase in compressive strength at the end of 365 days of exposure to the Na_2SO_4 solution. All mixtures containing supplementary cementitious materials showed good performance in Na_2SO_4 solution of 50 g/l for the whole testing period. However, when the compressive strength results are compared, it is seen that among all the other specimens, PC1N showed the best performance. It is observed that the higher levels of cement replacement by BFS appear to be more effective. On the other hand, it is noticed that the PC2N specimen having LS supplement exhibits the lowest compressive strength in Na_2SO_4 solution.

When the weight change of the concrete specimens immersed in lime-saturated water and Na_2SO_4 solution were compared at the end of 365 days, it is concluded that the specimens exposed to Na_2SO_4 solution gained more weight compared to the specimens immersed in lime-saturated water. It can be said that the absorption of the Na_2SO_4 solution caused weight gain in the specimens. On the other hand, among the specimens with mineral admixtures immersed in Na_2SO_4 solution, the smallest amount of weight gain is observed in PC1N as 1.74% and the highest in PC4N

as 2.29%. Compared to lime-saturated water curing, the weight increment was higher for the concrete specimens containing different types of cementitious materials in different percentages. If the changes in the weight of the specimens both in lime saturated water and Na_2SO_4 solution are evaluated separately, it is seen that with respect to the reference series PCW and PCN, all the other series showed weight loss at the end of 365 days.

As a result, in this research, it is seen that the studied supplementary cementitious materials offer properties comparable to those of Portland cement with a much reduced CO_2 footprint and a potential of a performance advantage over traditional types of cement in certain applications.

Conflict of interest:

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 18%

References

- [1] F. Bellmann, W. Erfurt, and H. M. Ludwig, Field performance of concrete exposed to sulphate and low pH conditions from natural and industrial sources. *Cem. Concr. Comp.*, 34, 86-93, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.07.009>
- [2] M. Sahmaran, O. Kasap, K. Duru, and I. O. Yaman, Effects of mix composition and water-cement ratio on the sulfate resistance of blended cements. *Cem. Concr. Comp.*, 29, 159-167, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.007>
- [3] L. Guangcheng, X. Youjun, and T. Xuguang, Evaluating deterioration of concrete by sulfate attack.

- J. Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 22, 572-576, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11595-006-3572-6>
- [4] K. K. Sideris, A. E. Savva, and J. Papayianni, Sulfate resistance and carbonation of plain and blended cements. *Cem. Concr. Comp.*, 28, 47-56, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.09.001>
- [5] A. M. Diab, A. M. Awad, H. E. Elyamany, and A. M. AbdElmoaty, Guidelines in compressive strength assessment of concrete modified with silica fume due to magnesium sulfate attack. *Constr. Build. Mater.*, 36, 311-318, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.075>
- [6] P. S. Mangat, and J. M. El-Khatib, Influence of initial curing on sulphate resistance of blended cement concrete. *Cem. Concr. Res.*, 22, 1089-1100, 1992. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(92\)90039-X](https://doi.org/10.1016/0008-8846(92)90039-X)
- [7] N. M. Al-Akhras, Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. *Cem. Concr. Res.*, 36, 1727-1734, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.026>
- [8] W. Ouyang, J. Chen, and M. Jiang, Evolution of surface hardness of concrete under sulfate attack. *Constr. Build. Mater.*, 53, 419-424, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.107>
- [9] M. Santhanam, M. D. Cohen, and J. Olek, Mechanism of sulfate attack: A fresh look Part 1: Summary of experimental results. *Cem. Concr. Res.*, 36, 2132-2137, 2006. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00724-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00724-X)
- [10] J. I. Bhatta, and P. C. Taylor, Sulfate resistance of concrete using blended cements or supplementary cementitious materials. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, R&D Serial No. 2916a, 2006.
- [11] C. Shi, A. Fernandez-Jimenez and A. Palomo, New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement. *Cem. Concr. Res.*, 41, 750-763, 2011. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9953-8>
- [12] A. E. Al-Salami and A. Salem, Effects of mix composition on the sulfate resistance of blended cements. *Int. J. Civ. Environ. Eng.*, 10(6), 43-47, 2010.
- [13] A. M. Neville, Properties of concrete, 4th. ed., John Wiley & Sons Inc, New York, USA, 1997.
- [14] H. Rashidian-Dezfouli, and P. R. Rangaraju, A comparative study on the durability of geopolymers produced with ground glass fiber, fly ash, and glass-powder in sodium sulfate solution. *Constr. Build. Mater.*, 153, 996-1009, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.139>
- [15] Z. Bascarevic, M. Komljenovic, Z. Miladinovic, V. Nikolic, N. Marjanovic, Z. Zujovic and R. Petrovic, Impact of sodium sulfate solution on mechanical properties and structure of fly ash based on geopolymers. *Materials and Structures*, 48, 683-697, 2015. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0325-4>
- [16] N. Dzunuzovic, M. Komljenovic, V. Nikolic and T. Ivanovic, External sulfate attack on alkali-activated fly ash-blast furnaceslag composite. *Constr. Build. Mater.*, 157, 737-747, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.159>
- [17] Z. Zhang, Q. Wang, H. Chen and Y. Zhou, Influence of the initial moist curing time on the sulfate attack resistance of concretes with different binders. *Constr. Build. Mater.*, 144, 541-551, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.235>
- [18] R. E. Hachem, E. Roziere, F. Grondin and A. Loukili, New procedure to investigate external sulfate attack on cementitious materials. *Cem. Concr. Compos.*, 34, 357-364, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.010>
- [19] TS 706 EN 12620, Aggregates for Concrete, Turkish Standards Institute, Ankara, 2003.



Sarmal malzemeli granüler kolonların sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi Investigation of encased granular columns with finite element method

Can Erenson^{1,*} , Niyazi Uğur Terzi¹ 

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

Özet

Granüler kolon uygulamaları, zemin taşıma kapasitesinin artırılmasında, sıvılaşmanın önlenmesinde ve stabilitenin sağlanmasında günümüzde yaygın kullanılan güçlendirme teknikleri arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, polyster ve ömrünü tamamlamış atık araç lastikleri ile sargılanmış taş ve kum kolonların geridolgunuz ortamda düşey yüklemeye altındaki deformasyon davranışları ve yük taşıma kapasiteleri deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Kolon stabilitesinin düşey yüklemeye altında bozulmasını engellemek amacıyla kullanılan sargılama materyallerinin göçme anındaki kritik davranışlarını ortaya koyan bu araştırmalar sonucunda, atıl halde bulunan araç lastikleri polyster sarmallı kolonlara göre daha düşük seviyelerde deformasyonlar göstermiştir. Diğer bir deyişle geridolgu malzemesinin bütüncül yapısını muhafaza etmek için kullanılan atık lastikler, taşıma kapasitesi artışında önemli bir rol oynamıştır. Bu uygulama, aynı zamanda geri kazanım açısından ömrünü tamamlamış lastiklere yeni bir kullanım alanı açmaktadır. Yapılan laboratuvar deneyleri ve bu deneyler ile benzer sonuçlar ortaya koyan analizler sonucunda, lastik sarmallı kolonlar, polyster sarmallı kolonlara göre 6 ile 12 kat arasında daha yüksek taşıma kapasitesine ulaşmışlardır.

Anahtar kelimeler: Atık lastikler, Granüler kolon, Nümerik analiz, Sarmal takviyesi, Sonlu elemanlar yöntemi

1 Giriş

Zemin iyileştirmenin en önemli amacı, zeminin mukavemet değerlerini artırmak, taşıma kapasitesinin yeterliliğini sağlamak ve stabiliteyi dengede tutmaya dayanmaktadır. Bunun için zemine tatbik edilen güçlendirme elemanlarının zeminle birlikte kompozit bir eleman halinde çalışması iyileştirme yöntemleri arasında yer almaktadır. Bu çalışmada söz konusu taşıma gücünün artırılması ve stabilitenin korunmasına yönelik olarak granüler kolonlar ve granüler kolonların bütüncül yapısının muhafaza edilmesi için uygulanan atık lastik ve polyster sarmalların etkisi araştırılmıştır. Her iki uygulamada da nihai sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda taşıma gücü yönünden büyük ölçüde olumlu sonuçlar alınmıştır.

Granüler zeminlerin taş ve kum kolonlar ile iyileştirilmesinde, sarmal içerisindeki kumlu ve çakıllı geridolgu malzemesinin tabakalar halinde sıkıştırılarak yerleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Uygulamalarda güçlendirme elemanı olarak taş ve kum kolon çevresine polyster esaslı geotekstil membran ile sarmal sargı yapılmıştır. Bu yöntemde, granüler kolonların taşıma gücü artırılmış olsa da granüler kolona sargılama işleminin uygulanması ve zemin ortamına yerleştirilmesi zor ve uzun sürmektedir. Diğer yandan, geotekstil ve benzeri sargılama

Abstract

Nowadays, reinforcement techniques applied with granular column applications are widely used in increasing soil bearing capacity, preventing liquefaction and providing stability. In this study, polyster encased granular columns and tire encased granular columns were tested under vertical loading without backfill. Deformation behavior and load bearing capacity of granular columns were investigated experimentally and numerically. In this research, the critical behavior of the encasement materials used to prevent the deterioration of column stability under vertical loading has been demonstrated and lower deformations were observed in tire encased columns than polyster encased columns. In other words, the waste tires provide the integrative structure of the backfill material and have played an important role in increasing bearing capacity. This application opens new usage areas for end of life tires in terms of recycling. As a result of the laboratory tests and numerical analyses that showed similar results with these experiments, the tire encased granular columns reached 6 to 12 times more bearing capacity than the polyster encased granular columns

Keywords: Granular column, Encasement, Finite element method, Numerical analysis, Waste tires

malzemelerin beraberinde getirdiği üretim ve işçilik giderleri sistemi daha yüksek maliyetli kılmaktadır. Bu bakımdan araştırmada, atık malzemelerin sargılama malzemesi olarak kullanılması hedeflenmiştir. Çevreci bir yaklaşımın gereği ile ömrünü tamamlamış atık araç lastikleri sarmal malzeme olarak kullanılması sağlanmıştır.

Atık lastikler pek çok şekilde parçalanarak geri kazanılmaktadır ancak bu materyalin depolanması, taşınması ve parçalanma işlemleri de bir maliyet getirdiği için lastiklerin bütüncül bir şekilde geri kazanılması da çalışmanın dikkat çekici diğer bir yönünü ortaya koymaktadır. Lastik içerisinde bulunan tel demetleri, kord bezi ve katmanlar kauçuk hamuruna ilave olarak yüksek dayanıklılık oluşturmaktadır. Bu bakımdan lastik içerisinde tabakalar halinde sıkıştırılmış kumlu ve çakıllı geridolgu malzemelerinin etriye prensibi gibi daha güçlü tutmasını sağlamıştır.

Granüler kolonların boydamca orta noktalarında dört farklı konumundan yanal deformasyonları potansiyometrik cetveller ile alınmıştır. Bu çalışmada düşey yüklemeler etkisinde laboratuvar deneylerinden elde edilen bu deplasmanlar aksel ve yanal olarak gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçların doğruluklarını değerlendirmek için ve deney sistemi ile yüklemeye koşulları ANSYS sonlu elemanlar

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: canerenson@aksaray.edu.tr (C.Erenson)

Geliş / Recieved: 30.06.2020 Kabul / Accepted: 25.11.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngmuh.760183

programı ile modellenmiştir. Daha sonra, nümerik ve deney sonuçları birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Granüler kolonların kullanımı doğal zeminlerin iyileştirilmesinde ilk olarak 1800'lü yılların başlarında görülmektedir [1]. Taş kolon uygulamaları ise özellikle 1950'li yıllardan itibaren Avrupa'da 1970'li yıllarda ise Amerika'da görülmeye başlanmıştır. Olumsuz zemin koşullarının bulunduğu sahalarda inşa edilmesi hedeflenen yapıların zemin iyileştirmesinde beklenen zemin taşıma kapasitesinin altında kalınması durumunda granüler kolonların tercih edildiği pek çok uygulama literatürde bulunmaktadır. Bununla beraber taş kolon kesitinin zamana bağlı olarak veya proje yüklerinin üzerine çıktığı durumlarda bozulması, taş kolon çemberinin sargılamaya ihtiyacını doğurmuştur. Geotekstil sarmallı granüler kolonların sektöre dahil olması ile birlikte kayda değer taşıma gücü artışları izlenmiştir. Geotekstil sargılama elemanların geoteknik mühendisliğine sağladığı katkı tecrübi ve akademik yayınlarda biliniyor olmasına karşın zaman zaman maliyet ve uygulama açılarından dezavantajlı olabilmektedir. Bu bakımdan geleneksel sarmallı uygulamaların haricinde yeni bir yöntem olarak lastiklerin sarmal malzeme olarak kullanılması hem taşıma kapasitesi artışı hem de geri dönüşüm yönünden üstünlükler ortaya koymaktadır.

Yumuşak ve gevşek zeminlerin iyileştirilmesinde granüler kolon uygulamaları ile yaygın olarak karşılaşılmaktadır. Yapıdan aktarılan yüklerin projede belirlenen şekilde taşınmaması durumunda zemin taşıma gücünün artırılmasında, oturma sorunlarının giderilmesinde sivilaşan veya mukavemetini kaybeden zeminlerin stabilitesinde söz konusu bu yöntem oldukça etkili sonuçlar vermektedir.

İki farklı tür sargılama malzemesi ile donatılmış taş ve kum kolonların düşey yükleme altındaki kısalmaları ve kolon orta noktalarının yanal doğrultuda genişlemeleri mekanik ve fotogrametrik yöntemlerle belirlenebilmektedir [2]. Ancak güçlendirme elemanlarının farklı koşullardaki zemin ortamları içerisindeki davranışının belirlenebilmesi için geridolgu ile sarmal malzemenin modellenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Düşey yükleme altında deformasyona maruz kalan kolon özellikle zeminin en gevşek bölgesinde ayrışma gösterme eğiliminde bulunmaktadır. Geridolgunun ve takviye sarmal malzemesinin davranışının incelenmesi bu sebepten dolayı önem taşımaktadır. Granüler malzemenin ayrışma bölgelerinin ve büyüklüğünün belirlenmesi, geotekstil kökenli granüler kolon sarmal takviyelerinin zorlanma bölgelerinin belirlenmesi için ise sonlu elemanlar programlarından yararlanılmaktadır. Literatürde, granüler kolonların nümerik yöntemler ile incelendiği pek çok çalışma bulunmaktadır. Özellikle taş kolonların güçlendirilmesinde sayısal modellemenin önemine dikkat çeken bir çalışmada modelleme tekniklerinin 2D ve 3D koşullarda nasıl uygulanacağına yönelik araştırmalarda bulunmuşlardır [3]. Araştırmacılar çalışmalarında, Plaxis 2D ve 3D, DIANA, EXAMINE, ZSoil, ABAQUS, ANSYS, NISA, GEOSTUDIO, CRISP, TOCHNOG, CESAR, GEOFEM 2D ve 3D, FLAC, FLAC 3 gibi pek çok yazılımın

taş kolon uygulamalarında yaygın olarak kullanıldığını vurgulamışlardır. Çalışmada aynı zamanda, sonlu elemanlar ile modelleme yapılırken model iç kuvvet dengelerinin sağlanmasının, farklı bölgelerde oluşan deplasmanların uyumluluğunun, materyaller üzerinde oluşan gerilmelerin gerçeği yansıtmasının ve sınır koşullarının dikkate alınmasının önemi de belirtilmiştir.

Öte yandan, taş kolonların modellenmesi üzerine beş ana yaklaşımın bulunduğunu ileri sürülmüştür [4]. Bunlardan birincisi, eksenel simetrik olarak tek bir kolonu çevreleyen zemin modeli ile kullanılan birim hücre modelidir [5]. Van Impe ise 1983 yılında düzlem gerilme durumunda çok sayıdaki kolonun sürekli yükleme altındaki davranışını modelleyerek bir yöntem geliştirmiştir [6]. Bu metodun dışında, silindirik kolonlar yerine ringler halinde bir modelleme yapılarak da başka bir eksenel simetri durumunda teknik kullanılmıştır [7]. Homogenization (homojenleştirme) adı verilen diğer bir modelleme tekniğinde ise Gáb vd. 2008 yılında, zemin ve taş kolon modelini kompozit zemin parametrelerini ele alarak kullanmıştır [8]. Bu dört metod 2D olarak değerlendirilirken beşinci modelleme tekniği olarak vurgulanan "Full 3D" modelde ise sistem kompleks halde değerlendirilerek üç boyutlu analizler yapılmıştır [9]. Bu araştırmalar sonucunda, geleneksel taş kolon uygulamalarında analizlerin modellemeye uyumu açısından Castro 2017 yılında, birim hücre metodunun oturma ve konsolidasyonun analizinde uygun olup stabilite problemlerinde uygun olmadığını; düzlem gerilme modelinin ve homojenleştirme metodunun kullanıldığı çalışmalarda oturma, konsolidasyon ve stabilite problemlerinde kısmen uygun olduğunu ve 3D modelin kullanıldığı araştırmalarda oturma, konsolidasyon ve stabilite problemleri açısından tamamen uygun olduğunu ortaya koymuştur [10].

Zemin modelleri açısından ise literatürde ortam koşulları ve problem türüne göre farklı modeller kullanılabilmektedir. Kaynaklarda, vibro-replacement (vibro yer değiştirme) metodu ile oturmaların azaltılmasına yönelik çalışmalarda Mohr-Coulomb (MC) zemin modeli [11], geogrid sarmallı taş kolonların davranışlarının incelendiği bir başka çalışmada killi zemin ortamı için Soft Soil (SS, yumuşak zemin) modeli ve kumlu zemin ortamı için Hardening Soil (HS, pekleşen zemin modeli) kullanılmıştır [12].

Yanal destekli yüksek rijitlikteki geosentetik malzeme ile sargılanmış taş kolon davranışının nümerik olarak incelendiği bir çalışmada araştırmacılar, taş kolon deformasyon davranışlarını etkileyen, geosentetik malzemenin rijitliği, geridolgu malzemesinin kayma mukavemeti parametrelerinin etkinliği, kolon çapı ve yanal zemin itkisi gibi parametreleri ABAQUS programında modellemişlerdir ve parametrelerin stabilite üzerindeki etkinliklerini belirlemişlerdir [13]. ANSYS sonlu elemanlar programı ile modelleme yapılan çalışmalar da literatürde bulunmaktadır. Bu kapsamda, karayolu dolgusunun tasarımında taş kolonlar ile güçlendirilmiş kesitin davranışı [14] ve karayolu tasarımında taş kolon uygulamaları ile tabaka kalınlıklarının azaltılmasına yönelik optimizasyonu incelenmiştir [15]. PLAXIS programında 2D ve 3D analizinin farkının araştırıldığı bir başka çalışmada ise

parametrik ve modelsel farklılıkların olmasına rağmen göçme modu ve deformasyon davranışında benzerlikler gözlemlenmiştir [16]. Buna benzer olarak modellerin simule edildiği başka çalışmalarda literatürde yerini almaktadır [17, 18].

Yapılan laboratuvar çalışmaları ve literatür taraması kapsamında elde edilen veriler ışığında bu çalışmada, geridolgu ortamda düşey yüklemeye maruz, atık lastik ve polyester sarmallı taş ve kum kolonların ANSYS programı ile deformasyon davranışı incelenmiştir. 3D olarak modellenen yapılan çalışmada, granüler kolonların deformasyon davranışları konum sensörleri ve fotogrametrik veriler ile örtüşmektedir. Ayrıca, polyester sarmallı taş kolonların nihai yüklemeye altındaki göçme anındaki davranışı ve göçme bölgesi de program çıktıları ile benzer sonuçlar göstermiştir. Bu bakımdan, güçlendirme elemanı ve zemin ortamının doğru modellenmesi, tasarım, maliyet ve taşıma gücü kapasitesinin belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada esas olarak, sarmal malzemelerin granüler kolonun taşıma kapasitesine etkisi ve tekstil kökenli sarmalın göçme davranışı üzerine durulmuştur.

2 Materyal ve metot

Laboratuvar deneyleri, 60 cm çaplı 150 cm yükseklikli granüler kolonlar üzerine düşey yüklemeye yapılarak gerçekleştirilmiştir. Tatbik edilen yük etkisinde granüler kolonlara sargılanmış her bir numune üzerinden konum sensörleri ile deplasmanlar okunup kaydedilmiştir ve nihai taşıma kapasitesine erişene kadar göçme paternleri belirlenmiştir. Bununla birlikte, eş zamanlı olarak, düşey yönde potansiyometrik cetveller yardımı ile granüler kolonların düşey yönde şekil değiştirmesi (eksenel oturma) de iki farklı noktadan ölçülmüştür. Düşey yüklemeye, 25 mm kalınlıklı rijit bir yüklemeye plakası üzerine hidrolik krikolar vasıtasıyla aktarılmıştır ve yüklemeye verileri yük hücreleri yardımıyla veri toplama ünitesinde kaydedilmiştir. Deneyler sonucunda, yük hücreleri ve potansiyometrik cetvellerden okunan veriler, bilgisayar ortamında yük deplasman ilişkilendirmeleri yapılarak yorumlanmıştır. Bu bağlamda, davranışa ait yorumlamalar sonuçlar doğrultusunda değerlendirilerek atık lastik ve polyester sarmalların etkinliği ortaya koymuştur.

Deneylerde kullanılan materyallerin mühendislik özellikleri ve deney sistemi içerisindeki yerine ait bilgiler ise aşağıdaki gibi verilmiştir.

2.1 Geridolgu malzemesi

Granüler kolonlarda geridolgu malzemesi olarak iki farklı malzeme kullanılmıştır. Bunlardan birincisi Kırşehir bölgesinden temin edilen Kızılırmak dere kumudur. Bu kum, bünyesindeki danelerin pek çok kum türüne kıyasla daha homojen yapıda olması sebebiyle tercih edilmiştir. Böylelikle, kolon içerisine sıkıştırılarak yerleştirilen kumun, granüler kolonun her tarafında eşit veya benzer karakteristik göstermesi beklenmektedir.

Kumun mühendislik parametreleri elek analizi ve üç eksenli basınç deneyleri ile belirlenmiş olup Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kırşehir Kızılırmak kumu mühendislik parametreleri

Parametre	Değer
İçsel Sürtünme Açısı (ϕ)	25°
Kohezyon (c)	0 kPa
Kuru Birim Hacim Ağırlık (γ_k)	15.05 kN/m ³
Zemin Sınıfı (USCS)	SP

Diğer geridolgu malzemesi ise 19 mm çaplı agregalardan seçilmiştir. Yükleme sonrasında agregaların aşınmaya bağlı olarak dane dağılımı değiştiği için her deneyde eşdeğer özellikte agregalar kullanılmıştır. Uniformluk katsayısı (c_u) yaklaşık 1 olarak belirlenmiş agregalar üzerinde yapılan deneyler sonucu elde edilen mühendislik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

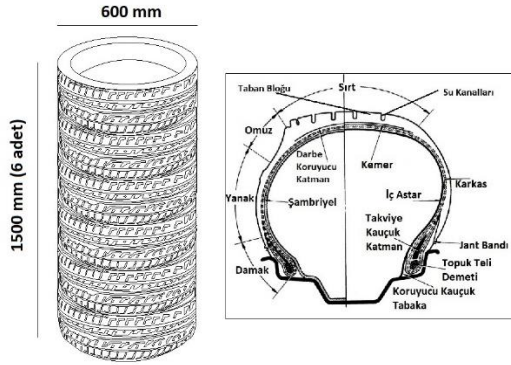
Tablo 2. Ortalama 19 mm çaplı agregaların mühendislik parametreleri

Agrega Özellikleri	Değer
Aşınma Oranı	%33
Kohezyon (c)	0 kPa
Metilen Mavisini	0.5 (temiz)
Zemin Sınıfı (USCS)	GP

2.2 Atık araç lastikleri

Tamamı ömrünü tamamlamış atık lastiklerden oluşan sargılama malzemeleri Aksaray Organize Sanayi Bölgesi’nde ve çevresindeki depolama tesislerinden temin edilerek kullanılmıştır. Lastiklerin seçiminde kalite bazında sadece, her biri yaklaşık aynı çapta (60 cm) olacak şekilde birbirlerinden ayrılan malzemelerden 15 ve 16 inç araç lastiklerinde lastik bütünlüğünü bozacak olan yırtık veya kopukluk bulunmamasına dikkat edilmiştir. 150 cm yüksekliğine ulaşana kadar her bir lastik 10’ar cm’lik tabakalar halinde sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Atıl araç lastiklerinin üst üste diziliminde yerleşim aksının sağlanması için her bir adımda su terazileri kullanılarak yüklemenin eksenel olması sağlanmıştır.

Bütüncül yapıyı muhafaza etmesi için kullanılan atık lastiklerin yatay eksenindeki deplasmanlarına karşı direnç lastiğin yol ile temas eden sırt kısmı tarafından karşılanmaktadır. Esasen üretim amacına yönelik, araç lastiklerinin temel görevleri, yuvarlanma direnci, aerodinamik kuvvetler, iç sürtünme kuvvetleri, yokuş anı yerçekimi kuvveti ve hızlanma esnasındaki eylemsizlik kuvvetlerini karşılamaktır. Karayollarında bu kuvvetlere maruz kalan lastiklerin tasarımında kullanım ömrü ortalama beş yıl olarak belirlenmektedir. Lastikler ulaştırma bakımından her ne kadar araçlar üzerindeki etkinliğini bu sürede yitirse de bünyesinde bulunan katmanlar, çelik teller, kord bezi vb. elemanlardan dolayı mukavemetini uzun süre korumaktadır. Bu çalışmada, düşey yüklemeye altındaki granüler kolonlara etkiyen yükler doğrultusunda geridolgu malzemesinin yanal açılmasını minimize etmek amaçlı atık araç lastikleri kullanılmıştır. Tatbik edilen düşey yüklemenin altında yanal deplasmanları engelleyen kesit ve lastiğin bölgeleri Şekil 1’deki gibidir.



Şekil 1. Lastik dizilimi ve kesiti

Ayrıca, saha uygulamalarında ve özellikle sıvılaşma potansiyeli yüksek zemin profiline sahip bölgelerde mevcut yeraltı suyunun düşey yöne ek olarak yatay yönde de drenajının büyük önem taşımasından dolayı özellikle atık lastik sarmallı sisteme drenaj kanallarının açılması önerilmektedir.

2.3 Polyester

Çalışmada sarmal olarak kullanılan diğer bir materyal olan polyester, yüksek mukavemetli branda olarak bilinen PVC kaplı bir tekstil malzemedir. Yüksek dayanımlı polyester iplikten dokunmuş kumaşlar da yine aynı şekilde her 10 cm'de bir sıkıştırılarak yükseltilmiştir. Sarmal olarak kullanılan bu malzeme tekstil malzemeler arasında ürün özellikleri ve dokunma biçiminden dolayı kumaş türlerine göre daha dayanıklı ve uzun ömürlüdür. Yüksek yırtılma ve kopma dayanımına sahip bu tekstil malzemenin bir diğer üstünlüğü de yüksek sıcaklık ve soğuk iklim koşullarında kullanılabilmesidir. 1100 DTX türü yüksek mukavemetli polyester iplik kumaştan dokunmuş tekstil malzemenin mühendislik özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Polyester sarmalın teknik özellikleri

Özellik	Değer
Kalınlık (mm)	0.45
Ağırlık (gr/m ²)	650
Kaplama	PVC
Atkı Dokuma Sıklığı (adet/cm)	8
Çözgü Dokuma Sıklığı (adet/cm)	8
Doku Şekli	1/1 Bez Ayağı
Kaynak Yapma	EF Kaynağına Uygun
Atkı Kopma Mukavemeti (kg/5 cm)	220
Çözgü Kopma Mukavemeti (kg/5 cm)	300
Su Geçirmezlik (mm/ss)	1000
Isıya Dayanıklılık	+70 ⁰ C
Soğuğa Dayanıklılık	-30 ⁰ C
Yapışma (N/5 cm)	90
Işık Haslığı	5 - 6

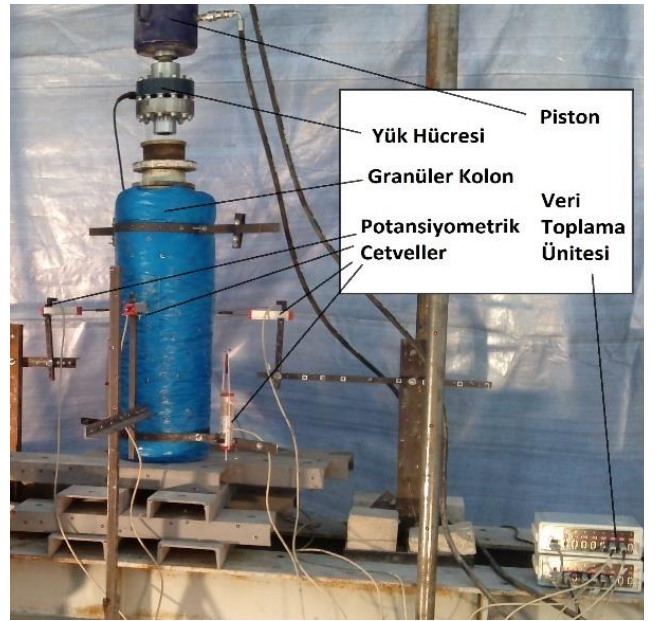
Sarmal malzeme olarak kullanılan ömrünü tamamlamış atık araç lastikleri ve polyester malzemelerinin sistem içerisindeki görünümü Şekil 2'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2. (a) Polyester sarmallı (b) lastik sarmallı granüler kolon

2.4 Yükleme, ölçüm düzeneği ve veri toplama ünitesi

Kademeli düşey yüklemeler hidrolik krik o vasıtasıyla yükleme plakasına iletilmektedir. Plaka ile piston arasında bulunan yük hücresi saniyede dört adet olacak şekilde veri toplama ünitesine veri akışında bulunmaktadır. Yüklemeler, her kademede deplasmanlar sabitlendikten sonra bir sonraki aşamaya geçerek sürdürülmüştür. Eş zamanlı olarak granüler kolonların dört bir tarafının orta noktalarından potansiyometrik cetveller ile yanıl deplasman okumaları alınmaktadır. Aynı zamanda, granüler kolonların üzerine kurulan bir ölçüm düzeneği ile iki yandan düşey deplasman verileri de toplanmaktadır. Veriler grafikler ve tablolar üzerinden değerlendirilerek yük deplasman ilişkilendirmeleri yapılmaktadır. Yükleme ve ölçüm düzeneği ile veri toplama ünitesi Şekil 3'te verilmiştir



Şekil 3. Deney sistemi

3 Bulgular ve tartışma

Analizlerde gerçek sarmal ve taş kolon davranışının yansıtılabilmesi için dolgu – sarmal ara yüzey tanımlamaları, malzeme özelliklerinin atanması, mesnet ve sınır koşullarının belirlenmesi ve yükleme koşullarının birebir olarak programa aktarılmasına dikkat edilmesi gerekmektedir [19-22]. Bu kapsamda program girdileri Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Program girdileri

Atık Lastik Sarmal	Elastisite Modülü	40 MPa
	Poisson Oranı	0.43
	Yoğunluk	1150 kg/m ³
PVC Sarmal	Elastisite Modülü	15 MPa
	Poisson Oranı	0.41
	Yoğunluk	1444 kg/m ³
Dolgu – Sarmal Arayüzey Kontaktı		Sürtümlü
Granüler Kolonların Mesnet Koşulu		Ankastre
Yükleme		Kademeli

3.1 Laboratuvar deney sonuçları

Laboratuvar deney sonuçları doğrultusunda elde edilen yük-deplasman verileri Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Deney sonuçları

Deney	Nihai Yük (kPa)	Düşey Deplasman (mm)	Yatay Deplasman (mm)	Düşey Dep./ Yatay Dep.
Lastik Sarmallı Taş Kolon	555	78	7	11.14
Polyester Sarmallı Taş Kolon	88	35	25	1.40
Lastik Sarmallı Kum Kolon	749	48	3	16.00
Polyester Sarmallı Kum Kolon	28	81	23	3.52

Tablolarda belirtilen düşey ve yatay deplasman değerleri nihai yüklemeler altında oluşmuşlardır. Bu yük değerleri, lastik sarmallı granüler kolonlarda %3 kısalma gözlemlenene kadar, polyester sarmallı kolonlarda ise tekstil malzeme yırtılana kadar olacak şekilde uygulanmıştır.

Çakıl geridolgu kullanılan deneylerde, agregalarda göçme limitine ulaşmadan önce ciddi oranda kütle kaybı gözlemlenmiştir. Deney sonrası yapılan gözlemsel incelemelerde, agregaların pürüzlülüklerin büyük ölçüde kaybolduğu izlenmiştir. Bu da sarmal malzemelerin yüksek dayanımını açıkça ortaya koymaktadır. Diğer bir yandan nihai yükleme altında, polyester sarmallı kum kolon

deneylerinde yırtılma sonucu, lastik sarmallı kum kolon deneylerinde ise üstten 3. ve 4. lastiklerin arasında oluşan ayrılma sonucu stabilite bozuklukları gözlemlenmiştir.

3.2 ANSYS Program Çıktıları

ANSYS sonlu elemanlar program çıktıları doğrultusunda elde edilen yük-deplasman verileri Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. ANSYS program çıktıları

Deney	Düşey Deplasman (mm)	Yatay Deplasman (mm)	Düşey Dep./ Yatay Dep.
Lastik Sarmallı Taş Kolon	73.29	8.66	8.46
Polyester Sarmallı Taş Kolon	44.13	33.83	1.30
Lastik Sarmallı Kum Kolon	47.65	4.56	10.45
Polyester Sarmallı Kum Kolon	102.86	16.75	6.14

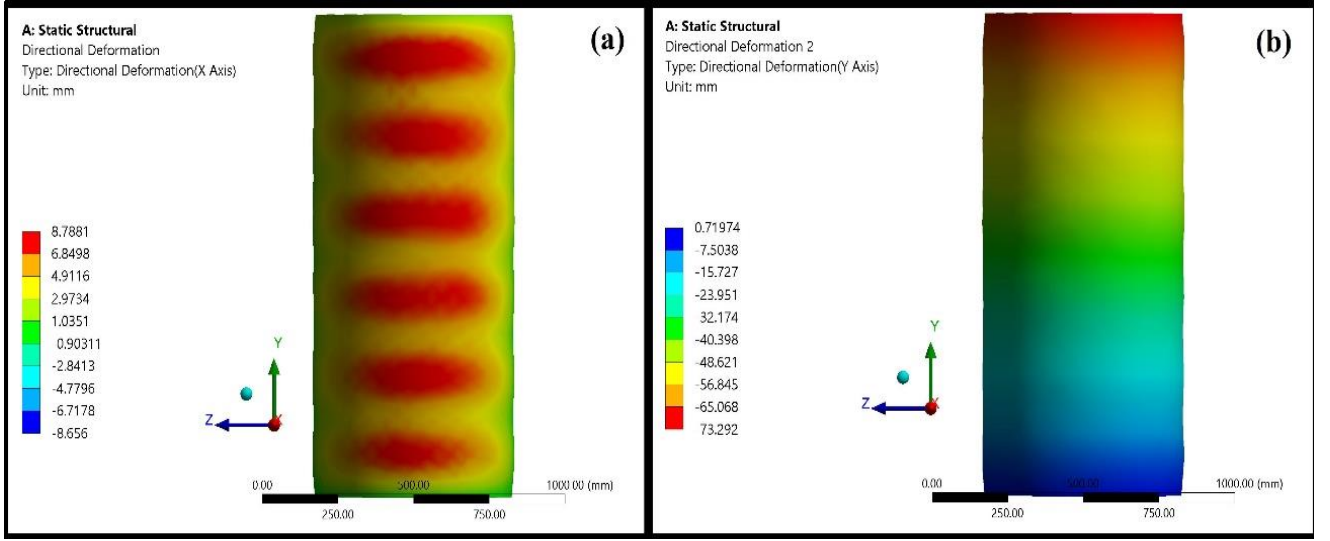
Bu doğrultuda, deney sonuçları ile analizler karşılaştırıldığında yaklaşık sonuçlar ve benzer davranışlar gözlemlenmektedir. Buna bağlı olarak bu çıkarımlar, çalışmanın hedefleri arasında yer alan deformasyon büyüklerinin ve zorlanan bölgelerin bilgisayar ortamında belirlenmesi amacını desteklemektedir. Bu kapsamda düşey yük tatbik edilen granüler kolonların yatay ve düşey yöndeki deplasman kontürleri Şekil 4, 5, 6 ve Şekil 7’de görülmektedir.

Analizler, deneysel veriler ile davranış bakımından yaklaşık, deformasyon büyüklükleri açısından yaklaşık sonuçlar ortaya koymaktadır. Polyester sarmalın her iki geridolgu malzemesi için maksimum zorladığı bölge, deneysel verilerde de olduğu gibi kolon orta kısımlarının yaklaşık 20 – 25 cm üzerinde görülmektedir. Ayrıca, lastik sırt ve yanak bölgeleri arasındaki takviye katmanların, kuşakların ve tellerin granüler kolonlara kazandırdığı katkılar Şekil 4 ve 5’te görülmektedir. Çalışmaya ait gözlemlenen bazı göçme limitleri ise Şekil 8’de gösterildiği gibi meydana gelmiştir.

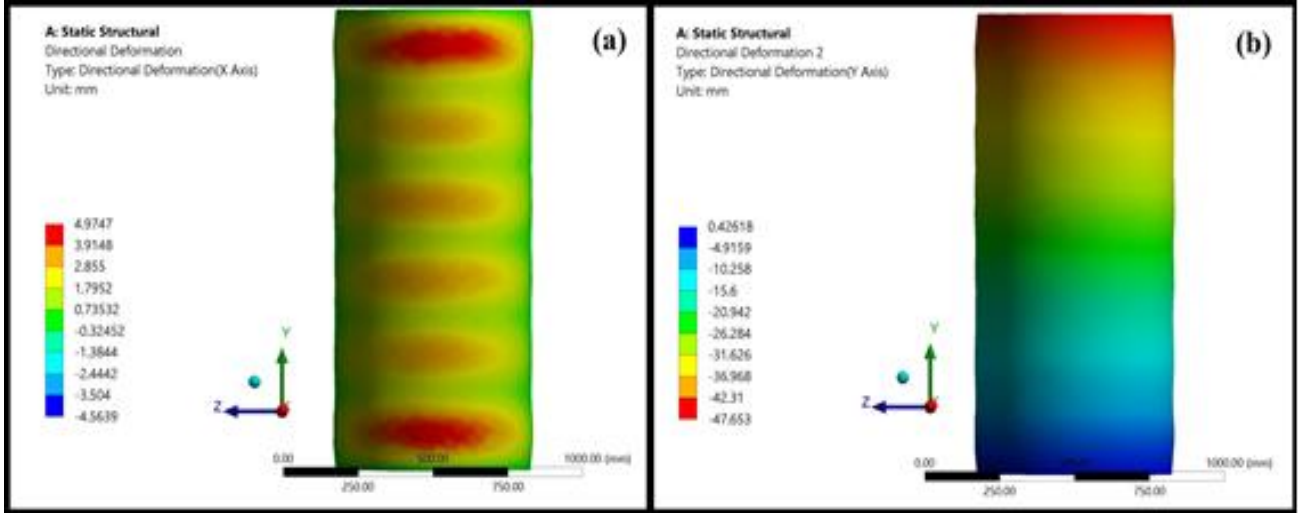
4 Sonuçlar

Bu çalışmada, geleneksel granüler kolon uygulamalarında yeni bir bakış açısı olarak atık lastiklerin geri kazandırılarak sarmal etkisinde incelenmesi araştırılmıştır. Atık lastiklerin depolama, parçalama ve maliyet bakımından olumsuz yönlerini ortadan kaldırmaya yönelik yeni bir kullanım alanının açılması ve güçlü bir sarmal malzeme temin edilmesi çalışmanın iki temel amacını yansıtmaktadır.

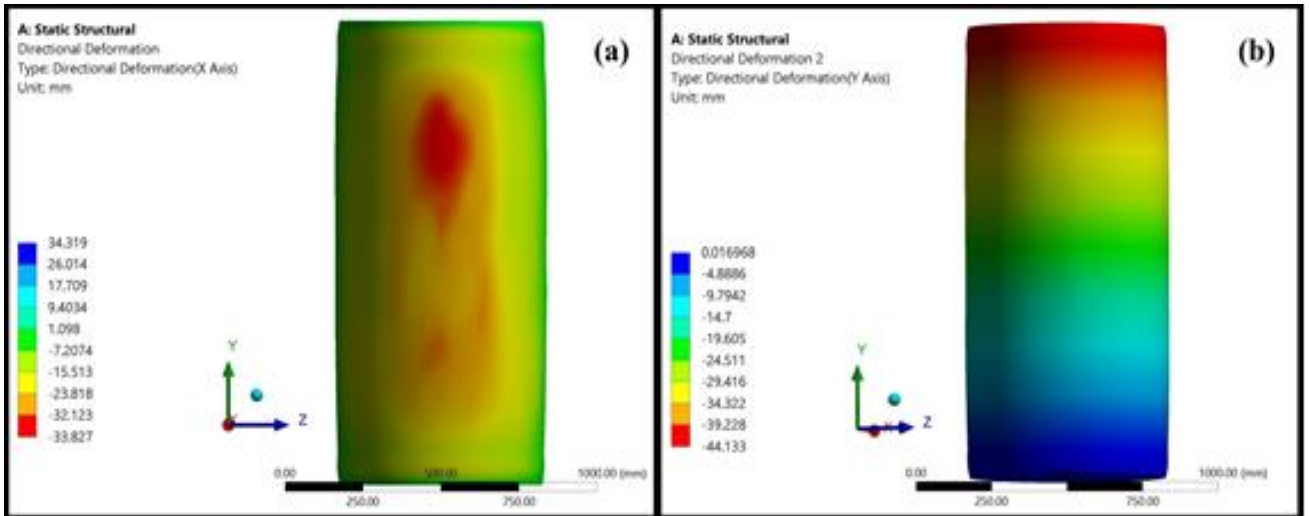
Deneysel çalışmalarda atık lastikler parçalanmadan bütüncül bir yapıda kullanılmıştır. Nümerik analizler ile



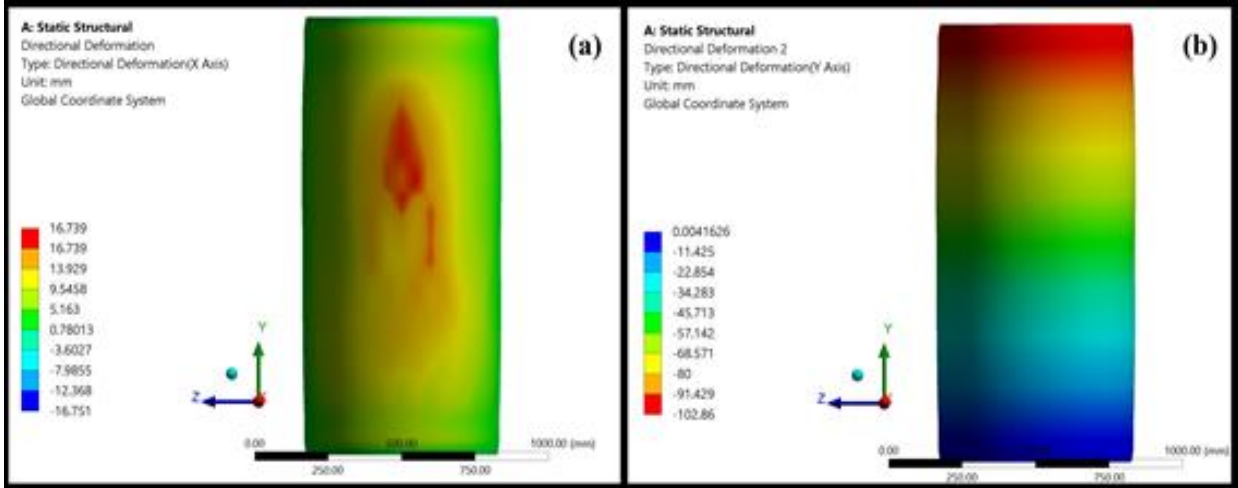
Şekil 4. Lastik sarmallı taş kolon (a) yatay, (b) düşey deplasman kontürleri



Şekil 5. Lastik sarmallı kum kolon (a) yatay, (b) düşey deplasman kontürleri



Şekil 6. Polyester sarmallı taş kolon (a) yatay, (b) düşey deplasman kontürleri



Şekil 7. Polyester sarmallı kum kolon (a) yatay, (b) düşey deplasman kontürleri



Şekil 8. Nihai yükleme anında polyester sarmallı granüler kolonlarda göçme anı

uyumlu olarak elde edilen ve davranışı yansıtan deney sonuçlarına göre, taş kolon agregalarını çepeçevre saran lastik malzemesi ile birlikte yanal deformasyonlara karşı ilave bir rijitlik kazanıldığı açıkça gözlemlenmektedir.

Atık araç lastikler ile sargılanmış tüm granüler kolonlarda yaklaşık 600 kPa gibi yüksek taşıma kapasiteleri elde edilmiştir. 19 mm çaplı agregalı geridolgu malzemesi kullanılan deneylerde atık lastik sarmallı taş kolon, polyester sarmallı taş kolona göre 6.3 kat daha yüksek taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Kum kolon deneylerinde ise atık lastik sarmallı kolon, polyester sarmallı kolona kıyasla 11.3 kat daha fazla taşıma kapasitesi değerine ulaşmıştır.

Diğer bir yandan, atık lastik sarmallı granüler kolon deneylerinde yükün boşaltılmasının ardından kolon ilk haline dönebilmektedir. Ancak, polyester sarmallı kolonlar nihai yükleme sonunda beklenildiği üzere yırtılarak göçmüşlerdir. Lastiklerin kendinden beklenen elastik şekil değiştirme özelliklerini kolon davranışına aktarmış olmaları önemli bir çıkarımdır. Bu durum hem plastik davranışları kontrol altına alırken hem de kolonun sünekliğini ve kesit bütünlüğünü sağlamıştır.

Analiz sonuçları ve deney sonuçları incelendiğinde, düşey yükleme altında farklı geridolgu ortamlarının sıkıştırılarak yerleştirildiği lastik sarmallı granüler

kolonlarda, kum geridolgu malzemeli kolon çakıl geridolgu malzemeli kolona oranla 1.35 kat daha fazla taşıma kapasitesi göstermiştir. Polyester sarmallı deneylerde ise çakıl geri dolgu malzemeli kolon kum geridolgu malzemeli kolona kıyasla 1.33 kat daha fazla taşıma kapasitesine erişmiştir. Ayrıca, atık lastik sarmallı analizlerde, polyester sarmallara kıyasla taş kolonda %40, kum kolonda %54 daha az aksel kılma (oturma) değerleri elde edilmiştir.

Çalışmanın nihai hedefi atık lastiklerin zemin iyileştirme alanında değerlendirilerek geri dönüşüme katkı sağlaması yolunda bir kapı açmaktır. Sonraki çalışmalarda bu yöntemin uygulanabilirliği ve muhtemel sakıncalarına yönelik araştırmaların sürdürülmesi amaçlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmada desteklerinden dolayı Aksaray Üniversitesi BAP (Bilimsel Araştırma Projeleri) Koordinasyon Birimi'ne (2015-086) teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 16

Kaynaklar

- [1] R. D. Barksdale, and R. C. Bachus, Design and Construction of Stone Columns. Federal Highway Administration, USA, 1983.
- [2] C. Erenson, Atık lastiklerin taş/kum kolon uygulamalarında kullanılmasının deneysel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.
- [3] A. Zukri, and R. Nazir, Numerical modelling techniques of soft soil improvement via stone columns: A brief review. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 342 (1), 2018.
- [4] J. Canizal, A. Cimentada, A. Da Costa, M. Miranda, and C. Sagasetta, Theoretical analyses of laboratory tests of kaolin clay improved with stone columns. ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement, 3, pp. 373–81, Brussels, Belgium, 2012.
- [5] N. P. Balaam, and J. R. Booker, Effect of stone column yield on settlement of rigid foundations in stabilized clay. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 9, pp. 331–51, 1985. <https://doi.org/10.1002/nag.1610090404>.
- [6] W. Van Impe, Improvement of settlement behaviour of soft layers by means of stone columns. In Proceedings, 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: Improvement of Ground, 1, pp. 309-312, 1983.
- [7] H. A. Elshazly, D. H. Hafez, and M. E. Mossaad, Reliability of conventional settlement evaluation for circular foundations on stone columns. Geotechnical and Geological Engineering, 26, 323, 2008. <https://doi.org/10.1007/s10706-007-9169-9>.
- [8] M. Gäb, H. F. Schweiger, D. Kamrat-Pietraszewska, and M. Karstunen, Numerical analysis of a floating stone columns foundation using different constitutive models. Geotechnics of Soft Soils - Focus on Ground Improvement, CRC Press, London, 2008.
- [9] T. M. Weber, S. M. Springman, M. Gäb, and V. Racansky, Numerical modelling of stone columns in soft clay under an embankment. pp. 305–11, 2009. <https://doi.org/10.1201/9780203883334.ch39>.
- [10] J. Castro, Modeling stone columns materials. Materials, 10-782, 2017. <https://doi.org/10.3390/ma10070782>.
- [11] J. Pivarc, Stone columns – determination of the soil improvement factor. Slovak Journal of Civil Engineering, 19, 17–21, 2011. <https://doi.org/10.2478/v10189-011-0014-z>.
- [12] J. Gniel, and A Bouazza, Predicted site behaviour of geogrid encased stone columns. Australian Geomechanics, 44, pp. 11–16, 2009.
- [13] M. Khabbazian, V. N. Kaliakin, and C. L. Meehan, Numerical study of the effect of geosynthetic encasement on the behaviour of granular columns. Geosynthetics International, pp. 132-143, 2010. <https://doi.org/10.1680/gein.2010.17.3.132>.
- [14] A. H. K. Al-Shukur, and H. N. Al-Khafajy, Effect some parametric on optimum design of highway embankment with stone columns. Journal University of Kerbala, 15 (2), pp. 192-205, Scientific, 2017.
- [15] A. H. K. Al-Shukur, and H. N. Al-Khafajy, Optimum design for highway embankment with stone column. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), 8 (1), pp. 863–872, 2017.
- [16] N. K. Shien, Numerical study of floating stone columns. Ph.D. Thesis, National University Of Singapore, 2013.
- [17] A. P. Ambily, and S. R. Gandhi, Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133, 405–15, 2007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900241\(2007\)133:4\(405\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(2007)133:4(405)).
- [18] J. K. Mitchell, and T. R. Huber, Performance of a stone column foundation. Journal of Geotechnical Engineering, 111 (2), 205-223, 1985. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339410\(1985\)111:2\(205\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339410(1985)111:2(205)).
- [19] T. Giurgiu, F. Ciortan, and C. Pupaza, Static and transient analysis of radial tires using ANSYS. Recent Advances in Industrial and Manufacturing Technologies, 2012.
- [20] T. Hiyake, Automotive Design: Advanced Nonlinear Simulation. Ix (2), Ansys, 2015. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)10970207\(19980815\)42:7<1279::AID-NME437>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/(SICI)10970207(19980815)42:7<1279::AID-NME437>3.0.CO;2-I).
- [21] Y. Başar, and M. Itskov, Finite element formulation of the Ogden material model with application to rubber - like shells. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 42 (7), 1279-1305, 1998. <https://doi.org/10.1177/0954407015590018>.
- [22] J. M. Conradie, P. S. Els, and P. S. Heyns, Finite element modelling of off-road tyres for radial tyre model parameterization. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Automobile Engineering, 230 (4), 564-578, 2016. <https://doi.org/10.2346/1.2137519>.





Farklı uç sınır koşullarına sahip kirişin Carrera Birleşik Formülasyon (CUF) çerçevesinde statik analizi

Static analysis of a beam with different end boundary conditions via Carrera Unified Formulation (CUF)

Esra Eylem Karataş^{1,*} 

¹ Gaziantep Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 27310, Gaziantep Türkiye

Özet

Bu çalışma kapsamında düzgün yayılı yük etkisinde farklı uç sınır koşullarına sahip dikdörtgen kesitli bir kirişin, birleşik kiriş teorilerinden biri olan Carrera Birleşik Formülasyon (CUF) çerçevesinde lineer statik analizi incelenmiştir. Kesit yer değiştirme alanının birleşik formülasyonu, kesit düzlemi üzerinde tanımlanmış eşdeğer Taylor ve Lagrange tipi açılım fonksiyonları ile ayrı ayrı ifade edilmiştir. Yönetici denklemler ve sonlu elemanlar formülasyonunun elde edilmesinde virtüel iş prensibi kullanılmıştır. İlk olarak, hem Taylor tipi hem de Lagrange tipi açılım fonksiyonlarının ayrı ayrı kullanılması ile farklı uç sınır koşullarına ait dikdörtgen kesitli kiriş için bir yakınsama çalışması ve elde edilen sayısal sonuçların güvenilirliğini test etmek amacı ile literatürden alınan analitik çözümler ile bir karşılaştırma çalışması yapılmıştır. Daha sonra, uygun olan açılım fonksiyonu kullanılarak CUF çerçevesinde, örnek problemlerin lineer statik analizi yapılmış, sayısal sonuçlar tablo ve grafikler ile sunulmuştur. Bu çalışmada kullanılan bilgisayar algoritması MUL2 grubu tarafından geliştirilmiş olup, literatürde mevcut olan pek çok çalışma ile test edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Geliştirilmiş kiriş teorisi, Carrera birleşik formülasyon (CUF), Sonlu elemanlar yöntemi

1 Giriş

Son iki yüzyıldan bu yana çok sayıda üç boyutlu mühendislik problemlerinin çözümünde bir boyutlu kiriş teorileri kullanılmıştır. Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorileri bilinen ilk klasik kiriş teorileri olup sadece eğilme etkilerinin dikkate alındığı ve malzemenin izotrop kabul edildiği teorilerdir. Euler-Bernoulli kiriş teorisi enine kayma deformasyonlarını dikkate almayan buna karşılık ince cidarlı kirişler için oldukça iyi sonuçlar veren bir teoridir. Timoshenko kiriş teorisi ise kiriş kesiti boyunca düzgün yayılı bir kayma dağılımını dikkate alırken öngörülen bu kaymanın, bir kayma düzeltme faktörü kullanılarak düzeltilmesini gerektirmektedir. Her iki teorinin ortak özelliği; kesit çarpılması, burulma-eğilme çifti ve bölgesel geometrik ve mekanik sınır koşulları gibi klasik olmayan etkileri dikkate almamalarıdır [1]. Klasik olmayan bu etkiler genellikle malzemenin anizotrop olmasından ve yapı elemanının küçük narinlik katsayısına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Fakat son yıllarda sayısal yöntemler özellikle de sonlu elemanlar yöntemi, klasik kiriş teorilerinin kullanımını çok daha başarılı ve çekici hale getirmiştir. Geometrik ve mekanik olarak çok farklı sınır koşullarına sahip kompleks yapıları çözmeye olasılığı, binlerce serbestlik

Abstract

In this study, linear static analysis of a rectangular beam with compact cross-section for different end boundary conditions subjected to uniformly distributed load is analyzed within the framework of Carrera Unified Formulation (CUF), which is one of the unified beam theory. The unified formulation of cross-section displacement field is expressed by employing both Taylor and Lagrange type expansion functions defined over the cross-section. The Principle of Virtual Displacements (PVD) is used to obtain the governing differential equations and the Finite Element formulation. First, by using separately both Taylor and Lagrange types of expansion functions for a rectangular beam with compact cross-section with different end boundary conditions study of convergence and comparison with results obtained from the analytical solutions in the literature is performed in order to examine the reliability of the results obtained. Then, using the appropriate expansion function, linear static analysis of sample problems is made within the framework of CUF and numerical results are presented with the help of tables and graphics. The computer algorithm used in the present paper is developed by MUL2 group and tested by many studies, available in the relevant literature.

Keywords: Refined beam theory, Carrera unified formulation (CUF), Finite element method

derecesi içeren pek çok karmaşık problemin kabul edilebilir bir doğrulukla analiz edilmesini mümkün kılmıştır [2]. Bununla birlikte, karmaşık kesit geometrisine sahip yapı elemanları için kesin bir gerilme-şekil değiştirme alanı elde etmenin zorluğu hala bir sorun olarak güncelliğini korumakta olup bu sebeple birleşik kiriş teorilerine ya da yüksek mertebe/geliştirilmiş kiriş teorilerine olan ihtiyaç artmaktadır. Yüksek mertebe kiriş teorileri, yer değiştirme bileşenlerinin kiriş kalınlığı boyunca açılımlarında yüksek mertebe polinomlar kullanılmaktadırlar.

Fonksiyonel derecelenmiş kirişlerin serbest titreşim analizi problemleri, literatürde çeşitli yüksek mertebe kayma deformasyonu teorileri kullanılarak ele alınmıştır [3, 4]. Levinson [5, 6], 3. mertebe kayma deformasyonu teorisine dayanarak izotrop plak ve kirişlerin denge denklemlerini elde etmek için bir vektör yaklaşımı kullanmıştır. Wang ve Wang [7] ve Gao ve Wang [8] tarafından önerilen geliştirilmiş kiriş teorisi, dördüncü mertebeden bir diferansiyel denklem ve ikinci mertebeden bir transandant denklemden oluşmasına karşın, bu kompleks kiriş teorisi ankastre uç için yer değiştirme kısıtlarını düzgün bir şekilde ele almakta yetersiz kalmaktadır. Literatürde, kayma düzeltme faktörü, varyasyonel asimptotik çözüm, geliştirilmiş kiriş teorisi ve kesit çarpılması gibi yüksek

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ekaratas@yildiz.edu.tr (E. E. Karataş)

Geliş / Received: 24.07.2020 Kabul / Accepted: 23.11.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.764252

mertebe etkileri dikkate alan diğer çalışmalar da mevcuttur [9-14].

Bu çalışmada kullanılan Carrera Birleşik Formülasyonu (CUF), değişken sayıda yer değiştirme bilinmeyi içeren çok sayıda kiriş teorisinin, kısa bir gösterim yoluyla ve birkaç temel çekirdeğe referans gösterilmesi aracılığı ile geliştirilmesine ve elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca, yüksek mertbe kiriş teorileri de oldukça kolay bir şekilde CUF çerçevesinde ele alınabilmektedir. İlâveten, çok çeşitli kiriş teorilerinin doğruluğu, bu formülasyonun bünyesinde modern tekniklerin kullanılmasına imkan sağlaması sebebi ile hiyerarşik ve/veya aksiyomatik anlamda test edilebilmektedir. Sahip olduğu bu özellikler sebebiyle CUF, yapılan sayısal hesaplamalarda araştırmacıya hem kolaylık sağlamakta hem de zamandan ciddi anlamda tasarruf sağlanmasına imkan sağlamaktadır. Bu formülasyon çerçevesinde, bilinmeyen değişken sayısı problemin serbest parametresi olarak tanımlanmaktadır. Ele alınan herhangi bir kiriş problemi için (dolü kesitler, ince cidarlı kesitler, statik ve dinamik problemler, vs.) bilinmeyen değişkenlerden uygun bir seçim yapılarak üç boyutlu gerilme-şekil değiştirme alanı elde edilebilmektedir [2].

Bu çalışma kapsamında düzgün yayılı yük etkisinde farklı uç sınır koşullarına sahip dikdörtgen kesitli bir kirişin lineer statik analizi CUF çerçevesinde yapılmıştır. Kesit yer değiştirme alanının birleşik formülasyonu, kesit düzlemi üzerinde tanımlanmış eşdeğer Taylor ve Lagrange tipi açılım fonksiyonları ile ayrı ayrı tanımlanmıştır. Yönetici denklemler ve sonlu elemanlar formülasyonunun elde edilmesinde Virtüel İş Prensibi kullanılmıştır. Öncelikle farklı uç sınır koşulları için bir yakınsama çalışması ve elde edilen sayısal sonuçların güvenilirliğini test etmek amacı ile literatürden alınan bazı analitik ve sayısal sonuçlar ile bir karşılaştırma çalışması yapılmıştır. Daha sonra aynı kirişin, Taylor ve Lagrange tipi açılım fonksiyonlarının ayrı ayrı kullanılması durumuna ait sayısal çalışma yapılmış, sonuçlar tablo ve grafikler ile sunulmuştur.

2 Carrera birleşik formülasyon (CUF) ve sonlu eleman formülasyonu

Ele alınan dikdörtgen kirişin çözüm bölgesi (Şekil 1) aşağıda verilen eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$-b/2 \leq x \leq b/2, 0 \leq y \leq L, -h/2 \leq z \leq h/2 \quad (1)$$

Burada L , b ve h sırası ile ilgili kirişin açıklık uzunluğu, kesit genişliği ve yüksekliğidir. Genel yer değiştirme vektörü

$$u(x, y, z) = [u_x \quad u_y \quad u_z]^T \quad (2)$$

eşitliği ile kurulmuştur. Gerilme şekil değiştirme bileşenleri Denklem (3)'de verilen ifadeler şeklinde gruplandırılmışlardır.

$$\sigma_p = [\sigma_{zz} \quad \sigma_{xx} \quad \sigma_{zx}]^T, \quad \varepsilon_p = [\varepsilon_{zz} \quad \varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{zx}]^T \quad (3)$$

$$\sigma_n = [\sigma_{zy} \quad \sigma_{xy} \quad \sigma_{yy}]^T, \quad \varepsilon_n = [\varepsilon_{zy} \quad \varepsilon_{xy} \quad \varepsilon_{yy}]^T$$

Burada alt indis ‘‘p’’ ve ‘‘n’’ sırası ile kesit düzlemine dik düzlemlerdeki terimleri ve kesit düzlemindeki terimleri

temsil etmektedirler. Yer değiştirmelerin küçük kabul edilmesi durumları için şekil değiştirme-yer değiştirme ilişkileri Denklem (4)'de ifade edildiği gibidir.

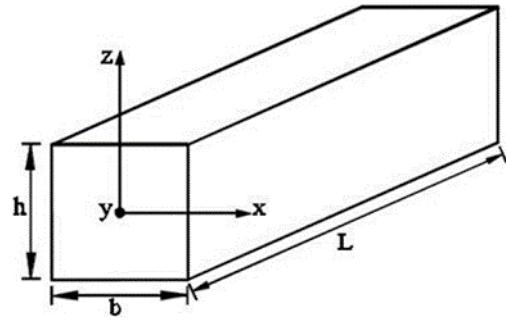
$$\varepsilon_p = D_p u$$

$$\varepsilon_n = D_n u = (D_{n\Omega} + D_{ny})u \quad (4)$$

Burada Ω sembolü kiriş kesitini; D_p , $D_{n\Omega}$ ve D_{ny} sembolleri ise Denklem (5) ile verilen lineer diferansiyel operatörleri temsil etmektedir.

$$D_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad D_{n\Omega} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$D_{ny} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$



Şekil 1. Ele alınan dikdörtgen kirişin geometrisi

Kiriş malzemesinin lineer elastik olması durumunda Genelleştirilmiş Hooke Kanunu geçerli olduğu için bünye denklemleri, Denklem (6)'da verildiği gibidir.

$$\sigma = C\varepsilon \quad (6)$$

Burada σ gerilme vektörünü, ε şekil değiştirme vektörünü ve C katsayılar matrisini temsil etmektedir. Denklem (3) ve Denklem (6) ifadelerinden aşağıda verilen eşitlik elde edilir.

$$\sigma_p = \tilde{C}_{pp}\varepsilon_p + \tilde{C}_{pn}\varepsilon_n, \quad \sigma_n = \tilde{C}_{np}\varepsilon_p + \tilde{C}_{nn}\varepsilon_n \quad (7)$$

Malzemenin izotrop olması durumu için \tilde{C}_{pp} , \tilde{C}_{pn} , \tilde{C}_{np} ve \tilde{C}_{nn} matrisleri aşağıda verildiği gibidir.

$$\tilde{C}_{pp} = \begin{bmatrix} \tilde{C}_{11} & \tilde{C}_{12} & 0 \\ \tilde{C}_{12} & \tilde{C}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{C}_{66} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\tilde{C}_{pn} = \tilde{C}_{np}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \tilde{C}_{13} \\ 0 & 0 & \tilde{C}_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{C}_{nn} = \begin{bmatrix} \tilde{C}_{55} & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{C}_{44} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{C}_{33} \end{bmatrix}$$

$[\tilde{C}]_{ij}$ katsayıları malzeme özelliklerine bağlı olup Young Modülü ve Poisson oranı ile olan ilişkisine bu çalışma kapsamında yer verilmemiştir. Bu konuda detaylı bilgiler Tasi [15] ve Reddy [16] çalışmalarında verilmiştir.

CUF çerçevesinde, üç boyutlu yer değiştirme alan denklemleri, Denklem (9) şeklinde ifade edilir.

$$u = F_\tau(x, z)u_\tau(y), \quad \tau = 1, 2, 3, \dots, M = M(N) \quad (9)$$

Burada $F_\tau(x, z)$ kesit düzlemi üzerinde tanımlanmış açılım fonksiyonunu, $u_\tau(y)$ kiriş eksenine bağlı genelleştirilmiş yer değiştirme vektörünü, M açılımda kullanılan terim sayısını, τ ise Einstein toplama kuralına göre toplamı ve N formülasyonun serbest bir parametresi olup açılım mertebesini (kiriş modeli mertebesi) ifade etmektedir. Yapı elemanının kesit düzlemi üzerindeki yer değiştirme alanını modellemek için kullanılacak $F_\tau(x, z)$ açılım fonksiyonunun ve M terim sayısının seçimi tamamen keyfi olduğu için farklı sınıflardan ve herhangi bir mertebeden fonksiyonların kullanılması mümkündür.

Bu çalışma kapsamında $F_\tau(x, z)$ açılım fonksiyonunu tanımlamak için hem Taylor tipi hem de Lagrange tipi polinomlar kullanılmıştır. Taylor tipi modellerde, temel olarak kesit düzlemi koordinatlarına bağlı polinomları kullanan bir MacLaurin serisinden oluşan açılım fonksiyonları kullanılır. Taylor tipi modellerde açılım mertebesi (kiriş modeli mertebesi) N arttıkça, terim sayısı M de artacağı için burulma, kesit çarpılması ve enine kayma deformasyonları gibi yüksek mertebeye etkiler dikkate alınmış olacaktır. Taylor tipi açılım modellerinde polinom mertebesi, açılım mertebesi (kiriş modeli mertebesi) N ile belirlenirken, Lagrange tipi açılım modellerinde ise kesit düzlemi üzerinde alınan düğüm noktası (nod) sayısı ile belirlenir.

Genelleştirilmiş yer değiştirme vektörü $u_\tau(y)$, aşağıda verildiği gibi $N_i(y)$ şekil fonksiyonu ve $q_{\tau i}$ nodal yer değiştirme vektörü kullanılarak ifade edilebilir.

$$u_\tau(y) = N_i(y)q_{\tau i}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{NE} \quad (10)$$

Burada N_{NE} kiriş eksenini boyunca alınan düğüm noktası (nod) sayısıdır. Şekil fonksiyonları hakkında herhangi bir açıklamaya yer verilmemiş olup bu konu hakkında daha detaylı bilgi Carrera vd. [2], Thai ve Vo [3] ve Bathe [17] çalışmalarından elde edilebilir.

Bu çalışma kapsamında kiriş eksenini boyunca, klasik 4 nodlu bir boyutlu $B4$ sonlu eleman modellemesi (kübik elemanlar) yapılmıştır. Belirtilmelidir ki, açılım mertebesi (kiriş modeli mertebesi) N , kesit üzerinde tanımlanmış açılım fonksiyonunun mertebesi ile ilişkili iken; her bir sonlu elemana ait düğüm noktası sayısı N_{NE} ise bu noktalarda

tanımlı şekil fonksiyonlarının mertebesi ile ilişkilidir. Yine bu çalışma kapsamında Lagrange tipi açılım modellemeleri için, 9 nodlu Lagrange kuadratik elemanları (L9) kullanılmıştır.

Statik problemler için virtüel iş prensibi aşağıda verildiği gibi ifade edilir:

$$\delta L_{int} = \int (\delta \varepsilon_p^T \sigma_p + \delta \varepsilon_n^T \sigma_n) dV = \delta L_{ext} \quad (11)$$

Burada δ , L_{int} ve L_{ext} sırasıyla virtüel varyasyon operatörü, şekil değiştirme enerjisi ve dış kuvvetlerin işi şeklinde tanımlanır. Denklem (4), (7), (9) ve (10) ifadeleri, Denklem (11)'de yerine yazılır ve gerekli düzenlemeler yapırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\delta L_{int} = \delta q_{\tau i}^T K^{ijrs} q_{sj} \quad (12)$$

Burada K^{ijrs} rijitlik matrisidir.

3 Sayısal sonuçlar

Bu çalışma kapsamında düzgün yayılı yük etkisinde farklı uç sınır koşullarına sahip dikdörtgen kesitli bir kirişin lineer statik analizi CUF çerçevesinde incelenmiştir. Üç boyutlu yer değiştirme alan denklemlerindeki açılım fonksiyonu $F_\tau(x, z)$ için iki farklı kiriş modelinin (Taylor ve Lagrange tipi açılım modelleri) ayrı ayrı tanımlanması durumları ele alınmıştır. Birinci problemde basit kiriş durumu, ikinci problemde ise aynı kirişin iki ucunun ankastre olması durumu ele alınmıştır. Sayısal hesaplamalarda, ele alınan kirişe ait geometrik parametreler $b = 0.2 \text{ m}$, $h = 2 \text{ m}$ ve $L = 10 \text{ m}$, homojen- izotrop malzeme parametreleri Elastisite modülü $E = 71.7 \text{ GPa}$ ve Poisson oranı $\nu = 0.3$. ve şiddeti $q = 10 \text{ N/m}$ olan düzgün yayılı yük seçilmiştir. Problemlere ait sayısal sonuçlara geçmeden önce, bir yakınsama çalışması ve elde edilen sayısal sonuçların güvenilirliğini test etmek amacı ile literatürden alınan analitik çözümler ile bir karşılaştırma çalışması yapılmıştır. Yakınsama kriteri olarak, ele alınan kirişin açıklık ortasındaki kesitinin ağırlık merkezindeki düşey yer değiştirme dikkate alınmıştır. Ele alınan problemlerde yakınsama çalışması öncelikle kiriş modelinin keyfi mertebeden bir Taylor tipi açılım modeli (TE) olması durumunda, ardından ise Lagrange tipi bir açılım modeli (LE) olması durumu için ayrı ayrı yapılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar aşağıda verilmiştir.

3.1 Basit kiriş problem

3.1.1 Yakınsama çalışması

Kiriş modelinin keyfi mertebeden bir TE olması durumuna ait elde edilen sayısal sonuçlar ve bu sonuçların literatürden alınan analitik çözümler ile karşılaştırılması Tablo 1'de verilmiştir. CUF, kiriş modeli mertebesini serbest bir parametre olarak ele alan bir formülasyon olduğu için, yüksek mertebeden kiriş teorilerini elde etmek için ilave bir formülasyona ihtiyaç duyulmamaktadır. Euler-Bernoulli ve Timoshenko gibi klasik kiriş teorileri de CUF çerçevesinde, TE modelinin özel durumları olarak elde edilmektedirler [2]. Tablo 1 ve 2'de, elde edilen sayısal sonuçlar,

Denklem(13)'de Timoshenko ve Goodier [18] çalışmasında verilen analitik çözümden elde edilen kesin çözüm ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, CUF formülasyonunun özel bir hali olarak Euler-Bernoulli kiriş teorisi (EBKT)'ne ait sayısal sonuçlarda örnek olması bakımından Tablo 1'de verilmiştir.

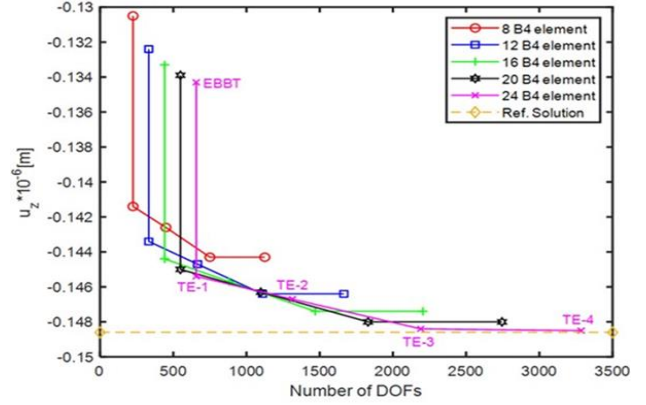
$$\delta = \frac{5 q \left(\frac{L}{2}\right)^4}{24 E I_x} \left[1 + \frac{12 (h/2)^2}{5 (L/2)^2} \left(\frac{4}{5} + \nu \right) \right] \quad (13)$$

Tablo 1. Farklı mertebeden TE modelleri ve sonlu eleman sayısı için düşey yer değiştirme (u_z) yakınsaması ($x = 0, y = L/2, z = 0$)

Model	$u_z \times 10^{-6}$ (m)	Hata (%)	Serbestlik Serecesi Sayısı (SDS)	Sonlu eleman sayısı
Analitik çöz. (13)	-0.1486	-	-	
EBKT	-0.1305	12.1803	225	
TE - 1	-0.1414	4.8452	225	
TE - 2	-0.1426	4.0377	450	8 B4
TE - 3	-0.1443	2.8937	750	
TE - 4	-0.1443	2.8937	1125	
EBKT	-0.1324	10.9017	333	
TE - 1	-0.1434	3.4993	333	
TE - 2	-0.1447	2.6245	666	12 B4
TE - 3	-0.1464	1.4805	1110	
TE - 4	-0.1464	1.4805	1665	
EBKT	-0.1333	10.2961	441	
TE - 1	-0.1444	2.8264	441	
TE - 2	-0.1457	1.9515	882	
TE - 3	-0.1474	0.8075	1470	16 B4
TE - 4	-0.1474	0.8075	2205	
EBKT	-0.1339	9.8923	549	
TE - 1	-0.1450	2.4226	549	
TE - 2	-0.1463	1.5478	1098	20 B4
TE - 3	-0.1480	0.4038	1830	
TE - 4	-0.1480	0.4038	2745	
EBKT	-0.1343	9.6231	657	
TE - 1	-0.1454	2.1534	657	
TE - 2	-0.1467	1.2786	1314	24 B4
TE - 3	-0.1484	0.1346	2190	
TE - 4	-0.1485	0.0673	3285	

Tablo 1'deki sayısal verilerden, TE modeli için, açılım mertebesinin artması ile analitik çözüme yakınsamanın oldukça iyi sağlandığı görülmektedir. Örneğin, kiriş eksenini boyunca alınan 24 adet 4 nodlu B4 tipi sonlu eleman modellenmesi (24 B4) için 4.mertebeden TE modeli (TE - 4) kullanılması durumunda, analitik çözüme yakınsama

%0.0673 hata ile gerçekleşmektedir. Yine aynı tip sonlu eleman modellenmesi için (24 B4), EBKT ile analitik çözüme yakınsama %9.6231 hata ile gerçekleşmektedir. Dolayısıyla klasik kiriş teorilerinin, yüksek mertebeden etkileri (kesit çarpılması, kayma şekil değiştirmesi, burulma, vs.) dikkate alınmadığı bu karşılaştırmadan da görülmektedir.



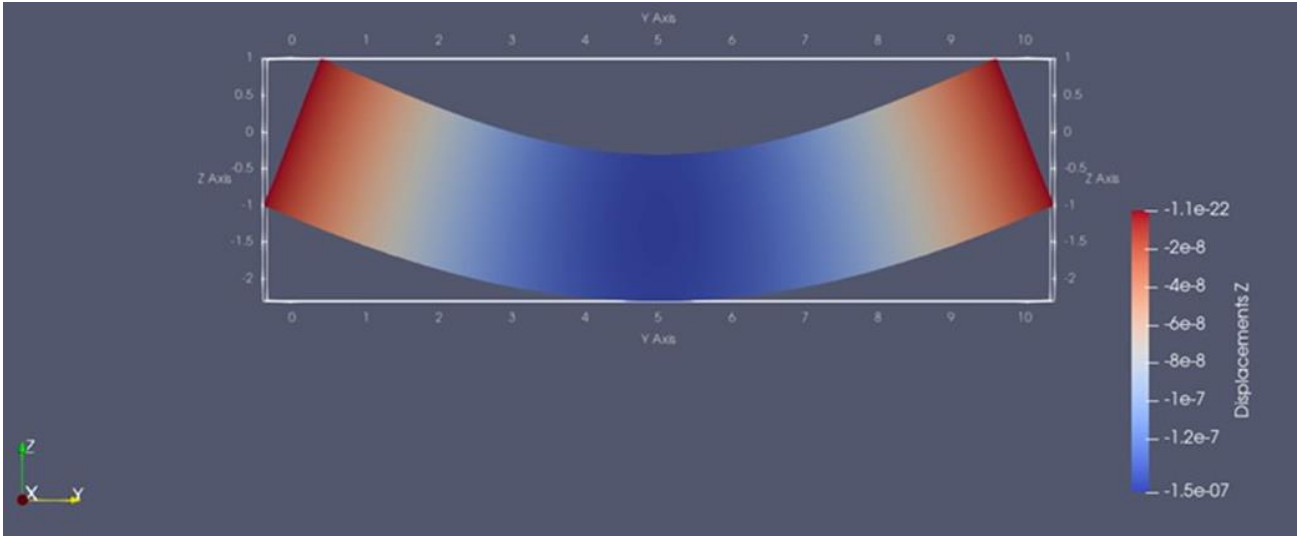
Şekil 2. Farklı mertebeden TE modelleri ve sonlu eleman sayısı için düşey yer değiştirme (u_z) yakınsaması ($x = 0, y = L/2, z = 0$)

Şekil 2, TE modeli kullanılması durumunda açılım mertebesinin artması ile SDS'de de artış olacağını göstermektedir. Bu durum hesaplama yükünün ve süresinin artmasına sebep olacaktır.

Tablo 2'de, kiriş modelinin LE olması durumuna ait elde edilen sayısal sonuçlar ve bu sonuçların analitik çözüm ile karşılaştırılması verilmiştir. Tablodan görüleceği üzere LE modelinin kullanılması durumunda, kesit düzlemi üzerinde alınan alt bölge sayısının artırılması (kesit üzerinde nod sayısının artırılması) analitik çözüme yakınsamayı oldukça iyi sağlamaktadır. 24B4 sonlu eleman modellenmesi ve LE - 3L9 (3 adet 9 nodlu Lagrange kuadratik eleman) LE modelinin kullanılması durumunda analitik çözüme yakınsama, TE - 4 Taylor tipi bir açılım modelinin kullanılması durumu ile benzer sonuç vermekte olup, hata %0.0673'dür. TE modelinde bu hata oranına 3285 SDS ile yaklaşıırken, LE modelinde bu sayı 4599'dur.

LE modelleri kullanılması durumunda, kesit düzlemi üzerinde alınan alt bölge sayısı artırıldıkça, bir başka ifade ile kesit düzlemi üzerinde nod sayısı artırıldıkça, analitik çözüme yakınsama daha fazla olmakla birlikte SDS'de artış göstermektedir. Bu durum Şekil 4'de açık bir şekilde görülmektedir.

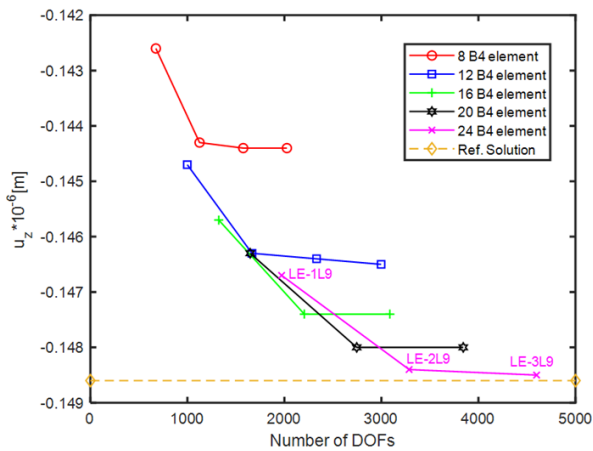
Sonuç olarak ele alınan basit kiriş problemi için, TE modelinin LE modeline göre analitik çözüme aynı hata oranı ve fakat daha az sayıda SDS ile yakınsadığı görülmüştür. Bu sebeple bu çalışmanın bundan sonraki aşamalarında basit kiriş problemi için yapılacak sayısal hesaplamalarda, farklı mertebeden TE modelleri kullanılacaktır. Bu çalışmalarda kiriş eksenini 24 adet B4 tipi sonlu elemanlar (24B4) ile modellenecek olup, TE modelinin farklı mertebelerinin, ele alınan basit kiriş probleminin statik analizi üzerindeki etkileri incelenecektir.



Şekil 3. 24 B4 sonlu eleman modellemesi için TE – 4 tipi açılımına ait kiriş deformasyonu

Tablo 2. Farklı LE modelleri ve sonlu eleman sayısı için düşey yer değiştirme (u_z) yakınsaması ($x = 0, y = L/2, z = 0$)

Model	$u_z \times 10^{-6}$ (m)	Hata (%)	SDS	Sonlu eleman sayısı
Analitik çöz. (13)	-0.1486	-	-	-
LE – 1L9	-0.1426	4.0377	675	
LE – 2L9	-0.1443	2.8937	1125	8 B4
LE – 3L9	-0.1444	2.8264	1575	
LE – 4L9	-0.1444	2.8264	2025	
LE – 1L9	-0.1447	2.6245	999	
LE – 2L9	-0.1463	1.5478	1665	12 B4
LE – 3L9	-0.1464	1.4805	2331	
LE – 4L9	-0.1465	1.4132	2997	
LE – 1L9	-0.1457	1.9515	1323	
LE – 2L9	-0.1474	0.8075	2205	16 B4
LE – 3L9	-0.1474	0.8075	3087	
LE – 1L9	-0.1463	1.5478	1647	
LE – 2L9	-0.1480	0.4038	2745	20 B4
LE – 3L9	-0.1480	0.4038	3843	
LE – 1L9	-0.1467	1.2786	1971	
LE – 2L9	-0.1484	0.1346	3285	24 B4
LE – 3L9	-0.1485	0.0673	4599	



Şekil 4. Farklı LE modelleri ve sonlu eleman sayısı için düşey yer değiştirme (u_z) yakınsaması ($x = 0, y = L/2, z = 0$)

3.1.2 Basit kiriş statik analiz

Ele alınan basit kirişin kritik kesitlerinde gerilme ve şekil değiştirme analizi CUF çerçevesinde farklı mertebeden TE modeller kullanılarak yapılmıştır. Söz konusu analizlerde gerilme ve şekil değiştirmelerin kalınlık ve genişlik boyunca değişimleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Şekil 5’de enine kayma gerilmesi σ_{YZ} ve enine şekil değiştirme ε_{YZ} dağılımlarının mesnet kesiti için kalınlık boyunca farklı mertebeden TE modelleri ($N = 1 \sim 5$) için dağılımı görülmektedir. Kullanılan model mertebesinin (N) hem enine kayma gerilmesi hem de enine şekil değiştirme üzerindeki büyük etkisi (özellikle $N = 2$ ’den sonra) açık bir şekilde görülmektedir. Meritebe değerinin en az $N = 3$ olması ile birlikte enine kayma gerilmesi ve enine şekil değiştirme değerlerinde yakınsama gerçekleşmiştir. Daha yüksek mertebeden açılım modeli kullanılması, sadece

SDS'yi ve dolayısı ile hesaplama yükünün artmasına sebep olacaktır. Şekil 5'den görüleceği üzere enine kayma gerilmesi σ_{YZ} ve enine şekil değiştirme ϵ_{YZ} en büyük değerlerini mesnet kesitinin ($y = 0$) ağırlık merkezinde almaktadırlar ($x = 0, z = 0$).

Tablo 3'de bu iki büyüklüğün, kesit genişliği boyunca kritik noktalardaki değerleri, TE giriş modeli mertebesinin farklı değerleri için verilmiştir. Tablodan görüleceği üzere derece değerinin en az $N = 3$ olması durumunda her iki değerde yakınsama görülmekte olup $N = 8$ için bu değerler aşağı yukarı sabit kalmaktadır.

Şekil 6'da aksel gerilme σ_{YY} ve aksel şekil değiştirme ϵ_{YY} dağılımlarının açıklık ortası kesit için kalınlık boyunca farklı mertebeden TE modelleri ($N = 1\sim 5$) için dağılımı görülmektedir. Derece değerinin en az $N = 3$ olması ile birlikte her iki büyüklük için yakınsama gerçekleşmiştir. Şekil 6'dan görüleceği üzere aksel gerilmesi σ_{YY} ve aksel şekil değiştirme ϵ_{YY} , en büyük değerlerini açıklık ortası kesitinin ($y = L/2$) alt ve üst liflerinde ($x = 0, z = \pm h/2$) almaktadır.

Tablo 4'de bu iki büyüklüğün, üst lifler için kesit genişliği boyunca kritik noktalardaki değerleri, TE giriş modeli mertebesinin farklı değerleri için verilmiştir.

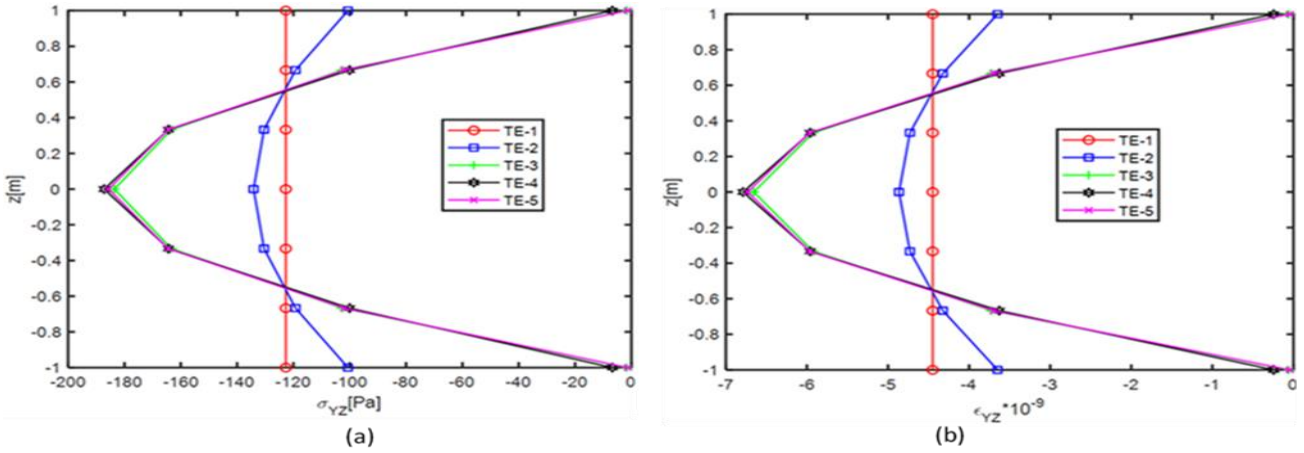
Tablodan görüleceği üzere $N = 3$ 'den itibaren her iki değerde yakınsama görülmekte olup $N = 4$ değerinde ise bu değerler sabit olarak kalmaktadırlar.

3.2 İki ucu ankastre giriş problem

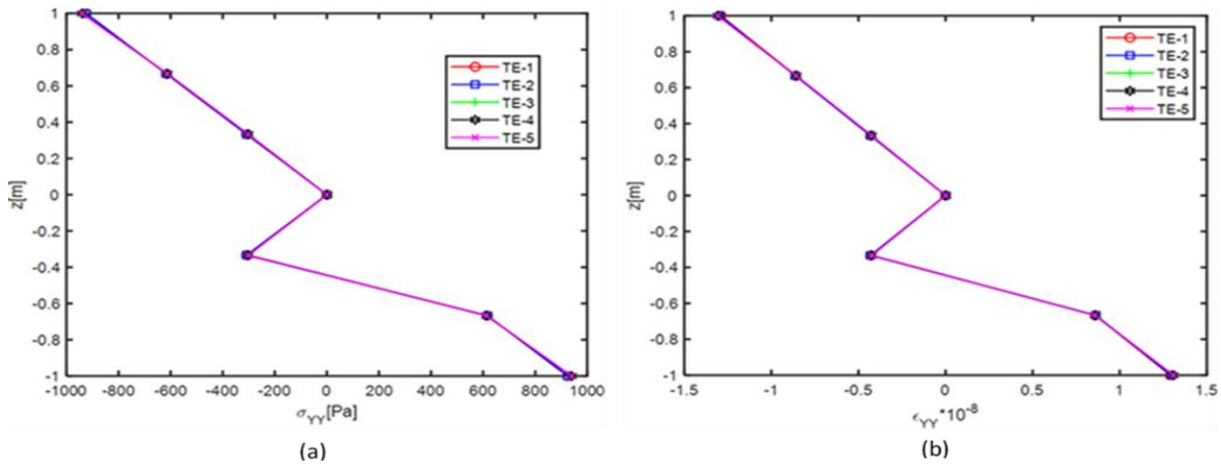
3.2.1 Yakınsama çalışması

Bir önceki bölümde ele alınan basit giriş problemi için yapılan yakınsama ve elde edilen sayısal sonuçların literatürden alınan analitik çözümler ile karşılaştırılması çalışmaları bu bölümde iki ucu ankastre mesnet olan aynı giriş için de yapılmıştır. Giriş modelinin keyfi mertebeden bir TE modeli ve LE modeli olması durumlarına karşılık gelen sayısal sonuçlar ve bu sonuçların literatürden alınan analitik çözüm ile karşılaştırılmaları Tablo 5'de verilmiştir. Shi ve Voyiadjis [19] çalışmasına göre, iki ucu ankastre mesnetli düzgün yayılı yük etkisi altındaki bir girişin açıklık ortası düşey yer değiştirme değeri, $L/h = 5$ ve Poisson oranı $\nu = 0.3$ olması durumlarında, Denklem (14) ile elde edilir.

$$u_z = \frac{qL^4}{384EI_x} (1.47698) \quad (14)$$



Şekil 5. (a) Kalınlık boyunca enine kayma gerilmesi σ_{YZ} , (b) enine şekil değiştirme ϵ_{YZ} dağılımları ($x = 0, y = 0, z$)



Şekil 6. (a) Kalınlık boyunca aksel gerilme σ_{YY} , (b) aksel şekil değiştirme ϵ_{YY} dağılımları ($x = 0, y = L/2, z$)

Tablo 3. Farklı *TE* modelleri için enine kayma gerilmesi σ_{YZ} ve enine şekil değişirmesi ε_{YZ} ($x, y = z = 0$)

Model	$y = 0, z = 0$					
	$(\sigma_{yz}) \times 10^3$ [Pa]			$(\varepsilon_{yz}) \times 10^{-8}$		
	$x = 0$	$x = \pm b/4$	$x = \pm b/2$	$x = 0$	$x = \pm b/4$	$x = \pm b/2$
$N = 1$	-0.122	-0.122	-0.122	-0.445	-0.445	-0.445
$N = 2$	-0.134	-0.133	-0.133	-0.486	-0.485	-0.483
$N = 3$	-0.183	-0.183	-0.182	-0.665	-0.665	-0.663
$N = 4$	-0.187	-0.186	-0.184	-0.678	-0.675	-0.670
$N = 5$	-0.185	-0.184	-0.183	-0.673	-0.669	-0.664
$N = 6$	-0.188	-0.186	-0.184	-0.684	-0.676	-0.668
$N = 7$	-0.188	-0.185	-0.183	-0.682	-0.673	-0.666
$N = 8$	-0.190	-0.186	-0.184	-0.691	-0.677	-0.667
$N = 9$	-0.190	-0.186	-0.183	-0.689	-0.675	-0.665

Tablo 4. Farklı *TE* modelleri için aksenal gerilme σ_{YY} ve aksenal şekil değişirme ε_{YY} ($x, y = L/2, z = h/2$)

Model	$y = L/2, z = h/2$					
	$(\sigma_{yy}) \times 10^3$ [Pa]			$(\varepsilon_{yy}) \times 10^{-7}$		
	$x = 0$	$x = \pm b/4$	$x = \pm b/2$	$x = 0$	$x = \pm b/4$	$x = \pm b/2$
$N = 1$	-0.924	-0.924	-0.924	-0.128	-0.128	-0.128
$N = 2$	-0.924	-0.924	-0.924	-0.129	-0.129	-0.129
$N = 3$	-0.939	-0.939	-0.939	-0.130	-0.130	-0.130
$N = 4$	-0.940	-0.940	-0.940	-0.130	-0.130	-0.130
$N = 5$	-0.940	-0.940	-0.940	-0.130	-0.130	-0.130

Tablo 5’de verilen sayısal sonuçlar incelendiğinde, kirişin açıklık ortası kesitinin ağırlık merkezindeki düşey yer değiştirme u_z değeri, aşağı yukarı $-0.40 * 10^{-7} m$. civarlarında olmaktadır ve bu değerden sonra sonlu eleman sayısının artırılması, kullanılan kiriş modelinden bağımsız olarak (*LE* ve/veya *TE*) sadece *SDS*’nin önemli ölçüde artmasına sebep olurken, düşey yer değiştirme değerinde çok çok önemsiz artışlara sebep olmaktadır. Yine tablodaki sayısal sonuçlar incelendiğinde, düşey yer değiştirme değerinin aşağı yukarı benzer değerleri için, *LE* modelinin kullanılması durumunda *SDS*’nin çok daha az olduğu görülmektedir. Oysa basit kiriş probleminde, bu durumun tam tersi bir sonuç elde edilmiştir. Bir başka deyişle, aynı problemin farklı uç sınır koşullarına sahip olması durumunda, kullanılan kiriş modeli *SDS*’yi önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca, basit kiriş probleminde elde edilen

düşey yer değiştirme değeri analitik çözüme % 0.0673 ‘lük bir hata oranı ile yakınsarken, bu problem için bu değer aşağı yukarı % 0.32’ler civarındadır. Yani, ele alınan kirişin iki ucunun ankastre olması durumunda, yakınsama çok daha zor gerçekleşmektedir.

Şekil 7’den görüleceği üzere *TE* kiriş modeli için açılım mertebesi N değerinin artması ile *SDS*’de artış göstermektedir; bu durum hesaplama yükünün ve süresinin artmasına sebep olacaktır.

Şekil 8’de ise *LE* kiriş modeli için, kesit düzlemi üzerinde alınan alt bölge sayısı artırıldıkça, analitik çözüme yakınsama daha fazla olmakla birlikte *SDS*’de artış göstermektedir.

Şekil 9’da, ele alınan dikdörtgen kesitli iki ucu ankastre kirişin, verilen yükleme altında *LE* kiriş modeli durumuna ait deformasyonu örneklendirilmiştir.

Tablo 5. Farklı *LE* ve *TE* modelleri ve sonlu eleman sayısı için düşey yer değiştirme (u_z) yakınsaması ($x = 0, y = L/2, z = 0$)

Sonlu eleman sayısı	$-u_z \times 10^{-7} (m)$									
	Kiriş modelleri									
	LE/SDS				TE/SDS					
	1L9	2L9	3L9	4L9	TE - 1	TE - 2	TE - 3	TE - 4	TE - 5	TE - 6
	SDS	SDS	SDS	SDS	SDS	SDS	SDS	SDS	SDS	SDS
12 B4	0.3727 999	0.3891 1665	0.3903 2331	0.3912 2997	0.3752 333	0.3726 666	0.3892 1110	0.3903 1665	0.3907 2331	0.3910 3108
16 B4	0.3757 1323	0.3922 2205	0.3935 3087	0.3944 3969	0.3778 441	0.3756 882	0.3923 1470	0.3935 2205	0.3939 3087	0.3942 4116
20 B4	0.3775 1647	0.3940 2745	0.3954 3843	0.3962 4941	0.3793 549	0.3774 1098	0.3941 1830	0.3954 2745	0.3958 3843	0.3961 5124
24 B4	0.3787 1971	0.3953 3285	0.3966 4599	0.3975 5913	0.3804 657	0.3786 1314	0.3954 2190	0.3967 3285	0.3971 4599	0.3974 6132
28 B4	0.3796 2295	0.3962 3825	0.3975 5355	0.3984 6885	0.3811 765	0.3794 1530	0.3962 2550	0.3976 3825	0.3980 5355	0.3983 7140
32 B4	0.3802 2619	0.3968 4365	0.3981 6111	0.3990 7857	0.3817 873	0.3800 1746	0.3969 2910	0.3982 4365	0.3986 6111	0.3990 8148
36 B4	0.3806 2943	0.3973 4905	0.3986 6867	0.3995 8829	0.3821 981	0.3805 1962	0.3974 3270	0.3987 4905	0.3991 6867	0.3995 9156
40 B4	0.3810 3267	0.3976 5445	0.3990 7623	0.3998 9801	0.3825 1089	0.3809 2178	0.3977 3630	0.3991 5445	0.3995 7623	0.3999 10164
44 B4	0.3813 3591	0.3980 5985	0.3994 8379	0.4002 10773	0.3828 1197	0.3812 2394	0.3981 3990	0.3995 5985	0.3999 8379	0.4002 11172
52 B4	0.3818 4239	0.3984 7065	0.3998 9891	0.4006 12717	0.3832 1413	0.3816 2826	0.3985 4710	0.4000 7065	0.4003 9891	0.4007 13188
56 B4	0.3819 4563	0.3986 7605	0.4000 10647	0.4008 13689	0.3834 1521	0.3818 3042	0.3987 5070	0.4002 7605	0.4006 10647	0.4009 14196
60 B4	0.3821 4887	0.3988 8145	0.4002 11403	0.4010 14661	0.3836 1629	0.3820 3258	0.3989 5430	0.4003 8145	0.4007 11403	0.4011 15204
64 B4	0.3822 5211	0.3989 8685	0.4003 12159	0.4011 15633	0.3836 1737	0.3821 3474	0.3990 5790	0.4005 8685	0.4008 12159	0.4012 16212

Analistik çöz. (14)

0.4023

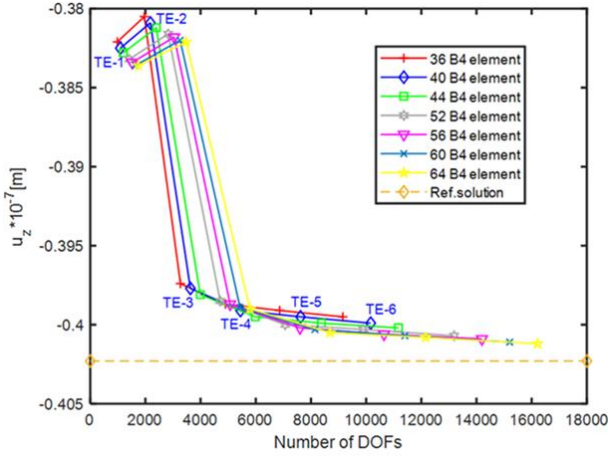
Sonuç olarak iki ucu ankastre mesnet kiriş problemi için, *LE* tipi bir açılım modelinin *TE* tipi bir açılım modeline göre analitik çözüme hemen hemen aynı hata oranı ve fakat daha az sayıda *SDS* ile yakınsadığı görülmüştür. Bu problem için bundan sonra yapılacak statik analiz çalışmalarında daha az sayıda *SDS* sağlaması sebebiyle *LE* kiriş modelinin tercih edilmesi daha uygun olmasına karşın, bir önceki problem ile karşılaştırma olanağı sağlanabilmesi amacıyla farklı mertebelerden *TE* kiriş modeli kullanılacaktır. Ayrıca kiriş eksenine 60 adet *B4* tipi sonlu elemanlar (*60B4*) ile modellenecektir.

3.2.2 İki ucu ankastre kiriş static analiz

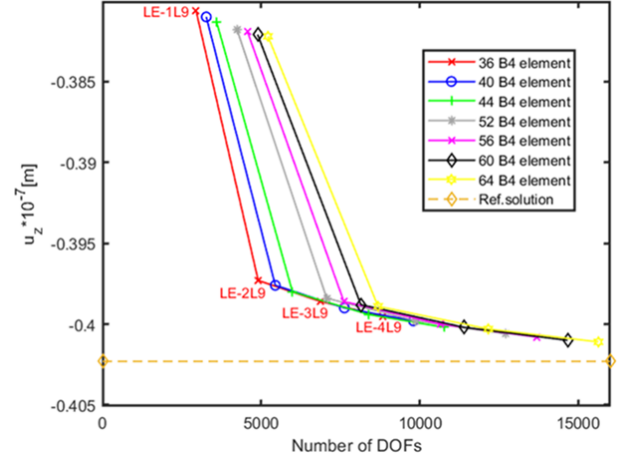
Ele alınan iki ucu ankastre kirişin kritik kesitlerinde gerilme ve şekil değiştirme analizi *CUF* çerçevesinde farklı mertebeden *TE* modelleri kullanılarak yapılmıştır. Söz konusu analizlerde gerilme ve şekil değiştirmelerin kalınlık

ve genişlik boyunca değişimleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

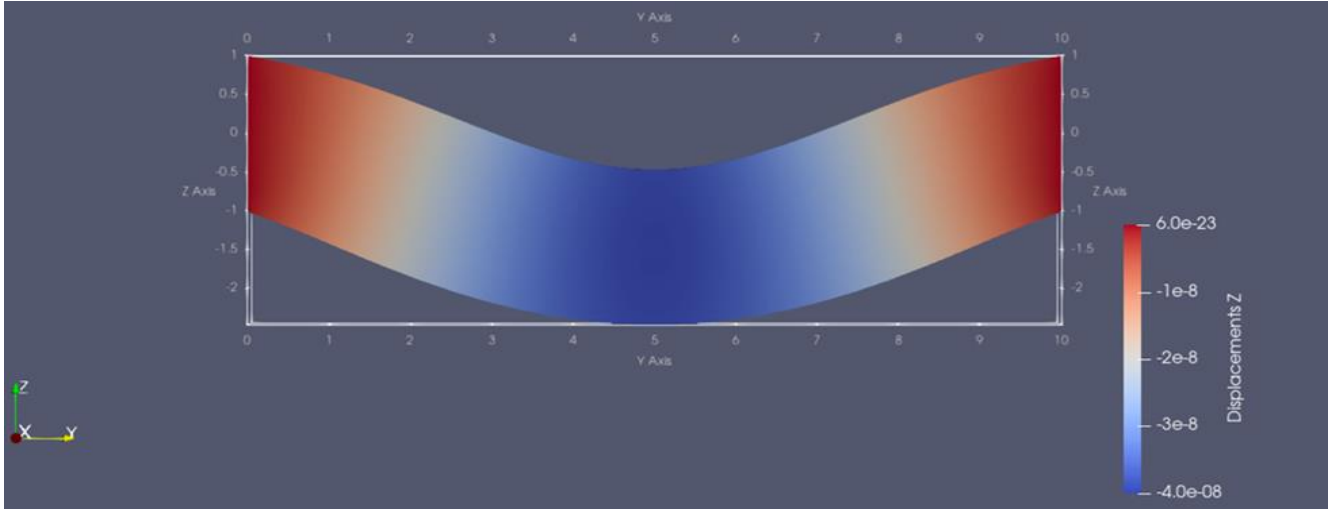
Şekil 10'da enine kayma gerilmesi σ_{YZ} ve enine şekil değiştirme ϵ_{YZ} dağılımlarının $y=0.1L$ kesiti için kalınlık boyunca farklı mertebeden *TE* modelleri ($N=2\sim6$) için dağılımı görülmektedir. Kullanılan model mertebesinin (N), hem enine kayma gerilmesi hem de enine şekil değiştirme üzerindeki büyük etkisi (özellikle $N=2$ 'den sonra) açık bir şekilde görülmektedir. Meritbe değerinin en az $N=3$ olması ile birlikte enine kayma gerilmesi ve enine şekil değiştirme değerlerinde yakınsama gerçekleşmiştir. Daha yüksek mertebeden açılım modeli kullanılması, sadece *SDS*'yi ve dolayısı ile hesaplama yükünün artmasına sebep olacaktır. Şekil 10'dan görüleceği üzere enine kayma gerilmesi σ_{YZ} ve enine şekil değiştirme ϵ_{YZ} en büyük değerlerini $y = 0.1L$ kesitinin ağırlık merkezinde almaktadırlar ($x = 0, z = 0$).



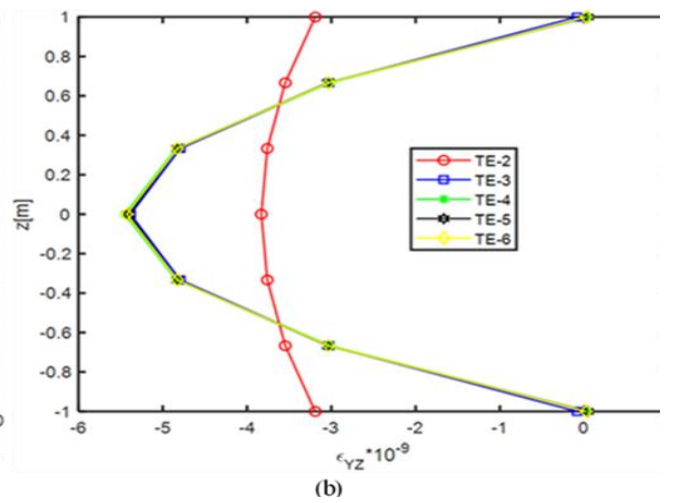
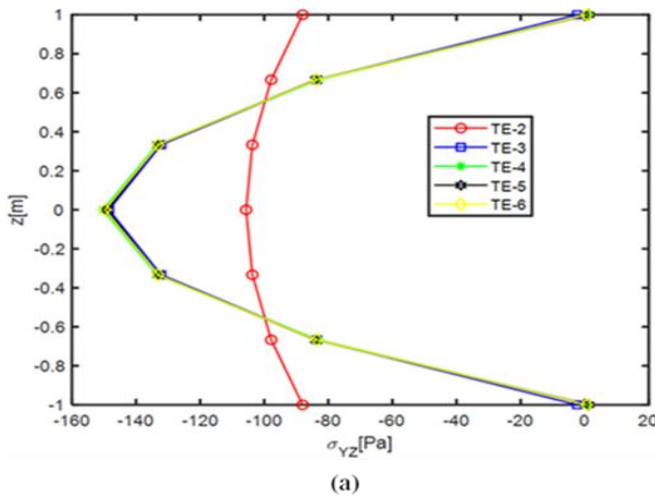
Şekil 7. Farklı mertebeden TE modelleri ve sonlu eleman sayısı için düşey yer değiştirme (u_z) yakınsaması ($x = 0, y = L/2, z = 0$)



Şekil 8. Farklı LE modelleri ve sonlu eleman sayısı için düşey yer değiştirme (u_z) yakınsaması ($x = 0, y = L/2, z = 0$)



Şekil 9. 60 B4 sonlu eleman modellemesi için LE – 4L9 tipi açılıma ait kiriş deformasyonu



Şekil 10. (a) Kalınlık boyunca enine kayma gerilmesi σ_{YZ} , (b) enine şekil değiştirme ϵ_{YZ} dağılımları (b) ($x = 0, y = 0.1L, z$)

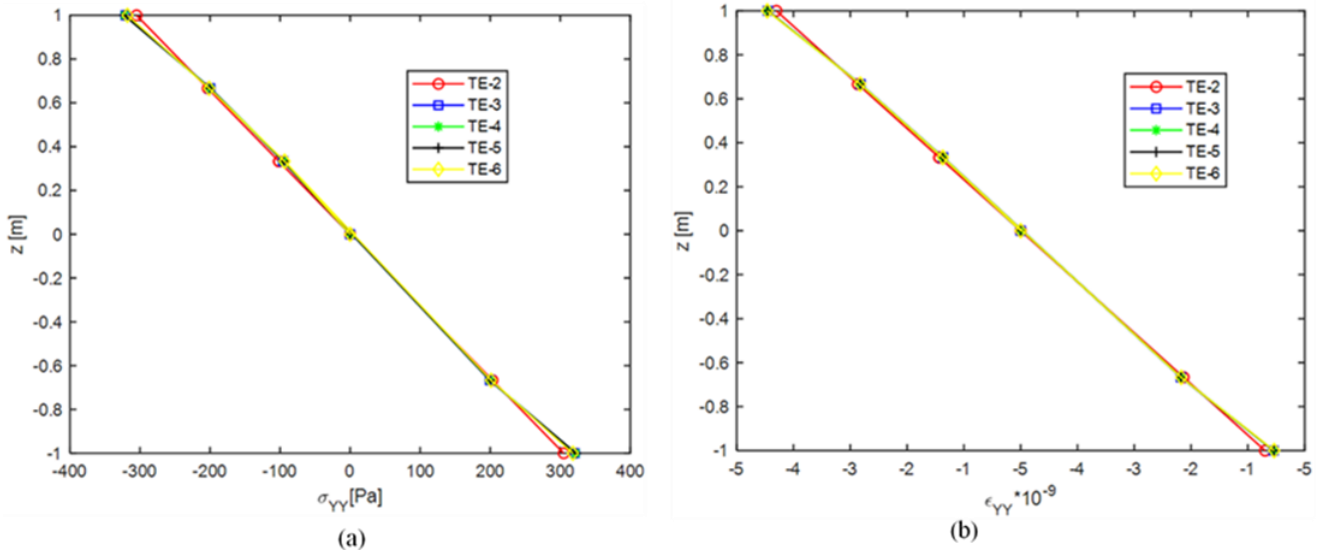
Tablo 6. Farklı *TE* modelleri için enine kayma gerilmesi σ_{YZ} ve enine şekil değişimi ε_{YZ} ($x, y = 0.1L, z = 0$)

Model	$y = 0.1L, z = 0$					
	$(\sigma_{yz}) \times 10^2$ [Pa]			$(\varepsilon_{yz}) \times 10^{-8}$		
	$x = 0$	$x = \pm b/4$	$x = \pm b/2$	$x = 0$	$x = \pm b/4$	$x = \pm b/2$
$N = 2$	-1.056	-1.055	-1.053	-0.383	-0.382	-0.381
$N = 3$	-1.483	-1.483	-1.482	-0.538	-0.537	-0.537
$N = 4$	-1.502	-1.498	-1.494	-0.544	-0.543	-0.542
$N = 5$	-1.490	-1.486	-1.482	-0.540	-0.539	-0.537
$N = 6$	-1.496	-1.486	-1.481	-0.542	-0.539	-0.537
$N = 7$	-1.494	-1.484	-1.479	-0.541	-0.538	-0.536
$N = 8$	-1.502	-1.484	-1.479	-0.544	-0.538	-0.536
$N = 9$	-1.502	-1.484	-1.479	-0.544	-0.538	-0.536

Şekil 11'de aksel gerilme σ_{YY} ve aksel şekil değişimi ε_{YY} dağılımlarının açıklık ortası kesiti için kalınlık boyunca farklı mertebeden *TE* modelleri ($N = 2 \sim 6$) için dağılımı görülmektedir. Söz konusu kesitin özellikle alt ve üst liflerinde merite değerinin en az $N = 3$ olması ile birlikte her iki büyüklük için yakınsama gerçekleşmiştir. Şekil 11'den görüleceği üzere aksel gerilme σ_{YY} ve

aksel şekil değişimi ε_{YY} , en büyük değerlerini bu kesitin alt ve üst liflerinde ($x = 0, z = \pm h/2$) almaktadır.

Tablo 7'de bu iki büyüklüğün, üst lifler için kesit genişliği boyunca kritik noktalardaki değerleri, *TE* giriş modeli mertebesinin farklı değerleri için verilmiştir. Tablodan görüleceği üzere $N = 3$ 'den itibaren her iki değerde yakınsama görülmekte olup $N = 4$ değerinde ise bu değerler sabit olarak kalmaktadırlar.



Şekil 11. (a) Kalınlık boyunca aksel gerilme σ_{YY} , (b) aksel şekil değişimi ε_{YY} dağılımları ($x=0, y=L/2, z$)

Tablo 7. Farklı *TE* modelleri için eksenel gerilme σ_{YY} ve eksenel şekil değiştirme ε_{YY} ($x, y = L/2, z = h/2$)

Model	$y = L/2, z = h/2$					
	$(\sigma_{yy}) \times 10^3$ [Pa]			$(\varepsilon_{yy}) \times 10^{-8}$		
	$x = 0$	$x = \pm b/4$	$x = \pm b/2$	$x = 0$	$x = \pm b/4$	$x = \pm b/2$
$N = 2$	-0.304	-0.3049	-0.3049	-0.4302	-0.4302	-0.4302
$N = 3$	-0.320	\mp 0.320	-0.320	-0.445	\mp 0.445	-0.445
$N = 4$	-0.322	\mp 0.322	-0.322	-0.445	\mp 0.445	-0.445
$N = 5$	-0.322	\mp 0.322	-0.322	-0.445	\mp 0.445	-0.445

4 Sonuçlar

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- *CUF* çerçevesinde kullanılacak açılım modelinin tipi, problemin uç sınır koşullarına daha az sayıda serbestlik derecesi bakımından bağlıdır.
- Ele alınan basit kiriş probleminde, *TE* kullanılması ile analitik çözüme yakınsama çok daha az sayıda *SDS* ile gerçekleşmektedir.
- Ele alınan ankastre kiriş probleminde, *LE* kullanılması ile analitik çözüme yakınsama çok daha az sayıda *SDS* ile gerçekleşmektedir.
- Enine kayma gerilmesi σ_{YZ} ve enine şekil değiştirme ε_{YZ} için Taylor tipi bir kiriş modelinde *TE* açılım mertebesinin en az $N = 3$ olması gerekmektedir.
- Eksenel gerilme σ_{YY} ve eksenel şekil değiştirme ε_{YY} için Taylor tipi bir kiriş modelinde *TE* açılım mertebesinin en az $N = 3$ olması gerekmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde değerli katkılarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Erasmo Carrera'ya en derin saygılarımı sunarım.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %13

Kaynaklar

- [1] D. T. Mucichescu, Bounds for stiffness of prismatic beams. Journal of Structural Engineering, 110, 1410-14, 1984.
- [2] E. Carrera, G. Giunta and M. Petrolo, Beam Structures: Classical and Advanced Theories. JohnWiley & Sons, United Kingdom: Chichester, West Sussex, 2011.
- [3] H. T. Thai and T. P. Vo, Bending and Free Vibration of Functionally Graded Beams Using Various Higher-order Shear Deformation Beam Theories. International Journal of Mechanical Sciences, 62(1), 57-66, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2012.05.014>.

- [4] K. K. Pradhan and S. Chakraverty, Effects of Different Shear Deformation Theories on Free Vibration of Functionally Graded Beams. International Journal of Mechanical Sciences, 82, 149-60, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.03.014>.
- [5] M. A. Levinson, An accurate simple theory of statics and Dynamics of elastic plates. Mech. Res. Commun., 7(6), 343-50, 1980. [https://doi.org/10.1016/0093-6413\(80\)90049-X](https://doi.org/10.1016/0093-6413(80)90049-X).
- [6] M. A. Levinson, A new rectangular beam theory. Journal of Sound and Vibration, 74(1), 81-7, 1981. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(81\)90493-4](https://doi.org/10.1016/0022-460X(81)90493-4).
- [7] M. Z. Wang and W. Wang, A refined theory of beams. J. Eng. Mech., Suppl., 324-327, 2003.
- [8] Y. Gao and M. Wang, A refined theory of rectangular deep beams based on general solutions of elasticity. Sci. China Ser. G, 36(3), 286-97, 2006.
- [9] A. Bekhadda, et al., Static buckling and vibration analysis of continuously graded ceramic-metal beams using a refined higher order shear deformation theory. Multidiscipline Modeling In Materials And Structures, 15(6), 1152-69, 2019.
- [10] J. Cai and C. D. Moen, Elastic buckling analysis of thin-walled structural members with rectangular holes using generalized beam theory. Thin-Walled Structures, 107, 274-86, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.06.014>.
- [11] E. Carrera, A. Pagani, M. Petrolo, et al., Recent developments on refined theories for beams with applications. Mechanical Engineering Reviews, 2 (2), 14-00298, 2015. <https://doi.org/10.1299/mer.14-00298>.
- [12] E. Carrera, A. G. de Miguel, and A. Pagani, Extension of MITC to higher-order beam models and shear locking analysis for compact, thin-walled, and composite structures. International Journal For Numerical Methods In Engineering, 112(13), 1889-908, 2017. <https://doi.org/10.1002/nme.5588>.
- [13] S. Richard, Generalized Beam Theory-an adequate method for coupled stability problems. Thin-Walled Structures, 19(2-4), 161-80, 1994.
- [14] G. Taig and G. Ranzi, Generalised Beam Theory (GBT) for composite beams with partial shear interaction. Engineering Structures, 99, 582-602, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.05.025>.
- [15] S. W. Tsai, Composites Design. Dayton, Think Composites, 1988.
- [16] J. N. Reddy, Mechanics of laminated composite plates and shells. Theory and Analysis. CRC Press, 2004.
- [17] K. Bathe, Finite element procedure. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996.
- [18] S. Timoshenko and J. N. Goodier, Theory of Elasticity. McGraw-Hill Book Company, Inc., 1951.
- [19] G. Shi and G. Z. Voyiadjis, A sixth-order theory of shear deformable beams with variational consistent boundary conditions. J. Appl. Mech. 78(2), 021019-1-021019-11, 2011.



Harçsız yığma duvarlı betonarme çerçevenin nümerik analizi

Numerical analysis of reinforced concrete frame with dry stack masonry infill

Hakan Koman^{1,*} , Halil Nohutcu¹ 

¹ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 45140, Manisa, Türkiye

Özet

Bu çalışmada betonarme çerçeveye harçsız tuğlalı duvar etkisi nümerik analiz yoluyla araştırıldı. Harçsız tuğlalı duvarlar, geleneksel duvarlar kadar çerçeveyi rijitleştirmeden adeta bir sürtünmeli sönümleyici gibi görev yaparak, çerçevenin enerji tüketme kapasitesini arttırmaktadır ve bu konuda mevcut çalışmalar vardır. Bu çalışmada ayrıca duvarın çerçeveye bağlantısının rijit veya esnek olmasının çerçeve davranışına etkisi araştırılmıştır. Rijit birleşim için harç, esnek birleşim için ise poliüretan tabanlı yapıştırıcı kullanılmıştır. ABAQUS programı ile çerçevelere yapılan 20mm (%2.5 yanal öteleme oranı) itme analizlerinde esnek birleşim kullanılmasının kilitli duvarlı çerçevenin taşıdığı yükü arttırdığı, duvar ile çerçeve arasındaki bölgede gerilme yığılmalarının azaltarak duvarın daha az hasar almasını sağladığı görülmüştür. Duvarsız çerçeveye nazaran, harçsız tuğlalı çerçevenin enerji tüketim kapasitesi daha fazla olmuştur.

Anahtar kelimeler: ABAQUS, Harçsız yığma, Polymer Pm, Poliüretan yapıştırıcı, Esnek birleşim.

1 Giriş

Geçmişte, Kocaeli 1999, Northridge 1994, Erzincan 1992, Landers 1992, Kobe 1995 gibi birçok yıkıcı deprem meydana gelmiştir. Birçok can kaybı ve ekonomik hasar birçok binanın yıkılması sonucu meydana gelmiştir. Güçlü yer hareketlerinin yıkıcı etkilerini alt edebilmek için yapıların enerji tüketim kapasitelerini arttırmak bir zorunluluktur. Bu amaçla sismik sönümleyiciler kullanılmakta ve özellikleri geliştirilmektedir. Sürtünmeli, metalik akmaya dayalı, viskoz ve viskoelastik sönümleyiciler önceki çalışmalarda kullanılan pasif enerji sönümleyicilerden bazılarıdır. Halihazırda anlaşılmıştır ki, bu tarz sismik sönümleme cihazları, yapının rijitliğini arttıran betonarme perde eklenmesi gibi geleneksel güçlendirme metotlarıyla kıyaslandığında ekonomik ve alternatif bir güçlendirme çözümüdür. İstanbul'da yapılan bir güçlendirme çalışmasında görülmüştür ki sürtünmeli sönümleme cihazları, bu cihazlar yerleştirilirken bina sakinlerini rahatsız etmediğinden ve taşınmaya zorlamadığından geleneksel güçlendirme metotlarıyla kıyaslandığında daha iyi bir alternatiftir [1]. Sismik bölgelerde çerçeve içindeki dolgu duvarlar korunma ve alanı bölme amaçlı kullanılmaktadır ve geçmişteki tasarımlarda bu dolgu duvarların yapı deprem davranışına etkisi ihmal edilmiştir. Fakat gerçekte dolgu duvarlar güçlü depremler esnasında yapının rijitlik, periyot, süneklik gibi özelliklerini duvar ile çerçeve arası etkileşimden dolayı değiştirmektedir. Birçok araştırmacı bu problemi araştırmış ve hayali basınç çubuğu kullanarak duvar davranışının modellenmesini

Abstract

In this study the effect of a wall with dry stack masonry to a RC frame was investigated through numerical analysis. Dry stacked walls increases the energy dissipation of frames by acting as frictional energy dissipation devices, without increasing the stiffness of frame like a traditional wall and many studies exist about this. In this study, also, the effect of the joint between wall and frame was investigated by using flexible and stiff joint. For stiff joint mortar was used, and for flexible joint, a polyurethane based adhesive was used. In the ABAQUS analysis in which the RC frames were pushed 20mm (%2.5 drift ratio), it was concluded that using flexible joint increases the load carried by frame, and decreased the damage in the wall by decreasing the stress concentrations in the region between wall and frame. When compared with the RC frame without walls, the energy dissipation of dry stacked masonry infilled frame is higher.

Keywords: ABAQUS, Dry stack masonry, Polymer pm, Polyurethane adhesive, Flexible joint

önermişlerdir. Bu yaklaşım ayrıca Eurocode 8, FEMA 356 gibi bazı deprem yönetmelikleri tarafından da benimsenmiştir [2]. Diğer taraftan, mimari sebeplerle zaten yapılan dolgu duvarları enerji sönümleyiciye çevirmek mantıklı bir fikirdir. Lin vd. [3] tarafından yapılan bir deneysel çalışmada görülmüştür ki, harçsız yığma dolgu duvar, çerçeve elastik aşamadayken, çerçevenin rijitliğini arttırmadan, çerçevenin enerji tüketimini arttırmaktadır. Bu sebeple Totoev [4] diğer çalışmasında harçsız yığma dolgu duvarı bir enerji sönümleme cihazı olarak modellemeyi ve Jacobsen yaklaşımını kullanarak çerçevenin dinamik analizi için yeni bir sönüm oranı hesaplamayı önermiştir. Jacobsen yaklaşımında cihaz tarafından tüketilen enerjiyi çerçevenin elastik şekil değiştirme enerjisine oranlayarak yapısal davranışın doğrusal olmayan aşaması için yeni bir sönüm oranı hesaplanmaktadır. Totoev ayrıca dolgu duvar çerçeve arası birleşim özelliklerinin (boşluk olması-olmaması), çerçevenin enerji tüketim özelliklerini değiştirdiğini söylemiştir. Diğer çalışmasında değişik boşluk doldurucu malzemeler denemiş ve etkilerini araştırmıştır [5].

Diğer bir çalışmada detaylı bir sonlu eleman analizi DIANA programıyla yapıldıktan sonra Seismostruct programının elastik olmayan duvar özelliği kullanılarak basitleştirilmiş bir nümerik analiz de yapılmıştır ve görülmüştür ki, yarı kilitli harçsız duvar yapının sünekliğini kayda değer şekilde azaltmadan yapının enerji tüketimini arttırmada avantajlıdır [6].

Geçmiş bir çalışmada ayrıca gösterilmiştir ki, betonarme kolonlar eksenel yüklerden dolayı taşıma gücünü

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail:hakankoman@hotmail.com (H. Koman)
Geliş / Recieved: 25.08.2020 Kabul / Accepted: 18.11.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021
doi: 10.28948/ngmuh.785286

yitirdiğinde, harçsız duvar çerçevelere eksenel yükleri taşımada yardım etmekte ve bloklar arasındaki sürtünmeden dolayı enerji tüketmeye çerçeve elastik olmayan aşamadayken de devam etmektedir. Harçsız duvar dolgu çerçeveler duvarsız çerçeveye nazaran daha fazla yatay yük taşıma kapasitesine sahiptirler. Yazarlar ayrıca harçsız da olsa duvarın yatay yüklemeye bir basınç çubuğu gibi davrandığından bahsetmişlerdir [7].

Türkiye’de yerel yarı kilitli delikli tuğlalarla bir çalışma yürütülmüş fakat çerçeve yanıl yük kapasitesinin, dolgu duvarsız çerçevelerle kıyaslandığında, artmadığı görülmüştür. [8]. Bu çalışmanın yazarlarına göre boşluklu tuğla kullanmak, harçsız yığma dolgu duvar bir hayali basınç çubuğu davranışı gösterdiğinde zayıf bir direnç oluşmasına sebep olmuştur ve bu olgu çerçevenin yatay yük kapasitesinin artmasına yardımcı olmamıştır.

Diğer taraftan, Krakow Teknoloji Üniversitesi’nde Kwiecien [9] tarafından esnek birleşim metodu önerilmiş ve gösterilmiştir ki, bir hayli deforme olabilen yapıstırıcılar kullanılarak birleşimlerdeki gerilme yığılmalarını azaltmak ve birleşimlerin yük taşıma kapasitelerini arttırmak mümkündür. Kwiecien [9] tarafından yapılan deneylerde esnek yapıstırıcıyla onarılmış tuğlaların hiç deforme olmamış sağlam eşlerine nazaran eğilme deneyinde daha fazla yük taşıdığı görülmüştür (hem de yapıstırıcının çekme dayanımı tuğlalardan düşük olmasına rağmen). Kwiecien, [9-12] esnek birleşimlerin yapıların enerji tüketim kapasitelerini arttırdığını gösteren birçok çalışma yapmıştır ve bazılarında esnek malzemenin nasıl modellenebileceğinden ve malzemenin mekanik özelliklerinden bahsetmiştir.

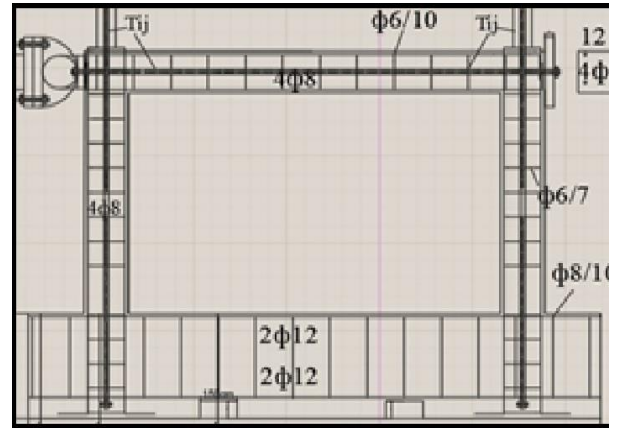
Bu çalışma, harçsız yığma duvarı bir enerji tüketme sistemi olarak incelemiştir ve bununla beraber çerçeve ile duvar arasında esnek birleşim kullanılmasının etkisini Abaqus ile yapılan bir sonlu eleman analiziyle incelemiştir. Abaqus önceki bir çalışmada da belirtildiği üzere deney sonuçlarına yakın sonuçlar elde edilmek istendiğinde kullanılabilecek güçlü bir araçtır [13]. Bu çalışma sonucunda harçsız duvarın enerji tüketimini artırarak ve geleneksel duvarlar kadar rijitliği arttırmadığı için yapının periyodunu büyütürük, yapıların depreme karşı davranışını iyileştirmesi ve esnek birleşim kullanılarak yapı-duvar etkileşimi dolayısıyla duvarların ve yapının aldığı hasarın azaltılması hedeflenmiştir.

2 Materyal ve metod

2.1 Çerçeve tasarımı

40x40 cm ebatları olan kolon ve kirişlerden oluşan bir çerçeve, Türk Deprem yönetmeliğine (2007) göre dizayn edilmiştir. (Bu yönetmeliğin kullanılma sebebi tasarlanan çerçevenin yerel bir prefabrik firmasında 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği yürürlüğe girmeden önce inşa ettirilmesi ve ileride yapılması planlanan deneysel çalışmalardır.) Çerçeve 4 m genişliğinde, 3m yüksekliğindedir. Tasarım yapılırken her bir kolon için 600kN düşey yük ve çerçeve için 250 kN yatay yüklemeye dikkate alınmıştır. Yapısal analiz sonucunda betonarme dizayn için şu kuvvetler bulunmuştur: Kolon için: $N_d=700.62$ kN (eksenel kuvvet), $V_d=126.44$ kN (kesme

kuvveti), $M_d=206631.06$ kNm (moment) ve kiriş için $V_d=92.5$ kN, $M_d=172710.92$ kNm. Çerçeve ¼ oranında küçültülmüştür ve 12x12 cm ebatlı (konstrüktif nedenlerle ve yapılması planlanan deney için kullanılacak tuğlanın üretici firmasının ebatları dolayısıyla), 0.75 m yüksekliğinde, 1m genişliğinde bir çerçeve belirlenmiştir. (Betonarme dizayn yeni ebatlar için kontrol edilmiştir ve dizaynın değişmediği görülmüştür.) Bu süreçte geçmiş çalışmalarda bahsedilen modelleme yasaları kullanılmıştır [14, 15]. Çerçevenin küçültülmesinde pratik gerçek model yaklaşımı kullanılmıştır. Çerçevenin detayları Şekil 1’de görülmektedir, Şekil 1’de görülmeyen etriye sıklaştırılması Türk deprem yönetmeliği hükümleri uyarınca 12x12 cm ebatlı çerçevenin kolon-kiriş birleşim bölgesine uygulanmıştır.



Şekil 1. Ölçekli çerçeve donatı detayları

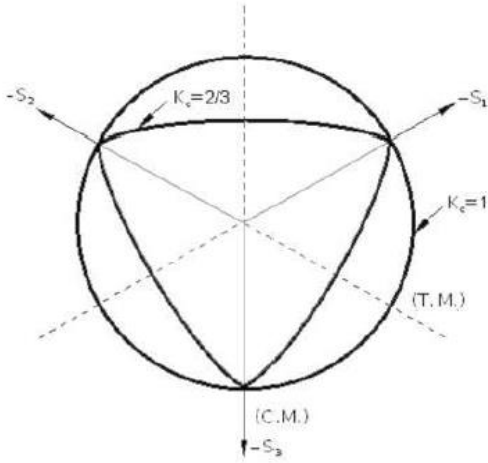
2.2 Abaqus modellemesi

2.2.1 Betonun modellenmesi

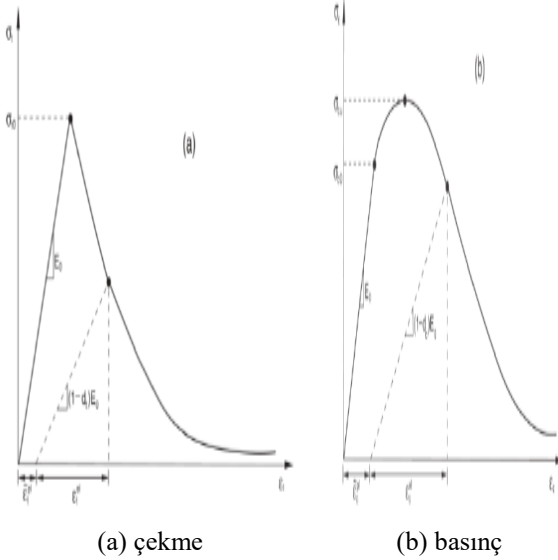
Betonun davranışını modellemek için Abaqus’te yer alan CDP (Concrete Damaged Plasticity) modeli kullanılmıştır. CDP modeli, Lubliner vd. tarafından öne sürülen akma yüzeyini kullanır ve J. Lee ve G. Fenves tarafından önerilen çekme ve basınçtaki dayanımın farklı evrimini içeren modifikasyonları da içerir [13]. CDP modeli Drucker-Prager modelinin modifiye edilmiş halidir. K_c parametresi 1’e eşit olduğunda model Drucker-Prager modeli olmaktadır. Şekil 2’de [13] bu durum gözükmektedir. Von Mises kırılma hipotezinde hacim değiştiren hidrostatik basınç dikkate alınmamaktadır. Fakat Drucker Prager teorisinde bir akma kriteri saptamak için hidrostatik basınç ta deformasyona yol açan diğer gerilmelerle birlikte dikkate alınmaktadır.

Beton için olan gerilme-şekil değiştirme ilişkileri Şekil 3’teki [13] gibi düşünülmüştür ve d_c ile d_t parametreleri - ki bunlar betonun elastisitesini basınçta ve çekmede bozan etkileri gösterir- sıfır kabul edilmiştir. Maksimum gerilmeye karşılık gelen birim şekil değişimi C25 için 0.002 alınmış, ve elastisite modülü de 31000 MPa alınmıştır.

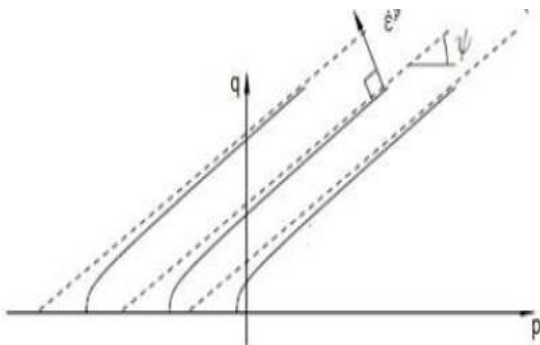
Şekil 4’te [17] görüldüğü üzere p-q düzleminde ölçülen genişleme açısına dilatasyon açısı denir ve beton için 38 derece alınmıştır. Bu değer önceki bir çalışmada deney sonuçlarıyla uyumlu bir sonuç verdiği için kabul edilmiştir [16].



Şekil 2. CDP modeli



Şekil 3. Betonun gerilme şekil değiştirme ilişkileri



Şekil 4. Dilatasyon açısı

f_{b0}/f_{c0} oranı 1.16 alınmıştır. f_{b0} : betonun iki eksenli gerilme halindeki dayanımı, f_{c0} : betonun tek eksenli gerilme halindeki dayanımıdır. Betonun çekme dayanımının basınç

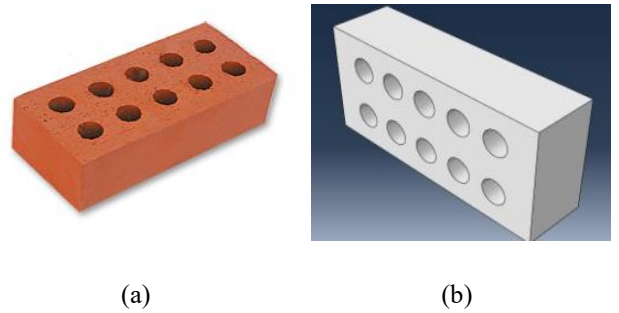
dayanımına oranını ifade eden eksantrisite değeri 0.1 kabul edilmiştir.

2.2.2 Çelik modellemesi

Nümerik analiz sonuçlarını doğrulamak için bir deneysel çalışma yapılması planlanmaktadır, bu yüzden üreticilerden çelik çekme deneyi sonuçları alınarak modelleme için kullanılmıştır. S420B için (bunlar 8mm çaplı donatılarda kullanılmıştır) akma dayanımı 491 MPa, çekme dayanımı 553 MPa alınmıştır. S420 için (bunlar 12 mm çaplı donatılarda kullanılmıştır) akma dayanımı 490 MPa, çekme dayanımı 610 MPa alınmıştır. SAE5.5 çelikleri etriye olarak kullanılmıştır ve akma dayanımı 277 MPa, çekme dayanımı 387 MPa alınmıştır. Etriyelerde SAE 5.5 çeliğinin kullanılma sebebi, nümerik analiz sonuçlarını doğrulamak için çerçevenin inşa ettirildiği fabrikada 6mm çaplı S420-S420B çeliğinin bulunmaması ve piyasada bulunamaması ve SAE 5.5 çeliğinin bulunabilmesidir.

2.2.3 Tuğlaların modellenmesi

Normalde bu tip bir çalışmada yarı-kilitli tuğlalar kullanılarak duvarın düzlemsiz davranışına katkıda bulunulması gerekmektedir. Daha önceki bir çalışmada yarı-kilitli tuğlaların düzlem dışı devrilmeyi engellediği söylenmiştir [7]. Fakat gerçek durumu simule etmek amacıyla yerel bir fabrikada üretilen pres tuğlalar harçsız yığılmayı modellemede kullanılmıştır ve duvarın düzlem dışı davranışı bu çalışmada incelenmemiştir. Şekil 5'te tuğlanın gerçek resmi ve Abaqus modellemesi görülmektedir. Yarı kilitli tuğla yerine bu tuğlanın kullanılma sebebi ticari sebeplerle yerelde üretilen kilitli tuğlaların üretiminin durmuş olmasıdır ve nümerik analizi doğrulamak için ileride bir deney yapılmasının planlanmasıdır.



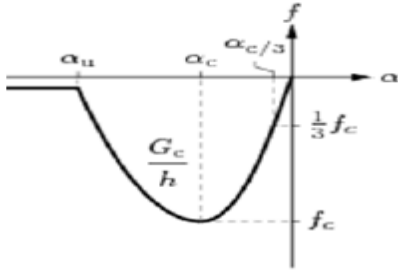
Şekil 5. (a) pres tuğla (b) abaqus modellemesi

Tuğlayı modellemek için yine CDP modeli kullanılmıştır fakat K_c parametresi 1 alınarak Drucker-Prager modeline dönüştürülmüştür. Gerilme-birim şekil değiştirme değerleri daha önce yapılan bir çalışmada açıklanan parabolik ilişki kullanılarak elde edilmiştir.[18]. Bu ilişkide basınç durumunda akma şekil değiştirmesi taşınan maksimum gerilmenin 1/3'üne karşılık gelen şekil değiştirme olarak alınmıştır. Ve parabolik bir ilişki varsayılmıştır. Bu ilişkiye ait grafik Şekil 6'da [18] görülmektedir. G_c, f_c, α_c, h sırasıyla, basınç kırılma enerjisi, basınç gerilmesi, basınç şekil değiştirmesi, yüksekliktir. Model için, Denklem (1), (2) ve (3)' te görülen şu ilişkiler varsayılmıştır:

$$\alpha_{c/3} = -\frac{1}{3} \frac{f_c}{E} \quad (1)$$

$$\alpha_c = -\frac{5}{3} \frac{f_c}{E} \quad (2)$$

$$\alpha_u = \alpha_c - \frac{3}{2} \frac{G_c}{hf_c} \quad (3)$$



Şekil 6. Kil tuğlaların basınçta gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini açıklayan parabolik ilişki

Çekme dayanımı, elastisite modülü, poisson oranı, söylenen sıra için 2 MPa, 6000 MPa, 0.14 alınmıştır ve bu değerler önceki bir çalışmadan alınmıştır [18]. Aynı çalışmada belirtildiği üzere basınçtaki kırılma enerjisi 25.1 N/mm alınmıştır. Tuğlanın basınç dayanımı 16 MPa alınmıştır ve bu değer yerel üreticide Türk Standartlarına uygunluk amacıyla mevcut olan test sonuçlarından alınmıştır

2.2.4 Harcın modellenmesi

Harcı modellemek için Abaquste var olan CDP modeli kullanılmıştır. Dilatasyon açısı betondan farklı olarak 36.4 derece kabul edilmiştir. Harcın basınç dayanımı, young modülü, poisson oranı, çekme dayanımı, önceki bir çalışmada belirtildiği biçimde sırasıyla 6.2 MPa, 1750 MPa, 0.157, 0.61 MPa alınmıştır [18].

2.2.5 Polimer malzemenin modellenmesi

Kwiecien vd. [9-12] esnek polimer malzemenin nasıl modellenebileceğinden ve malzemenin mekanik özelliklerinden makalelerinde bahsetmiştir. Önceki çalışmaları incelenerek, polimer malzemenin elastisite modülü, poisson oranı, çekme dayanımı, söylenen sıra için 4 MPa, 0.49, 1.4 MPa alınmıştır. Bu makaleler incelenerek, kauçuk malzeme modellemesinde kullanılan Mooney-Rivlin teorisinde gerekli olan parametreler belirlenmiştir. Mooney-Rivlin teorisi kauçuk malzeme modellemesinde kullanılan bir teoridir. [19, 23] Gams vd. nin [23] önceki deneylerinin sonuçlarına göre, Polimer Pm malzemesi için, C_{01} katsayısı 0.53, C_{10} katsayısı 0.21 olarak hesaplanmıştır. Kauçuk benzeri malzemelerin modellenmesinde kullanılan Mooney-Rivlin Teorisi Denklem (4-8)'de gösterildiği üzere şöyledir:

$$W^{M-R} = C_{10} \left(\Delta^2 + \frac{2}{\Delta} - 3 \right) + C_{01} \left(\frac{1}{\Delta^2} + 2\Delta - 3 \right) \quad (4)$$

$$S_1 = \frac{F}{A_0} = \frac{dW^{M-R}}{d\Delta} = 2(C_{10} \left(\Delta - \frac{1}{\Delta^2} \right) + C_{01} \left(1 - \frac{1}{\Delta^3} \right)) = 2 \left(1 - \frac{1}{\Delta^3} \right) (\Delta C_{10} + C_{01}) \quad (5)$$

$$E_0 = 3G_0 = 6(C_{10} + C_{01}) \quad (6)$$

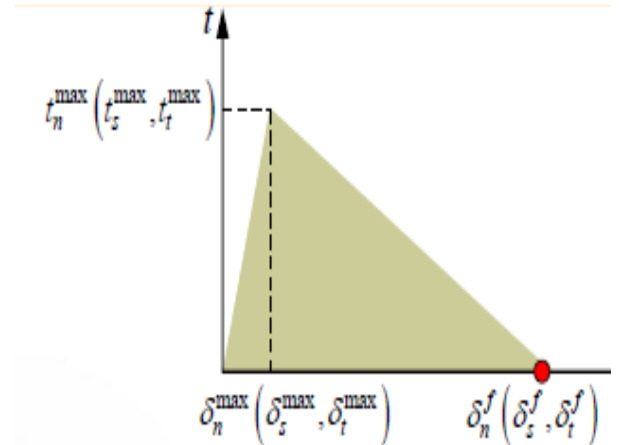
$$G_0 = 2(C_{10} + C_{01}) \quad (7)$$

$$\Delta = \frac{L}{L_0} = \varepsilon + 1 \quad (8)$$

Bu denklemlerde L, poliüretan bazlı kauçuk benzeri polimer pm malzemesinin yüklemmeden sonraki uzunluğu, L_0 yükleme öncesi ilk uzunluğu, E_0 elastisite modülü, G_0 kayma modülüdür.

2.2.6 Mikro modelleme yaklaşımında harç ile malzeme arası etkileşimin modellenmesi

Çerçeve ile duvar arası kısımdaki, harç ile tuğlalar arası etkileşimi tanımlamak için yüzey tabanlı kohesif davranış kullanılmıştır. Yüzey tabanlı kohesif davranış, kırma-ayırma modelini kullanarak, ihmal edilebilecek kadar küçük arayüzey kalınlıklı birleşimleri modellemek için basitleştirilmiş bir yöntem sağlamaktadır [20]. Yüzey tabanlı kohesif davranış formülleri kırma ayırma davranışı ile kullanılan kohesif elemanlar için kullanılan formüllerle çok benzerdir. [20] Şekil 7'de [20] görüldüğü üzere kırma ayırma kanunları birleşimin mod 1, mod2, mod3 göçme modlarındaki davranışlarını tanımlamak için kullanılmaktadır. Bir başka deyişle çekme ve kesme durumlarındaki göçme davranışlarını tanımlamak için kullanılmaktadır. İlk başta birleşim lineer davranmakta ve K_n , K_s , K_t birleşimin rijitlikleri olmaktadır. Ancak ayrılmayı başlatan maksimum gerilme (Şekil 7'de t_n^{\max} olarak görülüyor.) değerinden sonra birleşim arayüzeylerinin plastik davranışı başlamaktadır. t_n^{\max} , t_s^{\max} , t_t^{\max} temas gerilmelerinin maksimum değerleri, δ_n^{\max} , δ_s^{\max} , δ_t^{\max} , temas ayrılmasının maksimum gerilmelere karşılık gelen değerleri, δ_n^f , δ_s^f , δ_t^f göçmedeki ayrılma değerleridir.



Şekil 7. Birleşimlerin kırılma -ayırılma davranışı

Hasar başlangıcını (plastik davranışa geçişi) tanımlamak için maksimum gerilme kriteri kullanılmıştır. Birleşimin çekme dayanımı 0.56 MPa, kritik kesme gerilmesi değeri de Mohr-Coulomb sürtünme formülü ile hesaplanarak 10 MPa alınmıştır. Mohr-Coulomb davranışında, kohezyon katsayısı sıfır alınmış ve sürtünme katsayısı 0.7 kabul edilerek basınçla çarpılmış ve kritik kesme değeri elde edilmiştir. Bunlara ek olarak birleşimin göçmesi tamamlandıktan sonraki kayma davranışını modellemek için, sürtünme katsayısı 0.7 olan bir Mohr-Coulomb kayma davranışı tanımlanmıştır. Bu şu manaya gelir ki birleşim kritik gerilme değeri aşıldıktan sonra kayacaktır. Birleşimin kırılma enerjileri daha önce yapılan bir çalışmadaki yığma birleşimlerin, kohesif elemanlar kullanılarak tanımlandığı bir çalışmadan alınmıştır [18] Abaqus manuelede, [20] söylendiği gibi yüzey tabanlı kohesif davranış formülasyonu kırılma ayırma davranışları ile kullanılan kohesif elemanlar için kullanılan formülasyonla çok benzerdir. Bu yüzden varsayılmıştır ki aynı kırılma enerjileri (kırılma-ayrılma grafiğinin altındaki alan) yüzey tabanlı kohesif davranışı tanımlamak için de kullanılabilir. 1. Mod için kırılma enerjisi 0.017 N/mm, 2. Mod için kırılma enerjisi 0.085 N/mm alınmıştır ve karışık mod davranışı Abaqus'te Benzeggagh-Kenane kuralı uygulanarak dikkate alınmıştır. Önceki bir çalışmada da belirtildiği üzere eğer kritik karışık mod kırılma enerjisi Benzeggagh-Kenane kuralı kullanılarak tanımlanırsa bu ikinci-üçüncü mod kırılma enerjileri aynı olan durumlarda yerinde olur [21]. Ve aynı çalışmada Benzeggagh-Kenane kuralındaki η , gevrek davranışta 2 olarak tavsiye edilmiştir. Benzeggagh-Kenane kuralı Denklem (9)'da gösterilmektedir. Burada G_{TC} kritik karışık mod kırılma enerjisi, G_{II} ve G_{III} kesme modu kırılma enerjileri, G_{IC} ve G_{IIC} ilgili modlardaki kritik kırılma enerjileridir.

$$G_{TC} = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right)^\eta \quad (9)$$

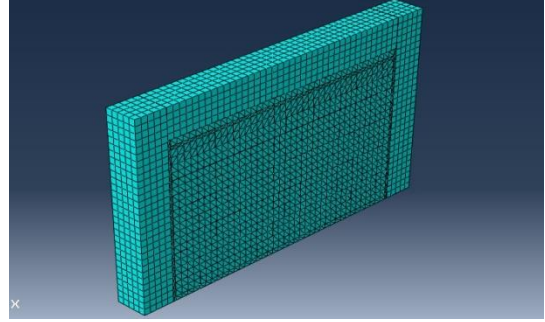
Viskovic vd. [22] tarafından yapılan önceki bir çalışmada esnek birleşimlerin kırılma enerjileri harçlı birleşimlerle kıyaslanmıştır ve görülmüştür ki polimer malzemeli esnek birleşimler çok daha fazla hasar enerjisi ve toplam kırılma enerjisine sahiptirler. Onların çalışmalarında gösterilmiştir ki, esnek birleşimi geçertmek için gerekli enerji çekme modunda harçlı birleşime nazaran 16 kat ve kesme modunda 14 kat daha fazladır. Bu yüzden bu çalışmada polimerli birleşimlerin kırılma enerjileri 1. Mod için 0.272 N/mm ve 2. Mod için 1.19 N/mm alınmıştır.

2.2.7 Modelin analizi

Şekil 8'de görüldüğü üzere, 3 boyutlu C3D8R elemanı donatı haricindeki tüm malzemeler için kullanılmıştır. C3D8R elemanı 8 noktalı lineer bir eleman olup, azaltılmış integasyonlu ve kumsaati kontrollüdür.

Çerçevenin yüklemesi için explicit (açık) dinamik analiz yapılmıştır. Çünkü explicit (açık) dinamik analiz Abaqus'te nonlineer quasi-statik problemler ve hızlı ve temas içeren problemler için çok uygundur. Hareket denklemini çözmek

için Newton-Raphson iterasyonunu kullanmaz, onun yerine merkezi farklar iterasyon metodunu kullanır.



Şekil 8. Birleşimlerin kırılma –ayrılma davranışı

Merkezi farklar iterasyonunda rijtlik, kütle ve sönüm matrisleri her adımda tekrar oluşturulmaz ve I+1'inci adımdaki deplasmanlar I ve I-1'inci adımdaki deplasmanlar kullanılarak bulunur. Bu sebeple bilgisayar analiz maliyeti düşüktür. Büyük bir bilgisayar gücü gerekmez ve bilgisayar gücü genellikle eleman iç kuvvetlerinin bulunmasında kullanılır. [14]

Quasi-statik gibi bir yükleme açık(explicit) analiz kullanılarak simüle edilecekse, başarılı bir analiz için bazı şartlar dikkate alınmalıdır. Çünkü bu durumda statik bir yükleme dinamik bir yüklemeye çevrilmiştir. Eğer eylemsizlik kuvvetleri bir seviyenin altında tutulursa, problemin statik bir problem gibi olduğu kabul edilebilir. Bunu anlamak için kinetik enerji/toplam iç enerji oranı analizden sonra kontrol edilir ve bu oran eğer 0.10 değeri ve altındaysa, yükleme statik bir yükleme gibi kabul edilebilir. [14].

Açık(explicit) analizin diğer bir hususu da mantıklı bir yükleme zamanının ayarlanmasıdır. Eğer statik yüklemedeki doğal zaman dikkate alınır, bu dinamik bir olaya nazaran çok yavaş olduğu için, bu kadar uzun süre analiz yaptırılması bilgisayar kullanımı açısından ekonomik olmaz. Daha önce belirtildiği üzere olayın ivmelendirilmesi durumunda da, kinetik enerji/toplam iç enerji oran şartı sağlanmayabilir. Bunu aşmak için Abaqus'teki kütle oranlama özelliği kullanılabilir. Bu özellik Denklem (10) ve (11)'de şöyle ifade edilebilir [14].

$$\Delta_t = \frac{L_e}{C_d} \quad (10)$$

$$C_d = \sqrt{E/\rho} \quad (11)$$

Formüllerdeki L_e karakteristik eleman uzunluğu, c_d ise lineer elastik malzemenin dilatasyonel dalga hızıdır. Formüllerden görüldüğü üzere yoğunluğu arttırsak, analiz süresini kısaltabiliriz. Çünkü nümerik analizdeki stabil zaman arttırımı bununla ilişkilidir. Bu çalışmada kütle oranlama oranı 2 olarak kullanılmıştır.

Analizde 2 sn içinde 20mm'ye (%2.5 öteleme oranı) ulaşan yanal bir itme çerçeveye yüklenmiştir. Tablo 1'de

görülmektedir. Bu çalışmada yüklemenin %2.5 yükleme oranıyla sınırlandırılma sebebi, kolonların bu değerden sonraki yüklemelerde ileri hasar bölgesi olarak tanımlanan performans bölgesine (%3) çok yaklaşmasıdır ve pratikte bu değerden sonrasının anlamlı olmayacağı düşüncesidir. Bu çalışmada dizayn edilen çerçeve 2018 yönetmeliğinden önce tasarlanmış ve ileride planlanan deney için inşa ettirilmiş ve o günkü mevcut yönetmelik olan TDY 2007’de yeni bina tasarımı için etkin görece kat ötelemeleri değeri %2 ile sınırlandırılmıştı. Ayrıca kolonlara A_c kolon kesit alanı, f_{ck} C25 karakteristik basınç dayanımı olmak üzere; $0.3 \times A_c \times f_{ck}$ olan aksel yük uygulanmıştır.

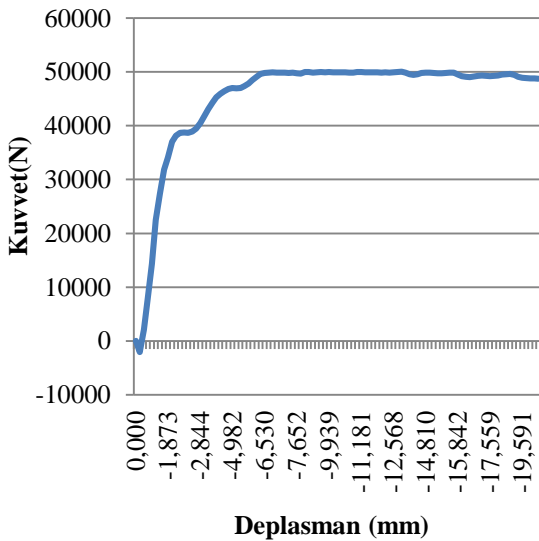
Tablo 1. Çerçeveye yükleme zamanı içinde verilen yükleme

Zaman(s)	Deplasman (mm)
0	0.
0.25	2.5
0.5	5
0.75	7.5
1	10
1.25	12.5
1.5	15
1.75	17.5
2	20

3 Bulgular ve tartışma

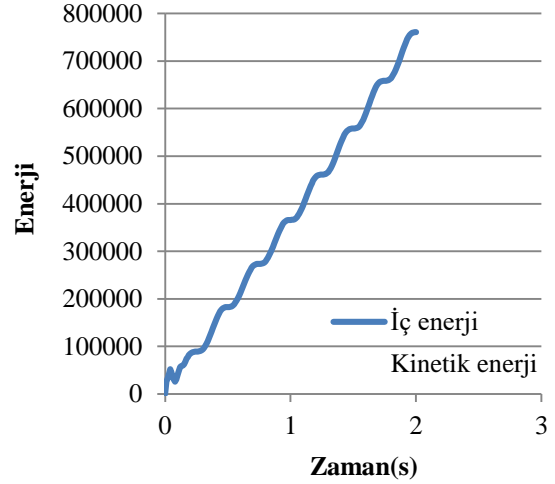
3.1 Duvarsız çerçeve sonuçları

Abaqus’ün görüntüleme modülünde yük-deplasman grafikleri görülebilmektedir ve buradan data alınıp excel programına aktarılabilir. Analizden sonra Yük-deplasman, enerji, ve gerilme değerleri elde edilmiştir. Boş çerçeve Şekil 9’da görüldüğü gibi 50KN taşımıştır. Eğer 0.75 x maksimum yük’e karşılık gelen sekant rijitliği, başlangıç rijitliği olarak kabul edilirse, başlangıç rijitliği: 16237.87N/mm’dir. Grafik incelenirse, akma yer değiştirmesinin 2.5mm olduğu söylenebilir.



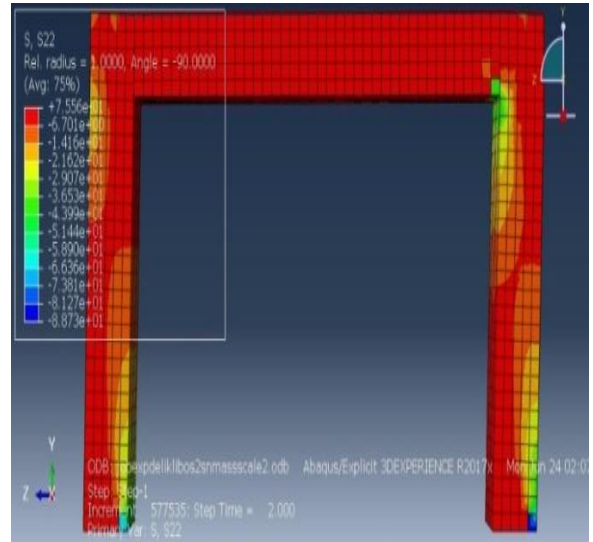
Şekil 9. Duvarsız çerçeveye ait yük(newton) –deplasman (mm) grafiği

Eğer Kinetik enerji/iç enerji grafikleri incelenirse, bu oranın düşük olduğu ve yüklemenin açık(explicit) dinamik analiz olmasına rağmen statik itme yüklemesi gibi düşünülebileceği görülür. Şekil 10’da enerji grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 10. Duvarsız çerçeve yüklemesinin iç enerji (mavi) ve kinetik enerji(kırmızı) grafikleri

Gerilme durumu da yüklemenin son saniyesindeki S22 (yerçekimi doğrultusu) gerilmesi olarak Şekil 11’de görülmektedir.



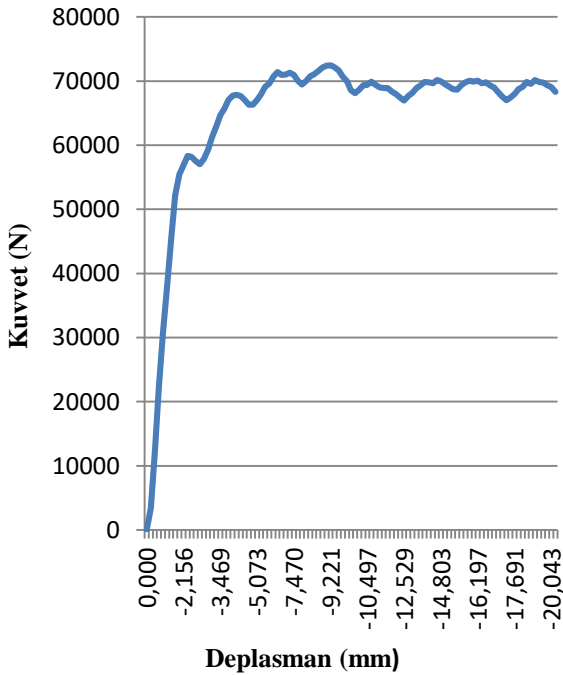
Şekil 11. Duvarsız çerçevenin yüklemenin 2. saniyesindeki gerilme durumu

3.2 Çerçeve duvar arası harç olan çerçeve

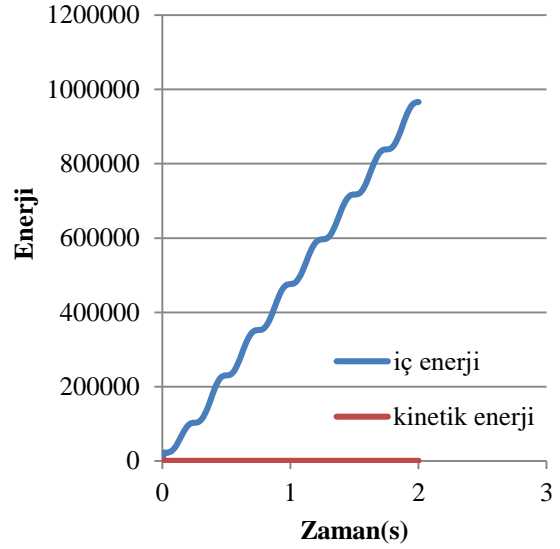
Yük deplasman ilişkileri, enerji grafikleri, gerilme değerleri analizlerden sonra görülmüştür. Dolgu duvarlı ve çerçeve duvar arası harçlı birleşimli çerçeve Şekil 12’de görüldüğü üzere 70KN yük taşımıştır. Eğer maksimum yükün 0.75’inin sekant rijitliği, başlangıç rijitliği olarak kabul edilirse, başlangıç rijitliği 34163.66N/mm ‘dir ki bu dolgu duvarsız çerçevenin 2.10 katıdır. Harçsız bloklar

geleneksel dolgu duvarlar kadar çerçeve rijitliğini arttırmamaktadır. Grafikten, akma yer değiştirmesinin 2.5mm olduğu kabul edilebilir. Bu, harçsız bloklulu dolgu duvarın akma yer değiştirmesine ve akma sünekliğine negatif bir etkisi olmadığı anlamına gelir. Bu sonuç önceki çalışmalar [4] dikkate alınırsa uygun bir sonuçtur. Bu yüzden, bu çalışmanın yazarlarına göre, harçsız bloklulu dolgu duvarın tasarımı zayıf bir basınç çubuğu ve daha fazla bir viskoz sönümün birleşimi olarak düşünülebilir. Başlangıç rijitliği kullanılarak, bu başlangıç rijitliği duvar yerine basınç çubuğu içeren çerçevenin başlangıç rijitliğine eşitlenerek, basınç çubuklu eşdeğer bir çerçeve yapı dizaynı için düşünülebilir. Ayrıca geleneksel dolu bloklulu yığma duvarın betonarme bir çerçevenin başlangıç rijitliğini 30 kat arttırabildiğinden önceki çalışmalarda [3] bahsedildiği göz önüne alınırsa, harçsız duvarın rijitliği neredeyse arttırmadığı düşünülebilir ve bu da depremlerde katlar arası rijitlik farkları nedeni ile oluşan düzensizliklerin meydana getirebileceği sorunların bertaraf edilmesi anlamına gelir.

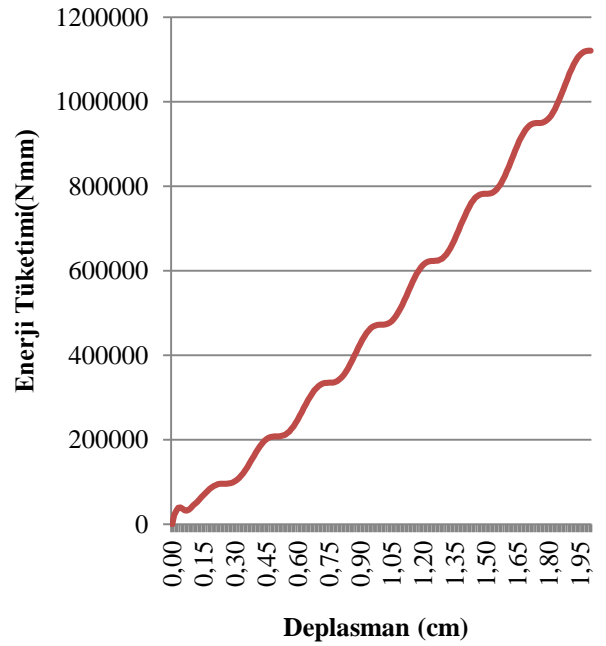
Bir diğer husus ta rijitliğin artmamasının yapı periyodunu geleneksel duvarlı yapıdan daha uzun hale getirmesi ve uzun periyot ile yapıya gelen deprem kuvvetlerinin azalabileceği gerçeğidir. Bunlara ek olarak unutulmamalıdır ki önceki çalışmalarda görüldüğü üzere [7] , kolonlar kesmeden kırıldığında sürtünmeden dolayı oluşan enerji tüketimi artacak ve duvar çerçevenin düşey yüklerini taşıyacaktır. Enerji grafiklerine bakıldığında, kinetik enerji/toplam iç enerji oranının düşük olduğu Şekil 13'te görülmektedir. Ve dolgulu çerçevenin sürtünme nedeniyle olan enerji tüketimi Şekil 14'te görülmektedir. Bu enerji daha önce bahsedildiği şekilde [4] Jacobsen yaklaşımı kullanılarak eşdeğer bir sönüm oranı hesaplamakta kullanılabilir. (N-mm cinsinden Abaquste hesaplanmıştır.)



Şekil 12. Harçsız bloklulu ve harçlı birleşimli çerçevenin yük deplasman grafiği



Şekil 13. Harçsız duvarlı ve duvar çerçeve etkileşimi harçlı olan çerçevenin iç enerji(mavi) ve kinetik enerjisi

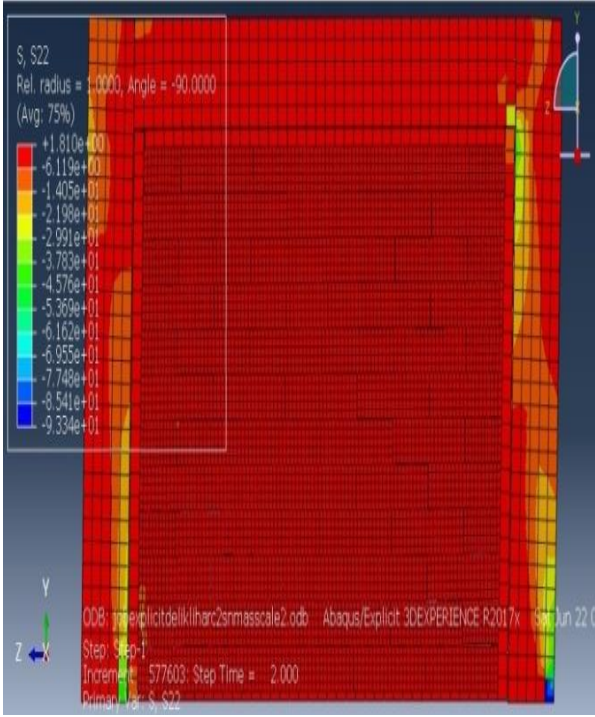


Şekil 14. Harçlı birleşimli sistemin yükleme zamanına göre toplam enerji tüketimi (N-mm vs deplasman)

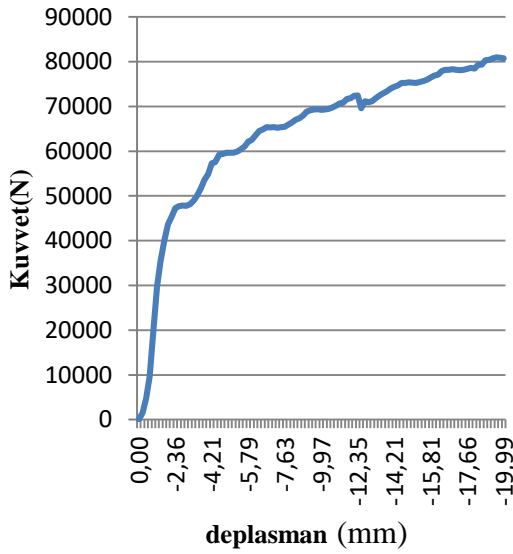
Yükleme sonundaki S22 gerilmesini gösteren (yerçekimi yönü) gerilme grafiği Şekil 15'te görülmektedir.

3.3 Çerçeve duvar arası polimer yapıştırıcılı çerçeve

Çerçevenin yük deplasman ilişkileri, enerji grafikleri, gerilme değerleri analizden sonra elde edilmiştir. Şekil 16'da görüldüğü üzere, harçsız bloklulu ve polimer birleşimli çerçeve 80KN maksimum yük taşımıştır ki bu harçlı birleşimli, harçsız bloklulu çerçeveden %14 daha fazladır.



Şekil 15. Harçsız bloklı harçlı birleşimli çerçevenin yüklemenin 2. saniyesindeki gerilme durumu



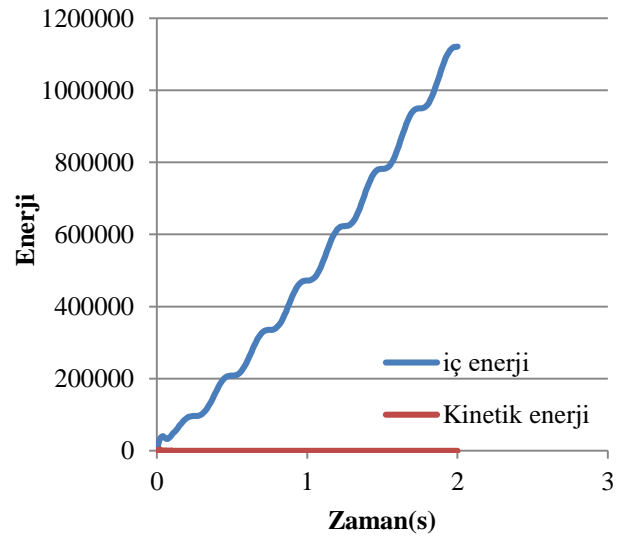
Şekil 16. Polimer yapıştırıcılı harçsız bloklı çerçevenin yük deplasman grafiği

Eğer başlangıç rijitliği, maksimum yükün 0.75'inin sekant rijitliği olarak kabul edilirse, başlangıç rijitliği: 11817.11N/mm olmaktadır ki dolgu duvarsız çerçevden düşüktür. Akma yer değiştirmesini grafikten 2.5mm olarak kabul edebiliriz. Harçsız bloklı dolgu duvar yapının akma yer değiştirmesine ve sünekliliğine negatif bir etki yapmamaktadır. Ve polimerli durumda, dolgu duvarsız ve harçlı birleşimli durumlarda görmediğimiz şekilde yük akmadan sonra artış göstermektedir. Bu sonuç düzensizlikler

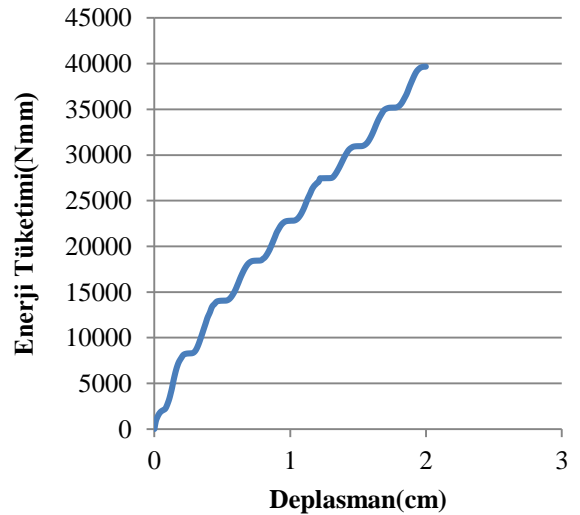
ve yapı periyodu ile ilgili harçlı birleşimli, harçsız duvar sisteminde belirtilen avantajlardan bile daha iyidir.

Enerji grafikleri incelendiğinde yine görülmüştür ki, kinetik enerji/toplam iç enerji oranı Şekil 17'de gösterildiği üzere düşüktür. Çerçevenin Sürtünme dolayısıyla kaybettiği enerji Şekil 18'de görülmektedir. Bu enerji daha önce bahsedildiği şekilde Jacobsen metodu kullanılarak eşdeğer bir sönüm oranı hesaplamak için kullanılabilir.

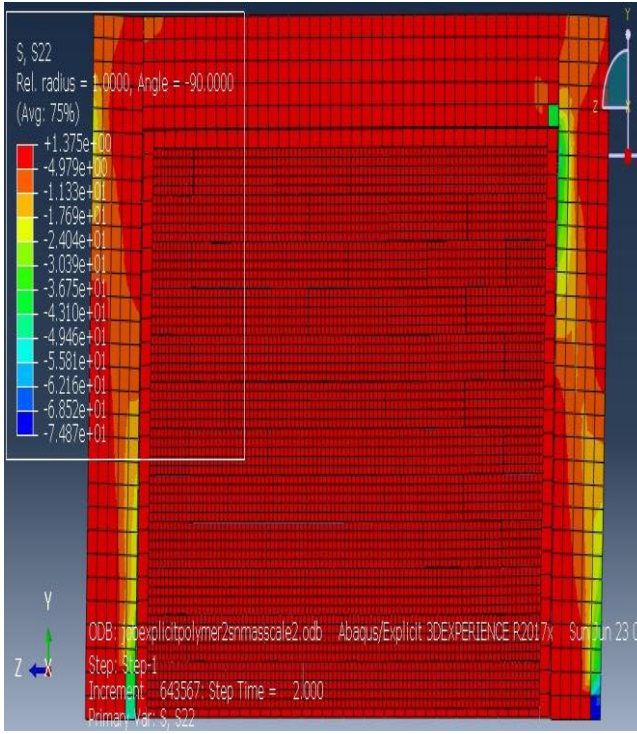
Yüklemeye sonundaki S22 gerilmesini gösteren (yerçekimi yönü) gerilme grafiği Şekil 19'da görülmektedir. Şekil 18'deki enerji tüketimi incelendiğinde, harçlı birleşime nazaran sürtünme enerjisinin azaldığı görülmektedir. Bu harç yerine kullanılan kauçuk benzeri polimer pm malzemesinin deformasyon yeteneği ile gerilme yığılmalarını azaltması sayesinde olmuştur.



Şekil 17. Harçsız bloklı ve polimer birleşimli çerçevenin iç enerji(mavi) ve kinetik enerji (kırmızı) grafikleri



Şekil 18. Harçsız bloklı ve polimer birleşimli çerçevenin tükettiği sürtünme enerjisi (N-mm vs deplasman (cm))



Şekil 19. Harçsız duvarlı polimer birleşimli çerçevenin yüklemenin 2. saniyesine ait gerilme durumu

4 Sonuçlar

Çalışma kapsamında harçsız duvarlı-duvarsız ve farklı dolgulu 3 farklı betonarme çerçeve, düşey yükler altında 20mm yanal itmeye tabi tutularak nümerik analiz ile incelenmiştir. Sonuç olarak, görülmüştür ki harçsız duvar, sistemin enerji tüketim kapasitesini arttırmaktadır ve harçsız bloklü duvar ile çerçeve arasında var olan bağlayıcının cinsi

bu bunlardan müteşekkil yapı davranışını değiştirmektedir. Şekil 20’de daha önce verilen yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırmalı görünümü görülmektedir.

Harçsız bloklü ve harçlı birleşimli çerçevenin başlangıç rijitliği dolgu duvarsız çerçevenin 2.10 katıdır. Harçsız bloklü dolgu duvar geleneksel duvar kadar çerçeve rijitliğini arttırmamakta ve akma yer değiştirmesine ve sünekliliğine negatif bir etki yapmamaktadır. Bu yüzden bu çalışmanın yazarlarına göre, harçsız bloklü dolgu duvar zayıf bir basınç çubuğu ve daha yüksek bir viskoz sönümün birleşimi şeklinde modellenilebilir. Başlangıç rijitliği kullanılarak basınç çubuklu eşdeğer bir çerçeve yapı tasarımı için düşünülebilir.

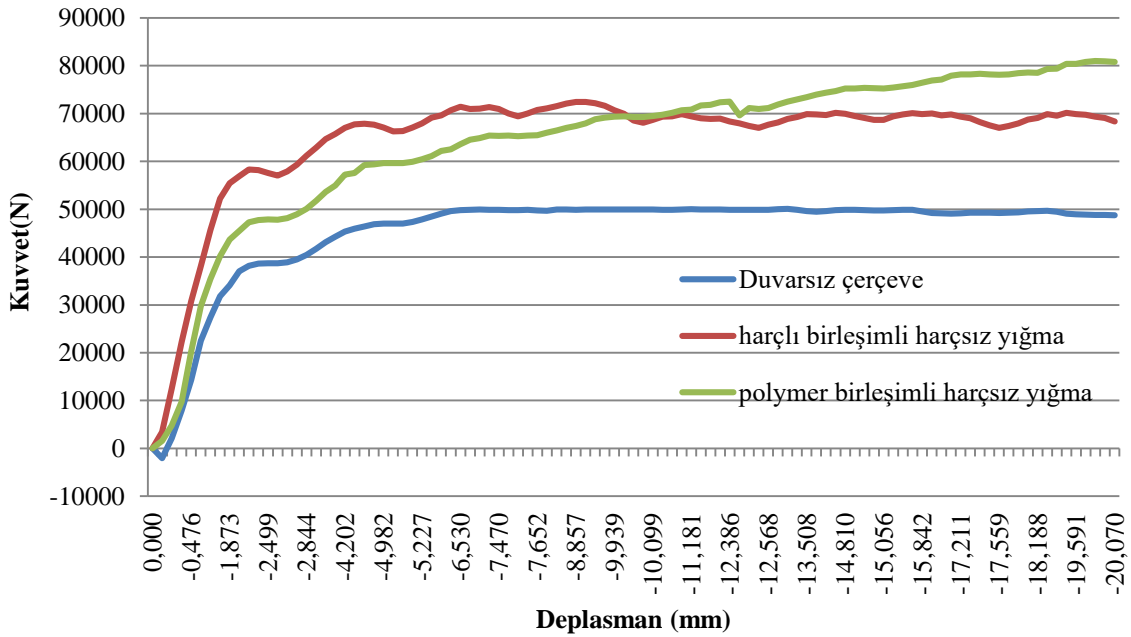
Harçsız duvarlı sistem rijitliği çok fazla arttırmadığından, yapılarda katlar arası rijitlik farklarından dolayı oluşabilecek düzensizlikleri gidermede faydalı olacaktır.

Harçsız duvarlı çerçeve, duvarsız çerçeveye nazaran %2.5 öteleme oranı için, %40 daha fazla yatay yük taşımıştır. Duvar ile çerçeve arasında bağlayıcı olarak Polimer Pm kullanıldığı durumda ise %60 daha fazla yatay yük taşımıştır. Bu olgu betonarme çerçevedeki gerilme yığılmalarının Polimerli durumda azalmasıyla açıklanabilir.

Polimer birleşimli ve harçsız duvarlı çerçeve bütün bu sebeplerden sismik tasarım ve sismik güçlendirme için iyi bir alternatiftir.

Harçsız duvarların önceki çalışmalarda, kolonlar kesmeden kırıldığında, sürtünmeyle daha fazla enerji tükettiği ve düşey yükleri taşıdığı saptanmıştı. Bu olgu da bu çalışma sonuçlarıyla birlikte değerlendirilirse, polimer pm kullanımı ile gerilme yığılmaları azaltılarak, ek bir dayanım sağlanabilir.

Daha fazla araştırma için deneysel çalışma gerekmektedir.



Şekil 20. Çerçevelere ait yük deplasman eğrilerinin karşılaştırmalı görünümü

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

- [1] S. Yıldırım, G. Aşık, B. Erkus, Y. Yetimoğlu, Y. Tonguç, and I. Mualla, Retrofit of a reinforced concrete building with friction dampers, Second European Conference on earthquake engineering and seismology, İstanbul, Türkiye, 25-29 Ağustos 2014.
- [2] G. Amato, M. Fosetti, L. Cavaleri, An updated model of equivalent diagonal strut for infill panels. Eurocode 8 perspectives from the Italian Standpoint Workshop, 119-128, Napoli, Italya, 2009.
- [3] K. Lin, Y. Z. Totoev, H. Liu, T. Guo, In plane behaviour of a reinforcement concrete frame with a dry stack masonry panel. Mdpi materials, 9, 108, 2016. <https://doi.org/10.3390/ma9020108>
- [4] Y. Totoev, Design procedure for semi interlocking masonry. Journal of civil engineering and architecture, 9, 517-525, 2015. <https://doi.org/10.17265/19347359/2015.05.003>
- [5] A. Hossain, and Y. Totoev, Energy dissipation of framed semi interlocking masonry panel under large displacement. 10th Australian Masonry Conference, Sydney, Australia, 11-14 February 2018.
- [6] Y. Totoev and A. Al. Harty, Semi interlocking masonry as infill wall system for earthquake resistant buildings. The Journal of Engineering Research, 13(1), 33-41, 2016. <http://doi.org/10.24200/tjer.vol13iss1pp33-41>
- [7] Y. Sanada, N. Yamauchi, E. Takahashi, Y. Nakano, and Y. Nakamura, Interlocking block infill capable of resisting out-of-plane loads. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 12-17 October 2008.
- [8] S. Mısır, Ö. Özcelik, S. Girgin, S. Kahraman, Experimental work on seismic behaviour various types of masonry infilled RC frames. Structural Engineering and Mechanics, 44(6), 763-774, 2012. <http://doi.org/10.12989/sem.2012.44.6.763>
- [9] A. Kwiecien, Highly deformable polymers for repair and strengthening of cracked masonry structures. International Journal of Engineering Technology, 2(1), 182-196, 2013. http://doi.org/10.5176/2251-3701_2.1.53
- [10] A. Kwiecien, G. Felice, D. V. Oliveira, B. Zajac, A. Bellini, S. De Santis, B. Ghiassi, G. P. Lignola, P. B. Lourenço, C. Mazzotti, A. Prota, 2015, Repair of composite to masonry bond using flexible matrix. Materials and Structures, 49, 2563-2580, 2015, <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0668-5>
- [11] A. Kwiecien, Shear bond of composites to brick applied highly deformable, in relation to resin epoxy interface materials. Materials and Structures, 47, 2005-2020, 2014. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0363-y>
- [12] A. Kwiecien, M. Gams, and B. Zajac, Numerical modelling of flexible polymers as the adhesive for frps, The 12th International Symposium on Fiber Reinforced Polymers as The Adhesive for FRPs. Nanjing, China, 14-16 October 2015.
- [13] I. Al-Shaikh, and N. Falah, Numerical analysis of masonry infilled RC frames. Journal of Science and Technology, 19(2), 2014.
- [14] C. Demir, Seismic behaviour of historical stone masonry, PHD Thesis, İstanbul Technical University, İstanbul, Turkey, 2012.
- [15] F. Birdal, Analytical modelling and experimental investigation of RC structures. PHD thesis, Kayseri University, Kayseri, Turkey, 2015.
- [16] Y. T. Obaidat, Structural retrofitting of concrete beams using FRP. PHD thesis, Lund University, Lund, Sweden, 2011.
- [17] S. Ergun, Betonarme kirişlerin kesme kapasitesinin dış donatılar ile artırılması, Doktora Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye, 2014.
- [18] J. R. Van Noort, Computational modelling of masonry structures, Master thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2012.
- [19] S. Erkek, Kauçuk kapı stoperinin hiperelastik ve viskoelastik modellenmesi ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi, Y. Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 2016.
- [20] Dassault Systems Simula Abaqus, Modelling fracture and Failure, Lecture 6
- [21] K. F. Abdulah, L. S. Cunningham, M. Gillie Simulating masonry behaviour using a simplified micro model approach, Engineering Structures, 151, 349-365, 2017. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.021>
- [22] A. Viskovic, L. Zuccarino, A. Kwiecien, B. Zajac, M. Gams, Quick seismic protection of weak masonry infilling in filled frame structures using flexible joints, Key Engineering Materials, 747, 628-637, 2017. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.747.628>
- [23] M. Gams, A. Kwiecien, J. Korelc, T. Rousakis, A. Viskovic, Modelling of deformable polymer to be used for joints between infill masonry walls and R.C. frames. Procedia Engineering, 193, 455-461, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.237>





Gelir getirmeyen su oranı tahmin modelleri Prediction models for non-revenue water ratio

Burak Kızılöz^{1,*}, Eyüp Şişman^{2,3}

¹ Kocaeli Büyükşehir Belediyesi, İSU Genel Müdürlüğü, Çevre Koruma ve Kontrol Daire Başkanlığı, 41200, Kocaeli Türkiye

² İstanbul Medipol Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34810, İstanbul Türkiye

³ İstanbul Medipol Üniversitesi, İklim Değişikliği Uygulama ve Araştırma Merkezi (İKLİMER), 34810, İstanbul Türkiye

Özet

Bu çalışmada Gelir Getirmeyen Su Oranı (GGSO) tahminleri, Kocaeli'nin en fazla su kaybı yaşanan altı ilçesinin 2018 ve 2019 yıllarına ait iki yıllık verisi dikkate alınarak ve tüketilen su miktarı, şebeke uzunluğu, servis bağlantı uzunluğu, toplam şebeke uzunluğu, şebeke yaşı ve şebeke basıncı ana parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Model tahminleri iki girdi ve tek çıktılı Yapay Sinir Ağı (YSA) modelleri ve Kriging yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Modellerde toplam şebeke uzunluğu ve iki girdili YSA model kombinasyonlarında ise, servis bağlantı uzunluğu ilk kez bu çalışmada model girdisi olarak kullanılmıştır. Yöntemlerin model çıktı performansları R^2 ve HKOK performans ölçütleri üzerinden değerlendirilmiştir. Sonuç olarak; Kriging yöntemi ile gerçekleştirilen modellerin tahmin performansları YSA yöntemine göre oldukça iyidir. Kriging tekniği ile oluşturulan GGSO tahmin model çıktılarının değerlendirilmesi ve yorumlanması elde edilen tahmin haritaları sayesinde daha kolay yapılabilirken, kapalı model yapısına sahip olan YSA model sonuçlarında bu durum nitelikli uzmanlık gerektirmektedir.

Anahtar kelimeler: Kriging, Yapay sinir ağı, Gelir getirmeyen su oranı, Su dağıtım şebekesi, Kocaeli

1 Giriş

Ülkemizdeki belediyeler ve özel şirketler su, kanalizasyon, yağmursuyu, elektrik ve doğalgaz gibi çok önemli alt yapı hizmetlerine destek sağlamaktadır. Bunlar içerisinde özellikle su dağıtım şebekesi altyapılarına gereken önemin verilmediği, su kayıplarının çok yüksek olmasından bilinmektedir. Bir su dağıtım şebekesi, farklı çaplarda şebeke boruları, çeşitli hacimlerde su depoları, belli güçte pompalar, vanalar, dirsekler, vantuzlar ve tahliye özelliği olan çeşitli bileşenlerden bir araya gelmektedir. Bu bileşenlerin herhangi birisinde ortaya çıkan arızalar, ciddi su kayıplarına sebep olabilmekte, beraberinde su ve hizmet kalitesini de etkilemektedir.

Dünya genelinde yıllık toplam Gelir Getirmeyen Su (GGSO) miktarının yaklaşık 126 milyar m³ olduğu ve bunun ekonomik değerini yaklaşık 39 milyar dolar olduğu tahmin edilmektedir [1]. Gelişmiş ülkelerde GGSO %10 seviyesinin altına düşürülebilirken, gelişmekte olan ülkelerde bu oran %20-60 aralığındadır [2]. Yüksek GGSO idarelerin bütçelerini olumsuz etkileyip, yeni yatırımların önündeki en büyük engellerden biridir.

Su dağıtım şebekelerindeki kayıplar sıklıkla American Water Works Association (AWWA) ve International Water Association (IWA) tarafından önerilen su denge birleşenleri kullanılarak değerlendirilmektedir [3, 4]. Bu araştırma

Abstract

In this study, Non-Revenue Water Rate (NRWR) predictions have been made by taking into account two-year data (2018 and 2019) of Kocaeli and using the main parameters of consumed water amount, network length, service connection length, total network length, network age and network pressure in only six districts with the highest water loss. Model predictions have been made by both Artificial Neural Network (ANN) models with two inputs one output and Kriging method. In this study, the total network length for all model combinations and the service connection length for ANN combinations with two inputs have been used as a model input for the first time. The model output performances of the above-mentioned methods have been evaluated in accordance with R^2 and HKOK criteria. In conclusion, it is obvious according to the results that the model prediction performances made by Kriging method are better than the other one (ANN method). On the other hand, while evaluating the NRWR prediction model outputs established by Kriging method is easier through the prediction charts, this requires a specialized skill set for evaluating the ANN results

Keywords: Kriging, Artificial neural network, Non revenue water ratio, Water distribution network, Kocaeli

çalışmasında da IWA tarafından önerilen ve standartlaştırılan GGS değerleri kullanılmıştır. GGS faturalandırılmamış iznli tüketim ile, idari ve fiziki kayıplardan oluşur.

GGSO miktarının azaltılması ve kontrol altında tutulabilmesi için yapılan çalışmalar incelendiğinde, literatürde ülkemizde de bazı araştırmaların olduğu görülmektedir. Kanakoudis ve Muhammetoğlu [5], Antalya ve Kos bölgelerindeki GGS miktarını azaltabilmek için, hidrolik model üzerinde çalışmışlardır. Çalışma sonunda her iki bölgede minimum gece debilerinde azalmalar ortaya çıkmıştır. Malatya su dağıtım şebekesi servis bağlantılarında oluşan sızmaların GGS miktarı üzerindeki etkisi Boztaş vd. [6] tarafından araştırılmıştır. 14 izole alan için, akustik dinleme cihazı ile arızalar tespit edilerek, su kayıpları azaltılmıştır. Tasarruf edilen toplam debi miktarı 148,9 lt/sn'dir. Bu çalışmalarla birlikte literatürde ayrıca, GGS miktarını azaltmak için idari ve fiziki kayıplar üzerine yapılmış ulusal ve uluslararası pek çok araştırma da bulunmaktadır [7-14].

GGSO tahminine yönelik literatür incelemesi yapıldığında ise, daha az sayıda araştırmacının olduğu görülmüştür. Bu çalışmalardan birinde, Jang ve Choi [15] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, Yapay Sinir Ağı (YSA) ve Çoklu Regresyon Analiz (ÇRA) yöntemleri kullanılarak GGSO tahmin modelleri geliştirilmiştir. YSA

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: bkiziloz@isu.gov.tr (B. Kızılöz)

Geliş / Received: 02.09.2020 Kabul / Accepted: 10.12.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngmuh.789694

model sonuç performansları, ÇRA'ya göre daha yüksek olarak belirlenmiştir (YSA için $R^2=0.63$ ve ÇRA için $R^2=0.19$ 'dur). Jang ve Choi [16] tarafından yapılan bir diğer araştırmada bu kez orijinal ve standartlaştırılmış verilerin kullanıldığı farklı nöron sayılarında YSA modelleri oluşturulmuştur. Çalışma sonunda performansı en iyi model için R^2 değeri, 20 nöron için, 0.397 olarak belirlenmiştir. Şişman ve Kızılöz [17] Kocaeli'nin tüm ilçelerinin on iki izole bölgesinin 2018 yılı on iki aylık toplam 144 adet verisini kullanarak, YSA ve Kriging yöntemleri ile GGSO'nu tahmin etmişlerdir. Model girdileri olarak, su dağıtım sistemine giren su miktarı, şebeke uzunluğu, arıza sayısı, servis bağlantı sayısı, su sayacı sayısı, düğüm noktası sayısı, servis bağlantı uzunluğu, içme suyu deposu hacmi, ortalama şebeke basıncı, boru çapları ve boru yaşları seçilmiştir. Sıralanan her bir değişkenin GGSO üzerindeki etkisini ortaya koyabilmek için, öncelikle YSA ile tek girdili modeller oluşturulmuştur. Sonrasında sırayla girdi sayıları artırılarak iki, üç ve dört girdili YSA modelleri geliştirilmiştir. Tüm bu modellerde veri setinin %55'i eğitim, %35'i doğrulama ve %10'uda test şeklinde bölünmüştür. En sonunda benzer değişkenler kullanılarak, Kriging yöntemi ile iki girdili ve tek çıktılı tahmin model haritaları hazırlanmıştır. Araştırmalarda en yüksek model performansı Kriging yöntemi ile elde edilmiş olup, R^2 değeri 0.95'dir. En iyi model sonucunun elde edildiği kombinasyonda girdi değişkenlerinin, sisteme giren su miktarı/düğüm noktası sayısı ve ortalama şebeke basıncı oldukları görülmüştür. Şişman ve Kızılöz [17] bu araştırmada şebeke basıncı ve boru yaşlarını, GGSO tahmin modelinde, ilk kez girdi olarak kullanmışlardır.

Bu araştırma çalışması, Şişman ve Kızılöz'ün [17] makale çalışmasından esinlenilerek ve tahmin modellerinde önceki araştırmadan ayıran belli değişiklikler ile, Kocaeli'nde en fazla su kaybı yaşanan altı ilçe için, 2018 (72 adet) ile birlikte 2019 (72 adet) yılları verileri de kullanılarak, oluşturulmuştur. Ayrıca her iki tahmin yönteminde tercih edilen toplam şebeke uzunluğu ve bunun yanında iki girdili YSA model kombinasyonlarındaki servis bağlantı uzunlukları, ilk kez bu araştırmada model girdisi olarak düşünülmüştür.

2 Materyal ve metot

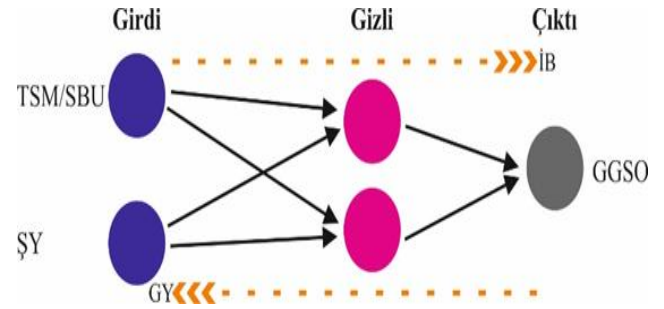
Bu araştırma makalesinde GGSO'nun modellenmesinde Kriging ve YSA yöntemleri kullanılmıştır. Kriging modellerinde Surfer programı, YSA modellerinde ise MATLAB programı tercih edilmiştir. Modeller iki girdi ve tek çıktılı yapıya sahiptir. Model girdi değişkenleri tüketilen su miktarı (TSM), şebeke uzunluğu (ŞU), servis bağlantı uzunluğu (SBU), toplam şebeke uzunluğu (TŞU), şebeke basıncı (ŞB) ve şebeke yaşı (ŞY) değişkenleri arasında seçilmiş olup, çıktı GGSO değişkenidir. YSA ve Kriging yöntemlerinde benzer girdi kombinasyonları üzerinden model sonuçları ve performansları karşılaştırılmıştır. Oluşturulan modellerin performans değerlendirilmesi korelasyon katsayısı (R^2) ve hataların karesinin ortalamasının kareköküne (HKOK) göre değerlendirilmiştir.

2.1 Çalışma alanı ve veriler

Araştırma için Kocaeli Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü'nün (İSU) hizmet sahasında olan on iki ilçesi arasından en yüksek GGSO'na sahip altı ilçesi (Kandıra, Kartepe, Körfez, Karamürsel, Gölcük ve Derince) seçilmiştir. Belirlenen altı ilçenin 2019 yılı toplam nüfusu 708.596 kişi olup, toplam şebeke uzunluğu 5077 km ve tüketilen su miktarı 210.990.587 m³tür. Bu ilçelerin toplam abone sayısı ise 315.181'dir [18]. Bu altı ilçenin 2018-2019 yılları aylık GGSO miktarları incelendiğinde, en yüksek GGSO Kartepe'de, en düşük ise Kandıra'dadır. Seçilen altı ilçenin su dağıtım sistemine ilişkin istatistikî bilgilere aşağıdaki Tablo 1'de bu araştırma çalışması başlığı altında yer verilmiştir. Ayrıca Tablo 1'de bu araştırmanın model girdi ve çıktılarına ilişkin istatistikî bilgiler yanında, Şişman ve Kızılöz'ün [17] çalışmasında kullandığı veriler karşılaştırma amaçlı verilmiştir. Tablo 1'de yer alan toplam şebeke uzunluğu bu çalışmada, tüm modeller için ilk defa model girdisi olarak kullanılmıştır.

2.2 Yapay sinir ağları

YSA modelleri için sıklıkla kullanılan İleri Beslemeli (İB) Geri Yayılımlı (GY) (feed-forward back propogation) ağ yapısından faydalanılmıştır. Klasik örnek bir ağ mimarisi, Şekil 1'de görüldüğü şekilde girdiler, gizli katman ve çıktılardan oluşmaktadır.



Şekil 1. YSA mimarisi

Model sürecinde ağ eğitimi için, pek çok araştırmada tercih edilen Geri Yayılımlı (GY) Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır [17 19]. Model çıktısı ve beklenen model sonucu arasındaki farklar, bu algoritma yardımıyla hata değerinin en küçüklenmesi yönünde, ağ sürekli olarak geriye doğru tekrar tekrar çalıştırılmıştır. Model veri setinde, 2018 ve 2019 yıllarında belirlenen altı ilçede aylık hesaplanan, toplam 144 adet veri bulunmaktadır. Bu veri setinin %65'i (93 adet) eğitim, %20'si (29 adet) doğrulama ve kalan %15'i (22 adet) test için, rastgele şekilde bölünmüştür. Bu şekilde veri setinin kullanımını için de Şişman ve Kızılöz'ün [17] model çalışmasından farklı bir dağılım tercih edilmiştir. Modelin gizli katmanında sigmoid ve çıktı katmanında ise lineer aktivasyon fonksiyonu ile işlemler gerçekleştirilmiştir. Gizli katmandaki nöron sayısına deneme yanılma ile karar verilmiştir.

Tablo 1. Model girdi ve çıktıları

Girdi ve Çıktı	Kısaltma	Bu araştırma çalışması		Şişman ve Kızılöz [17]		Birim
		Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum	
Tüketilen Su Miktarı	TSM	315.445	1.461.737	315.445	2.844.526	m ³
Şebeke Uzunluğu	ŞU	429	1631	306	1600	km
Servis Bağlantı Uzunluğu	SBU	131	393	128	527	km
Toplam Şebeke Uzunluğu	TŞU	1738	207.808	-	-	km
Şebeke Basıncı	ŞB	43	60	43	64	m
Şebeke Yaşı	ŞY	14	31	8	30	yıl
Gelir Getirmeyen Su Oranı	GGSO	0.21	0.54	0.13	0.54	-

2.3 Kriging

Kriging metodolojisinde, eldeki veriler kullanılarak üç boyutlu yüzey modelleri oluşturulmakta ve bu modeller yardımıyla girdilere karşılık model çıktı tahminlerinde bulunmaktadır. Model tahminleri için ölçüm değerlerine karşılık gelen çıktılar enterpolasyon tekniği ile belirlenmiştir. Kriging’de en önemli etken ağırlıkların belirlenmesidir. Model ağırlıklarına variogram fonksiyonu yardımıyla karar verilmiştir. Model için kullanılan verilerin ağırlıklı ortalaması ile çıktılar tahmin edilmektedir. Kriging yöntemi genel eşitliği aşağıda Denklem (1) ile verilmiştir [20].

$$Z(x_0) = \sum_i^N W_i Z(x_i) \quad (1)$$

2.4 Model performans ölçütleri

Araştırmada kullanılan modellerin tahmin performansları aşağıda verilen (2) ve (3) numaralı denklemler yardımıyla değerlendirilmiştir.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$$HKOK = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

3 Bulgular ve tartışmalar

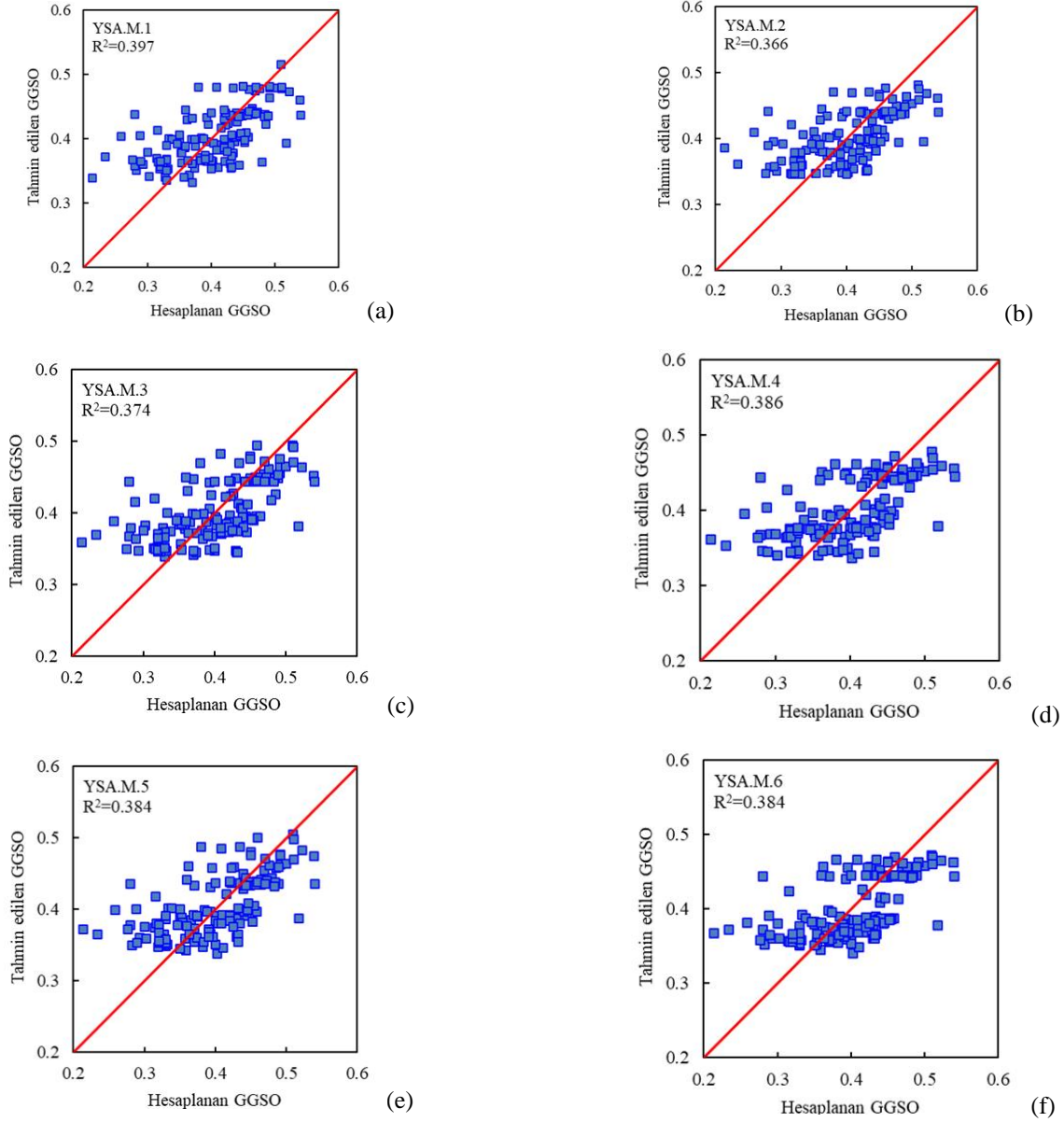
3.1 Yapay sinir ağları (YSA)

GGSO’nun tahmin edilmesinde öncelikle iki girdili ve tek çıktılı YSA modelleri kullanılmıştır. Modellerde veriler eğitim, doğrulama ve test için MATLAB programı yardımıyla rastgele şekilde üç parçaya ayrılmıştır. Gizli

katmandaki nöron sayısı model performansı göz önüne alınarak dört olarak belirlenmiştir. Altı farklı model kombinasyonu için elde edilen R² ve HKOK değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Geliştirilen YSA modelleri için R² değerleri 0.366 ile 0.397 aralığında değişirken, HKOK değerleri 0.051-0.052’dir. GGSO hesap değerleri ile YSA tahmin modellerinin arasındaki benzerlik ve farklar Şekil 2 üzerinden değerlendirilebilir. Şekil 2’de yer alan grafiklere ve R²’ye göre en iyi tahmin YSA.M.1 modeli ile ortaya konulmuş olup, R² değeri 0.397 ve HKOK değeri 0.051’dir. Bu grafiklerde kırmızı doğrunun üst kısmında kalan saçılımlar hesap değerlerine göre tahminlerin yüksek olduğunu, doğrunun alt kısmındaki saçılımlar ise tahminlerin hesap değerlerine göre küçük kaldığını gösterir. Buna göre genel olarak geliştirilen YSA modellerinin performansları ve tahmin doğrulukları iyi zayıftır.

Tablo 2 Tahmin modelleri performans sonuçları

Girdiler	Kriging			YSA		
	Model No	R ²	HKOK	Model No	R ²	HKOK
TSM/SBU-ŞY	K.M.1	0.886	0.022	YSA.M.1	0.397	0.051
TSM/TŞU-ŞY	K.M.2	0.836	0.027	YSA.M.2	0.366	0.052
TSM/ŞU-ŞY	K.M.3	0.811	0.029	YSA.M.3	0.374	0.052
TSM/SBU-ŞB	K.M.4	0.799	0.029	YSA.M.4	0.386	0.051
TSM/TŞU-ŞB	K.M.5	0.743	0.033	YSA.M.5	0.384	0.051
TSM/ŞU-ŞB	K.M.6	0.736	0.033	YSA.M.6	0.385	0.051



Şekil. 2. GGSO hesap değerleri ile YSA tahmin model sonuçları kıyaslama grafikleri

3.2 Kriging

YSA modellerinden sonra daha iyi GGSO tahminleri için Kriging metodolojisi kullanılarak bu modellerin performansları belirlenmiştir. Bu amaçla, YSA modellerinde kullanılan girdi eşleşmeleri için, öncelikle Surfer programı yardımıyla Kriging metodolojisi kullanılarak GGSO model tahmin haritaları hazırlanmıştır. Model haritalarındaki X, Y koordinatları model girdilerini ve Z koordinatı ise model çıktısını verir. Tüm modeller, nokta Kriging ve lineer yarıvariogram kullanılarak geliştirilmiştir. Kriging ve YSA tahmin modelleri performans sonuçları karşılaştırmalı şekilde yukarıda Tablo 2’de sunulmuştur.

GGSO tahmininde Kriging modellerinin YSA’ya göre model performansları ve doğrulukları Tablo 2’den görüldüğü gibi çok daha yüksektir. Kriging metodolojisi ile GGSO tahmininde K.M.1 no’lu model için R² değeri 0.886 iken, aynı kombinasyonun YSA ile çözüm sonucunda elde

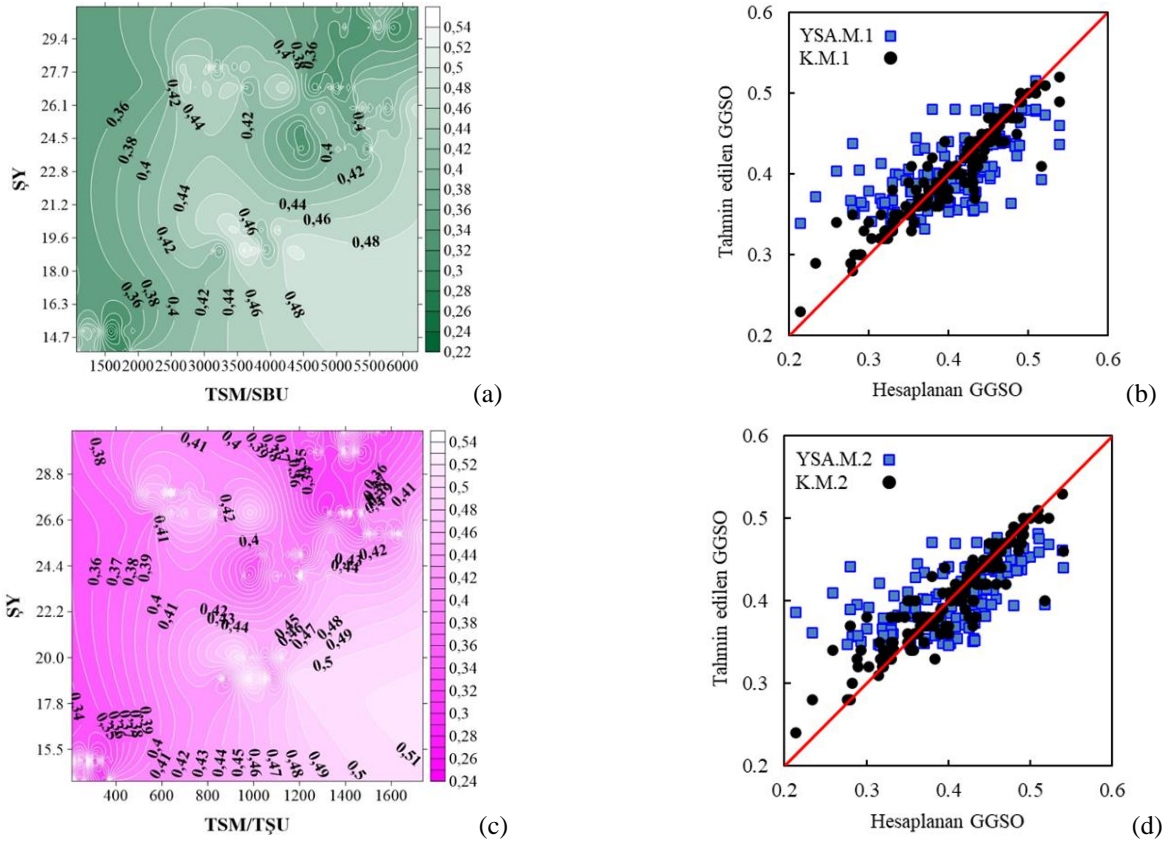
edilen R² değeri 0.379’dur. Kriging yöntemi model performansının YSA’ya göre oldukça iyi olduğu R² ve HKOK değerlerinden görülmektedir. Tablo 2’de verilen diğer beş model kombinasyonu için de Kriging modellerinin YSA’ya göre oldukça üstün oldukları görülmüştür. Kriging modellerinin R² değerleri 0.74-0.89 aralığında olup, 0.37-0.40 aralığında değişen YSA modellerine göre oldukça yüksektir. Kriging yönteminde belirlenen kombinasyonlar içerisinde en düşük model doğruluğu TSM/ŞU-BŞ (K.M.6 modeli) ye aittir. Diğer taraftan Kriging tahmin haritaları sayesinde uzmanlar şekil bilgisinin sunduğu avantajı da kullanarak model çıktılarını daha kolay yorumlayabilir. Bu araştırma çalışmasındaki GGSO tahmin model performans sonuçları ile Jang ve Choi [15-16] tarafından geliştirilen model performans sonuçları karşılaştırılırsa, bu çalışmada daha az girdi ile çok daha belirgin şekilde yüksek model doğrulukları elde edilmiştir. Şekil 3’de altı model kombinasyonu için hazırlanan Kriging tahmin haritaları yer

almakta olup, bunlarla birlikte GGSO hesap ve YSA-Kriging model tahmin sonuçları saçılımları kıyaslama için Kriging grafiklerinin sağ tarafında verilmiştir. Grafiklerde siyah daireler Kriging modellerine, mavi kareler ise YSA modellerine aittir. GGSO hesapları yatay eksen, model tahminleri dikey eksende gösterilerek modellerin doğrulukları (performansları) değerlendirilmiştir. Noktaların 1:1 eğimli kırmızı doğru etrafındaki saçılım varyanslarına bakılarak en iyi modellerin Kriging ile elde edildiği görülebilir. Altı model kombinasyonu içinde hesap ve tahminlerin birbirine yakınlıkları modelden modele farklılık göstermektedir. ŞY değişkeni ile kurulan modellerin doğruluklarının ŞB'na göre çok daha iyi olduğu Şekil 3b, 3d ve 3f grafikleri ile Şekil 3h, 3i ve 3k grafiklerinin mukayesesinden çıkarılabilir.

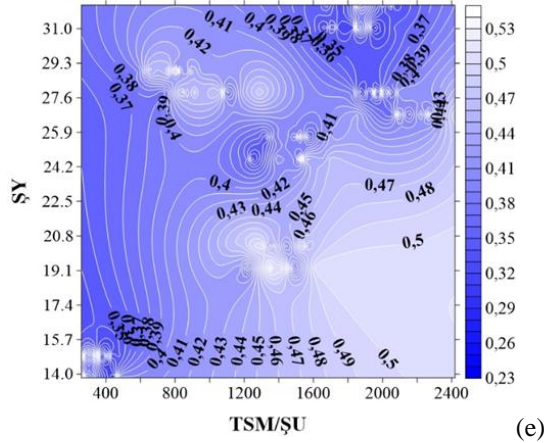
Bu araştırma ile Şişman ve Kızıloz'un [17] ilk araştırma sonuçları karşılaştırmalı olarak Tablo 3'de sunulmuştur. Her iki çalışmada da tahmin modellerinin oluşturulmasında toplam 144 adet veri kullanılmıştır. Ancak Şişman ve Kızıloz [17] tarafından ilk kez yapılan çalışmada Kocaeli sınırları içindeki on iki ilçenin 2018 yılı aylık verilerini kullanarak GGSO modellerini oluştururken, bu çalışma da tüm ilçeler içinde su kayıp oranı en yüksek olan altı ilçenin 2018 ve 2019 yılları aylık verileri kullanılmıştır. Dolayısıyla bu çalışmada elde edilen model tahminlerinin ve performanslarının daha düşük olması, en yüksek GGSO oranlı ilçelerin seçilmesine de bağlı olarak, yazarlar tarafından doğal olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca sunulan çalışmada verilen kombinasyonlar için de şebeke ve servis

bağlantı uzunluğu etkisini bir arada içeren toplam şebeke uzunluğu ilk kez bu çalışmada model girdisi olarak seçilmiştir.

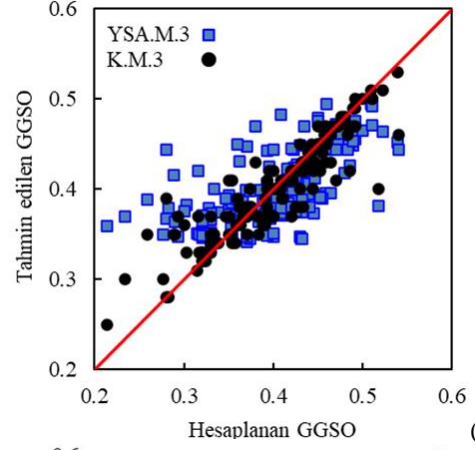
Tablo 3'ü incelediğimizde, model performansları açısından, Şişman ve Kızıloz'un [17] ilk çalışması ile arasındaki farklılıklar dikkat çekicidir. Bunun sebebi bu çalışmada performansı en düşük ve su kaybı en yüksek ilçelerin verileri kullanılarak tahmin modellerinin geliştirilmesidir. Bu durumda geliştirilen model performanslarının, belirlenen iki gösterge üzerinden, gerilediği görülmektedir. GGSO yüksek ilçelerde kayıplarla birlikte yıl içerisindeki değişkenlikte fazladır. Bunun da tahmin modellerinin performansları üzerinde dezavantajlı bir durum oluşturduğu düşünülmektedir. Bir su dağıtım şebekesinde yüksek su kayıp değerleri söz konusu ise, düşük kayıp değerlerine göre model sonuçlarının ve performanslarının da bununla orantılı kötü yönde etkileneceği beklenen bir durum olup, çalışmada bunu desteklemektedir. Ancak Kriging model performansları, bu yüksek GGSO verilerine rağmen, oldukça iyidir. YSA model performansları bu araştırma sonuçları açısından geliştirilen modellerin kullanılmaması gerektiğini göstermektedir. Sonuç olarak şebekelerde su kayıplarının düşürülmesi ve bu yönde adımlar atılması, su kayıplarının ve şebekelerin yönetimleri için geliştirilen karar destek tahmin model doğruluklarını da etkileyecek ve su kayıplarının daha da azaltılması için doğru kararlar alınabilmesine yardımcı olacaktır.



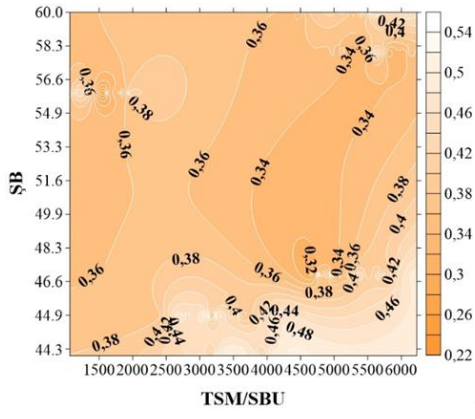
Şekil 3. Kriging model tahmin haritaları ve model sonuçları kıyaslama grafikleri



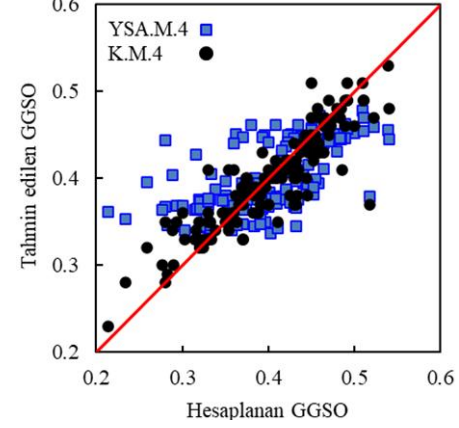
(e)



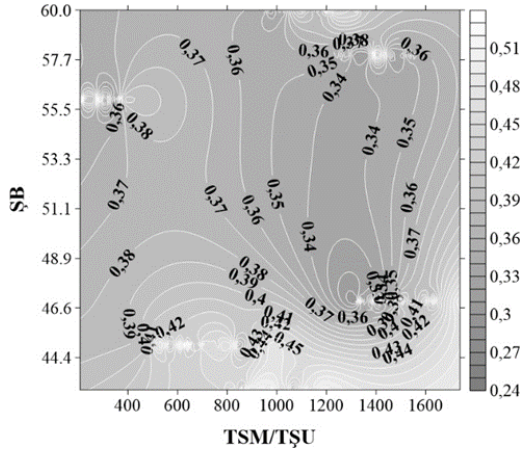
(f)



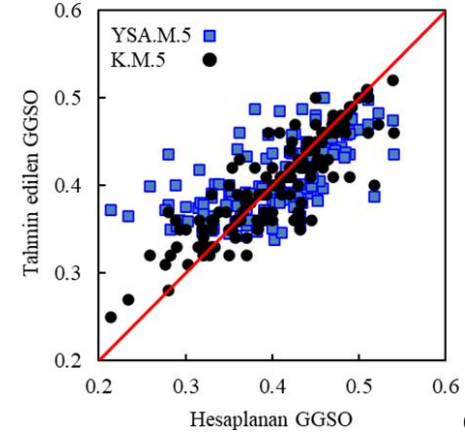
(g)



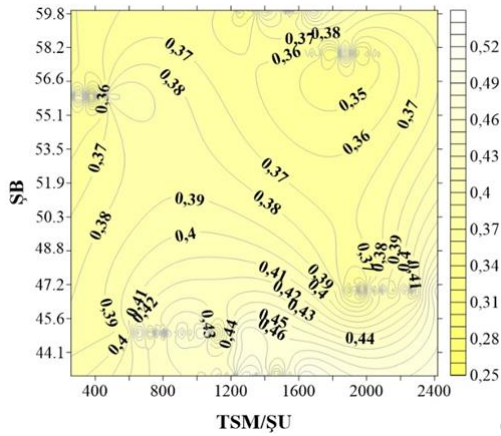
(h)



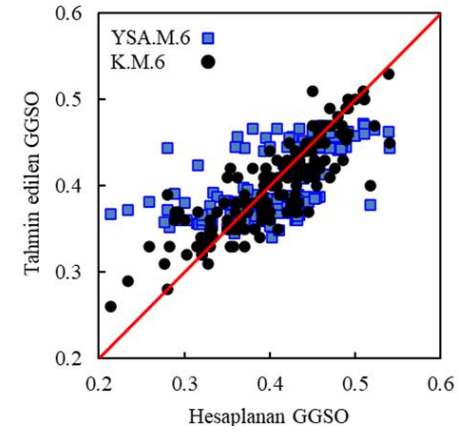
(i)



(j)



(k)



(l)

Şekil. 3 (devam). Kriging model tahmin haritaları ve model sonuçları kıyaslama grafikleri

Tablo 3 GGSO model sonuçlarının karşılaştırılması

Girdiler	Kriging				YSA			
	Bu çalışma		Şişman ve Kızılöz [17]		Bu çalışma		Şişman ve Kızılöz [17]	
	R ²	HKOK	R ²	HKOK	R ²	HKOK	R ²	HKOK
TSM/SBU-ŞY	0.89	0.022	0.93	0.0006	0.397	0.051	-	-
TSM/TŞU-ŞY	0.84	0.027	-	-	0.366	0.052	-	-
TSM/ŞU-ŞY	0.81	0.029	0.90	0.0008	0.374	0.052	-	-
TSM/SBU-ŞB	0.80	0.029	0.93	0.0006	0.386	0.051	-	-
TSM/TŞU-ŞB	0.74	0.033	-	-	0.384	0.051	-	-
TSM/ŞU-ŞB	0.74	0.033	0.90	0.0008	0.385	0.051	0.59	0.0032

4 Sonuçlar

Bu çalışma sonunda bir su dağıtım şebekesindeki GGSO tahminlerinde, Kriging yönteminin kullanılmasının, YSA'ya göre oldukça avantajlı olduğu bir kez daha görülmüştür. Kriging yöntemi ile GGSO tahminlerinde şebeke yaşı model performansları şebeke basıncına göre çok daha iyidir. Ancak şebeke yaşının doğru şekilde tanımlanmasında güçlüklerin söz konusu olduğu da bir gerçektir. Önemli diğer bir sonuçta YSA ve Kriging yöntemlerine ilişkin sonuçların yorumlanmasında ortaya çıkmaktadır. YSA model yapısı kapalı bir sistem olup, sonuçlar üzerinden yorumlar geliştirilmesi kolay değildir. Buna karşın Kriging yönteminde elde edilen model haritaları üzerinden yorum ve değerlendirmelerde bulunulması söz konusudur. Kriging model haritaları yardımıyla değişkenler arasındaki mantık ilişkilerinin şekil bilgisine dayanarak sorgulanması ve uzmanların konuya ilişkin tecrübe kazanabilmeleri mümkündür. GGSO'nun oldukça yüksek olduğu dağıtım şebekeleri içinde, Kriging yöntemi ile elde edilen modellerin performansları yüksek olup, kabul edilebilir tahminler ortaya konulmuştur.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] R. Liemberger and A. Wyatt, Quantifying the global non-revenue water problem. *Water Science and Technology: Water Supply*, 19 (10), 831–837, 2019. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.129>.
- [2] IBNET, The international benchmarking networks. <https://database.ibnet.org/Reports/Indicators/HeatMap?itemId=27>, Accessed 06 November 2020.

- [3] AWWA, Best practice in water loss control: improved concepts for 21st century water management, American Water Works Association. <https://www.awwa.org/Portals/0/AWWA/ETS/Resources/WLCFlyerFinal.pdf?ver=2015-02-10-083650-287>.
- [4] IWA, Assessing Non-Revenue Water and its Components: A Practical Approach. The IWA water loss task force, Water 21, 2003.
- [5] V. Kanakoudis and H. Muhammetoglu, Urban water pipe networks management towards non-revenue water reduction: Two case studies from Greece and Turkey. *Clean-Soil, Air, Water* 42 (7), 880-892, 2014. <https://doi.org/10.1002/clen.201300138>.
- [6] F. Boztaş, Ö Özdemir, F. M. Durmuşçelebi and M. Fırat, Analyzing the effect of the unreported leakages in service connections of water distribution networks on non-revenue water. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16 (8), 4393–4406, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2085-0>.
- [7] M. Tabesh, A. Asadiyami Yekta, R. Burrows, An integrated model to evaluate losses in water distribution systems, *Water Resources Management*. 23 (3), 477–492, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9284-2>.
- [8] H. E. Mutikanga, S. K. Sharma, K. Vairavamoorthy, Multi-criteria decision analysis: A strategic planning tool for water loss management, *Water Resources Management*. 25, 3947-3969, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9896-9>.
- [9] H. E. Mutikanga, S. K. Sharma, K. Vairavamoorthy, Assessment of apparent losses in urban water systems. *Water and Environment Journal*, 25 (3), 327–335, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2010.00225.x>.
- [10] C. van den Berg, Drivers of non-revenue water: A cross-national analysis. *Utilities Policy*, 36, 71–78, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2015.07.005>.
- [11] S. H. Zyoud, L. G. Kaufmann, H. Shaheen, S. Samhan and D. Fuchs-Hanusch, A framework for water loss management in developing countries under fuzzy environment: Integration of Fuzzy AHP with Fuzzy TOPSIS. *Expert Systems with Applications*, 61, 86–105, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.05.016>.
- [12] M. Tabesh, A. Roozbahani, B. Roghani, N. R. Faghihi and R. Heydarzadeh, Risk Assessment of factors influencing non-revenue water using bayesian networks and fuzzy logic. *Water Resources Management*, 32 (11), 3647–3670, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2011-8>.
- [13] K. Gonelas and V. Kanakoudis, Reaching economic leakage level through pressure management. *Water Science and Technology: Water Supply*, (16), 3, 756–765, 2016. <https://doi.org/10.2166/ws.2015.181>.
- [14] G. Güngör-Demirci, J. Lee, J. Keck, R. Guzzetta and P. Yang, Determinants of non-revenue water for a water utility in California. *Journal of Water Supply: Research*

- and Technology – AQUA, vol. 67 (3), 270–278, 2018. <https://doi.org/10.2166/aqua.2018.152>.
- [15] D. Jang and G. Choi, Estimation of non-revenue water ratio using MRA and ANN in water distribution networks. *Water*, (10), 1, 1-13, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10010002>.
- [16] D. Jang and G. Choi, Estimation of non-revenue water ratio for sustainable management using artificial neural network and Z-score in Incheon, Republic of Korea. *Sustainability*, (9), 11, 1933, 2017. <https://doi.org/10.3390/su9111933>.
- [17] E. Şişman and B. Kızılöz, Artificial neural network system analysis and Kriging methodology for estimation of non-revenue water ratio. *Water Supply*, (20), 5, 1871-1883, 2020. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.095>.
- [18] İSU, Kocaeli Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü, Yıllık faaliyet raporları, 2019.
- [19] B. Kızılöz, E. Çevik ve B. Aydoğan, Estimation of scour around submarine pipelines with Artificial Neural Network. *Applied Ocean Research*, (51), 241–251, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.04.006>.
- [20] C. M. Yeşilkanat, Y. Kobya, H. Taşkin and U. Çevik, Dose rate estimates and spatial interpolation maps of outdoor gamma dose rate with geostatistical methods; A case study from Artvin, Turkey. *Journal of Environmental Radioactivity*, (150), 132–144, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.08.011>.



Tarihi Şenkaya Yünören Köprüsünün deprem performansının incelenmesi Earthquake performance of historical Şenkaya Yünören Bridge

Oğuzhan Çelebi¹ , Abdulkadir Cüneyt Aydın^{1,*} 

¹Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

Özet

Türkiye Erzurum İli Şenkaya İlçesinde yer alan Yünören Köprüsünün, Türkiye’de yaşanmış büyük depremler etkisinde performansının belirlenmesi ve köprünün güçlendirilmesi için mevcut yöntemler kullanılarak çalışma yapılmıştır. Çalışmada, SAP2000 paket programı ile köprü üç boyutlu olarak modellenmiş ve yine analiz sonuçları bu programdan alınmıştır. Analiz sonuçlarına göre, köprü ayaklarının ileri hasar seviyesinde ve ana taşıyıcı kirişlerinin ise göçmenin önlenmesi hasar seviyesinde olduğu gözlemlenmiştir. Yapıdaki hasarları en aza indirmek için, yapıda doğrusal olmayan yer değiştirmelerin yoğun olduğu kirişlerin dönme merkezine sismik sönüm cihazı yerleştirilmiştir. Ayrıca, ek güçlendirme yöntemi olarak kirişlerin deprem esnasında düzlem dışı burkulmasını önlemek için, kirişler yanal stabilite bağlantılarıyla desteklenmiştir. Elde edilen yapının üç farklı durumu, analiz edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yanal stabilite bağlantılarıyla oluşan yapının sünek davranış gösterdiği ve sismik sönüm cihazı yerleştirilen tasarımda da yapının benzer şekilde belirgin hasar düzeyinde kaldığı gözlemlenmiştir. Yapının oluşabilecek deprem esnasında göçmeden ayakta durabilmesi için tasarımı yapılan şekilde güçlendirilmesi gerektiği kanısına varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Çelik köprü, Onarım ve güçlendirme, Performans analizi

1 Giriş

Günümüzde kültürel öneme sahip tarihi yapılar, geçmiş medeniyetimizi anlamada bizlere öncülük etmektedir. Tarihi yapıların, doğal afetlerden veya herhangi bir durumdan göçmeden ayakta durabilmesi için, mimari ve tarihi yapısı bozulmadan restorasyonunun ya da onarım güçlendirilmesinin yapılması gerekmektedir. Çalışmada konu edinilen Yünören çelik köprüsünün, 1900’lü yılların başında Ruslar tarafından, yaya ve yük arabaları geçişi için Erzurum Şenkaya Bölgesinde inşa edildiği tahmin edilmektedir. Günümüzde köylüler tarafından rulmanın üstüne su kanalı yapılarak kullanılmaktadır. Tarihte birçok göçlere, savaflara ve doğal afetlere maruz kalan bölgelerden biri olan Şenkaya’da yer alan köprü birçok medeniyete ışık tutmaktadır. Tüm bu sebeplerle kültürel mirasın korunması ve yaşanabilecek büyük depremde köprüde ağır hasarların oluşmaması için köprünün deprem performans analizi yapılmıştır.

Çelik köprü geniş mesafelere yayılan kemer şeklinde olması ve geometrik formu nedeniyle basınç kuvvetlerine maruz kalmaktadır [1]. Tarihi köprülerin birçoğu büyük depremlere maruz kalsa da ayakta durabilmeyi başarmıştır [2]. Çalışmada konu edilen köprü bugüne kadar büyük depremlere maruz kalmasına rağmen ayakta durabilmiştir.

Abstract

This sentence needs rephrasing: Turkey Erzurum Province, located in the district of Şenkaya Yunoren Bridge, experienced major earthquakes in Turkey have been studied using the present method for determining the effect of performance and strengthening the bridge. In the study, the bridge was modeled in three dimensions with the SAP2000 package program, and the analysis results were obtained from this program. According to the analysis results, it was observed that the building columns were at the advanced damage level and the main carrier beams were at the damage level to prevent collapse. In order to minimize the damages in the structure, a seismic damping device was placed in the center of rotation of the beams where non-linear displacements are intense. Another strengthening method is to support the beams with lateral stability connections to prevent out-of-plane buckling of beams during earthquakes. Three different situations of the obtained structure were analyzed, and the results were compared. It was observed that the structure formed by the support of the beam with lateral stability joints displayed a ductile behavior and remained at an obvious damage level and the structure in which the seismic damping device was installed remained at the level of obvious damage. It has been concluded that the building should be strengthened in order to stand without collapse during an earthquake.

Keywords: Steel bridge, Repair and strengthening, Performance analysis

Ancak, köprüde yapılan gözlemler sonucunda kirişlerin ve kolonların yanal öteleme yaptığı görülmektedir. Yapı analizinden önce köprünün geometrik yapısı, malzeme ve maruz kaldığı kritik yüklerin bilinmesi gerekmektedir [3]. Bunların yanı sıra köprüde oluşan çatlaklar, ezilmeler, deformasyonlar ve sünmeler hesaba dahil edilmelidir [4]. Tüm bu etkilerin temsil edilmesi için Türkiye Çelik Yapılar Yönetmeliği 2016’da tanımlanan dayanım ve rijitlik azaltılması dikkate alınmıştır [5]. Yapıların analizinde üç ana kriter olan mukavemet, rijitlik ve stabilite durumları bu çalışmada göz önünde bulundurulmuştur [4].

Yukarıda ifade edilen tüm durumları analitik modelde temsil edilebilmesi için SAP2000 programında köprünün üç boyutlu modeli oluşturulmuş ve yapı elemanlarına yükler aktarılmıştır [6]. Yapıda oluşan tüm olumsuz durumları temsil eden model bu çalışmada hasarlı köprü olarak tanımlanmıştır. Tarihi yapıların performansının belirlenmesi için literatürde önerilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi kullanılmıştır [7]. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre yapıda bir takım güçlendirme prensipleri önerilmiştir. Yapı analizinde Türkiye’de yaşanmış büyük şiddetli depremlerden olan Erzincan Depremi, Erzurum Horasan Depremi ve Van Depremi verileri kullanılmıştır. Yapılan

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail acaydin@atauni.edu.tr (A.C. Aydın)

Geliş / Received: 12.10.2020 Kabul / Accepted: 25.11.2020 Yayımlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngmuh.809490

incelemeler sonucunda bu depremlerin karakteristiklerinin, köprünün üzerinde bulunduğu zemin yapısına uygun olduğu tespit edildiğinden ve bölgeye yakın alan kaynaklı olmasından dolayı bu deprem verileri çalışmada tercih edilmiştir [8].

Deprem etkisi altında olan çelik köprünün karşılaşılabileceği büyük depremler altında geçmeden belirgin hasar düzeyinde kalabilmesi için bu çalışmada çelik köprüye bir takım yapısal kontrol ve güçlendirme işlemleri uygulanmıştır. Çelik köprü ilk olarak ASCE41-13 standartlarına uygun 3 boyutlu modellenerek sabit, hareketli ve deprem yükleri altında değerlendirilmesi yapılmıştır [9]. Daha sonra çelik köprüye tipik bir viskoz sönümleyici yerleştirilerek tekrar performansı değerlendirilmiştir. Viskoz sönümleyici olarak FEMA273 standartlarına göre yapının kritik sönümünün %20'si olarak hesaplara dahil edilmiştir [10]. Diğer güçlendirme olarak ise, yanal burulmalı burkulma sorunu yaşayan ana taşıyıcı kirişler yanal stabilite bağlantı elemanlarıyla ve kiriş gövdesi düşey ara rijitlik levhalarıyla desteklenmiştir. Bu güçlendirme yönteminde gövdede yerel burkulma sorununun giderilmesi için gövdeye berkitme levhası sürekli olarak kaynatılarak gövdenin kalınlığı artırılmıştır. Hasarlı köprü, sismik sönüm cihazı ile güçlendirilmiş köprü ve levha ile stabilite elemanlarıyla desteklenmiş köprü olarak üç farklı model için doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler yapılmıştır. Çelik çerçevelerde deprem enerjisinin önemli bir kısmı kolon, kirişler ve çapraz bağlantı elemanlarında oluşan plastik mafsallarla sönümlendiği kabul edilerek çelik köprüdeki tüm elemanlar plastik mafsallı olarak modellenmiştir. Çelik çaprazlara eksenel olarak çalışan mafsal, kirişlere eğilme momenti olarak çalışan mafsal ve kolonlara ise eksenel, eğilme momenti olarak çalışan plastik mafsallar tanımlanmıştır [11]. Çalışmada köprünün performansının değerlendirilmesinde Denklem 1'de ifade edilen yük kombinasyonu kullanılmıştır [13].

$$G + Q + E \quad (1)$$

Denklem 1'de ifade edilen G çelik köprüde, çelik elemanların ve beton döşeme kaplamasının oluşturduğu yükü, Q hareketli yükü ve E ise zaman tanım alanında hesap için kullanılan deprem kayıtlarının en büyüğünün zamanla değişen yük tanımını temsil etmektedir. Hasar oluşabilecek taşıyıcı elemanların mevcut dayanımları hesaplanarak, yukarıda ifade edilen yük birleşiminin bu yapı elemanlarında oluşturacağı iç kuvvetler mukayese edilmiştir. Güçlendirme işlemlerinin de elemanlarda oluşan iç kuvvetlerinde ne kadar değişiklik yaptığı açıklanmıştır. Üç farklı modellenmiş köprüde, depremlerin oluşturduğu iç kuvvetler, taban kesme kuvvetleri, tepe deplasmanları mukayese edilerek tartışılmıştır. Depremlere karşı köprünün üç farklı durumunun ivme-zaman ve yer değiştirme-zaman hikayeleri elde edilmiştir. Doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre köprünün geçmeden yapabileceği plastik deformasyon kabiliyetlerinin yanı sıra köprü elemanlarının yapabileceği plastik dönmeler hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

Elemanların yapacağı kalıcı yer değiştirme ve kalıcı dönmelere göre köprünün hasar seviyeleri belirlenmiştir [6].

2 Materyal ve metot

Bu bölümde, çelik köprü yapısının geometrik özellikleri, çelik köprüyü oluşturan yapı elemanlarının statik ve geometrik bilgileri, yapı elemanlarının mevcut dayanımları ve kesit karakteristikleri, Türkiye Çelik Yapılar Yönetmeliğine göre sunulmuştur [5]. Çelik köprü yerinde incelenerek rölevesi elde edilmiştir. Çelik yapının üç boyutlu modeli ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizi bilgisayar tabanlı SAP2000 programı ve depremlerin spektrumlarının, frekans tanım alanında sonuçları için MATLAB programı yöntem olarak kullanılmıştır. Hasar alan yapıyı güçlendirmek için hazırlanan güçlendirme detayları TEKLA structures programında çizilmiştir [12].

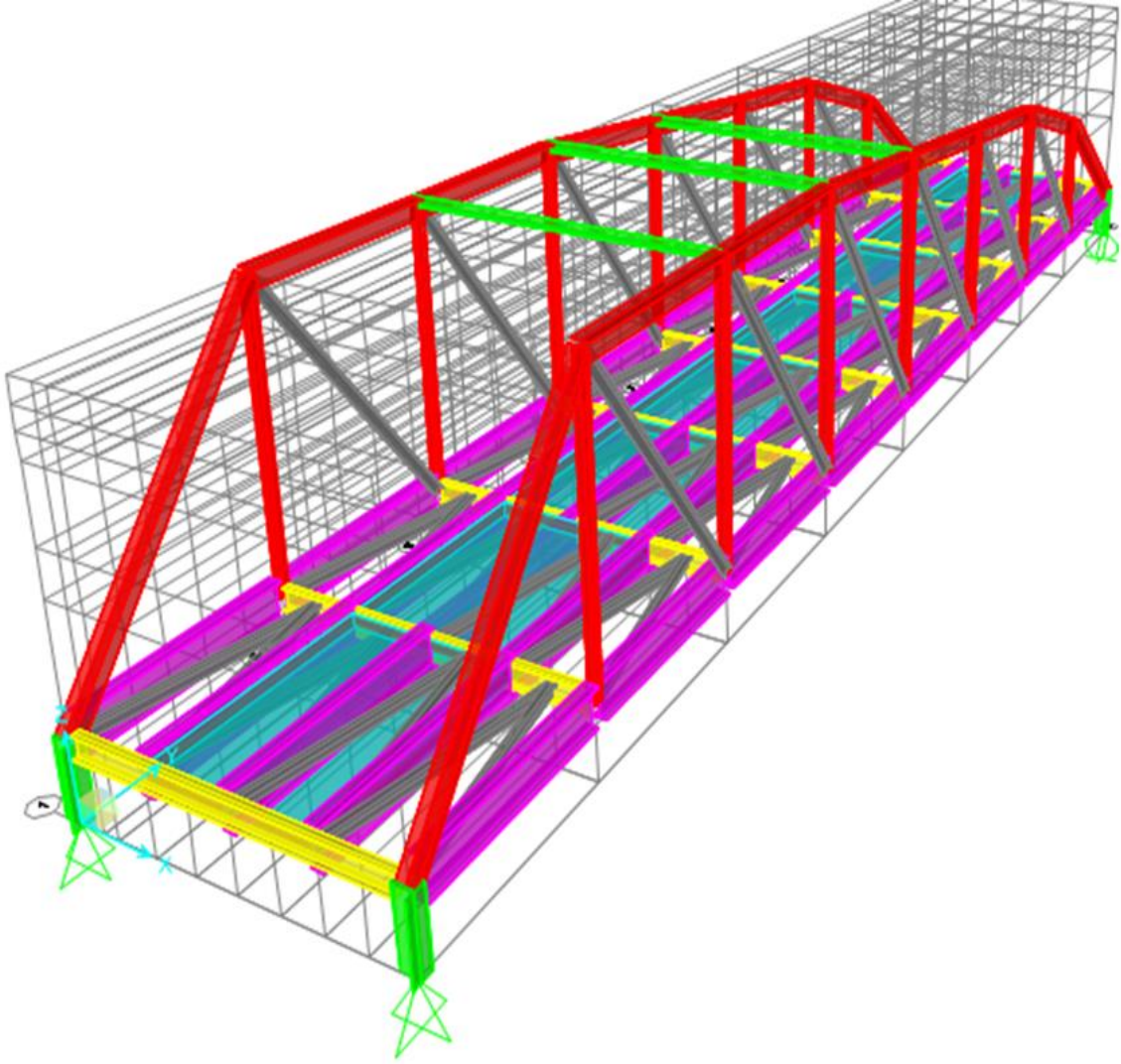
2.1 Çelik köprü bilgileri

Erzurum Şenkaya İlçesi Yünören Mahallesinde inşa edilen tarihi köprü göze alınan Y yönünde 34 m ve X yönünde 6 m açıklığa sahiptir. Betona gömülü olan kolonların yüksekliği 1.35 m'dir. Kemer köprünün makas kirişlerini oluşturan ana dikme profilinin maksimum yüksekliği 5.42 m'dir. Şekil 1'de çelik köprünün 3 boyutlu modeli ve çelik köprünün tasarımında kullanılan profillerin bilgisi Tablo 1'de sunulmuştur. Çelik köprünün görüntüleri Şekil 2a ve Şekil 2b'de sunulmuştur. Köprüde profillerin öz ağırlıklarının yanı sıra, su kanalı olarak yapılan betonun ağırlığı ve köprünün günümüze kadar maruz kaldığı hareketli yükler dikkate alınmıştır. Hareketli yük kolon ve ana taşıyıcı kirişlere 5 kN/m² olarak dağıtılmıştır [6]. Çelik köprüde tüm profiller birbirine lama demirleri yardımıyla perçinli olarak birleştirilmiştir.

2.2 Yapı elemanlarının mevcut dayanımlarının ve kesit karakteristiklerinin belirlenmesi

Geçmişte yaşanan depremlerden yola çıkılarak, köprülerde deprem sonrası oluşabilecek hasarlar göz önünde tutulmuştur. Depremin oluşturduğu yanal etkilere karşı kirişlerin güçlü eğilme momenti dayanımı sağlayabilmesi için kirişlerin kompakt geniş başlıklı kesitlerden oluşturulması gerekmektedir. Yine deprem etkisinde kolonlarda gevrek kırılmayı önlemek için kolonlarda oluşacak burkulmanın akma bölgesinden sonra oluşması için uygun kompakt ve narin olmayan kesitlerin seçilmesi gerekmektedir. Çaprazların deprem etkilerine karşı sönüm özelliği gösterebilmesi için çaprazlarda sünek tasarımın yapılması gerekmektedir. Eleman sünek davranış yapmadan burkulmaması için çapraz elemanı oluşturan başlıkların narin olmaması gerekmektedir. Dolayısıyla çelik köprüyü oluşturan yapı elemanlarının kompakt ve narin olmayan kesitlerden seçilmesi daha uygun olacaktır [11].

Çelik köprüde elemanların mevcut dayanımlarının belirlenmesinde referans alınacak yapı elemanları Şekil 3'te sunulmuştur. Yapı elemanlarının mevcut eksenel basınç dayanımları, eğilme momenti ve kesme dayanımları Türkiye Çelik Yapılar Yönetmeliğine göre hesaplanmıştır [5].



Şekil 1. Çelik köprü üç boyutlu modeli [15].



(a)



(b)

Şekil 2. Çelik köprü görüntüleri (a) çelik köprünlün rulman üstü görüntüsü ve (b) çelik köprünlün rulman altı görüntüsü

Referans alınan yapı elemanlarının başlık ve gövde yerel burkulmaları, kirişlerde oluşması muhtemel yanal burulmalı burkulma sorunları yine bu yönetmeliğin önermiş olduğu narinlik, kompaktlık ve yanal burulmalı burkulma sınır değerlerine göre belirlenmiştir [5].

Referans alınan yapı elemanlarında depremli yük birleşimlerinin çelik köprünün üç farklı durumunda oluşturduğu iç kuvvetler bu mevcut dayanımlarıyla mukayese edilmiştir. Deprem performans analizi yapılmadan önce, yapı elemanlarında oluşacak doğrusal olmayan şekil değiştirmeleri temsil edilebilmesi açısından yine bu yönetmelik kapsamında elemanların etkin eğilme, aksel ve kayma rijitlikleri 0.80 katsayısıyla çarpılarak azaltılmıştır. Bu azaltmalar sonucu elemanlarda oluşan iç kuvvetleri, yapı elemanlarının mevcut dayanımlarının karşılaması gerekmektedir. Aksi takdirde yapının performans analizine gerek kalmadan, yapıda stabilite geçmesi muhtemel olacaktır [5].

2.2.1 Kolonlar

Başlık genişliği 400 mm, gövde yüksekliği 380 mm, gövde ve başlık kalınlığı 20 mm olan T en kesitli kolonun aksel basınç dayanımı çelik yapılar yönetmeliğine göre aşağıda belirtilen denklemlerle hesaplanmıştır [5].

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (2)$$

Burada P_n aksel basınç dayanımı ve YDKT 'ye (yük ve dayanım katsayılarına göre tasarım) göre karakteristik aksel basınç dayanımı Denklem 3'e göre belirlenecektir

$$P_c = \phi_c P_n \quad (3)$$

Burada ϕ_c güvenlik katsayısı olmak üzere, basınç elemanlarında 0.90 olarak alınır. F_{cr} kritik burkulma gerilmesi ve A_g ise kayıpsız net en kesit alanı olarak tanımlanmıştır. Kritik burkulma gerilmesinin hesabı için Çelik Yapılar Yönetmeliği basınç elemanları için iki kriter sunmuştur;

$$\frac{L_c}{i} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ olduğunda } F_{cr} = (0.658 \frac{F_y}{E}) F_y \quad (4)$$

$$\frac{L_c}{i} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ olduğunda } F_{cr} = 0.877 F_e \quad (5)$$

Bu denklemlerde E yapısal çeliğin elastisite modülü ve F_y ise yapı elemanlarında kullanılan çelik malzemesinin akma dayanımıdır. Burada $E=200000\text{MPa}$ ve F_y ise 235 MPa olarak alınmıştır. F_e ise yapısal çelik elemanın elastik burkulma gerilmesidir. T en kesitli elemanlar için eğilmeli burkulma sınır durumu dikkate alınarak şöyle hesaplanacaktır;

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(\frac{L_c}{i})^2} \quad (6)$$

Bu denklemde L_c kolonun burkulma boyu olmak üzere $L_c=KL$ olarak hesaplanacaktır. K burada burkulma katsayısı (kolonun yanal ötelenip ötelenmeme durumuna göre) ve L

ise kolonun boyudur. L_c/i oranı narinlik oranını vermekle birlikte 200 değerini asla aşmamalıdır.

Kolonun güçlü ve zayıf eksenlerindeki atalet momentleri sırasıyla 28333.33 cm^4 ve 10693.33 cm^4 olarak hesaplanmıştır. Kesitin en kesit alanı 160 cm^2 'dir. Bu durumda güçlü ve zayıf eksendeki atalet yarıçapları sırasıyla 13.30 cm ve 8.17 cm olarak elde edilmiştir.

Kolonun statik bilgileri ve yukarıdaki denklemler kullanılarak kolonun aksel basınç dayanımı 1485.6 kN olarak hesaplanmıştır.

Kolon kesitinin narinlik sınır değerleri aşağıda belirtilen denklemlere göre elde edilmiştir.

T en kesit profilin başlığının narin olmaması için başlık/kalınlık oranı aşağıda belirtilen sınır değerini aşmayacaktır.

$$0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (7)$$

T en kesit profil gövdesinin narin olmaması için gövde/kalınlık oranı aşağıda belirtilen sınır değerini aşmayacaktır.

$$0,75 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (8)$$

T en-kesit profil başlığının ve gövdesinin kompakt olabilmesi için, sırasıyla başlık/kalınlık ve gövde/kalınlık değerinin aşağıda belirtilen sınır değerlerini aşmayacaktır.

$$0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (9)$$

$$0,84 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (10)$$

Kolonun başlık/kalınlık ve gövde/kalınlık oranları;

$$\frac{b}{2t_f} = \frac{400}{2 \times 20} = 10$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{380}{20} = 19$$

Başlık için narinlik sınır değeri, $0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} =$

$$0,56 \sqrt{\frac{200000}{235}} = 16.33$$

Gövde için narinlik sınır değeri, $0,75 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 21.88$

Başlık için kompaktlık koşulu, $0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 11.08$

Gövde için kompaktlık koşulu, $0,84 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 24.50$

Bu durumda kolonun başlığı ve gövdesi narin olmayan kompakt kesittir.

Kolon için kesme dayanımı aşağıda belirtilen denklemle hesaplanmıştır.

$$V_n = 0,6F_y A_w C_v 1 \quad (11)$$

A_w kolonun gövde kesit alanı, $C_v 1$ ise Türkiye Çelik Yapılar Yönetmeliğinde tanımlanan kayma dayanımı katsayısı olmak üzere güvenli bölgede kalınması için 1.0 olarak alınmıştır. Kolonun kayma dayanımı 1128 kN olarak hesaplanmıştır.

T en kesitler için eğilme momenti dayanımı şöyle hesaplanacaktır.

Akma anındaki eğilme momenti dayanımı,

$$M_y = F_y W_{ex} \quad (12)$$

Plastik bölgedeki maksimum eğilme momenti dayanımı,

$$M_p = F_y W_{px} \quad (13)$$

Denklemlerdeki W_{ex} , güçlü eksendeki elastik kesit mukavemet momenti olmak üzere T en kesit profil için 1287.83 cm³ ve W_{px} ise güçlü eksendeki plastik kesit mukavemet momenti olmak üzere 1923.00 cm³ olarak hesaplanmıştır.

$$M_y = F_y W_{ex} = 235 \times 1287.83 = 302.64 \text{ KNm}$$

$$M_p = F_y W_{px} = 235 \times 1923.00 = 451.90 \text{ KNm}$$

2.2.2 Makas kirişler

Başlık genişliği 35 cm, başlık kalınlığı 1cm, gövde yüksekliği 39 cm ve gövde kalınlığı 1 cm olan T en kesitli makas kirişleri için narinlik ve kompaktlık sınır değerleri incelenmiştir.

$$b/2t_f = 350/2 \times 10 = 17.5 > 16.33$$

$$h/t_w = 390/10 = 39 > 21.88$$

T en kesit profilin hem gövdesi hem de başlığı narin olduğundan dolayı makas kirişleri yerel burkulmaya uğrayacaktır. Profilin başlığı ve gövdesi levha elemanlar ile desteklenmesi gerekmektedir.

Makas kirişinin çekme dayanımı **Denklem 2-6** kullanılarak 1708.4 kN olarak hesaplanmıştır.

2.2.3 Ana taşıyıcı kirişler

Eğilme etkisinde bulunan I en kesitli ana taşıyıcı kirişin narinlik ve kompaktlık sınır değerleri incelenerek kiriş başlığının kompakt ve narin olmayan kesit olduğu, kiriş gövdesinin ise narin ve kompakt olmayan gövde olduğu belirlenmiştir.

$$b/2t_f = 250/2 \times 20 = 6.25 < 16.33$$

$$h/t_w = 500/20 = 25 > 21.88$$

Kiriş yanal burulmalı burkulma davranışı sergilememesi için yanal stabilite elemanlarıyla yanal olarak desteklenecektir. Yanal olarak desteklenmeyen uzunluk, gövdede düşey ara rijitlik levhaları belirli aralıklarla yerleştirilerek azaltılacaktır. Kiriş için eğilme momenti dayanımı yanal burulmalı burkulma sınır durumu, basınç başlığı yerel burkulma sınır durumu ve çekme başlığı akma

sınır durumu için hesaplanacak eğilme momenti dayanımlarının en küçüğü olarak hesaplanacaktır.

Yanal burulmalı burkulma sınır durumu için eğilme momenti dayanımı,

$$M_n = R_{pg} F_{cr} W_{exc} \quad (14)$$

Burada R_{pg} eğilme momenti dayanımı azaltma katsayısı olmak üzere şöyle hesaplanacaktır,

$$R_{pg} = 1 - \frac{a_w}{1200 + 300a_w} \left(\frac{h_c}{t_w} - 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right) \leq 1.0 \quad (15)$$

$$a_w = \frac{h_c t_w}{b_{fc} t_{fc}} \leq 1.0 \quad (16)$$

Denklem 14'te F_{cr} kritik burkulma gerilmesini ifade etmektedir. Yanal olarak desteklenen uzunluk L_b 'ye göre aşağıdaki gibi belirlenecektir.

$L_b < L_p$ olduğunda bu sınır durumunun göze alınmasına gerek kalmayacaktır.

$L_p < L_b < L_r$ olduğunda F_{cr} şöyle hesap edilecektir;

$$F_{cr} = C_b \left[F_y - (0.3F_y) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_b} \right) \right] \leq F_y \quad (17)$$

$L_b > L_r$ olduğunda F_{cr} ;

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{i_t} \right)^2} \leq F_y \quad (18)$$

L_r ve L_p kirişin sınır uzunluklarını temsil etmekte olup aşağıda belirtilen denklemlerden elde edilecektir.

$$L_p = 1.1 i_t \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (19)$$

$$L_r = \pi i_t \sqrt{\frac{E}{0.7F_y}} \quad (20)$$

Denklem 17'de ki C_b moment düzeltme katsayısını ifade etmektedir. Güvenli bölgede kalabilme açısından 1.0 olarak alınacaktır.

Kirişin yanal olarak desteklenmeyen uzunluğu 6.5 m'dir. Etkin atalet yarıçapı 6.84 cm'dir.

$$L_p = 1.1 i_t \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.1 \times 6.84 \times \sqrt{\frac{200000}{235}} = 2.19 \text{ m}$$

$$L_r = \pi i_t \sqrt{\frac{E}{0.7F_y}} = \pi \times 6.84 \times \sqrt{\frac{200000}{0.7 \times 235}} = 7.49 \text{ m}$$

$L_p < L_r < L_r$ olduğundan dolayı kirişte yanal burulmalı burkulma sınır durumu dikkate alınacaktır. Bu durumda F_{cr} 177.67 N/mm² olarak hesaplanmıştır.

Eğilme momenti dayanımı azaltma katsayısı 0.75 olarak hesap edilmiştir. Kiriş kesitinin basınç başlığı için elastik kesit mukavemet momenti W_{exc} 5188420 mm³ olarak hesaplanmıştır. Bu durumda yanal burulmalı burkulma sınır durumu için eğilme momenti dayanımı,

$$M_n = R_{pg} F_{cr} W_{exc} = 0.75 \times 177.67 \times 5188420 = 479.35 \text{ kNm}$$

Kiriş kesitinin başlığı kompakt olduğundan dolayı, basınç başlığında herhangi bir burkulma olmayacaktır. Basınç başlığında ve çekme başlığında akma sınır durumunda eğilme momenti dayanımı yanal burulmalı burkulma sınır durumunda hesaplanan eğilme momenti dayanımından daha büyük olacağından kiriş kesitinin eğilme momenti dayanımı 479.35 kNm olarak alınacaktır.

Kiriş kesitinin kesme kuvveti dayanımı [Denklem 11](#) kullanılarak şöyle hesaplanmıştır;

$$V_n = 0.6 F_y A_w C_v 1 = 0.6 \times 235 \times (500 \times 20) \times 1.0 = 1410 \text{ KN}$$

2.2.4 Makas kirişleri arası çaprazlar

Çelik köprüde çaprazlar çekme etkilerine karşı dayanım gösterdiği için çapraz elemanın çekme dayanımı hesaplanmıştır. Çaprazların birleşimi kaynak ile yapıldığından dolayı alan kaybı olmayacaktır. Bu durumda akma sınır durumunda çaprazların aksel çekme dayanımı hesaplanacaktır. Çaprazlarda birleşim kaynak ile yapıldığından dolayı çekme etkisinde kırılma sınır durumu incelenmeyecektir [5]. Çekme etkisinde çapraz elemanın narinlik değeri 300 değerini aşmayacaktır [5].

$$\frac{KL}{i} < 300 \quad (21)$$

Çok parçalı çekme elemanın x yönlü atalet yarıçapı 7.76 cm ve y yönlü atalet yarıçapı 3.94 cm olarak hesaplanmıştır. Çapraz elemanın boyu 6.25 m olmak üzere güvenli bölgede kalınması açısından burkulma boyu $KL=6.25$ m olarak alınacaktır.

$$\frac{KL}{i_{min}} = \frac{6.25}{3.94} = 158.62 < 300$$

Çapraz elemanın en kesit alanı A_g , 6180 mm²'dir. Bu durumda çekme dayanımı,

$$T_n = F_y A_g = 235 \times 6180 = 1452.3 \text{ KN} \quad (22)$$

$$\phi T_n = 0.75 \times 1452.3 = 1089.22$$

Çapraz elemanın başlık narinliğinin belirlenmesi [Denklem 23](#)'e göre yapılmaktadır.

$$\frac{b}{t} < 0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (23)$$

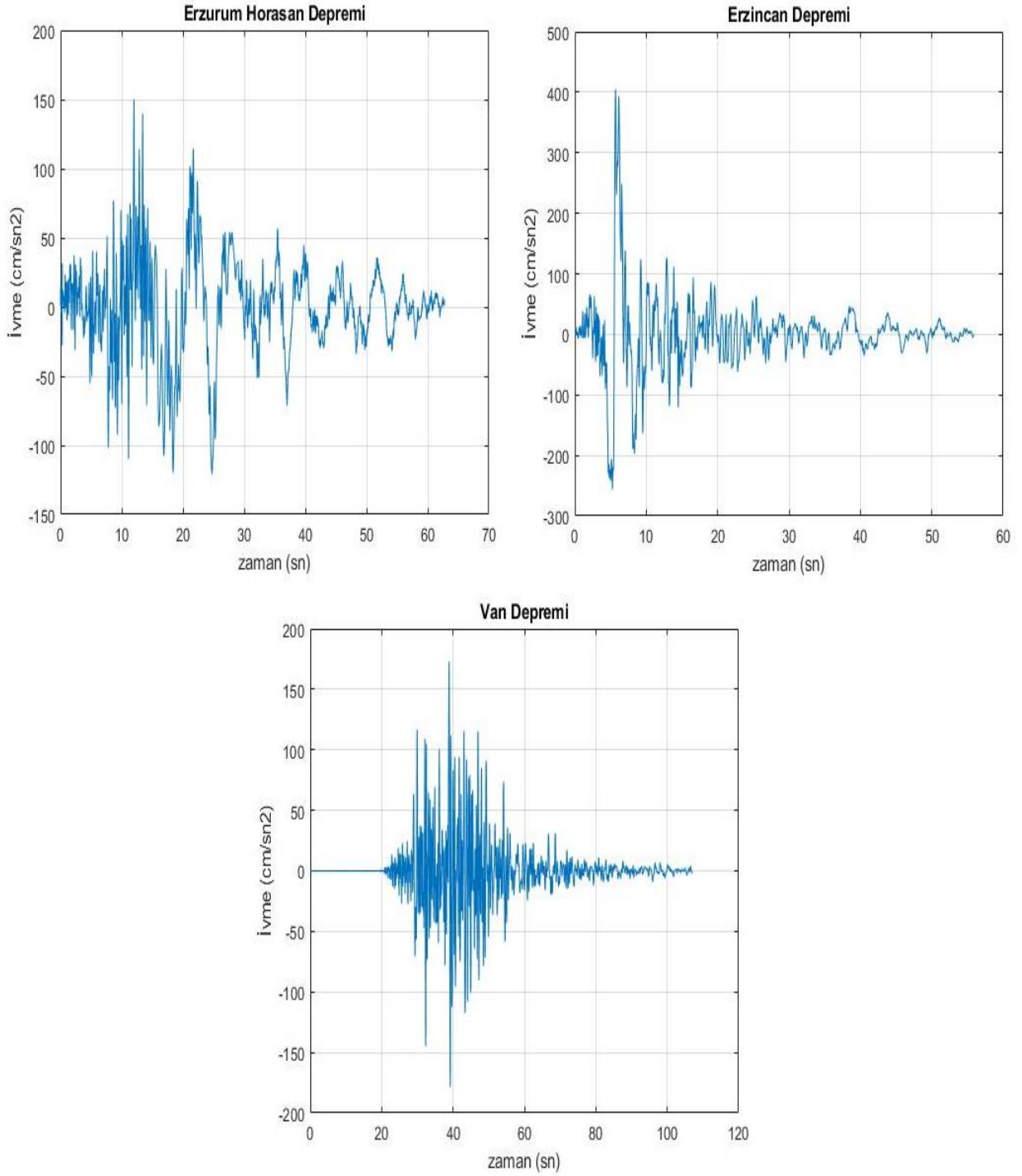
$\frac{200}{16} = 12.5 < 0.45 \sqrt{\frac{200000}{235}} = 13.2$ olduğundan dolayı çapraz elemanın başlığı narin değildir.

Çelik yapılar yönetmeliğinde doğrusal olmayan yer değiştirmelerin temsil edilebilmesi için yapı elemanlarının eğilme, kesme ve aksel rijitliklerinin 0.80 ile çarpılarak azaltılması gerektiği vurgulanmıştır. Bunun dışında zamana bağlı olarak yapı elemanlarında oluşan sünme etkilerini hesaba katılabilmesi için bu rijitlikler ayrıca 0.90 ile çarpılarak azaltılacaktır [6]. Toplamda 0.72 katsayısı ile yapı elemanlarının mevcut dayanımları çarpılarak, depremin yapı elemanlarında oluşturduğu iç kuvvetler mukayese edilecektir.

2.3 Çalışmada kullanılan deprem bilgisi

Aktif fay hattı bölgesinde bulunan çelik köprünün deprem yükleri altında analizleri için, Türkiyede bugüne kadar yaşanmış en büyük depremlerden üçü olan Erzincan Depremi (1992), Erzurum Horasan Depremi (1983) ve Van Depremi (2011) kayıtları kullanılmıştır. Üç farklı deprem verisinin verisinin bu çalışmada kullanılmasının nedeni, bu depremlerin çıkış kaynağının Şenkaya'da bulunan fay hatlarına benzer özellikler içermesidir. Bunun yanı sıra bu depremler çelik köprünün konumlanmış olduğu bölgeye en yakın alan kaynaklı depremler olması çalışmada bu üç deprem verisinin kullanılmasını sağlamıştır. Çalışmada kullanılan depremlerin bilgileri [Tablo 2](#)'de ve depremlerin ivme-zaman eğrileri [Şekil 4](#)'te sunulmuştur [8].

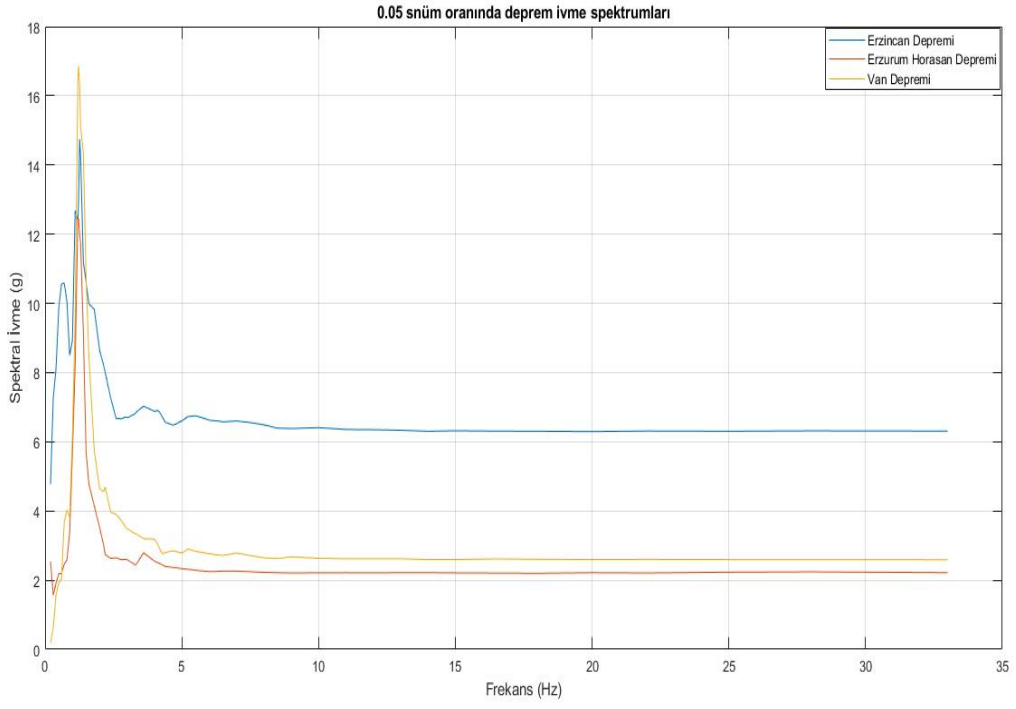
Zaman tanım aralığı $dt=0.01$ sn olarak depremlerin ivme zaman grafikleri çizdirilmiştir. Erzurum Horasan Depreminin 0-25 sn aralığında, Erzincan Depreminin 0-10 sn aralığında ve Van Depreminin 30-45 sn aralığında en büyük yer hareketini gerçekleştirdiği görülmektedir. Deprem kayıtlarının çelik köprünün zaman tanım alanı analizinde kullanılması için ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Çelik köprünün zemin bilgisine ve depremi sönmüleyebilme karakteristiklerine göre depremlerin ölçeklendirilmesi [Şekiller 5-7](#)'de sunulmuştur. Çelik yapı sistemlerinin deprem enerjisini sönmüleme oranı 0.05 olarak kabul edilmektedir. Ancak, yapının gerçek sönmünün belirlenebilmesi için yapıya, ivmeölçer cihazlarla zorlanmış titreşim hareketi uygulanmaktadır. ASCE-41 şartnamesinde, viskoz sönmüleme cihazı yerleştirilen çelik yapının sönmü oranının kritik sönmünün %20'si kadar alınabileceği ifade edilmiştir.



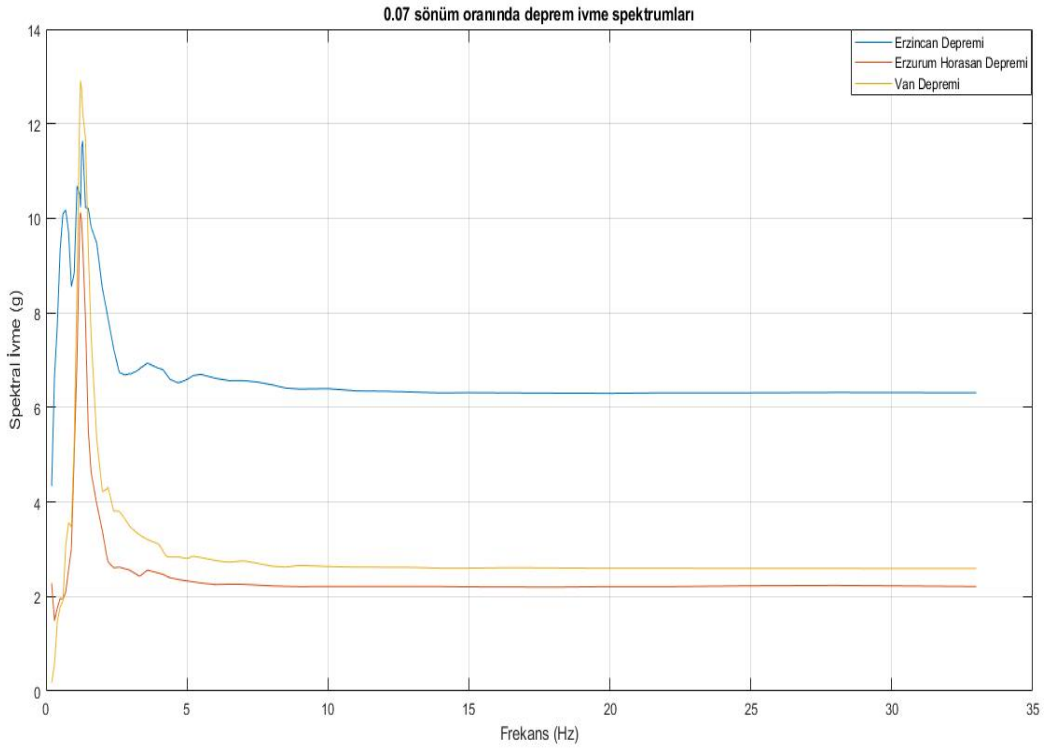
Şekil 4. Deprem yer hareketleri

Tablo 1. Çalışmada kullanılan deprem yer hareketi bilgileri [8]

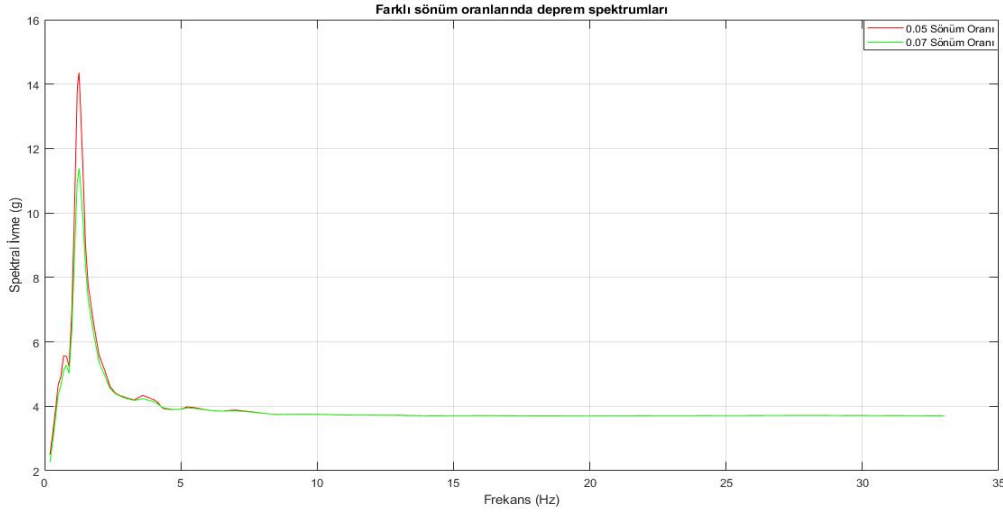
Depremler	Tarih	İstasyon	PGA (cm/sn ²)	Deprem Şiddeti
Erzincan Depremi	13.3.1992	Erzincan Merkez Meteoroloji Müdürlüğü	470.92	6.1 ML
Erzurum Horasan Depremi	30.10.1983	Erzurum Horasan Meteoroloji Müdürlüğü	173.29	6.0 ML
Van Depremi	23.10.2011	Van Muradiye Meteoroloji Müdürlüğü	178.5	6.7 ML



Şekil 5. 0.05 sönüm oranında deprem ivme spektrumu



Şekil 6. 0.07 sönüm oranında deprem ivme spektrumu



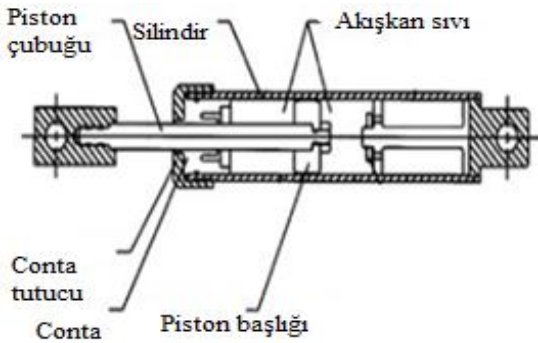
Şekil 7. Farklı sönüm oranlarında deprem ivme spektrumları

Bu durumda sönüm oranları 0.05 ve 0.07 olan yapının deprem spektrum eğrileri elde edilerek sunulmuştur [14]. Şekil 4,5,6 ve 7'de görüldüğü gibi yapı sönüm oranının 0.05'ten 0.07'ye çıkması depremin ivme etkisini yaklaşık %42 olarak azaltmıştır. Viskoz sönümleme cihazının yapının depreme karşı davranışını iyileştirmede önemli bir etken olduğu görülmüştür. Görüldüğü üzere çelik köprüye en fazla hasarı Van Depreminin vereceği anlaşılmaktadır. Van depremi etkisini azaltabilmek için yapıya viskoz sönümleme cihazının yerleştirilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Ayrıca depremin büyüklüğü ne olursa olsun yeryüzünde vereceği hasar depremin şiddeti olduğu bu grafiklerle doğrulanmıştır [15].

2.4 Çelik köprünün güçlendirilmesi ve yapısal kontrol uygulaması

2.4.1 Çelik köprüye sismik sönüm cihazının yerleştirilmesi

Çelik köprünün depreme karşı iyi bir performans sergileyebilmesi için çelik köprü güçlendirilmiştir. İlk olarak ana taşıyıcı kirişlerin merkezine doğrusal olmayan sismik sönümleyici cihaz yerleştirilmiştir [11]. Çelik köprüye yerleştirilen cihazın çelik köprünün sönüm oranına katkısının, çelik köprünün kritik sönüm oranının %20'si kadar olduğu varsayılmıştır [7]. Şekil 8'de çelik köprüye yerleştirilen sismik sönümleyici cihazın kesiti sunulmuştur.



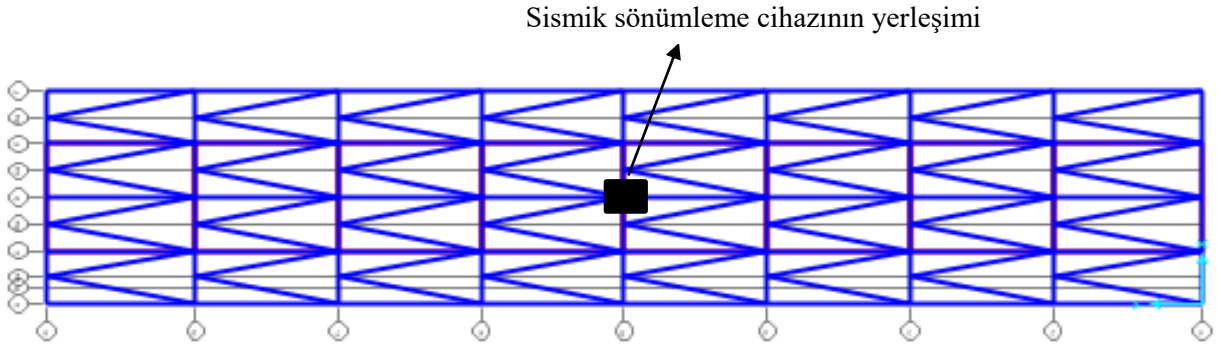
Şekil 8. Sismik sönümleyici cihazı

Sismik sönümleme cihazı depreme karşı duyarlı salınım hareketi göstererek köprünün rijitliğini ve periyodunu değiştirmeden köprüye yeni bir sönümleme kuvveti kazandırmıştır. Sönümleme kuvveti Denklem 2'de ifade edilmiştir. Çalışmada çelik köprünün sabit sönüm oranı ilk olarak 0.05 ve sismik sönümlü cihaz yerleştirildikten sonra köprünün sabit sönüm oranının tüm modlarda 0.07 olarak kabul edilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Çelik köprüye yerleştirilen sismik cihaz Şekil 9'da sunulmuştur.

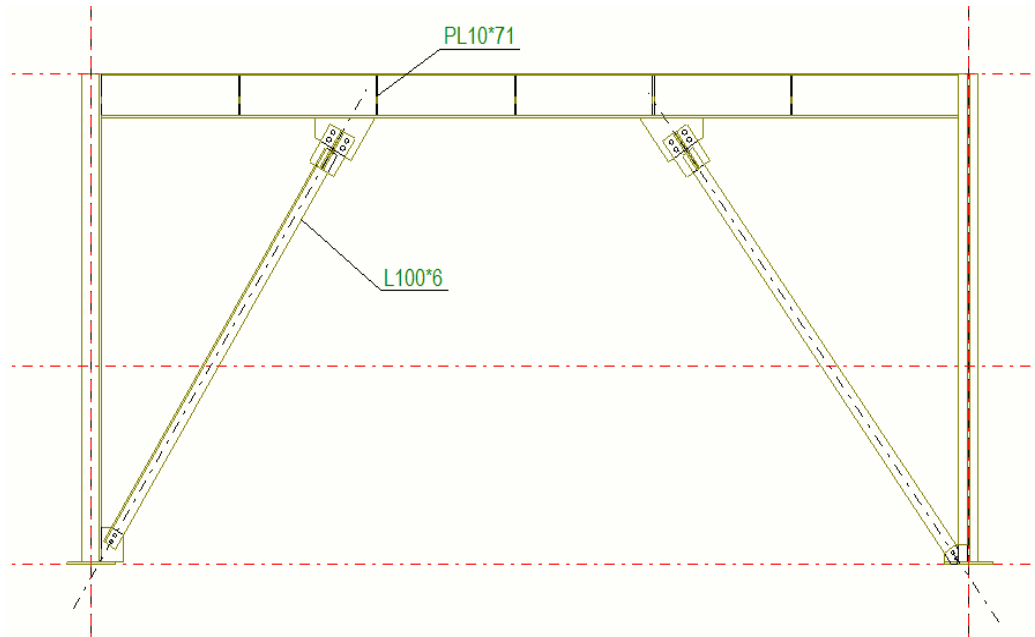
Kirişlerin kolonlardan daha fazla doğrusal olmayan yer değiştirme yapabileceği kabulünden yola çıkılarak en fazla titreşim hareketi oluşabileceği ön görülen rulman bölgesine sismik sönümleme cihazının yerleştirilmesi uygun görülmüştür [13]. Sismik sönümleme cihazı oluşabilecek titreşimleri yani mekanik enerjiyi elektriksel enerjiye dönüştürerek bu mekanik etkiyi absorbe edebilmektedir [4, 15, 17, 18].

2.4.2 Çelik yapı elemanlarının güçlendirilmesi

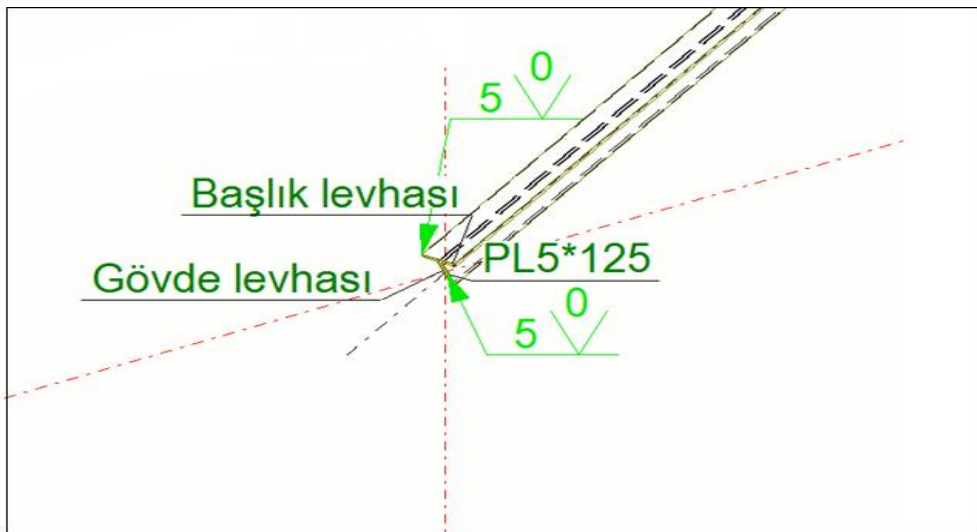
Çelik köprünün yapı elemanlarının deprem esnasında düzlem dışı burulma gerçekleştirmemesi için güçlendirme işlemi gerçekleştirilecektir. Ana taşıyıcı kiriş şekilde görüldüğü gibi yanal stabilite elemanlarıyla ve gövdede düşey ara rijitlik levhalarıyla desteklenmiştir. Bu durumda kirişin yanal olarak desteklenmeyen uzunluğu L_b 6.35 m'den 1m'ye düşmüştür. Bu nedenle kirişte yanal burulmalı burkulma engellenmiş olmaktadır. Şekil 10'da kirişin güçlendirilmiş hali sunulmaktadır. Gövde sürekli olarak kaynatılmış 10 mm levha ile yanal stabilite bağlantısı olarak L100x6 mm eşkenar köşebent ile kiriş yanal olarak desteklenmiştir. Köşebentler kirişe dışmerkezi olarak her iki ucu mafsallı bağlanmıştır. Deprem etkileri çaprazların mafsalları ve dış merkezi bağ kirişi ile karşılanacaktır. Sünek bir tasarımı için bu güçlendirme yöntemi tercih edilmiştir. Deprem esnasında mafsallarda oluşan çatlaklar ve bağ kirişte oluşacak doğrusal olmayan yer değiştirmeler sayesinde deprem enerjisinin sönümlenmesi öngörülmektedir.



Şekil 9. Sismik sönümlenme cihazının yerleşimi [12]



Şekil 10. Yanal stabilite elemanlarıyla desteklenmiş kiriş [19]



Şekil 11. Makas kirişlerinin başlık ve gövdesinin desteklenmesi [19]

Kirişin yanal stabilite bağlantısı ve düşey ara rijitlik levhası ile desteklenmesinin yanı sıra, makas kirişlerinin gövde kalınlığı ve başlık kalınlığı, kirişin başlığına ve gövdesine tam penetrasyonlu küt kaynak ile 10 mm kalınlıklı levha birleştirilmiştir. Bu işlemle kiriş kesitlerinin yerel burkulmaya uğramaması amaçlanmaktadır. Eksenel basınç yükü taşıyan makas kirişlerinin taşıma direncinin artırılması bu işlemle mümkün olabilecektir. Şekil 11’de bu güçlendirme yöntemi sunulmuştur. Bunların dışında iki tür güçlendirme prosedürü önerilmiştir. Birincisi diyagonal çelik elemanlarla ya da kesme duvarlarla güçlendirme diğeri ise kirişlerin mukavemetinin artırılmasıdır [19-22].

3 Bulgular ve tartışma

Çalışmanın bu bölümünde, köprünün mevcut durumu, sismik sönüm cihazıyla güçlendirilmiş durumu ve köprünün ana taşıyıcı kirişlerinin yanal doğrultuda desteklenmiş durumu için bir dizi analizler yapılmıştır. Türkiye’de yaşanmış büyük depremlerden olan Erzincan Depremi, Erzurum Horasan Depremi ve Van Depremi verileri kullanılarak, köprü için ifade edilen üç farklı yapıda ilk olarak zaman tanım alanında doğrusal analiz ve daha sonra zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları ve bu sonuçlar üç farklı yapı durumu için mukayese edilerek tartışılmıştır.

Çelik köprünün hasarlı, sismik sönümleyici cihazla ve çelik köprünün destek elemanlarıyla güçlendirilmiş yapıları zaman tanım alanında, Türkiye’de gerçekleşen 3 büyük depremin istasyon kayıtlarıyla doğrusal olmayan analizi yapılmıştır. Doğrusal olmayan analizden önce, bu üç farklı durumun zaman tanım alanında doğrusal analizi yapılarak yapı elemanlarında oluşan iç kuvvetler, yapının deprem etkisine karşı göstermiş olduğu ivmesel tepkiler, frekans tanım alanında yapının yapmış olduğu salınımlar elde edilerek mukayese edilmiştir. Daha sonra doğrusal olmayan analizler yapılarak üç farklı durum için çelik köprü elemanlarının yapmış olduğu maksimum plastik dönmeler, zaman tanım alanında doğrusal olmayan yer değiştirmeler elde edilerek yapı elemanlarının bu üç farklı durumda hasar seviyeleri karşılaştırılmıştır.

3.1 Zaman tanım alanında doğrusal analizler

Çelik köprü yapı elemanlarının eksenel, kayma ve eğilme rijitlikleri 0.72 katsayısı ile çarpılarak azaltılmıştır. Ölçeklendirilen üç deprem verisi çelik köprüye girdi olarak verilerek zaman tanım alanında doğrusal analizler yapılmıştır. İlk olarak, doğrusal olmayan hareketleri ve sünme gibi çeşitli olumsuz durumları temsil etmek için hasar verilen yapı elemanlarında depremlerin oluşturduğu iç kuvvetler elde edilmiştir.

Kolonun mevcut eksenel basınç dayanımı Bölüm 3’ten 1485.6 kN, kesme kuvveti dayanımı 1128 kN, akma anındaki eğilme momenti dayanımı 302.64 kN.m ve plastik sınır durumundaki eğilme momenti dayanımı 451.90 kN.m olarak elde edilmiştir. Tablo 2’de depremlerin kolonlarda oluşturduğu iç kuvvetlere bakıldığında kolonun eksenel basınç yükünü ve kesme kuvvetini karşılayabildiği görülmektedir. Depremlerin kolonda oluşturduğu eğilme

momenti, kolonun akma anındaki eğilme momenti dayanımını aştığı ve plastik sınırdaki eğilme momenti dayanımını aşmadığı görülmüştür. Bu durumda kolon ağır hasar almış ancak göçmemiştir.

Ana taşıyıcı kirişin kesme kuvveti dayanımı 1410 kN ve eğilme momenti dayanımı 479.35 kN.m olarak Bölüm 3’ten elde edilmiştir. Tablo 2’ye göre kiriş kesme etkilerini karşılayabilmekte lakin Erzincan depreminin kirişte oluşturduğu eğilme momentini karşılayamayıp göçmekte olduğu gözlemlenmiştir.

Makas kirişinin eksenel basınç dayanımı 1708.4 kN olarak Bölüm 3’ten elde edilmiştir. Tablo 2’ye göre makas kirişi eksenel basınç yükünü karşılayabildiği görülmüştür.

Çapraz elemanın eksenel çekme dayanımı 1089.22 kN olduğundan, çekme etkilerini karşılayabildiği görülmüştür.

Bu durumda, ana taşıyıcı kirişin göçtüğü, kolonun ise ağır hasar aldığı tespit edilmiştir. Yapılan güçlendirmeler sonucu kolonda ve kirişte oluşan iç kuvvetler Şekil 12’de sunulmuştur.

Şekil 13-18’de yanal olarak destekleme işleminin yapıda oluşan ivmeleri %60, yer değiştirmeleri %50 olarak azalttığı, sismik sönüm cihazı yerleştirme işleminin ise ivmeleri %45, yer değiştirmeleri %35 olarak azalttığı görülmüştür. Ayrıca şekillerden Erzincan Depreminin yapıda daha fazla öteleme, dinamik yer değiştirmelere yol açtığı anlaşılmaktadır.

Frekans tanım alanında yapının bu depremlere karşı yapmış olduğu salınımlar Şekil 19’da sunulmuştur.

Yapının hâkim olduğu frekans aralığında yanal olarak desteklenmiş köprünün daha az genliklerle salınım yapmış olduğu görülmektedir. Sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş köprünün hasarlı köprüyle yaklaşık olarak aynı genliklerde yaklaşık olarak benzer salınımlar yaptığı görülmektedir. Ancak yanal olarak desteklenmiş olan köprü çok düşük frekanslarda daha fazla dinamik hareket yapmış, sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş yapıda ise çok düşük frekanslarda dinamik hareket giderek azalmıştır. Bu durum insanların konforu açısından sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş yapının daha elverişli olacağını göstermiştir.

Şekil 19’da görüldüğü üzere, sismik sönüm cihazlı yapı yapının hakim periyodunu değiştirmeden yapıda depremlerin oluşturduğu ivmesel tepkileri azaltmaktadır. Desteklenme işlemi yapının hakim periyodunu azaltarak yapının rijitliğini önemli ölçüde artırarak ve buna bağlı olarak ivmesel tepkiyi azaltmaktadır.

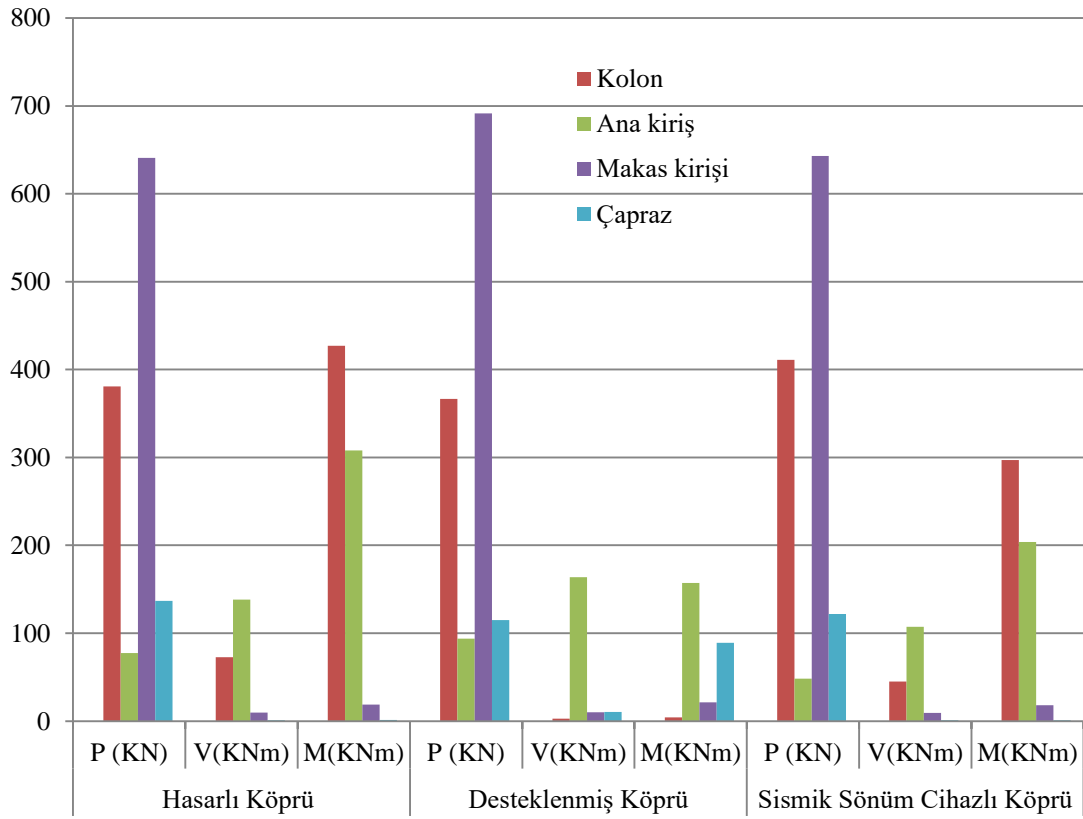
3.2 Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler

Yapı elemanlarında en fazla yer değiştirme, dinamik tepki oluşturan Erzincan Depremi etkisi altında zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yapılarak, yapı elemanlarında oluşan hasarlı yapı durumunda, yanal olarak desteklenmiş yapı durumunda ve sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş yapı durumunda plastik dönmeler ve zamanla değişen doğrusal olmayan yer değiştirmeler elde edilmiştir. Yapı elemanlarında oluşan bu istemlere göre, yapı elemanlarının hasar seviyeleri belirlenmiştir.

Tablo 4’te üç farklı yapı durumu için, ağır hasar alan kolon ve göçme aşamasında olan kiriş için plastik dönmeler gösterilmiştir.

Tablo 2. Hasarlı yapının taşıyıcı elemanlarında oluşan iç kuvvetler

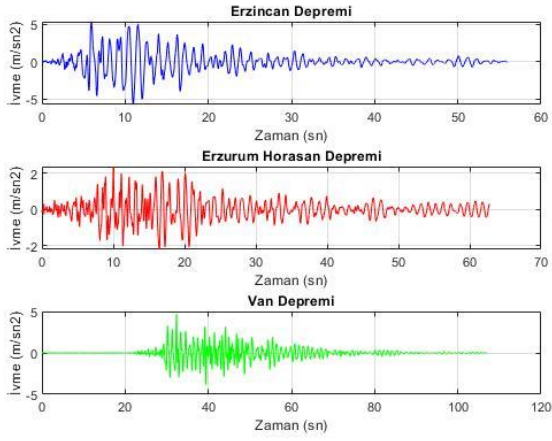
Yapı Elemanları	Van Depremi			Erzurum Horasan Depremi			Erzincan Depremi			Etkiyen Deprem		
	P (kN)	V (kN)	M (kN.m)	P (kN)	V (kN)	M (kNm)	P (kN)	V (kN)	M (kNm)	P (kN)	V (kN)	M (kNm)
Kolon	408.6	45.98	259.48	401.3	53.91	234.44	333.6	118.7	787.12	380.2	72.75	427.01
Ana kiriş	36.86	108.4	165.26	41.31	117.2	193.02	154.9	189.5	565.83	77.45	138.7	308.04
Makas kirişi	641.6	9.4	17.88	643.2	9.22	17.66	638.6	10.8	20.52	641.4	9.81	18.69
Çapraz	173.9	0.88	1.69	123.8	0.78	1.08	113.6	0.76	1.13	136.8	0.81	1.30



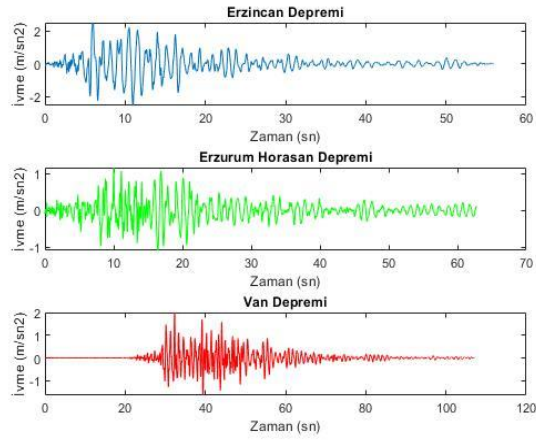
Şekil 12. Üç farklı yapı için yapı elemanlarında oluşan iç kuvvetler

Tablo 3. Depremlerin üç farklı yapıda oluşturdukları taban kesme kuvvetleri ve tepe deplasmanları

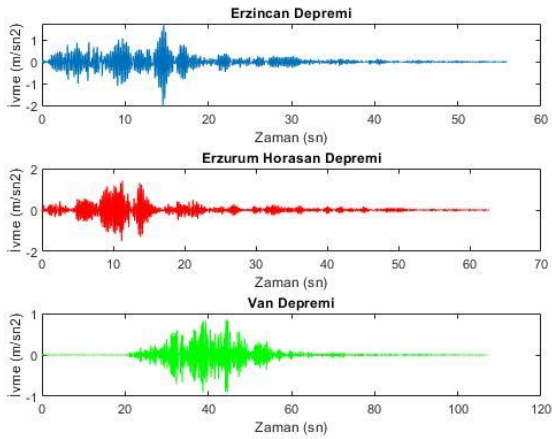
Depremler	Taban Kesme Kuvveti (KN)			Tepe Deplasmanı (m)		
	Hasarlı yapıda	Yanal Olarak Desteklenmiş yapıda	Sismik sönüm cihazlı yapıda	Hasarlı yapıda	Yanal Olarak Desteklenmiş yapıda	Sismik sönüm cihazlı yapıda
Van Depremi	232.4	369.30	152.24	0.0505	0.0021	0.031
Erzurum Horasan Depremi	208.8	372.24	124.45	0.0575	0.0025	0.039
Erzincan Depremi	786.20	741.62	543.39	0.115	0.0042	0.073
Etkiyen Deprem	409.07	494.35	273.38	0.074	0.0034	0.0481



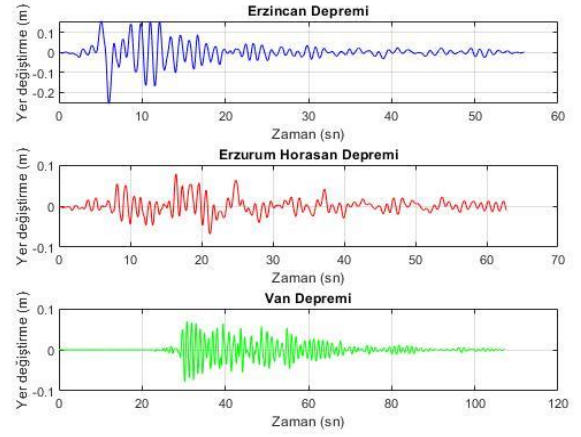
Şekil 13. Hasarlı yapının depremlere karşı yaptığı ivme zaman hikayesi



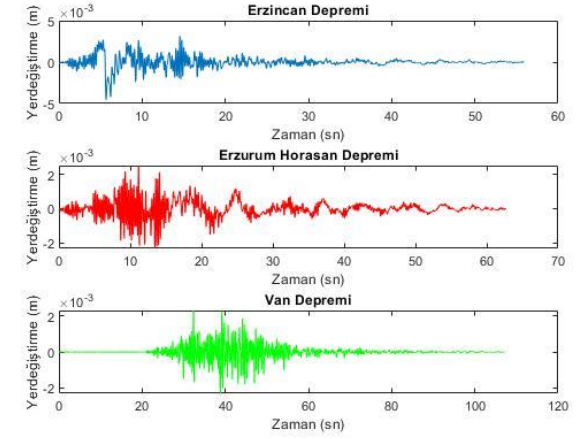
Şekil 14. Yanal olarak desteklenmiş yapının ivme zaman hikayesi



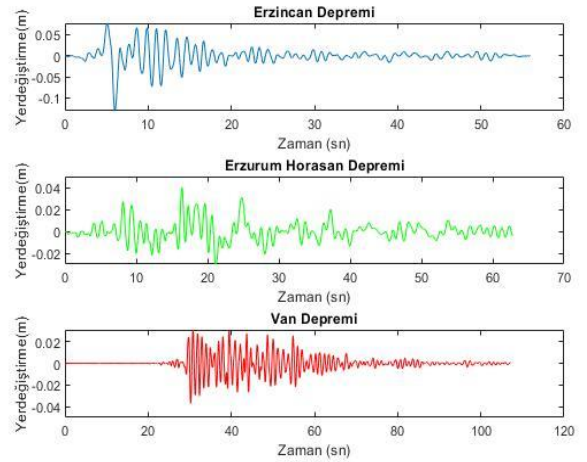
Şekil 15. Sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş yapının ivme zaman hikayesi



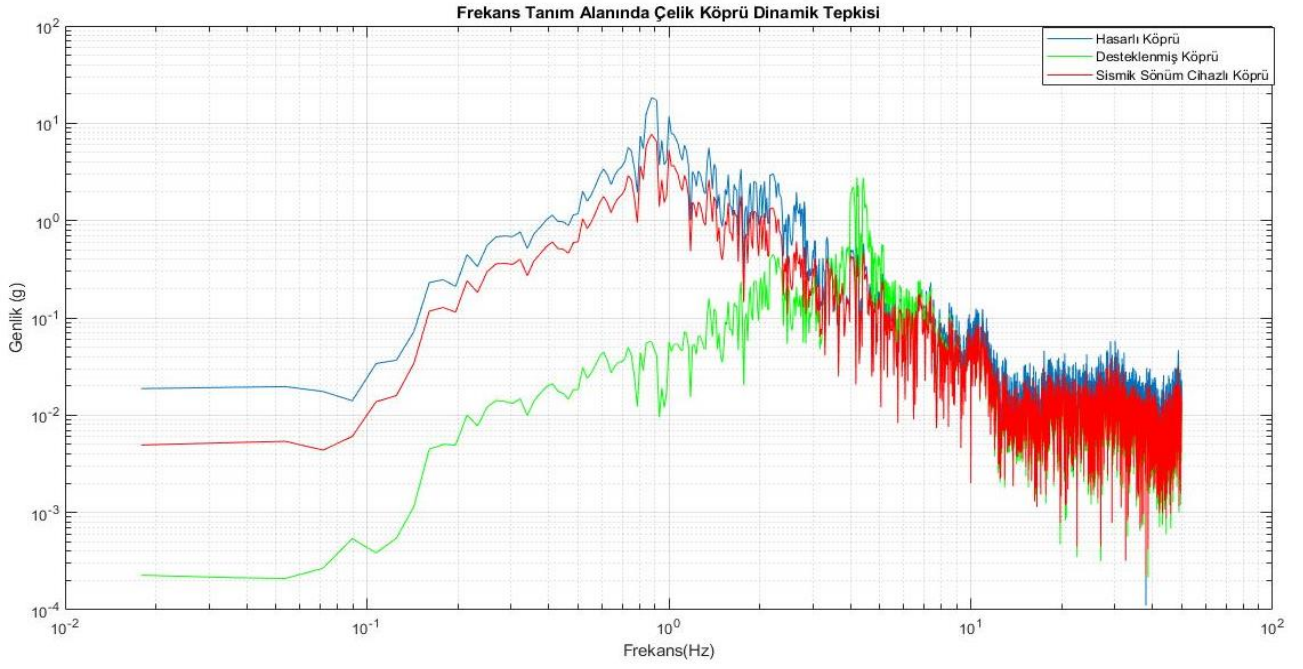
Şekil 26. Hasarlı yapının yer değiştirme zaman hikayesi



Şekil 37. Yanal olarak desteklenmiş yapının yer değiştirme zaman hikayesi



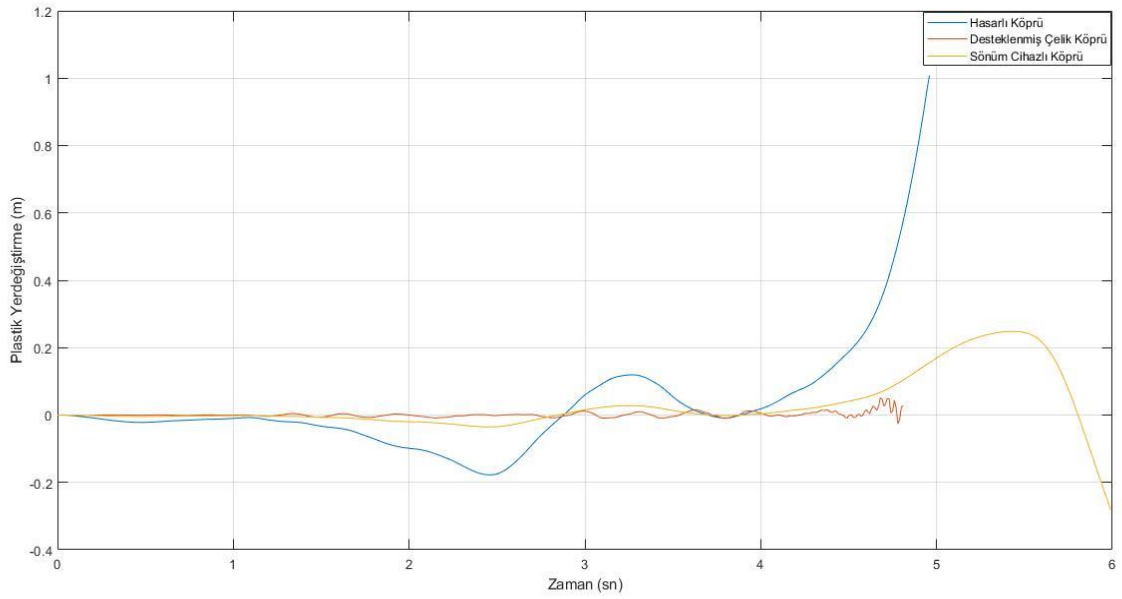
Şekil 48. Sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş yapının yer değiştirme zaman hikayesi



Şekil 59. Frekans tanım alanında yapının depremlere karşı salınımları

Tablo 4. Yapı elemanlarında oluşan plastik dönmeler ve buna karşılık gelen momentler

Etkiyen Deprem Verisine göre elemanlarda oluşan plastik dönme				
Taşıyıcı Eleman	İstemler	Hasarlı Köprü	Sönüm oranı 0.07	Desteklenmiş köprü
Kolon	M (KNm)	380.25	428.78	51.77
	Öp (rad)	0.144	0.089	0.00748
Kiriş	M (KNm)	255.4	285.17	440.25
	Öp (rad)	0.23	0.147	0



Şekil 20. Çelik köprünün üç farklı durumda plastik deformasyon yapabilme yeteneği

Tablo 5. Yapı elemanlarının hasar seviyeleri

Taşıyıcı Eleman	Hasar Seviyeleri		
	Hasarlı Köprü	Sismik Sönüm Cihazlı Köprü	Güçlendirilmiş köprü
Kolon	İleri Hasar Bölgesi	Belirgin Hasar Bölgesi	Belirgin Hasar Bölgesi
Kiriş	Göçme Bölgesi	Belirgin Hasar Bölgesi	Sınırlı Hasar Bölgesi

Tablo 4’te gösterildiği üzere Yanal olarak desteklenmiş köprü durumunda kolonda daha az plastik dönme ve daha az eğilme momenti oluşmaktadır. Yanal olarak desteklenmiş köprü için kolonda oluşan plastik dönme miktarının hasarlı duruma göre 20 kat ve sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş köprü için kolonda oluşan plastik dönme miktarının hasarlı duruma göre 1.7 kat daha az olduğu görülmektedir. Güçlendirme işlemleri sonucunda kirişte eğilme momenti taşıma kapasitesi artarak buna karşılık plastik dönmelerde azalmalar görülmektedir. Yanal destekleme işlemi sonunda kirişin elastik bölgede kalarak daha fazla eğilme momenti kapasitesine ulaştığı görülmektedir. Kirişin eğilme moment dayanımının 479.35 kN.m olması ve doğrusal olmayan analiz sonucu 440.25 kN.m momentin kirişte oluşması nedeniyle bu eğilme etkilerinin kiriş tarafından karşılanabileceği görülmektedir. Sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş sistemde kirişin daha fazla sünek davranarak, hasarlı durumdaki kirişe göre daha az plastik dönme yapabildiği gözlemlenmiştir.

Şekil 20’de ise çelik köprüde zamanla değişen plastik deformasyonlar sunulmuştur. Bu şekilde, desteklenmiş köprünün plastik deformasyon yapabilme yeteneğinin çok düşük olduğu, sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş yapının plastik deformasyon yapabilme yeteneğinin daha fazla olduğu ve zamanla yapmış olduğu plastik deformasyonla deprem etkilerini karşılayabildiği görülmüştür. Hasarlı durum için, yapı yüksek miktarda doğrusal olmayan yer değiştirme yaparak göçme seviyesine gelmiştir. Ayrıca Şekil 20’ye göre yanal stabilite bağlantılarıyla desteklenmiş köprünün çok rijit olduğu ve bu sayede elastik bölgede kalarak kalıcı plastik deformasyon yapmadığı izlenmiştir. Sismik sönüm cihazı yerleştirilen köprünün ise, deprem etkilerini karşılayacak düzeyde kalıcı plastik deformasyon yaptığı görülmüştür. Sismik sönüm cihazı sayesinde yapının sünek bir davranış gösterebileceği öngörülmüştür.

Ayrıca, Tablo 5’te üç farklı durumda yapının hasar seviyeleri belirtilmiştir. Yapı elemanlarında oluşan hasar seviyeleri, yapıda oluşan plastik dönmelere göre belirlenmiştir [9].

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, çelik köprünün maruz kalabileceği büyük depremde göçmemesi veya ağır hasar almaması için çelik köprünün performans analizi yapılarak yapının yaşanabilecek depremlere karşı davranışının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çelik köprü elemanlarında oluşabilecek çatlak deformasyon veya hasarları gözlemleyebilmek için Türkiye’de yaşanmış olan Erzincan, Erzurum Horasan ve Van Depremleri etkisinde zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre,

taşıyıcı kolonlar ileri hasar seviyesinde ve ana taşıyıcı kirişlerin göçmenin önlenmesi hasar seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, yapının göçmesinin önlenmesi açısından bir dizi güçlendirme prensipleri önerilmiştir. Çalışmada önerilen güçlendirme prensiplerinden birisi, göçme bölgesinde olan kirişlere dış merkezi olarak, her iki ucu mafsalı bağlanan yanal stabilite elemanlarıdır. Diğer güçlendirme yöntemi ise, yapıda doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin yoğun olduğu ön görülen kirişlerin dönme merkezine sismik sönümleme cihazının yerleştirilmesidir.

Yanal olarak desteklenmiş yapı ve sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş yapı için depremlerin taşıyıcı elemanlarda oluşturduğu iç kuvvetler sırasıyla hasarlı olarak değerlendirilen yapı için depremlerin taşıyıcı elemanlarda oluşturduğu iç kuvvetlerden %44 ve %18 daha az olduğu tespit edilmiştir. Ancak yapıya vermiş olduğu ağırlıktan dolayı, yanal olarak desteklenmiş sistem için hesaplanan eksenel basınç kuvvetleri hasarlı yapı için hesaplanan eksenel basınç kuvvetlerinden %1.5 oranında daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Depremlerin yapıda oluşturduğu taban kesme kuvvetleri, hasarlı yapı için hesaplanan taban kesme kuvvetlerine nazaran; desteklenmiş köprü için 90 KN civarında daha fazla, sismik sönüm cihazlı yapı için yaklaşık 136 KN daha az olduğu izlenmiştir. Bu durum yanal olarak desteklenmiş sistemin, köprünün ağırlığını artırdığını, sismik sönüm cihazının ise yapı ağırlığını değiştirmeden yapının periyodunu azaltarak taban kesme kuvvetini artırdığını göstermiştir. Maksimum tepe deplasmanları hasarlı yapı için 0.074 m, desteklenmiş yapı için 0.0031 m ve sismik sönüm cihazlı yapı için 0.0481 m olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, her iki güçlendirme yöntemiyle yapının yer değiştirmesi azaltılmıştır.

Zaman tanım alanında, zamana bağlı olarak üç farklı durum için yer değiştirme-zaman, ivme-zaman eğrileri elde edilmiştir. Yapının zamanla değişen ivmelerin yaklaşık olarak, desteklenmiş köprü de %60 ve sismik sönüm cihazlı köprüde %45 olarak azaldığı görülmüştür.

Ayrıca desteklenmiş köprüde zamanla değişen yer değiştirmelerin %50 ve sismik sönüm cihazlı köprüde %35 olarak azaldığı tespit edilmiştir. Aynı frekans aralıklarında desteklenmiş köprü ve sismik sönüm cihazlı köprü sırasıyla 19 ve 1.8 kat daha az ivmesel yer hareketi yaptığı görülmüştür. Her üç sistemde maksimum yer hareketi düzeyine ulaştığı anda Desteklenmiş köprü, sismik sönüm cihazlı köprüye göre 1.5 kat daha fazla salınım yaptığı görülmüştür.

Doğrusal analiz sonuçları dışında, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılarak yapı elemanlarının hasar seviyeleri belirlenmiştir. Desteklenmiş köprü için kirişlerde oluşan eğilme momentlerinin sismik sönüm cihazlı

köprüye göre 1.5 kat daha fazla olmasına rağmen sismik sönüm cihazlı köprü kirişi 0.147 rad dönme yapmış buna karşılık desteklenmiş köprü kirişi elastik bölgede kalarak plastik dönme yapmamıştır. Hasarlı köprü için kiriş 0.23 rad dönme yaparak göçme seviyesine gelmiştir. Göçme hasarını engellemek için sismik sönüm yerleştirilerek kirişin daha az dönme yapması sağlanmıştır. Kolonlarda oluşan plastik dönmelerin, desteklenmiş köprü için 0.00748 rad, sismik sönüm cihazlı köprü için 0.089 rad, hasarlı köprü için 0.144 rad olduğu gözlemlenmiştir. Güçlendirme işlemleri sonucunda yapı elemanlarının plastik dönmeleri azaltılmıştır. Bunların dışında, sismik sönüm cihazı yapının plastik yer değiştirme kapasitesine %60 oranında katkı sunmuştur. Desteklenme işlemi ise, yapıda kirişlerin plastik deformasyon yapmayarak elastik bölgede kalmasını sağlamış ve kolonların plastik deformasyon kapasitesine %4 civarında katkı sunmuştur. Son olarak, kolonlar hasarlı köprü için ileri hasar bölgesinde, sismik sönüm cihazlı yapı ve desteklenmiş yapı için ise belirgin hasar düzeyinde kalmıştır. Kirişler ise, hasarlı köprüde göçme bölgesinde, desteklenmiş yapı için sınırlı hasar seviyesinde ve sismik sönümlü yapıda belirgin hasar düzeyinde kalmıştır.

Bu sonuçlara göre, yapının daha az salınım yaparak insan konforunun iyileşmesi açısından uygulanan sismik sönüm cihazlı güçlendirme işleminin, desteklenmiş tasarıma göre daha uygun olduğu görülmüştür. Yapının ağırlığı değişmeden, yapı elemanlarının sünekliğini artırmak için sismik sönüm cihazı tercih edilmelidir. Daha az maliyete sahip desteklemeli güçlendirme yöntemiyle ise yapı elemanlarının göçmeden ayakta durabilmesi sağlanmaktadır. Desteklenme işlemiyle elemanların mevcut dayanımları artırılarak, depremden gelen kuvvetler, sismik sönüm cihazlı yapıya göre daha iyi karşılanmaktadır. Desteklenme işlemiyle, dış merkezi oluşturulan bağ kiriş tüm plastik dönmeleri kendinde toplayarak, ana taşıyıcı kirişin elastik bölgede kalmasını sağlamıştır.

Sonuç olarak, Şenkaya Yünören Köprüsünün göçmeden ayakta durabilmesi için, yukarıda ifade edilen güçlendirme işlemlerinden birinin uygulanması gerekmektedir. Ancak, yapının mimarisinin değişmemesi gerekiyorsa yapıya sismik sönüm cihazının yerleştirilmesi daha makul olacaktır. Aksi takdirde Erzincan Depremi gibi büyük depremlerde yapının göçmesi öngörülmektedir.

Çıkar çatışması

Bu çalışmada çıkar çatışmasının olmadığını beyan ediyoruz.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] A. Dogangun, and A. Ural, Characteristics of Anatolian stone arch bridges and a case study for Malabadi Bridge. ARCH 07 – 5th International Conference on Arch Bridges, 179–186, 12–14, 2007.
- [2] P. Foraboschi, Specific structural mechanics that underpinned the construction of Venice and dictated Venetian architecture. Eng. Fail. Anal., 78, 169–195, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.03.004>

- [3] A. C. Aydın, Restoration of historical structures: material and structural point of view. The 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, 325–336, 12–14 Oct. 2009.
- [4] I. N. Sener, An innovative methodology and structural analysis for relocation of historical masonry monuments: a case study in Hasankeyf. M.Sc. Thesis, 167, Middle East Technical University, Turkey, 2004.
- [5] TÇYY Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, Türkiye 2016.
- [6] AASHTO., American Association of State Highway And Transportation Officials, Washington, DC, U.S.A 2018.
- [7] H. Gönen, M. Doğan, ve H. Gökdemir, Viskoz sönümleyici ilave edilmiş kısmi dolgu duvarlı çelik çerçevelerin sismik performans analizi. 6. Çelik Yapılar Sempozyumu, 317-328. 12, 2015.
- [8] AFAD. T.C İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durumu Yönetim Başkanlığı, Ankara, Türkiye, 2009.
- [9] ASCE/SEI 41-13. Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2013.
- [10] D. Lee, and D. P Taylor, Viscous damper development and future trends. Struct. Des. Tall Build., 10, 311–320., 2001. <https://doi.org/10.1002/tal.188>
- [11] M. Bruneau, Performance of steel bridges during the 1995 Hyogoken – Nanbu (Kobe, Japan) earthquake. Elsevier Science Ltd., 20(12), 1063-1078, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00203-4](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00203-4)
- [12] TEKLA Structures, Structural BIM Software, Trimble Access, 1978.
- [13] SAP2000, Structural Analysis Program, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, 2005
- [14] Z. Celep, Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı. İstanbul, Beta Basın Yayın Dağıtım, 2018.
- [15] H. Jimin, and F. Zhi-Fang., Modal analysis, oxford, a division of reed educational and professional publishing ltd. linacre house, Jordan Hill, OX2 8DP, 2001
- [16] T. E. Kelly, In-structure damping and energy dissipation design guidelines, wellington, Holmes Consulting Group, 2001.
- [17] FEMA 273. Federal Emergency Management Agency Publication, NHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, D.C., U.S.A, 1997.
- [18] A. Chopra, Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.
- [19] E Aydın, B Ozturk, and E Duzel, Rehabilitation of planar building structures using steel diagonal braces and dampers. 5th European Conference on Structural Control (EACS 2012), Genoa, Italy, 2012.
- [20] E. Aydın, B. Ozturk, and D. Guney, Sensitivity analyses of variations on seismic response via viscous damper placement in planar building structures. 10th

- International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, 2013.
- [21] E Aydın, B Ozturk, H Cetin, M Gasir, Strengthening plane frames with steel plates. 7th World Conference on Structural Control and Monitoring, Qingdao, China, 2018.
- [22] E. Aydın, E. N. Farsangi, B. Ozturk, A. Bogdanovic and M. Dutkiewicz, Improvement of building resilience by viscous dampers. Resilient Structures and Infrastructure, 105-127, Springer, 2019. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7446-3_4





Etkileşimli parçacık hidrodinamiği kullanılarak trapez eşik üzerinden geçen baraj yıkılması akımının sayısal olarak modellenmesi

Numerical modeling of dam-break flow over trapezoidal obstacle using smoothed particle hydrodynamics

Selahattin Kocaman^{1,*} 

¹ İskenderun Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 31200, Hatay Türkiye.

Özet

Bir baraj yıkılması olayı gerçekleştiğinde, yüksek miktardaki su kütlesi ani bir şekilde mansap kısmına doğru yayılmaya başlar ve mansap bölgesinin topografyası, baraj yıkılması akımının ana karakteristikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Etki alanı içerisinde olası afetlerin önlenmesi için baraj yıkılması akımlarının dalga yayılma hızı ve su yüksekliği gibi temel özelliklerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu tür akımların saha verilerinin elde edilmesindeki zorluklar, bu alanda yapılan deneysel ve nümerik çalışmaların önemini artırmaktadır. Sunulan çalışmada mansap kesitinde trapez bir eşik bulunan baraj yıkılması akımının Etkileşimli Parçacık Hidrodinamiği (EPH) yöntemi ile nümerik analizi gerçekleştirilmiştir. EPH yönteminin çözüm kabiliyeti, üç farklı parçacık çözünürlüğünden elde edilen analiz sonuçlarının deneysel ölçümlerle karşılaştırılmasıyla test edilmiştir. Genel olarak deneysel ölçüm verileri ile nümerik hesaplamalar arasında iyi bir uyum gözlemlenmiş ve parçacık çözünürlüğünün sonuçlar üzerindeki etkisi tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Baraj yıkılması, Etkileşimli parçacık hidrodinamiği, Sayısal model, Trapez eşik.

Abstract

When a dam-break phenomenon occurs, the large amount of water rapidly starts to propagate towards the downstream and, the topography of the downstream has significant effects on the main characteristics of the dam-break flow. It has great importance to determine the main characteristics of the dam-break flows such as wave propagation velocity and water height in order to prevent possible disasters which can cause destructive effects in the impact area. Difficulties in obtaining field data of this type of flows increase the importance of experimental and numerical studies in this field. In the presented study, the numerical analysis of the dam-break flow with a trapezoidal hump in the downstream was performed by the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method. The solution capability of the SPH method was tested by the comparisons of the analysis results obtained from three different particle resolution with experimental measurements. In general, a good agreement was observed between experimental measurement data and numerical calculations and, the effect of particle resolution on the results was discussed.

Keywords: Dam-break, Smoothed particle hydrodynamics, Numerical model, Experiment, Trapezoidal obstacle.

1 Giriş

Bir baraj yıkılması olayı gerçekleştiğinde, oluşan taşkın dalgaları ani bir şekilde mansap kısmına doğru yayılmaya başlar ve etki alanı içerisinde önemli ölçüde can ve mal kayıplarına neden olabilir. Taşkın dalgalarının yayıldığı mansap kısmı genellikle doğal veya insan yapımı engellerin neden olduğu topoğrafik düzensizlikler barındırmaktadır. Taşkın dalgasının yayılımı üzerinde belirgin etkileri olan bu düzensizlikler, akımı incelemek ve noktasal derinlik, dalga yayılım hızı gibi ana karakteristiklerini belirlemek için yapılan çalışmaları daha karmaşık hale getirmektedir.

İlgili saha verilerinin elde edilmesindeki zorluk, araştırmacıları bu alanda deneysel çalışmalar yapamaya yönlendirmiştir. Birçok araştırmacı, mansap kısmındaki çeşitli geometrilerde engellerin ve daralmaların oluşturduğu düzensizliklerin etkilerini deneysel çalışmalar gerçekleştirerek incelemeyi amaçlamışlardır [1-6]. Elde edilen deneysel verilerin analitik metotlar ile yeterli doğrulukta yeniden üretilememesi ise bu alanda kullanılan nümerik yöntemlerin değerini ve önemini artırmaktadır. Nümerik yöntemler son yıllarda hidrolik problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılmaktadır [7, 8]. Literatürde baraj yıkılması akımlarının analizinde kullanılmak üzere birçok nümerik metot geliştirilmiş ve araştırmacılar tarafından başarı ile uygulanmıştır. Bu metotları genel olarak ağ ve

parçacık tabanlı metotlar olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Ağ tabanlı nümerik metotlar birçok araştırmacı tarafından çeşitli baraj yıkılması akımlarının incelenmesinde sıklıkla başvurulan yöntemler olmuşlardır [2-5, 9-12]. Bu metotlar ile gayet başarılı sonuçlar elde edilebilirken, kullanılan formülasyona bağlı olarak serbest yüzeyin tespiti için ilave denklemler gerektirmeleri, ağ yapısının düzenlenme şekline hassasiyetleri ve çözüm süresi ile ilgili zamansal maliyetleri metotların olumsuz yanları olarak göze çarpmaktadır.

Son yıllarda parçacık tabanlı metotlar ise birçok araştırmacı tarafından serbest yüzeyli akımların nümerik olarak modellenmesinde ilk tercih edilen metotlar haline gelmişlerdir. Bu metotların herhangi bir ağ yapısı barındırmaması ve serbest yüzey evriminin tespiti için ilave denklemlere ihtiyaç duyulmaması gibi öne çıkaran özellikleri bulunmaktadır. Bu yöntemlerin en popülerlerinden biri olan Etkileşimli Parçacık Hidrodinamiği (Smoothed Particle Hydrodynamics) metodu ilk olarak astrofizik problemlerine uygulanmak üzere geliştirilmişse de [13, 14] daha sonraları birçok hidrodinamik problemine başarı ile uygulanmıştır [15-18]. Hidrodinamik problemlerde kullanımı açısından ağ yapılı metotlara göre nispeten daha yeni olan bu yöntemin

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: selahattin.kocaman@iste.edu.tr (S. Kocaman)
Geliş / Received: 13.10.2020 Kabul / Accepted: 12.11.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021
doi: 10.28948/ngmuh.810306

kullanılan parametrelere olan duyarlılığı ise araştırmacılar arasında popüler bir araştırma konusu olmaktadır.

Bu çalışmada, mansap bölgesinde trapez geometrili bir eşik bulunan baraj yıkılması akımının Etkileşimli Parçacık Hidrodinamiği (EPH) metodu ile nümerik analizi gerçekleştirilmiştir. Parçacık çözünürlüğünün sonuçlar üzerindeki etkisinin test edilmesi amacı ile analizler üç farklı çözünürlük değeri için tekrarlanmıştır. Elde edilen nümerik çözüm sonuçları, Kocaman [19] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen çeşitli noktalardaki boyutsuz su derinliği değerlerinin zamana göre değişimleri üzerinden karşılaştırılmıştır.

2 Etkileşimli parçacık hidrodinamiği metodu

Bu çalışmadaki sayısal analizler, açık kaynak kodlu, Grafik İşlemci Birimi (GPU) ve Merkezi İşlem Birimi (CPU) üzerinden işlem gerçekleştirebilen, EPH çözücüsü DualSPHysics [20] kullanılarak gerçekleştirilmiştir. EPH yönteminde sürekli akışkan ortamı, oluşturulan parçacık setleri ile tanımlanmaktadır. Temel olarak bir interpolasyon teorisi olan yöntemde, hidrodinamiğin temel korunum yasaları bir çekirdek fonksiyonu yardımıyla ifade edilebilmektedir;

$$A(\mathbf{r}) = \int A(\mathbf{r}')W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h)d\mathbf{r}' \quad (1)$$

Burada A(r) konuma bağlı bir fiziksel özelliği temsil ederken, W(r-r',h) ağırlık fonksiyonudur. Ağırlık fonksiyonu ile interpolasyon uzunluğu (h) içerisindeki parçacıkların katkı oranları belirlenmektedir. Denklem 1, herhangi bir a parçacığı için çekirdek fonksiyonu tarafından belirlenen sınır içerisindeki komşu parçacıklar (b) kullanılarak aşağıdaki şekilde yaklaşık olarak ayrıştırılabilmektedir;

$$A(\mathbf{r}_a) \approx \sum_b A(\mathbf{r}_b) \frac{m_b}{\rho_b} W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h) \quad (2)$$

EPH analizlerinin çözüm kabiliyetleri kullanılan çekirdek fonksiyonuna yüksek oranda bağlılık göstermektedir. Bu çalışmada çekirdek fonksiyonu olarak Wendland [21] tarafından önerilen Quintic (Wendland) tipi bir fonksiyon kullanılmıştır;

$$W(r, h) = a_D \left(1 - \frac{q}{2}\right)^4 (2q + 1) \quad (3)$$

$$0 \leq q \leq 2$$

burada r; ilgili parçacıklar a ile b arasındaki mesafeyi temsil ederken, a_D; iki ve üç boyutlu problemler için sırasıyla 7/4πh² ve 21/16πh³ değerlerini almaktadır.

Serbest yüzeyli baraj yıkılması akımlarının EPH yöntemi ile analizinde kullanılan temel denklemler momentum ve kütle korunumu yasalarıdır. Momentumun korunumu EPH yönteminde;

$$\frac{dv_a}{dt} = - \sum_b m_b \left(\frac{P_b + P_a}{\rho_b \rho_a} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + g \quad (4)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada P ve ρ sırasıyla basınç ve yoğunluk terimlerini temsil ederken, g yerçekimsel ivme, Π_{ab} ise yapay viskozite terimidir. Bu viskozite terimi;

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} \frac{-\alpha \overline{c_{ab}} \mu_{ab}}{\rho_{ab}} & \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab} < 0 \\ 0 & \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab} > 0 \end{cases} \quad (5)$$

şeklinde ifade edilebilir [22]. Burada r_{ab}=r_a-r_b ve v_{ab}=v_a-v_b, parçacık pozisyon ve hızlarının farklarını temsil ederken, μ_{ab}=h v_{ab}·r_{ab}/(r_{ab}²+η²) ve c_{ab}=0.5(c_a+c_b) eşitlikleri söz konusudur. η²=0.01h² değerini alırken, c_{ab} ses hızının ortalama değerini temsil etmektedir. α değeri problem tipine bağlı değişiklik gösterebilen yapay viskozite sabitidir.

EPH yönteminde süreklilik denklemi ise;

$$\frac{dp_a}{dt} = \sum_b m_b \mathbf{v}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (6)$$

şeklinde ifade edilmektedir. DualSPHysics kodu ile gerçekleştirilen EPH analizlerinde akışkanlar, yoğunluğunda %1 dolaylarında sınırlı dalgalanmalar meydana gelebileceği kabulü ile zayıf sıkıştırılabilir şekilde modellenmektedir. Bu çözüm yaklaşımının kullanımı ile basınç ve yoğunluk arasındaki ilişkiyi tanımlamak üzere bir hal denklemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu doğrultuda bu çalışmada;

$$P = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (7)$$

hal denklemini kullanılmaktadır [23]. Burada; γ=7 ve B=c₀²ρ₀/γ olup, ρ₀ suyun referans yoğunluğu ve c₀ değeri bu yoğunluktaki bir su içerisindeki ses hızını temsil etmektedir.

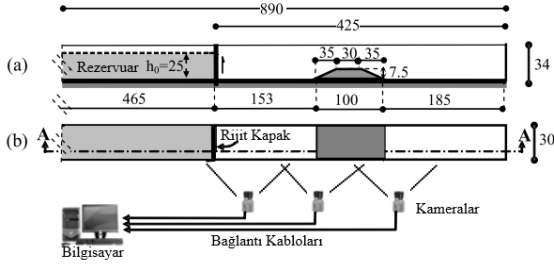
3 Bulgular ve tartışma

Bu çalışmada EPH yönteminin bir baraj yıkılması akımının trapez geometrili bir eşik ile olan etkileşiminin sayısal olarak modellenmesindeki performansı Kocaman [19] tarafından elde edilen deneysel ölçüm verileri kullanılarak test edilmiştir. Deneysel çalışma 8.9m uzunluğa, 0.3m genişliğe ve 0.34m yüksekliğe sahip dikdörtgen bir tank kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dikdörtgen tank, rijit bir kapak kullanılarak memba ve mansap olarak iki kısma ayrılmış, 4.65m uzunluğundaki memba kısmı başlangıçta h₀=0.25m derinlikte su ile doldurulmuştur. Rijit kapağın ani bir şekilde kaldırılması ile baraj yıkılması akımının başlangıç su külesinden 1.53m uzağa konumlandırılmış trapez geometrili bir engelin bulunduğu kuru mansap yatağı üzerinde ilerlemesi sağlanmıştır. Deney düzeneğinin genel görünümü Şekil 1'de gösterilmiştir. Deneysel ölçüm verileri görüntü işleme tekniği ile elde edilmiş olup, bu yöntem ve deney düzeneği hakkında detaylı bilgi Kocaman [19] çalışmasında bulunabilir.

Deneysel veriler ile karşılaştırmak amacıyla 0.00125m, 0.0025m ve 0.005m olmak üzere üç farklı parçacıklar arası başlangıç mesafesi (dp) değerine sahip EPH analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerin tümünde Wendland tipi çekirdek fonksiyonu kullanılırken, interpolasyon uzunluğu

Tablo 1. Nümerik analizlerde kullanılan EPH parametreleri

Sayısal Analiz (SA) No	SA1	SA2	SA3
Parçacıklar arası başlangıç mesafesi (m)	0.005	0.0025	0.00125
Parçacık Sayısı Yoğunluğu (h_0/d_p)	50	100	200
Yapay Viskozite Değeri (α)		0.01	
h/d_p		1.25	
Çekirdek Fonksiyonu		Wendland	
Sınır şartı formülasyonu		Dynamic Boundary Condition [24]	
Zaman adımlama tekniği		Symplectic [25]	



Şekil 1. Deneysel düzeneğin önden(a) ve üstten(b) genel görünüşü

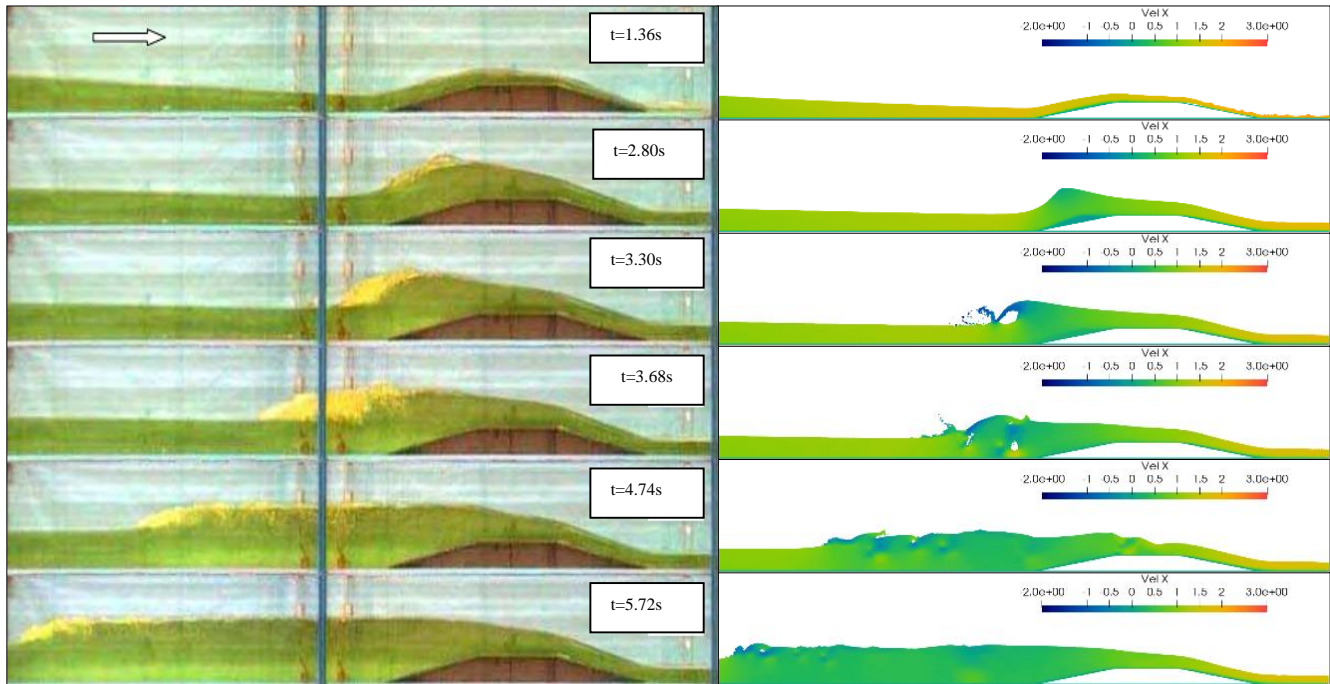
(h), her bir analiz için d_p değerinin 1.25 katı olacak şekilde seçilmiştir. EPH analizleri ile ilgili detaylı parametrik özet Tablo 1’de sunulmuştur.

Bu değerler kullanılarak, toplam analiz süresi 12.8s olan üç farklı EPH analizi gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmaya ait çeşitli zaman adımlarındaki karşılaştırmalı görseller Şekil 2’de sunulmuştur.

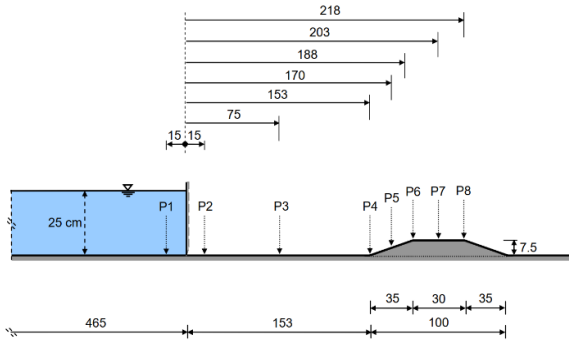
Rijit kapağın ani bir şekilde kaldırılması ile mansap kısmına doğru yayılmaya başlayan baraj yıkılması dalgasının trapez kesitli eşiğe vardığında bir kısmının eşiği aştığı bir kısmının ise eşiğin memba tarafında kalarak

kabarmaya başladığı gözlemlenmiştir. Eşiği aşan akımın sel rejiminde olduğu gözlemlenirken, eşik öncesinde kabarma miktarının artması ile $T=2.80s$ ’de bir hidrolik sıçramanın olduğu dikkat çekmektedir. Sonrasında hareketli hidrolik sıçrama olarak tanımlanabilecek bu hidrolik sıçramanın memba doğrultusunda ilerlemesiyle bir negatif dalga meydana gelmektedir. Sayısal sonuçlarda $t=3.30s$ anında deneysel sonuçlardan farklı olarak sıçrama tipi bir dalga kırılması meydana gelmektedir. Ayrıca, hidrolik sıçramanın olduğu (negatif dalga önu) bölgede ve sonrasında deneysel görsellerde önemli ölçüde hava girişiminden dolayı hava-su arakesiti oluşumları gözlemlenirken, sayısal analiz sonuçlarında kullanılan formülasyonun tek fazlı (su) olması nedeniyle bu durum gözlemlenmemektedir. Deneysel çalışmada hidrolik Dalga kırılması sonucu oluşan negatif dalga önünün baraj membasına doğru ilerlemesi ise analiz süresince devam etmiştir.

Elde edilen nümerik analiz sonuçları ile biri membada ve diğer yedi tanesi mansapta olmak üzere sekiz farklı ölçüm noktasında gerçekleştirilen deneysel ölçümler, boyutsuz su derinliği-zaman grafikleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Kullanılan ölçüm noktalarının dikdörtgen tank içerisindeki konumları Şekil 3’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Çeşitli zaman adımlarına ait deneysel ve sayısal (SA3) görsellerin karşılaştırılması

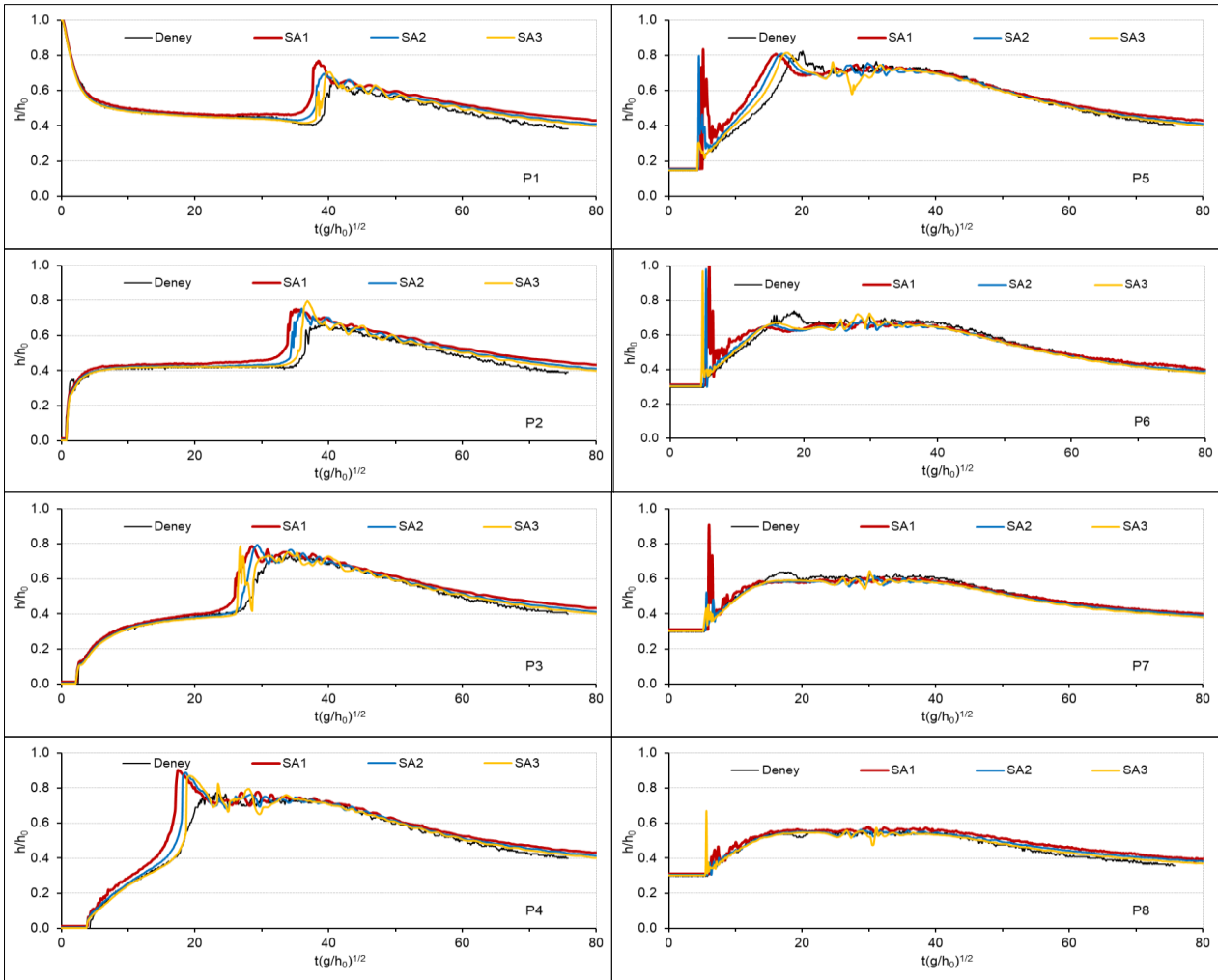


Şekil 3. Su seviyesi ölçüm noktaları

DeneySEL ve sayısal analiz sonuçlarının boyutsuz su derinlikleri üzerinden karşılaştırılmaları Şekil 4’de sunulmaktadır. Boyutsuz su derinliği değerleri; mevcut su derinliklerin başlangıç su derinliği değerine (h_0) bölünmesi sonucu elde edilirken, boyutsuz zaman değerleri; mevcut zaman değerlerinin $(g/h_0)^{1/2}$ ile çarpılmasıyla elde edilmiştir. Burada g yerçekimi ivmesidir. EPH analizlerinde kullanılan üç farklı çözünürlük değerleri de deneysel ölçümler ile

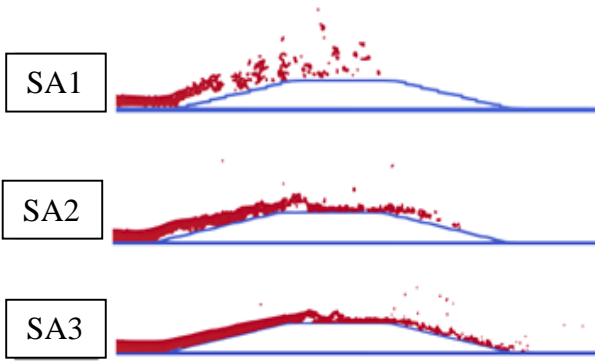
karşılaştırılmıştır. Trapez eşik üzerinde olmayan P1-P4 noktalarında, rijit kapağın aniden kaldırılması ile membada bulunan ve rezervuardaki su seviyesi değişimini temsil eden

P1 noktasında ani bir düşüş, diğer noktalarda ise taşkın dalgasının bu noktalara ulaşması ile ani yükselişler gözlemlenmiştir. Eşik öncesindeki kabarma ve akabindeki negatif dalga yansımalarının oluşumuna kadar, bu noktalardaki nümerik model sonuçları arasında kullanılan parçacık çözünürlüğüne bağlı olarak bir farklılaşmanın meydana geldiği gözlemlenmemiş ve deneysel ölçümler ile iyi bir uyum yakalanmıştır. Negatif dalga yansımalarının bu noktalardan geçişi sırasında ise sonuçlar arasında farklılıkların başladığı, en düşük çözünürlük değerine sahip analizlerde (SA1) bu dalgaların ölçüm noktalarına daha erken vardığı ve daha yüksek derinliklere ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, çözünürlük değerlerine bağlı olarak negatif dalga önünün geçişinden sonra ölçüm noktalarındaki derinlik değerlerinde düşük çözünürlükten yüksek çözünürlüğe doğru azalan bir derinlik değeri dikkat çekmektedir.



Şekil 4. Nümerik hesaplamaların deneysel ölçüm verileri ile karşılaştırılması

Tüm bu farklılaşmalar irdelendiğinde yüksek çözünürlük değerlerinin deneysel ölçümler ile daha uyumlu olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak, ağ tabanlı sayısal metotlarda olduğu gibi, daha fazla sayı ile tanımlanan çözüm alanının, nümerik metotlardaki çözüm yaklaşımları nedeniyle doğruluğu arttırdığı ve akışkanın daha çok parçacık ile daha iyi temsil edilebildiği ileri sürülebilir. Ayrıca, tüm çözünürlük değerlerinde aynı yapay viskozite değerleri kullanılmasına rağmen, yapay viskozite değerinin çözünürlük ile ilişkili olduğu bilinmektedir. Yapay viskozite değerinin problem üstündeki etkisinin arttırılması ile daha fazla enerji yayılımının gerçekleşeceği ve dalga yayılma hızlarında azalmalara neden olacağı düşünülmektedir.



Şekil 5. Eşik üzerindeki parçacık saçılımı

Trapez eşik üzerindeki P5-P8 noktalarında ise $t(g/h_0)^{1/2}=6-7$ boyutsuz zaman değeri civarında, baraj yıkılması dalga önünün trapez eşik başlangıç noktasına ulaşması ile meydana gelen ve gerçekçi olmayan parçacık saçılımı (Şekil 5) sonucu oluşan su derinliği değerlerindeki ani yükselmeler dikkat çekmektedir. Bu saçılımın çözünürlük ile ters orantılı olarak şiddetlendiği görülmektedir. Bu etki su derinliği değerlerinde bir miktar sapmalara neden olsa da, akım kararlılığının artması sonucu elde edilen homojen parçacık dağılımı ile sonuçlardaki tutarlılık da artmıştır. Bu ölçüm noktalarında, her üç analiz sonucu arasında belirgin farklar oluşmazken, su seviyesindeki kabarma etkisinin azalması akabinde meydana gelen su seviyesindeki düşüşün, yüksek çözünürlüklü analizde daha yüksek doğrulukta yeniden üretildiği görülmektedir.

Nümerik analizler Intel Core i7-8750H CPU, 16 GB RAM ve NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti GPU barındıran bir bilgisayar kullanılarak, GPU üzerinden gerçekleştirilmiştir. Üç farklı nümerik analize ait bazı istatistiksel veriler Tablo 2'de sunulmuştur. Parçacıklar arasındaki başlangıç mesafesinin yarıya düşürülmesi ile iki boyutlu bir analiz için beklendiği üzere parçacık sayısında

dört kat artış gözlemlenmiştir. Buna karşın analiz sürelerinde 5-6 kat civarlarında artışlar yaşanmıştır. En düşük ve en yüksek çözünürlükteki analizler olan SA1 ve SA3 arasında parçacık sayısı bakımından 16 kat fark bulunsa da, zamansal maliyetler bakımında 30 kata yakın farklar oluştuğu görülmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada mansap kısmında trapez kesitli bir eşik bulunan baraj yıkılması akımının nümerik modellemesi EPH metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üç farklı parçacık çözünürlüğü için tekrarlanan analizlerden elde edilen sonuçlar Kocaman [19] tarafından elde edilen deneysel ölçüm verileri ile karşılaştırılmıştır ve karşılaştırma sonuçları, çeşitli noktalardaki boyutsuz su derinliklerinin zamana göre değişimleri üzerinden sunulmuştur.

Baraj yıkılması akımının başlangıç evrelerinde, parçacık çözünürlükleri bakımından nümerik analizlerde belirgin farklılaşmalar gözlemlenmezken, hem üç farklı nümerik analiz sonuçları arasında hem de bu sonuçlar ile deneysel ölçüm verileri arasında yüksek dereceli uyumun yakalandığı görülmüştür. Ancak, eşik öncesinde gerçekleşen kabarma sonucu oluşan hidrolik sıçrama ve akabindeki negatif dalga yayılması ile akımın karmaşık yapısından dolayı çözünürlüklere bağlı olarak sonuçlar arasında bariz farklılıkların oluştuğu gözlemlenmiştir. Çözünürlük değerleri ile doğru orantılı olarak dalga yayılma hızı ve dalga boyu değerlerinde azalmalar meydana gelerek, yine çözünürlük değerleri ile doğru orantılı olacak şekilde deneysel ölçümler ile uyumun arttığı karşılaştırma sonuçları ile ortaya çıkmaktadır.

Nümerik analizlerin, çözüm alanının tanımlanmasında kullanılan elemanların sayısının artması ile daha yüksek doğruluklara çıktığının bilinmesinin yanı sıra, yapay viskozite değerinin çözünürlük ile olan ilişkisinin sonuçlar arasındaki farklılaşmanın temel nedeni olduğu düşünülmektedir. Problemdaki yapay viskozite etkisinin arttırılması ile daha fazla enerji dağılımının sağlanacağı ve bunda gerek dalga önü yayılma hızı gerekse dalga büyüklüğü değerlerinde düşüşe neden olacağı ileri sürülebilir. Bununla ilişkili olarak ileriki çalışmalarda farklı parçacık çözünürlükleri ile farklı yapay viskozite değerlerinin kullanımının araştırılması, bu etkinin daha iyi anlaşılması bakımından fayda sağlayacaktır.

Ayrıca üç farklı parçacık çözünürlüğü değeri için analizlerin zamansal maliyetleri incelendiğinde, zamansal maliyetlerin parçacık sayısı ile doğru orantılı artmadığı gözlemlenmiştir. En düşük parçacık çözünürlüğü ile en yüksek çözünürlük arasında parçacık sayısı olarak 16 kat artış olsa da, zamansal maliyetler bakımından bu değer 30 kata yaklaştığı görülmektedir.

Tablo 2. Üç farklı nümerik analize ait parçacık sayıları ve çözüm süreleri

Sayısal Analiz No	SA1	SA2	SA3
Parçacıklar arasında başlangıç mesafesi (mm)	5	2.5	1.25
Toplam parçacık sayısı	46500	186000	744000
Toplam analiz süresi (s)	952	4839	27984

Sonuç olarak EPH metodunun mansap kısmında bir engel bulunan baraj yıkılması akımının karmaşık dinamiğini makul doğrulukta modelleyebildiği görülmektedir. Ancak EPH yönteminin parçacık çözünürlüğü ve yapay viskozite teriminin yanı sıra diğer belirlenen parametrelere hassasiyetinin detaylı bir şekilde irdelenmesinin yüksek önem arz ettiği ve bu parametrelerin elde edilecek sonuçlar üzerinde dramatik farklılıklara neden olabileceği gerçeğinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Teşekkür

Yazar çalışmanın hazırlanması esnasında yaptığı yardımlarından dolayı Arş. Gör. Ada Yılmaz'a teşekkür etmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] F. Aureli, A. Maranzoni, P. Mignosa, and C. Ziveri, Dam-break flows: Acquisition of experimental data through an imaging technique and 2D numerical modeling. *J. Hydraul. Eng.*, 134(8), 1089–1101, 2008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339429\(2008\)134:8\(1089\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339429(2008)134:8(1089))
- [2] S. Kocaman, and H. Ozmen-Cagatay, The effect of lateral channel contraction on dam break flows: Laboratory experiment. *J. Hydrol.*, 432–433, 145–153, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.035>
- [3] H. Ozmen-Cagatay, S. Kocaman, and H. Guzel, Investigation of dam-break flood waves in a dry channel with a hump. *J. Hydro-Environment Res.*, 8(3), 304-315, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2014.01.005>
- [4] H. Ozmen-Cagatay, and S. Kocaman, Dam-break flow in the presence of obstacle: Experiment and CFD simulation. *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.*, 5(4), 541/552, 2011. <https://doi.org/10.1080/19942060.2011.11015393>.
- [5] H. Ozmen-Cagatay, and S. Kocaman, Investigation of dam-break flow over abruptly contracting channel with trapezoidal-shaped lateral obstacles. *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, 134(8), 2012. <https://doi.org/10.1115/1.4007154>.
- [6] S. Soares-Frazão, and Y. Zech, Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle. *J. Hydraul. Res.*, 45, 27-36, 2007. <https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521830>.
- [7] M. İlkentapar, and A. Öner, Geniş başlıklı savak etrafındaki akımın incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, 6, 615–626, 2017.
- [8] M. Aydın, and C. Kaplan, İlisu barajı dolusavak havalandırıcısı performans analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, 8, 902-911, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.598248>
- [9] A. Issakhov, Y. Zhandaulet, and A. Nogaeva, Numerical simulation of dam break flow for various forms of the obstacle by VOF method. *Int. J. Multiph. Flow*, 109, 191-206, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.08.003>
- [10] S. Kocaman, and H. Ozmen-Cagatay, Investigation of dam-break induced shock waves impact on a vertical wall. *J. Hydrol.*, 525, 1-12, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.040>
- [11] H. Ozmen-Cagatay, and S. Kocaman, Dam-break flows during initial stage using SWE and RANS approaches. *J. Hydraul. Res.*, 48(5), 603-611, 2010. <https://doi.org/10.1080/00221686.2010.507342>
- [12] A. Yilmaz, K. Dal, M. Demirci, and S. Kocaman, Numerical investigation of dam-break flow over a bottom obstacle using eulerian finite element method. *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.*, 4(12), 203–208, 2017. <https://doi.org/10.22161/ijaers.4.12.30>
- [13] R. Gingold, and J. J. Monaghan, Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 181, 375–189, 1977. <https://doi.org/10.1007/s00769-003-0757-y>
- [14] L. B. Lucy, A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astron. J.*, 82(12), 1013–1024, 1977.
- [15] A. J. C. Crespo, M. Gómez-Gesteira, and R. A. Dalrymple, Modeling dam break behavior over a wet bed by a SPH technique. *J. Waterw. Port. Coast. Ocean Eng.*, 134(6), 313–320, 2008. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733950x\(2008\)134:6\(313\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733950x(2008)134:6(313))
- [16] K. Dal, S. Evangelista, A. Yilmaz, and S. Kocaman, Validation of dam-break problem over dry bed using SPH. *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.*, 4(12), 209–213, 2017. <https://doi.org/10.22161/ijaers.4.12.31>
- [17] R. A. Dalrymple, and B. D. Rogers, Numerical modeling of water waves with the SPH method. *Coast. Eng.*, 53(2–3), 141-7, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.10.004>
- [18] M. Gomez-Gesteira, and R. Dalrymple, Using a three-dimensional smoothed particle hydrodynamics method for wave impact on a tall structure. *J. Waterw. Port. Coastal, Ocean Eng.*, 130(2), 63–69, 2004.
- [19] S. Kocaman, Baraj yıkılması probleminin deneysel ve teorik olarak incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana*, 2007.
- [20] A. J. C. Crespo, DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on smoothed particle hydrodynamics (SPH). *Comput. Phys. Commun.*, 187, 204–216, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2014.10.004>
- [21] H. Wendland, Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree. *Adv. Comput. Math.*, 4, 389–396, 1995.
- [22] J. J. Monaghan, Smoothed particle hydrodynamics, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 30, 543–574, 1992.
- [23] G. K. Batchelor, An introduction to fluid mechanics. UK: Cambridge University Press, 1974.
- [24] A. J. C. Crespo, M. Gomez-Gesteira, and R. A. Dalrymple, Boundary conditions generated by dynamic particles in SPH methods. *Comput. Mater. Contin.*, 5(3), 173–184, 2007.
- [25] B. J. Leimkuhler, S. Reich, and R. D. Skeel, Integration methods for molecular dynamics, in mathematical approaches to biomolecular structure and dynamics. Springer., New York, 185.



Nano parçacık silisyum dioksit (SiO₂) ile yüksek fırın cürufu karışımının kompaksiyon özelliklerine etkisi

Effects of the mixture of nanoparticle silicon dioxide (SiO₂) with blast furnace slag on the compaction characteristics

Firdevs Uysal^{1,*} , Vedat Yılmaz¹ 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Özet

Bu çalışma, silisyum dioksit (SiO₂) nanoparçacıkları ile yüksek fırın cürufu karışımının ince daneli zemin stabilizasyonundaki etkisini araştırmaktadır. Bu çalışmanın ana amacı, SiO₂ nanoparçacıkları ve yüksek fırın cürufu kullanarak stabilize edilmiş ince daneli zeminin kompaksiyon özelliklerini (maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği) değerlendirmektir. Stabilize edilmiş ince daneli zeminlerin kompaksiyon özelliklerini elde etmek için standart proktor testleri yapılmıştır. Zeminin farklı yüksek fırın cüruf yüzdeleri (%10, %20, %30 ve %40) ve küçük miktarlarda (%1 ve %1.5) SiO₂ nanoparçacıkları ile karıştırıldığı iki farklı tip numune hazırlanmıştır. Yüksek fırın cürufunun etkisi ve SiO₂ nanoparçacıklarının yüksek fırın cürufu ile karışımının etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Test sonuçları, yüksek fırın cüruf içeriğindeki artışla birlikte maksimum kuru yoğunlukta bir düşüş olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, zemine yüksek fırın cürufu ile SiO₂ nanoparçacıklarının eklenmesi maksimum kuru yoğunluğu arttırmıştır. Elde edilen sonuçlar küçük miktarlardaki SiO₂ nanoparçacıklarının genellikle kompaksiyon özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Zemin stabilizasyonu, Kompaksiyon özellikleri, Nanoparçacık silisyum dioksit (SiO₂), Yüksek fırın cürufu, İnce daneli zemin

1 Giriş

Zemin stabilizasyonu, mühendis ve tasarımcıların zayıf zemin özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla çeşitli katkı malzemelerinin zemine ilave edilmesi şeklinde uyguladıkları en yaygın yöntemlerdendir [1].

Günümüzde nanomalzeme ve nanoparçacıkların özellikle inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımı araştırmacıların ilgisini oldukça arttırmaktadır [2]. Nanoparçacıklar, nanokristaller olarak adlandırılmakta ve boyutu genellikle 1-100 nm aralığında değişmektedir [3]. Küçük dane boyutlarına sahip nanomalzemelerin büyük özgül yüzey alanları vardır. Bu özelliği nedeniyle zemin içinde oldukça az miktarda kullanımı bile zeminin morfolojik yapısında değişimlere neden olmaktadır. Nanomalzemelerin bu etkisi zeminlerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla nano teknolojinin kullanımı yaygınlaştırmaktadır [4]. Khalid vd. [5] çok az miktarlarda kullanılan nanoparçacıkların kaolenin temel mühendislik özelliklerinde önemli ölçüde değişime neden olduğunu vurgulamıştır. Khalid vd. [6], nanozemin kullanarak yumuşak zeminin dayanım ve kıvam

Abstract

This study investigates the effect of using the mixture of silicon dioxide (SiO₂) nanoparticles with blast furnace slag in fine grained soil stabilization. The main motive of this study is to evaluate the compaction characteristic (maximum dry density and optimum water content) of stabilized fine-grained soil using SiO₂ nanoparticles and blast furnace slag. The standard proctor tests were conducted to obtain compaction characteristics for stabilized fine-grained soils. Two different types of samples were prepared in which soil was mixed with different blast furnace slag percentages (10%, 20%, 30%, and 40%) and small amounts (1% and 1.5%) of SiO₂ nanoparticles. The effect of the blast furnace slag and the mixture of SiO₂ nanoparticles with blast furnace slag were investigated, separately. The test outcomes revealed that a decrease in maximum dry density with the increase in blast furnace slag content. Moreover, the addition of SiO₂ nanoparticles with blast furnace slag to the soil increased the maximum dry density. The obtained results show that the small amount of SiO₂ nanoparticles generally improves compaction characteristics.

Keywords: Soil stabilization, Compaction characteristics, Nanoparticle silicon dioxide (SiO₂), Blast furnace slag, Fine-grained soil

limitlerindeki değişimi araştırmıştır. Yumuşak zemine %2, %3 ve %4 oranlarında nanozemin ilave edilmesinin kayma dayanımını arttırdığı belirtilmiştir. Ancak aynı oranlarda nanozemin ilavesinden sonra zemin plastisitesinde düşüş tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda çok az miktarlarda kullanılan nano zeminin yumuşak zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirme ve geliştirmede etkili olduğu belirtilmiştir. Ghazi vd. [7], çimento ve %2 oranında kullanılan SiO₂ nanoparçacıklarının killi zeminlerin basınç dayanımını %46 oranında arttırdığını belirtmiştir. Taha [8], nanoparçacıkların zemin stabilizasyonuna etkisini araştırmak için çeşitli laboratuvar deneyleri yapmış ve bu malzemelerin, zemin iyileştirmede kullanılabilecek mükemmel bir katkı adayı olduğunu vurgulamıştır. Ghasabkolaei vd. [9], %9 çimento ile farklı oranlarda SiO₂ nanoparçacıklarını karıştırarak zeminin kıvam limitleri, basınç dayanımı ve CBR değerlerindeki değişimini araştırarak, kullanılan malzemelerin bu parametrelerin iyileştirmesindeki performansını değerlendirmiştir. Zemine eklenen SiO₂ ile killi zeminin basınç dayanımının arttığı, ayrıca %1.5 SiO₂ ve çimentonun 28 günde basınç dayanımı %38 arttırdığı belirtilmiştir. Çalışmada yapılan SEM ve

* Sorumlu yazar / Corresponding author, firdevsuysal@ohu.edu.tr (F. Uysal)

Geliş / Received: 23.10.2020 Kabul / Accepted: 07.12.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngmuh.815399

AFM analizlerinin deneysel sonuçları desteklediği, SiO₂ nanoparçacıklarının da zemin iyileştirmesinde kullanılabileceğini vurgulanmıştır. Nohani ve Alimakan [10], farklı oranlarda (%0.5, %1, %1.5 ve %2) nanokil kullanarak kıvam limitleri, CBR, drenajsız üç eksenli basınç ve kompaksiyon deneyleri yapmıştır. Zemine nanokil eklenmesi ile kıvam limitlerinin arttığı, drenajsız dayanım ve CBR değerlerindeki en iyi sonucun zemine %1.5 oranında nanokil eklenmesi ile elde edildiği belirtilmiştir. Ancak, nanokil oranının %1.5'dan %2'ye çıkarılması durumunda hem drenajsız dayanım hem de CBR değerlerinde azalma görüldüğü tespit edilmiştir. Priyadharshini ve Arumairaj [11], farklı nanomalzemeler (nanokil, nanoMgO, nanoalümina) kullanarak standart laboratuvar deneyleri yapmış ve bu malzemelerin zemin stabilizasyonundaki etkinliğini araştırmıştır. Nanokilin artması ile kıvam limitlerinde artış gözlemlenirken, nanoMgO ve nanoalümina miktarlarındaki artışın kıvam limitlerini azalttığı tespit edilmiştir. Nanokil ve nanoalümina miktarındaki artış optimum su içeriğini arttırmış ve kuru birim hacim ağırlık değerlerini azaltmıştır. NanoMgO oranındaki artış ise optimum su içeriğini azaltarak kuru birim hacim ağırlık değerini arttırmıştır. Drenajsız dayanımda ise, %1 nanokil ile %48, %0.3 nanoMgO ile %41 ve %0.75 nanoalümina ile de %43 oranında artış gözlemlenmiştir. Sonuç olarak nanoMgO'in diğer iki malzemeye göre oturmaların azaltılması ve taşıma gücü değerinin artırılmasında daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Literatür çalışmaları incelendiği zaman nanomalzemelerin az miktarda kullanılması durumunda da zemin özelliklerinde oldukça etkili sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Ancak, bu malzemelerin alanda kullanımını yaygınlaştırmak için daha fazla araştırma yapılması gerektiği de oldukça açıktır. Bu çalışma kapsamında yapılan deneysel araştırmaların nanomalzemelerden SiO₂ nanoparçacıklarının kullanımının yaygınlaştırılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada doğal ince daneli zemine farklı oranlarda (%10, %20, %30 ve %40) yüksek fırın cürufu (YFC) ve YFC'ye farklı oranlarda (%1 ve % 1.5) SiO₂ nanoparçacıkları ilave edilerek zeminin kompaksiyon parametreleri olan kuru birim hacim ağırlık (γ_k) ve optimum su içeriği (w_{opt}) değerlerindeki değişim araştırılmıştır. Çalışma sonucunda ince daneli zemine sadece YFC ilave edilmesi durumunda zeminin kompaksiyon özelliklerinde beklenen iyileşme gerçekleşmemiştir. Ancak, YFC ile birlikte kullanılan küçük miktarlardaki SiO₂ nanoparçacıklarının kompaksiyon özelliklerinden γ_k 'nın iyileştirilmesinde oldukça etkili olduğu tespit edilmiştir.

2 Materyal ve metot

Deneysel çalışmaların ilk adımı olarak kullanılan malzemelerin çeşitli mühendislik özellikleri tespit edilmiştir. Doğal zeminin sınıfı Birleşik Zemin Sınıflama Sistemine (USCS) göre CH olarak tespit edilmiştir. Plastik limit değeri ASTM D 4318 [12] ve likit limit değeri de BS 1377-2 [13] standartlarına uygun olarak elde edilmiştir (Tablo 1). Doğal zeminin özgül ağırlığı 2.55, YFC'nin özgül ağırlığı ise 2.05 olarak belirlenmiştir. SiO₂ nanoparçacıklarının boyutu

28nm'dir. YFC'nin dane boyutu dağılımı da Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Doğal zeminin özellikleri

Sınıfı (USCS)	CH
Likit limit (%)	104
Plastik limit (%)	26
Plastisite İndisi	78

SiO₂ nanoparçacıkları, doğal zemin ve YFC'nin kimyasal içeriğinin tespiti için XRF (X-Ray Fluorescence) analizleri yapılmıştır (Tablo 2 ve 3). Ayrıca ticari bir firmadan temin edilen SiO₂ nanoparçacıklarının fiziksel özellikleri de Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 2. SiO₂ nanoparçacıklarının kimyasal içeriği

	(%)
Si	>97
Fe	0.002
Ca	0.007
Ti	0.012
Na	0.003
Diğer	<0.01

Tablo 3. Doğal zemin ve YFC'nin kimyasal içeriği

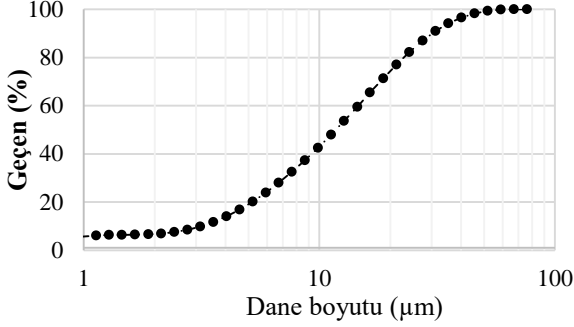
	Doğal Zemin	YFC
	(%)	(%)
SiO ₂	77.186	36.824
Al ₂ O ₃	15.928	13.314
Fe ₂ O ₃	1.646	0.727
CaO	2.504	38.834
MgO	0.715	5.648
K ₂ O	0.647	0.777
TiO ₂	0.337	0.761
SO ₃	0.142	0.562
Mn ₃ O ₄	0.039	1.17
Na ₂ O	0.668	-
ZnO	-	0.001
Cr ₂ O ₃	-	0.005
V ₂ O ₅	-	0.016
BaO	0.084	0.157
P ₂ O ₅	0.111	0.009
SrO	0.045	-

SiO₂ nanoparçacıkları, doğal zemin ve YFC'nin mikro yapısını görmek için SEM (Taramalı Elektron mikroskobu) analizleri yapılarak Şekil 2'de sunulmuştur.

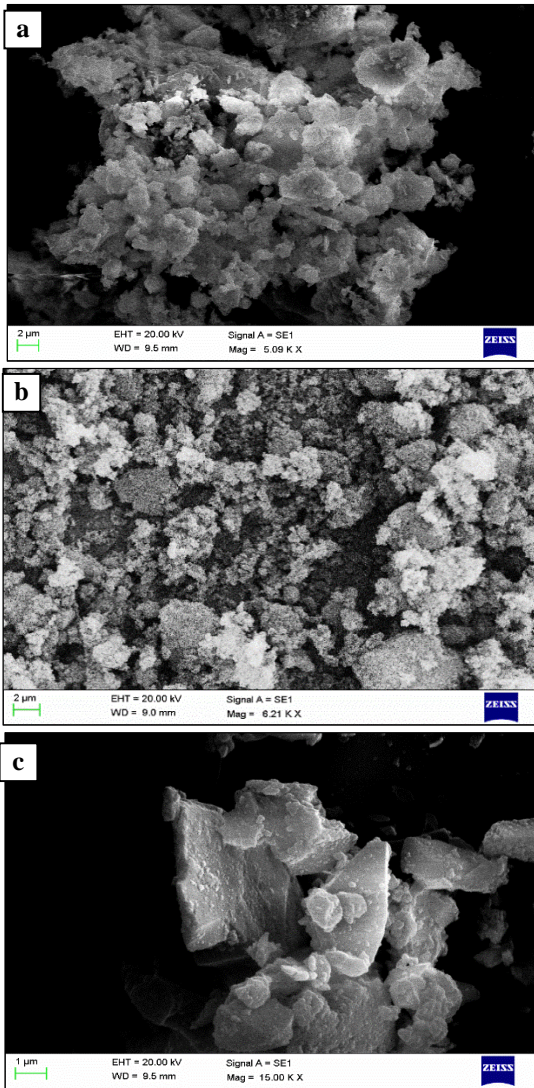
SiO₂ nanoparçacıkları zemine ilave edilmeden önce kullanılan oranlarda (%1 ve % 1.5) ayrı ayrı solüsyonlar hazırlanarak ultrasonik banyo cihazında bekletilmiş ve nanomalzemenin suda homojen olarak dağılması sağlanmıştır (Şekil 3).

Tablo 4. SiO₂ nanoparçacıklarının fiziksel özellikleri

Safılık (%)	99.5
Renk	Beyaz
Kitle yoğunluğu (g/cm ³)	<0.1
Gerçek yoğunluk (g/cm ³)	2.2
Dane boyutu (nm)	28
Özgül yüzey alanı (m ² /g)	150-550



Şekil 1. Yüksek fırın cürufunun dane dağılım eğrisi [14]



Şekil 2. SEM Görüntüleri; (a) doğal zemin (b) SiO₂ nanoparçacığı (c) yüksek fırın cürufu



Şekil 3. Ultrasonik banyo

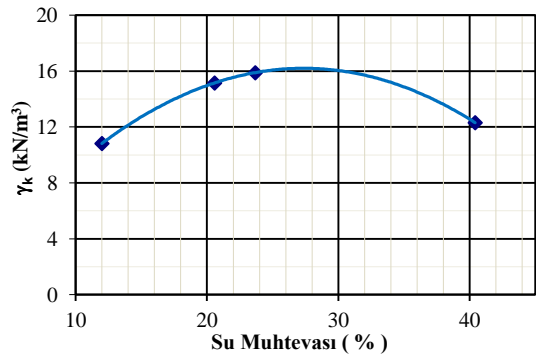
Kompaksiyon deneyleri ASTM D 698 [15] standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Bu deneyler, doğal zemine ağırlıkça farklı oranlarda (%10, %20, %30 ve %40) ilave edilmiş sadece YFC ile, son olarak da aynı YFC oranlarına ağırlıkça %1 ve %1.5 SiO₂ nanoparçacıkları karıştırılarak gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde sadece YFC ve YFC ile SiO₂ nanoparçacıklarının birlikte kullanılması ile kompaksiyon özelliklerinin değişimi araştırılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler iki seri olarak tamamlanmıştır. İlk seri deneylerde sadece YFC, ikinci seri deneylerde ise YFC ile SiO₂ nanoparçacıkları karışımlarının ince daneli zeminin maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği değerlerindeki değişime etkisi araştırılmıştır.

3.1.1. Seri Deneyler

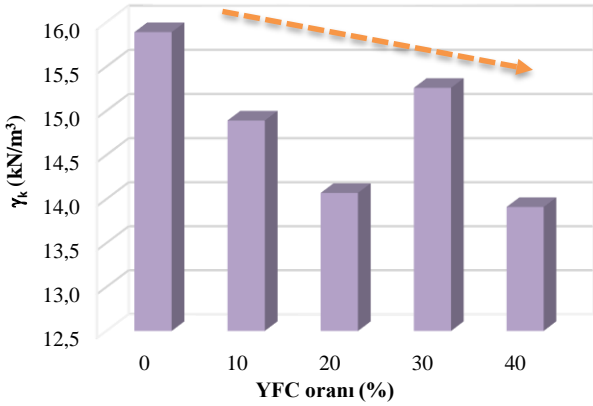
İlk seri deneylere başlamadan önce sadece doğal zemin için kompaksiyon deneyi yapılarak örnek sıkışma eğrisi olarak sunulmuştur (Şekil 4). Sonraki aşamada YFC'nin etkisini görmek için literatürden seçilen %10, %20, %30 ve %40 oranlarında YFC zemine karıştırılarak deneyler tamamlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5 ve 6'da verilmiştir.



Şekil 4. Doğal zeminin kompaksiyon eğrisi

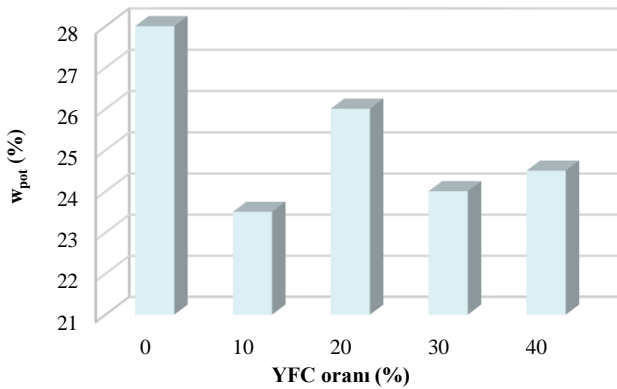
YFC'nin artan oranları ve γ_k değişimi incelendiği zaman genel eğilim olarak kuru birim hacim ağırlık değerinde azalma olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 5). Optimum su içeriğindeki artış ve azalmalara paralel olarak da birim hacim ağırlık değerlerinde değişimler gözlemlenmiştir (Şekil 5 ve

6). YFC'nin %30 oranında γ_k belirgin bir şekilde artış yaparken w_{opt} değeri de düşüş göstermektedir. Sharma ve Sivapullaiah [16] artan oranlarda YFC ile hem γ_k , hem de w_{opt} değerlerinde düşüş tespit etmiştir. Araştırmacılar bu çalışmada elde edilen %30 YFC oranındaki artışı kendi çalışmalarında %60 olarak belirlemiştir. Araştırmacılar bu durumu zemin tarafından tutulan suyun artan YFC oranı ile azalmasından dolayı zeminin yeterince sıkıştırılmaması olarak yorumlamıştır. Benzer sonuçlar Zhang vd. [17] tarafından elde edilmiştir. Bu çalışmada da katkı malzemesi ile hidrasyonun başladığı ve zemin içinde topaklanmaların meydana geldiği, bu nedenle de istenen sıkışmanın sağlanmadığı belirtilmiştir.



Şekil 5. Artan YFC oranları ile γ_k değişimi

Bu çalışmada yapılan ilk seri deney sonuçları incelendiği zaman YFC'nin kompaksiyon özelliklerinin iyileştirilmesinde beklenen etkiyi göstermediği gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeninin YFC'nin özgül ağırlığının doğal zemine göre daha az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

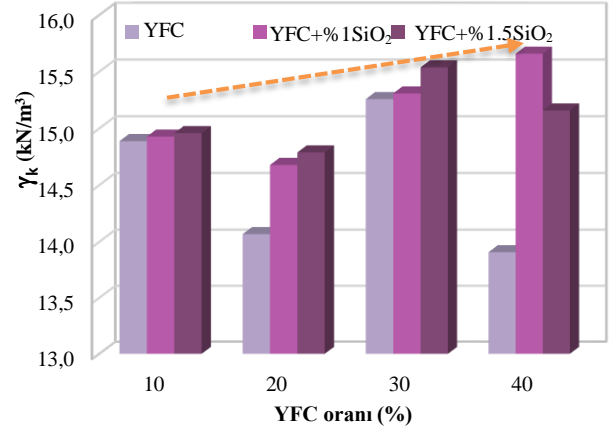


Şekil 6. Artan YFC oranları ile w_{opt} değişimi

3.2. II. Seri Deneyler

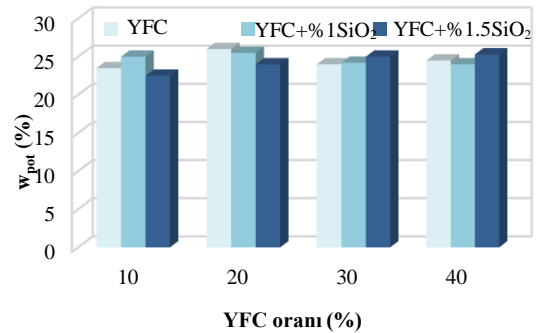
İkinci seri deneylerde YFC ile birlikte SiO₂ nanoparçacıkları karışımlarının kompaksiyon parametrelerine etkini araştırmak için literatürden seçilen %1 ve %1.5 oranlarındaki SiO₂ nanoparçacıkları, birinci

seride kullanılan oranlardaki (%10, %20, %30 ve %40) YFC ile ince daneli zemine karıştırılarak kompaksiyon deneyleri yapılmıştır (Şekil 7 ve 8).



Şekil 7. YFC ile SiO₂ nanoparçacıklarının γ_k ile değişimi

Yapılan deneysel çalışmalarda tüm YFC oranları için, %1 ve %1.5 SiO₂ nanoparçacıklarının YFC ile birlikte kullanılması durumunda γ_k 'yı belirgin bir şekilde arttırdığı tespit edilmiştir (Şekil 7). Sonuçlar, nano malzemelerin çok küçük miktarlarda kullanımının bile zemin özelliklerinin iyileştirilmesinde etkili olduğunu göstermektedir. Deneysel çalışmalarda her bir YFC oranı kendi arasında değerlendirildiğinde optimum su içeriğinde belirgin bir değişim gözlemlenmezken, %10, %20 ve %30 YFC oranlarında artan SiO₂ nanoparçacıklarının γ_k 'yı arttırdığı yani kompaksiyon özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Ancak %40 YFC oranında ise %1 oranında SiO₂ nanoparçacıklarının YFC ile birlikte kullanımında oldukça belirgin bir sıkışma sağlanırken, %1.5 oranında azalma gözlemlenmiştir. Benzer şekilde Malik vd. [18] de artan SiO₂ oranları ile γ_k 'da azalma tespit etmiştir. Artan YFC oranları birbiri ile karşılaştırıldığı zaman ise, genel olarak YFC oranının artması ile SiO₂ nanoparçacıklarının etkinliğinin arttığı görülmüştür.



Şekil 8. YFC ile SiO₂ nanoparçacıklarının w_{opt} ile değişimi

4 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında yapılan ilk seri deneylerde doğal ince daneli zemine dört farklı oranda (%10, %20, %30 ve %40) YFC ilave edilerek kompaksiyon parametreleri (γ_k ve

w_{opt}) değerlendirilmiştir. Çalışmada özellikle nano malzemelerin kullanımının yaygınlaştırılması hedeflendiği için aynı YFC oranlarına iki farklı oranlarda (%1 ve %1.5) SiO_2 nanoparçacıkları ilave edilerek yine zeminin kompaksiyonuna olan etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- İnce daneli zemine sadece artan oranlarda YFC ilave edilmesi durumunda zeminin kompaksiyon özelliklerinde beklenen iyileşme gözlemlenmemiştir.
- YFC'nin tüm oranlarında, YFC ile birlikte iki farklı oranda kullanılan SiO_2 nanoparçacıklarının kompaksiyon özelliklerinin iyileştirilmesinde oldukça etkili olduğu tespit edilmiştir.
- SiO_2 nanoparçacıklarının artması ile YFC'nin %10, %20 ve %30 oranlarında γ_k 'da iyileşme görülürken, %40 oranında azalma tespit edilmiştir. Bu durum nano malzemeler için efektif bir kullanım oranı olabileceğini düşündürmektedir. Ancak bu oranın tespiti için daha fazla araştırma yapılmalıdır.
- Kompaksiyon deneylerinde ağırlıkça çok küçük miktarlarda kullanılan SiO_2 nanomalzemesinin zeminin sıkışması üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] J. Alsharif, M. R. Taha, A. A. Firoozi and P. Govindasamy, Potential of using nanocarbons to stabilize weak soils. Applied and Environmental Soil Science, 5060531, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/5060531>.
- [2] U. Faheem, Clays, nanoclays, and montmorillonite minerals. Metallurgical and Material Transactions A, 39 (12), 2084-2814, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11661-008-9603-5>
- [3] C. Demetzos, Introduction to nanotechnology. in Pharmaceutical Nanotechnology, 3–15, Springer, Berlin, Germany, 2016.
- [4] A. Yeganeh Rikhtehgar, Investigating of effects of nano-materials and nano-polymers on clay. Master Thesis, Istanbul Technical University, Turkey, 2016.
- [5] N. Khalid, M. F. Arshad, M. Mukri. K. Mohamed and F. Kamarudin, The properties of nano-kaolin mixed with kaolin. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 19, 4247-4255. 2005.
- [6] N. Khalid, M. F. Arshad, M. Mukri, K. Mohamad and Kamarudin, F., Influence of nano-soil particles in soft soil stabilization. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 20, 731-738, 2015.
- [7] H. Ghazi, M. H. Baziar, and S. M. Mirkazemi, Assess of the improvement of the behavior of soil strength in the presence of nanoscale additive. Assas Journal Science and Technology, 1(1), 45–50, 2011.
- [8] M. R. Taha, Geotechnical properties of soil-ball milled soil mixture. Proc. 3rd Symp on Nanotechnology in Construction, Springer-Verlag, 377-382, 2009.
- [9] N. Ghasabkolaei, A. Janalizadeh, M. Jahanshahi, N. Roshan and S. E. Ghasemi, Physical and geotechnical properties of cement-treated clayey soil using silica nanoparticles: An experimental study. The European Physical Journal Plus 131(5), 134, 2016, <https://doi.org/10.1140/epjp/i2016-16134-3>
- [10] E. Nohani and E. Alimakan, The effect of nanoparticles on geotechnical properties of clay. International Journal of Life Sciences, 9(4), 25–27, 2015. <https://doi.org/10.3126/ijls.v9i4.12670>
- [11] R. Priyadarshini and P. D. Arumairaj, Improvement of bearing capacity of soft clay using nanomaterial's. International Journal of Scientific Research, 4(6), 2015.
- [12] ASTM D 4318, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. West Conshohocken, PA, USA, 2013.
- [13] BS 1377-2, Methods of test for soils for civil engineering purposes. Part 2, Classification Tests, BSI, 1990.
- [14] F. Uysal, V. Yılmaz ve H. M. Topçu, Farklı atık malzemeler ile stabilize edilmiş ince daneli zeminin mühendislik özellikleri. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35(1), 19-26, 2020.
- [15] ASTM D 698, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. Philadelphia, PA, 2007.
- [16] A. Kumar Sharma and P. V. Sivapullaiah, Improvement of strength of expansive soil with waste granulated blast furnace slag. State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering, 3920-3928, 2012. <https://doi.org/10.1061/9780784412121.402>.
- [17] Y. Zhang, W. Ye and Z. Wang, Study on the compaction effect factors of lime-treated loess highway embankments. Civil Engineering Journal 3, 1008, 2017. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-030933>.
- [18] A. Malik, S. O. Puri, N. Singla and S. Naval, Strength characteristics of clayey soil stabilized with nano-silica. In Recycled Waste Materials, 11-17, Springer, Singapore, 2019. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7017-5_2.



Cam elyaf takviyeli polyester (CTP) profillerden oluşan tek eğrilikli uzay kafes kirişlerin yapay sinir ağları ile analizi

Analysis of single-curved space cage beams consisting of glass fiber reinforced polyester(GFRP) profiles with artificial neural networks

Ahmet Arslan^{1,*} , Metin Hakan Severcan¹ 

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Özet

Bu çalışmada cam elyaf takviyeli polyester (CTP) malzeme kullanılarak üretilen profillerin tek eğrilikli uzay kafes sistemlerde kullanımı incelenmiştir. Farklı sistem davranışlarını görmek üzere 20 farklı sistem modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemlerde 12 farklı yüklemeye kullanılarak oluşturulan toplam 240 farklı model, SAP 2000 programı ile statik olarak analiz edilmiş ve AISC-ASD89' a göre de boyutlandırılmıştır. Boyutlandırılan çubuk elemanların minimum kesit alanı değerleri, 12 farklı girdi değişkeni kullanılarak yapay sinir ağları yönteminde geliştirilen model ile tahmin edilmiş ve analiz sonuçlarına yakın değerler elde edilmiştir. Bu çözümler sonunda Cam elyaf takviyeli polyester malzemenin yapı malzemesi olarak tek eğrilikli uzay kafes sistemlerde diğer yapı malzemelerine ikame olarak kullanılabilirliği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Cam elyaf takviyeli polyester, Tek eğrilikli uzay kafes sistemler, Yapay sinir ağları, AISC-ASD89

1 Giriş

Uzay kafes sistemler üç farklı düzlemde bulunan çubuk elemanların bir mafsal kürede birleşmesiyle oluşan ve sistem olarak üç doğrultuda da çalışan hiperstatik modüller sistemlerdir. Uzay kafes sistemler hafif, rijit ve hiperstatiklik derecesi yüksek olduğundan sistemdeki herhangi bir çubukta meydana gelebilecek bir kopma veya burkulmadan tüm yapı etkilenmemektedir. Bu sistemlerin hiperstatiklik derecelerinin yüksek olması, sistem içinde yük dağılımının sürekli olmasını sağlaması açısından bir avantajdır. Uzay kafes sistemler minimum malzeme ile maksimum verimin alındığı yapısal taşıyıcı sistemlerdir [1].

Uzay kafes taşıyıcı sistemler, temel biçimleri ve oluşum ilkeleri açısından incelenebilir. Bunlardan biri de tek eğrilikli tonoz şeklindeki uzay kafes sistemlerdir. Bu çalışmada yapı sistemi olarak tek eğrilikli uzay kafes sistemler kullanılmıştır.

20. yüzyılda, yapı sistemlerindeki hızlı ve olumlu gelişmeler neticesinde, yüksek yapıların yapılması ve büyük açıklıkların geçilmesinde tercih edilmiştir. Çeliğin ana malzeme olarak kullanıldığı bu yapı sistemlerinin başlıcası belki de en önemlisi uzay kafes sistemlerdir. Ülkemizin, bütün dünyanın en etkili deprem kuşaklarından birisi olan Kuzey Anadolu fay hattının üzerinde olmasından dolayı

Abstract

In this study, the use of profiles produced using glass fiber reinforced polyester (GFRP) material in single curvature space cage systems was investigated. 20 different system models are designed to see different system behaviors. A total of 240 different models created by using 12 different loadings in the designed systems were statically analyzed with the SAP 2000 program and designed according to AISC-ASD89. Using 12 different input variables, the minimum cross-sectional area values of the designed cage elements were estimated with the model developed in the artificial neural network method and values close to the analysis results were obtained. At the end of these solutions, it has been observed that glass fiber reinforced polyester material can be used as a building material as a substitute for other building materials in single curvature space cage systems.

Keywords: Glass fiber reinforced polyester, Single curvature space cage system, Artificial neural networks, AISC-ASD89

depreme dayanıklı yapı araştırmaları tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de önem kazanmıştır [2].

Deprem hareketi olarak bilinen ivme tam anlamıyla kontrol altına alınamamaktadır. Fakat yapı kütlelerinin hafifletilmesi ile orantılı olarak yapıya etkiyen deprem yükü azaltılabilir. Bu durum göz önüne alınarak, depreme dayanıklı yapı ihtiyacını karşılayabilmek için ikame teknolojik ürünler araştırılmaktadır. En son teknolojik ürünlerden birisi de, çelik yapı malzemesine göre daha hafif, korozyon dayanımı yüksek olan cam elyaf takviyeli polyester (CTP) malzemelerdir [3].

CTP uygulamalarının üstün yanları özetlenecek olursa en başta yüksek mukavemet gelmektedir. CTP yüksek mukavemete sahip malzemeler arasında en etkili olanlardan bir tanesidir. CTP'ler birim alan ağırlığına göre takviyesiz plastikler ve metallere göre çok daha yüksek mukavemet değerlerine sahiptir.

CTP ürünlerin tüm meslek grupları tarafından yaygın olarak kabul görmesinin en önemli nedeni sağlamış olduğu yüksek performanstır. CTP malzemeler hem tüketicilerin hem de üreticilerin kullanımında çeşitli yararlar sağlamaktadır.

Yapay sinir ağları (YSA) yöntemleri son yıllarda birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [4]. Özellikle inşaat mühendisliği

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ahmetarslan@hotmail.com (A. Arslan)

Geliş / Received: 23.10.2020 Kabul / Accepted: 02.12.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021
doi: 10.28948/ngmuh.815736

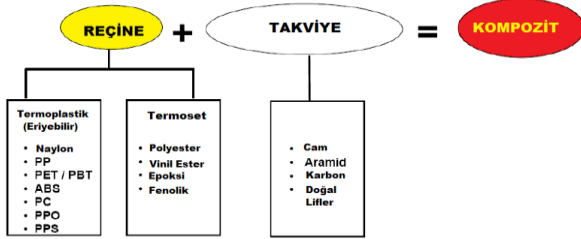
uygulamalarında çok yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Daha önce yapılmış deneysel ya da teorik çalışmalardan yararlanılarak YSA ile geliştirilen modellerle birçok ham maddenin yâda sistemin özellikleri çok kısa bir zamanda tahmin edilebilmekte ve genelleştirme yapılabilmektedir.

Bu çalışmada, uzay kafes sistemlerde çelik yapı malzemesi yerine CTP yapı malzemesinin kullanımı incelenmiştir. Bu inceleme yapılırken de farklı sistem davranışlarını görmek üzere, 20 farklı sistem modeli tasarlanmıştır. Bu tasarlanan sistemlerde 12 farklı yüklemle kullanılarak toplam 240 farklı modelin, SAP 2000 [6] programı ile statik analizi yapılmış ve AISC-ASD89' e [7] göre de boyutlandırılmıştır. Yapılan analiz ve boyutlandırma sonucunda elde edilen teorik sonuçlar kullanılarak YSA'da modeller geliştirilmiş ve geliştirilen modellerle daha farklı sistemlerin çözümlerinin çok kısa bir zamanda tahmin edileceği görülmüştür.

2 Materyal ve metod

2.1 Cam elyaf takviyeli polyester profiller

İki ya da daha fazla farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip malzemelerin birleştirilmesiyle elde edilen ürün kompozit malzeme olarak tanımlanır [8]. Günümüzde en fazla kullanılan lifli kompozit malzemelerin başında cam fiber takviyeli reçine, karbon fiber ve cam elyaf takviyeli polyesterlerdir. Şekil 1'de verilmiş olduğu gibi kompozitler takviye (reinforcement) ve reçine (matrix) bileşenleriyle oluşturulur. Bu malzeme türüne en genel örnek, "fiberglass" olarak bilinen cam fiber takviyeli polyesterdir [9].



Şekil 1. Kompozit malzeme bileşenleri

Kompozit malzemelerin en yaygın kullanılanı elyaf takviyeli kompozitlerdir. Bu kompozitler malzemelerde de takviye malzemesi olarak cam tercih edilmiştir. Plastik reçineler en yaygın olarak kullanılan matris malzemesidir. Plastik reçineler içerisinde de maliyetinden dolayı polyester tercih edilmektedir. Epoksi reçine ise yüksek gerilme dayanımı ve kimyasal dayanıklılığından dolayı yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır [10].

Bu çalışmada yapı malzemesi olarak seçilen cam elyaf takviyeli polyester malzeme, Pultrüzyon üretim yöntemi ile üretilen malzemeden seçilmiştir.

2.1.1 Pultrüzyon yöntemi

Profillerin yapı sisteminde taşıyıcı eleman olarak kullanılabilmesi için gereken gerilme kuvvetlerine karşı direnç gösterebilmesi ve ekonomik bir biçimde üretebilmek için pultrüzyon yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemle boru, kutu, L, T, I ve U profillerine ek olarak düzgün şekilli olmayan profiller de üretilmektedir [9].

Pultrüzyon yöntemi, malzemenin kalıp boyunca çekilerek üretilmesi dışında, termoplastik ve alüminyumun imal edilmesinde kullanılan ekstrüzyon imalat sürecine benzemektedir. Pultrüzyon da cam elyafı takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır. Dahası mütemadi fitil, keçe ya da bu malzemelerin kombinasyonlarının bir veya birkaçı birlikte kullanılmaktadır. Fitil sehpaları elyaf, fitil ve keçelerin sarılı olduğu bobinlerin bulunduğu kısımdır. Bu bölüm pultrüzyon makinesinden ayrı bir kısımdır ve buradaki elyaf bobinlerinin sayısı, önceden mekanik özellikleri belirlenen ve üretilmek istenen malzemeye göre değişiklik gösterir. Elyafın hacim oranları % 50 ile % 80 arasında değişiklik gösterebilir. Üretimde öncelikle termoset; reçine banyosundan geçirilir, daha sonra şekillendirme yapan kılavuzdan geçirilir. Daha önce ısıtılan çelik kalıp içinden geçirilerek, belirlenen kesitte sertleşmesi sağlanır. Kalıptan çıkan mamüller kesme aparatlarıyla belirtilen uzunluklarda kesilir ve üretim tamamlanır [11].

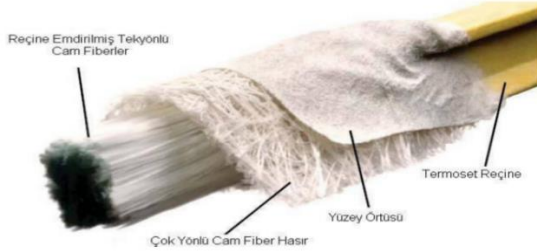
Bu yöntemde kullanılmakta olan reçine malzemesinin %90'ını polyesterler ve viniller oluşturmaktadır. Farklı performans özelliklerine sahip olması istenen malzemelerin kalıplanmasında epoksiler ile fenolik reçineler kullanılmaktadır. Fenolik reçineler, pultrüzyon üretim metodu ile üretilen mamüllere düşük duman yayma ve yanmazlık özelliklerini kazandırır. Epoksiler ise yüksek rijitlik, yüksek ısıya karşı dayanım ve yüksek elektriksel özellik performansını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra katkıları ve dolgu malzemeleri, ürüne farklı ve çeşitli özellikler kazandırmak, imalat karakteristiklerini geliştirmek ve üretim maliyetini düşürmek amacıyla pultrüzyon yönteminde kullanılmaktadır [9].

Pultrüzyon, yön verilmiş elyafların kullanıldığı bir yöntemdir. Elyaf malzemenin çoğunluğu optimum seviyede çekme dayanımı kazanacak şekilde boyuna yerleştirilir. Hem makineleşmiş hem otomatikleşmiş düşük bir imalat işçiliği mevcuttur. İşçilik toplam maliyetin %5 ile %10'u arasındadır. Bu yöntemde ilk tesis maliyeti diğer yüksek miktarda imalat yapılan yöntemlere göre daha düşüktür. Tüm bunlar düşünüldüğünde orta ve yüksek ölçekli uygulama alanları için bu yöntem ekonomik olmaktadır. Şekil 2'de pultrüzyon metodu ile üretilmiş bir profilin katmanları gösterilmiştir. Pultrüzyon üretim sürecinde elyaf ağırlıklı olarak çekme dayanımını arttıracak yönde yerleştirilmiş olmasından dolayı, çapraz kuvvetlere karşı mukavemeti düşüktür. Genellikle farklı yönler için sağlanan özellikler, çekme dayanımının %10 ile %25'i arasındadır. Pultrüzyon ürünleri genellikle rekabet halinde oldukları malzemelerle aynı rijitlik değerlerine sahip değillerdir. Bu durum rakip malzemelerin rijitlik değerlerine ulaşmak için kesitte ya da et kalınlığında tasarım değişikliklerinin yapılmasını zorunlu kılmaktadır [12].

2.2 Yapay sinir ağları

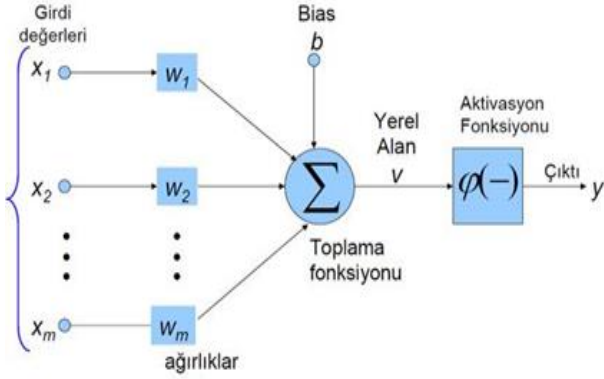
Yapay zekâ uygulamalarından biri olan yapay sinir ağları (YSA), insan beyninin çalışma yapısını taklit ederek mevcut verileri analiz edip, bu verilerden farklı öğrenme algoritmaları ile yeni bilgiler oluşturan bilgi işlem teknolojisidir. Genel olarak YSA insan beyninin biyolojik sinir yapısını taklit ederek sinirsel algılayıcılar yardımı ile

önceden öğrenilmiş ya da sınıflandırılmış bilgileri kullanarak yeni bilgiler türetebilen ve oluşturabilen, karar verebilen bilgisayar programlarıdır. Örüntü tanıma, sistem tanılama, robotik, sinyal işleme, nonlineer denetim alanları gibi birçok uygulama alanında yapay sinir ağları yaygın olarak kullanılmaktadır [13].



Şekil 2. Pultrüzyon metodu ile üretilmiş profil detayı

Teknik açıdan yapay sinir ağının görevi, girdi seti olarak kendisine verilen bilgilere karşılık Şekil 3’de verildiği gibi bir çıktı üretebilmektir. Bunun yapılabilmesi için ağ belirli örneklerle eğitilir. Sonra ağ genelleme yapabilecek ve karar verebilecek seviyeye kavuşur. Daha sonra bu kazanılan yetenek ile çıktıları belirler [14]. Bu çıktıların doğruya en yakın sonucu verebilmesi için girdilerin çeşitliliği ve sayısı çok önemlidir. Girdi değeri ne kadar fazla ve çeşitli ise doğru çıktıya ulaşma oranı o kadar yüksektir. YSA, paralel dağıtılmış ağlar, bağlantılı ağlar, nuromorfik ağlar gibi adlarla da tanımlanmaktadır.



Şekil 3. Yapay sinir ağı örneği

2.3 Tek eğrilikli uzay kafes sistemlerin analizi ve boyutlandırılması

Cam elyaf takviyeli polyester profiller kullanılarak oluşturulan tek eğrilikli uzay kafes sistem çubuklarının standart kesit alanları için farklı sistemlere ve çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebepten dolayı öncelikle sistem modül şekli ve sayısı sabit olması koşulu ile sistem açıklıkları ve yükseklikleri değiştirilerek 20 farklı sistem ölçüsü belirlenmiştir. Sistemlerin modül sayısı ve mimarisi aynı olduğu için sistem uzunluğu modüldeki çubuk elemanların uzaması ya da kısılmasına bağlı olarak değişmektedir. Seçilen sistem ölçüleri Tablo 1’de belirtilmiştir.

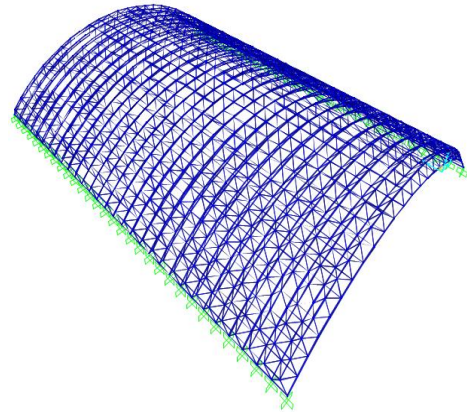
Sistemler Şekil 4’de görüldüğü gibi tonoz biçiminde tek eğrilikli bir uzay kafes sistemler olup, sistem geometrisi gereği her düğüm noktası için çatı düzlemi açıları değişmektedir. Sistemlerin kendi içerisinde değişen çatı eğimlerinden dolayı Şekil 5’de görüldüğü gibi 24 düğüm noktasına gelen yükler ayrı ayrı hesaplanmıştır. Yük hesapları yapıp belirlendikten sonra SAP 2000 v16 [6] programı kullanılarak sistemlerin statik analizleri ve boyutlandırılmaları yapılmıştır.

Tablo 1. Örnek sistemlerin ölçüleri

S.No	Genişlik	Yükseklik	Uzunluk	Modül genişliği	Modül yüksekliği
1	40.0	10.0	56.50	1.883	1.017
2	45.0	10.0	62.07	2.069	1.021
3	40.0	12.0	59.55	1.985	1.051
4	45.0	12.0	64.83	2.161	1.090
5	50.0	12.0	70.00	2.333	1.195
6	50.0	15.0	74.37	2.479	1.301
7	55.0	12.0	75.42	2.517	1.319
8	55.0	15.0	79.53	2.651	1.405
9	60.0	15.0	84.81	2.827	1.495
10	60.0	17.5	88.47	2.949	1.570
11	65.0	15.0	90.24	3.008	1.585
12	65.0	17.5	95.67	3.189	1.650
13	70.0	17.5	98.94	3.298	1.739
14	70.0	20.0	102.57	3.419	1.814
15	75.0	17.5	104.37	3.479	1.829
16	75.0	20.0	107.61	3.587	1.984
17	80.0	20.0	113.07	3.769	1.983
18	80.0	22.5	116.67	3.889	2.068
19	85.0	20.0	118.50	3.950	2.083
20	85.0	22.5	121.89	4.063	2.148

“Ölçüler m’dir”

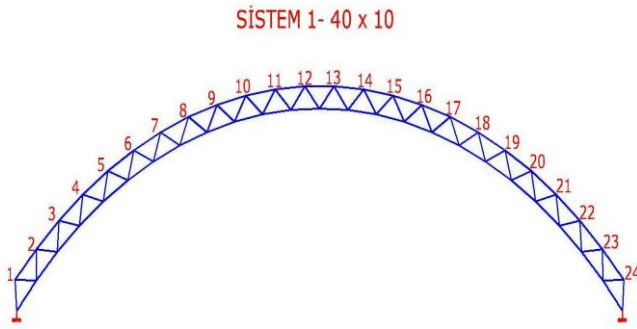
Bu çalışmada yüklem değerleri ile ilgili kabuller için TS 498’den [15] yararlanılmıştır. Aynı olan her sistem için 4 farklı yüklem bölgesi seçilmiştir. Bu seçilmiş olan yüklem bölgelerinde de yine 3 ayrı rüzgâr yükü hesaplanmıştır. Bu şekilde 20 farklı sistem için 4 ayrı yüklem bölgesi ve bunlar içinde 3 ayrı rüzgâr yükü ile birlikte 240 farklı sistem analiz edilmiş ve kesitleri belirlenmiştir.



Şekil 4. Örnek sistem 3D görüntüsü

Tablo 2. Örnek sistem kesit girdileri ve analiz sonuçları

Kesit numarası	En	Yükseklik	Boy	Rüzgar yükü	Kar yükü	Tasarım ivme katsayısı		Kesit	Kesit boyu	P (kuvvet)	Kesit kapasite kullanımı	Kesit alanı
				Kg/m ²	Kg/m ²	S _{DS}	S _{D1}					
1	40	10	56.5	80	75	0.72	0.23	P7	1.88	-1142.3	58	8.31
2	40	10	56.5	80	75	0.72	0.23	P 10	1.88	-13137.1	81	20.55
3	40	10	56.5	80	75	0.72	0.23	P7	1.68	-1614.0	64	8.31
4	40	10	56.5	80	75	0.72	0.23	P6	1.88	-818.1	86	6.50
5	40	10	56.5	80	75	0.72	0.23	P8	1.68	-2557.2	57	10.80
6	40	10	56.5	80	75	0.72	0.23	P6	1.88	-846.7	89	6.50
7	40	10	56.5	80	75	0.72	0.23	P 10	1.88	-13995.6	87	20.55
8	40	10	56.5	80	75	0.72	0.23	P7	1.68	-1744.5	70	8.31
9	40	10	56.5	80	75	0.72	0.23	P8	1.95	-1925.0	59	10.80
10	40	10	56.5	80	75	0.72	0.23	P6	1.88	-726.5	76	6.50



Şekil 5. Örnek sistem 2D görüntüsü

Her sistem için ayrı şekilde hesaplanan ve aşağıda belirtilen yükler kullanılmıştır.

- Zati yük: Uzak kafes sistemin taşıyıcı ve yardımcı elemanlarının zati ağırlıklarıdır.
- Kaplama + aşık yükü: Aşık ve çatı kaplaması zati yükleri hesaplanarak sistemin çatı ile temas halinde olduğu düğüm noktalarından düşey yük olarak etki ettirilmiştir.
- Tesisat Yükü: Uzak kafes sistem üzerindeki mimari açıdan kullanıma hizmet eden aydınlatma, havalandırma kanalları ve tesisatların sistemde oluşturduğu yüklerdir.
- Kar Yükü: Uzak kafes sistemin yapılacağı bölgeye göre TS 498'den [15] yararlanılarak belirtilen yük değerleri alınmış ve yapının çatı eğimine göre her düğüm noktası için ayrı ayrı hesaplanmıştır.
- Rüzgâr Yükü: Rüzgârın etkisi yapı mimarisine, yüksekliğine bağlı hızına, doğrultusuna ve çatının eğimine bağlı olarak TS 498'den [15] yararlanılarak hesaplanmıştır.
- Sıcaklık Etkisi: Sıcaklık etkisi yapının inşa edildiği bölgede sıcaklık farkı dikkate alınarak etki ettirilmiştir.
- Deprem Yükü: Yapının deprem yükü hesaplanırken Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nden (TBDY-2018) [16] yararlanılarak deprem parametreleri belirlenmiş ve mod birleştirme yöntemi ile sistem analiz edilmiştir.

Yüklemesi tamamlanmış olan çubuklar için malzeme olarak çeliğin yerine cam elyaf takviyeli polyeester malzeme kullanılmıştır. Modellemede kullanılan malzeme değerleri aşağıda verilmiştir.

- Birim hacim ağırlık (γ) :1800 kg/m³
- Elastisite modülü (E) :2.5 x 10⁴ MPa
- Poisson oranı (ν) :0.33
- Akma Gerilmesi (σ_f) :240 MPa
- Çekme dayanımı (σ_d) : 240 MPa
- Kayma modülü G : 9216.28 MPa
- Isıl genişleme katsayısı (α) : 1.10 x 10⁻⁵

AISC-ASD89 [7] yönetmeliğine göre yüklem kombinasyonları oluşturularak 240 farklı sistem için tanımlanmış ve analiz edilmiştir. Analizi yapılan 240 farklı tek eğrilikli uzak kafes sistemin boyutlandırılması işlemi CTP yapı malzemesi, AISC-ASD89 [7] yönetmeliği ve Tablo 3' de verilen kesitler kullanılarak SAP 2000 [6] programı yardımıyla yapılmıştır.

Tablo 2' de kesitler için verilmiş olan girdiler kullanılarak yapılan analiz ve boyutlandırma sonucunda her bir kesit için atanmış bir boru profil, aksel kuvvet, kesit kapasite oranları ve kesit tam kapasite alanı elde edilmiştir. Sistemlerin her birinde 5760 adet eleman bulunmaktadır. Bu elemanların bazıları basınca bazıları çekmeye çalıştığı görülmüştür. Uzak kafes sistem gereği elemanlarda moment oluşmamaktadır. Bu şekilde 240 farklı sistem ve 5760 kesit düşünüldüğünde toplam 1.382.400,00 adet kesit sonucu elde edilmiştir. Her bir sistem için 5760 adet olan kesit sayısı benzer kesitler örtüştürülerek 73'e düşürülmüş ve 240 farklı sistem için toplam 17520 adet kesit data oluşturulmuştur. Elde edilen her bir kesit için atanmış boru profiller, aksel kuvvetler, kesit kapasite oranları ve kesit tam kapasite alanları incelendiğinde, kesit kapasite oranlarının 0.217 ila 0.950 arasında değişmesi çelik yapılar için kullanılan boru profil kesitlerinin CTP yapı malzemesinden yapılmış boru profillerde de kullanılabileceği ve aynı zamanda tek eğrilikli uzak kafes sistemlerde CTP kullanımının uygun olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. Sistemde kullanılan boru profil kesitlerin özellikleri

Adı	Dış çap (cm)	Alan (cm ²)	Atalet momenti I (cm ⁴)	Mukavemet momenti W (cm ³)	Atalet yarıçapı i (cm)
P1	2.13	1.55	0.69	0.65	0.67
P2	2.69	2.02	1.50	1.12	0.86
P3	3.37	3.11	3.65	2.16	1.08
P4	4.24	4	7.71	3.64	1.39
P5	4.83	4.6	11.73	4.86	1.60
P6	6.03	6.5	26.18	8.68	2.01
P7	7.61	8.31	54.67	14.37	2.57
P8	8.89	10.8	97.42	21.92	3.00
P9	11.43	15.53	234.41	41.02	3.89
P 10	13.97	20.56	467.83	66.98	4.77
P 11	16.51	24.43	784.82	95.07	5.67
P 12	21.9	27.03	1562.29	142.67	7.60
P 13	21.9	33.63	1926.12	175.90	7.57
P 14	21.9	42.12	2383.74	217.69	7.52
P 15	21.9	47.28	2656.89	242.64	7.50
P 16	21.9	53.05	2956.62	270.01	7.47
P 17	21.9	58.14	3216.44	293.74	7.44
P 18	27.3	66.63	5854.07	428.87	9.37
P 19	27.3	73.07	6382.60	467.59	9.35
P 20	27.3	82.66	7156.97	524.32	9.31
P 21	32.39	87.15	10824.33	668.38	11.15
P 22	32.39	98.65	12163.24	751.05	11.10
P 23	32.39	117.63	14325.32	884.55	11.04
P 24	32.39	124.21	15061.90	930.03	11.01
P 25	33.97	130.52	17471.74	1028.66	11.57
P 26	35.56	136.87	20143.56	1132.93	12.13

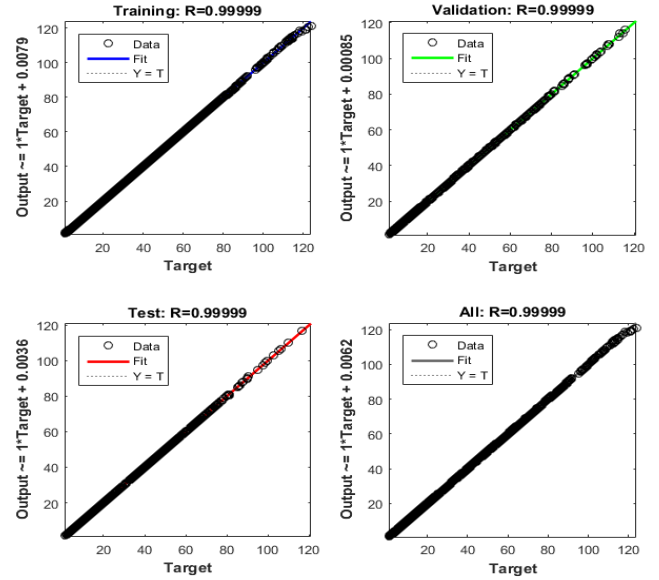
2.4 CTP profillerden oluşan tek eğrilikli uzay kafes sistemlerin kesit alanlarının YSA ile belirlenmesi

Uzay kafes sistemlerinin statik analizi ve boyutlandırılmasından elde edilen 17520 adet veri çok tabakalı ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı modelindeki işlemlerde kullanılmıştır. Verilerin % 70'i modelin eğitilmesi, % 15'i modelin doğrulaması ve % 15'i modelin testi için kullanılmıştır. Çok tabakalı yapay sinir ağı modelinde Tablo 2' de belirtilen 12 farklı girdi değişkeni olarak; kesit numarası, sistem genişliği, yüksekliği, uzunluğu, rüzgâr yükü, kar yükü, kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı, 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı, kesitlerin uzunlukları, eksenel kuvvetler, kesit kapasite kullanım oranları ve kesit tam kapasite alanı, çıktı değişkeni olarak da analizler sonucunda elde edilen minimum kesit alanı değerleri kullanılmıştır.

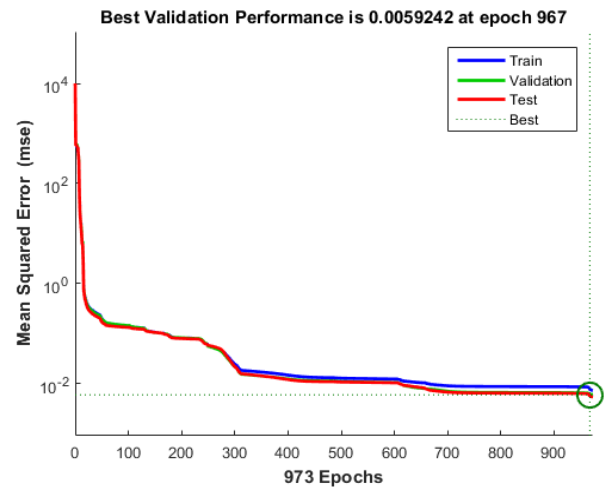
Çok tabakalı ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı modelinde tek eğrilikli uzay kafes sistemine ait 20 farklı modelin 12 farklı yüklemeye altında analizi sonucu elde edilen

toplam 1382400 adet çubuğa ait kesit alanı içerisinde aynı olanlar örtüştürülmüş ve içlerinden örtüşmeyen 17520 farklı çubuk kesiti kullanılmıştır. Belirlenmiş olan 17520 farklı çubuk kesitine ilişkin değerler, girdi ve çıktı verileri olarak modellerin eğitim, doğrulama ve test kümelerinde kullanılmıştır.

Şekil 6.'da görülen ileri beslemeli geri yayımlı ağı ve Levenberg-Marquardt öğrenme algoritması kullanılarak iterasyonlarla geliştirilen yapay sinir ağı modelinin eğitim, doğrulama ve test kümelerinden elde edilen sonuçlar, paket program yardımıyla yapılan analiz ve boyutlandırma sonucunda elde edilen minimum kesit alanı değerlerine çok yakındır. Şekil 7'de eğitim, doğrulama ve test sonuçlarının 973 adet döngü için hata grafiği verilmiştir. Bu çalışmada çok tabakalı ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı modelinde kullanılan parametre değerleri Tablo 4'de verilmiştir.



Şekil 6. Eğitim, doğrulama ve test sonuçları ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 7. Eğitim, doğrulama ve test sonuçlarının 973 adet döngü için hata grafiği

Tablo 4. Tek eğrilikli uzay kafes sistemler için model parametreleri

Parametreler	YSA
Girdi tabakası hücre sayısı	12
Çıktı tabakası hücre sayısı	1
Eğitim sonundaki hata	0.005924
Öğrenme döngüsü	973

3 Sonuçlar

Uzay kafes sistemler bilinen ve kullanılan diğer yapı sistemlerine göre üç boyutlu modüllere ve hafif bir yapıya sahip olmasından dolayı büyük açıklıkları kolonsuz geçebilmektedirler. Bu özelliğinden dolayı uzay kafes sistemler sergi, konferans, spor salonları, fuarlar gibi insanların kısa süreli fakat yoğun olarak bulunduğu mekânlarda tercih edilmektedir. Fakat bu yapılarda uzay kafes sistem imalatı düzgün yapılmazsa çatı göçmeleri meydana gelebilmektedir. Bu durum en dikkat edilmesi gereken unsur olarak karşımıza çıkmaktadır.

Uzay kafes sistem elemanlarında yapı malzemesi olarak çelik kullanılmaktadır. Çelik kullanımı da yapıyı ağırlaştırmakta ve bahsedilen göçme tehlikesini artırmaktadır.

Gelişen cam elyaf takviyeli polyester teknolojisi ile yeni bir yapı malzemesi üretilmiştir. Bu kompozit malzemeyi ön plana iten özelliklerinden en önemlisi hafif olması ve istenilen özelliklerde üretilebilmesidir. Bu çalışmada tek eğrilikli uzay kafes sistemlerin eleman ihtiyacını karşılayacak hafif, güvenilir, sağlam ve hızlı yapım olanağı bulunan malzemelerden biri olan pultrüzyon metodu ile üretilmiş cam elyaf takviyeli polyester profillerin alternatif bir yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Literatür araştırması ile cam elyaf takviyeli polyesterlerin yapısı, kimyasal, mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Literatür taramasından elde edilen veriler ışığında yapı malzemesi olarak çelik yerine cam elyaf takviyeli polyesterlerin kullanıldığı tek eğrilikli uzay kafes sistemler modellenmiştir.

Tek eğrilikli uzay kafes sistemler analiz edilirken çelik boru profillerin tablosundaki 26 adet kesit ölçüsü cam elyaf takviyeli polyester profiller için kullanılmıştır. 20 farklı modelin 12 farklı yüklem altında analizi ve AISC-ASD89 [7] yönetmeliğine göre de boyutlandırılması yapılmıştır. Statik analiz ve boyutlandırma sonucunda çelik yapılarda kullanılan 26 adet boru profilin kesitinin cam elyaf takviyeli polyester tipi yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği görülmüştür.

Statik analiz sonucunda elemanların eğilmeye değil sadece basınç ve çekmeye çalıştığı görülmüştür. Cam elyaf takviyeli polyester profillerin çekme ve basınç dayanımlarının yüksek olmasından dolayı tek eğrilikli uzay kafes sistemlerde kullanılabileceği görülmüştür.

Uzay kafes sistemlerinin statik analizi ve ardından kesitlerin tasarımından elde edilen 17520 adet veri çok tabakalı ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı modelinin geliştirilmesinde kullanılmıştır. Geliştirilen yapay sinir ağı modelinden elde edilen minimum kesit alan değerlerinin, analiz sonucu elde edilen minimum kesit alan

değerlerine çok yakın olduğu görülmüştür. Bu durumu istatistiksel parametre değerleri de göstermektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 14

Kaynaklar

- [1] T. Y. Soycan, Yapay sinir ağları yaklaşımı ile kompaksiyon parametreleri tahmini. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 2008.
- [2] E. Özbahar, Tek eğrilikli uzay kafes sistemlerin optimum dizaynı. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2007.
- [3] M. Sarıbıyık, M. Turhan, A. Sarıbıyık, Cam elyaf takviyeli plastiklerin mekanik özelliklerine elyaf hacim oranlarının etkileri. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, s. 1-4, Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs 2009.
- [4] M. D. Demirbaş, D. Çakır, İki boyutlu fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların yapay sinir ağı öğrenme algoritmaları ile ısıl gerilme modellemesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(2), 1065-1076, 2020. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.586770>
- [5] M. Sarıdemir, İ. F. Kara, Fiberle güçlendirilmiş silis dumani içeren betonların yarmada çekme dayanımının GEP ile tahmini. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5(2), 208-217, 2016. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.295586>
- [6] SAP 2000 v 16, Computers & Structures, INC, Structural and Earthquake engineering Software.
- [7] AISC-ASD89, Allowable Stress Design, American Institute of Steel Construction, Chicago, 1989.
- [8] Y. Şahin, Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Yayın Evi, Ankara, 2000.
- [9] O. Sayman, S. Aksoy, H. Aykul. An elastic/plastic solution for a thermoplastic composite cantilever beam loading by bending moment, Composite Science and Technology, 60, 2739-2745, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00146-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00146-9)
- [10] İ. Güldü, B. Dağhan ve S. Kaya, Faturalı CTP levhalarda gerilme konsantrasyonun araştırılması. DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 5 (2), 27-35, 2003.
- [11] A. Cumhuri, Pultrüzyon metodu ile üretilmiş CTP profillerle sera modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2007.
- [12] A. Kut, CTP teknolojisi, Cam Elyaf Sanayi A.Ş., Gebze, 2005.

- [13] E. Abadoğlu, M. Ö. Efe and O. Kaynak, Novel analysis and design of a neural network assisted nonlinear controller for a bioreactor. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 9 (11), 799-815, 1999. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1239\(199909\)9:11<799::aid-rnc441>3.0.co;2-u](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1239(199909)9:11<799::aid-rnc441>3.0.co;2-u)
- [14] M. F. Keskenler, ve E. F. Keskenler, Geçmişten günümüze yapay sinir ağları ve tarihçesi. *Takvim-i Vekayi Dergisi* 5 (2), 8-18, 2017.
- [15] TS-498, Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değeri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1997.
- [16] TBDY, Türkiye bina deprem yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2018.





Eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş helislerin karışık sonlu eleman yöntemi ile serbest titreşim analizi

Free vibration analysis of axially functionally graded helices via mixed finite element method

Merve Ermiş^{1,*} 

¹ Kırklareli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 39060, Kayalı Kampüsü Merkez, Kırklareli Türkiye

Özet

Bu çalışmanın amacı, eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş (EFD) kesin geometri tarifi üzerinden elde edilen dairesel olmayan (fiçi, hiperboloidal ve eliptik) helislerin doğal frekanslarını incelemektir. Timoshenko çubuk kuramı üstünden geliştirilen karışık sonlu eleman yönteminde kesit çarpılması da gözetilerek serbest titreşim analizi yapılmıştır. İki düğüm noktalı eğrisel sonlu elemanın her düğüm noktasındaki 12 değişken; üçü yer değiştirmeler, üçü kesit dönmeleri, üçü kuvvetler ikisi eğilme biri burulma momentleridir. Eksenel FD dairesel olmayan geometriye sahip ve kesin geometri üzerinden tariflenen helislerin serbest titreşim analizi farklı sınır koşulları ve malzeme gradyenti değişimleri üzerinden detaylıca tartışılmıştır. Yöntem literatür ya da ANSYS ile doğrulandıktan sonra literatür için tamamen özgün problemler çözülmüştür.

Anahtar kelimeler: Kesin helis geometrisi, Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme, Sonlu eleman, Çarpılma, Serbest titreşim analizi

Abstract

The objective of this study is to investigate the natural frequencies of axially functionally graded (AFG) non-circular (barrel, hyperboloidal and elliptical) helices based on exact geometry. Free vibration analysis is performed using the mixed finite element method based on Timoshenko beam theory by considering cross-sectional warping effect. A two-noded curved finite element involves 12 field variables at each node, three displacements, three cross-sectional rotations, three forces, and three moments. The free vibration analysis of axially FG exact non-circular helical geometries is discussed in detail over different boundary conditions and material gradient indexes. After verifying the algorithm with the problems available in the literature and ANSYS software, original problems for the literature are solved.

Keywords: Exact helix geometry, Functionally graded material, Finite element, Warping, Free vibration analysis

1 Giriş

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, hafif, yüksek mukavemetli, ısı direnç özellikli, aşınmaya veya korozyona karşı dayanımlı olmaları nedeni ile uzay, havacılık, endüstriyel malzemeler, biyoloji, enerji ve savunma sanayiinde kullanılmaktadır [1]. Bunlara örnek olarak, otomotiv turboşarjlar, termal bariyer kaplamalar, katı oksit yakıt hücreleri ve biyomedikal aletler verilebilir [2-6]. Ayrıca helisel geometri, nano ölçekten makro ölçeğe kadar mühendislik tasarımında yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Bunlara örnek olarak, helisel karbon nano-tüpler, helisel polimerler, helisel erişim düzenekleri, biyomedikal aletler, mekanik yaylar, merdivenler, yapı titreşimini azaltmada kullanılan helisel izolatörler verilebilir [7-13].

Bir kirişte eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş (EFD) malzeme, kiriş eksenli boyunca sürekli değişen malzeme özellikleri ile karakterize edilir. Literatür incelendiğinde, eksenel FD kirişler/nano-kirişler ile ilgili çalışmaların çoğu doğru eksenli çubuklar üzerinden yürütülmüştür, bu çalışmalardan bazıları [14-30] dır. Eksenel FD doğru eksenli çubuk çalışmalarına kıyasla, eksenel FD düzlem eğrisel çubuklar ile ilgili çalışmaların sayısı daha azdır ve bu çalışmalardan bazıları: Rajasekaran [31], eksenel FD değişken kesitli eğrisel çubukların statik ve serbest titreşim analizini kayma ve dönel eylemsizlik etkilerini dahil ederek incelemiştir. Tsiatas ve Charalampakis [32], eksenel FD kiriş ve dairesel düzlem çubukların doğal frekanslarının

optimizasyonu problemi üzerinde çalışmışlardır. Lee ve Lee [33], deneme (trial) özdeğer yöntemi ile geliştirilmiş doğrudan integral yöntemi kullanılarak eksenel FD dairesel kirişlerin serbest titreşim davranışını incelemiştir. Noori vd. [34], eksenel FD parabolik çubukların hem serbest titreşim hem de zorlanmış titreşim problemini tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemini kullanarak çözmüşlerdir. Temel ve Noori [35], değişken kesite sahip eksenel FD sikloit çubukların düzlem dışı titreşim davranışını [34] de sunulan yöntem ile incelemiştir. Literatürde dairesel olmayan eksenel FD üç boyutlu helisel çubuklar ile ilgili yalnızca bir adet yayına rastlanmıştır. Bu yayında, Calım ve Cuma [36] eksenel FD değişken kesite sahip fiçi ve hiperboloidal helislerin serbest titreşim analizi problemini transfer matris ve rijitlik matris yöntemlerini kullanarak yaklaşık helis geometrisi tarifi üzerinden incelemiştir.

Yapısal analizlerle ilgili çalışmalar göz önüne alındığında, yaklaşık geometriye dayalı dairesel olmayan helislerin dinamik davranışlarını inceleyen çok sayıda çalışma mevcuttur. Bunların çoğu serbest titreşim analizini [37-44], ve birkaçı [45, 46] ise zorlanmış titreşim analizi ile ilgilidir. Dairesel olmayan bir helis geometrisi eksenli boyunca değişen eğrilik ve tabii burulmaya sahiptir. Genel (Lancret) helis tanımına göre, eksen boyunca eğrilik ve tabii burulma arasındaki oran sabittir [47, 48]. Dairesel helisin kesin geometrik fonksiyonları (helisin eğriliği, tabii burulması, yay boyu gradyenti, yükselme açısı ve yükseklik)

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mermis@klu.edu.tr (M. Ermiş)

Geliş / Received: 09.11.2020 Kabul / Accepted: 16.12.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngmuh.823385

dejenere edilerek dairesel olmayan helislerin yaklaşık fonksiyonları elde edilmektedir [38]. Ermis ve Omurtag [49], Lancret türü dairesel olmayan helislerin geometrik fonksiyonlarını kesin ve yaklaşık geometri tanımı üzerinden sunmuşlardır. Daha sonra çalışmalarında, yaklaşık helis geometrisi tanımının sınırlı olduğu aralığı düzlem eğrisi Archimedean veya logaritmik spiralden oluşan konik helisler için parametrik bir çalışma ile kesin ve yaklaşık fonksiyon (helisin eğriliği, tabii burulması, yay boyu gradyenti) sonuçları üzerinden ortaya koymuşlardır. Çalışmalarının yapısal analiz ile ilgili kısmında ise, karışık sonlu eleman ve yer değiştirme türü sonlu eleman yöntemlerinin performanslarını kesin geometri tanımı üzerinden tanımlanan ve Archimedean spiralden oluşan konik helisin statik ve serbest titreşim analizi üzerinden detaylı olarak incelemiştir. Ermis [50], Archimedean spiralden oluşan konik helis için [49] da sunulan yaklaşık geometrinin sınırlı olduğu aralıkta, yapısal analiz sonuçlarının bu dejenerasyon işleminden hangi oranlarda etkilendiği problemini statik ve serbest titreşim analizleri üzerinden ele almıştır. Helisel çubukların yapısal analiz sonuçlarına ait hassasiyet hem eksen geometrisinin kesin ifadesine hem de dairesel olmayan kesitlerdeki çarpılma etkisinin dahil edilip edilmemesine bağlıdır. Araştırmalar, eğri eksenli çubuklara uygulanan dış yüklerin önemli mertebelerde bir burulma etkisi yaratma eğiliminde olduğunu göstermektedir ve bu yüzden kesit çarpılmasının gözetildiği burulma rijitliğinin hassas olarak hesaplanması hususunda ayrı bir çaba harcanmaktadır [51-53]. Arıbas [54], karışık sonlu eleman analizi ile kompozit eğrisel kirişlerin kesit çarpılması gözetilen normal ve kayma gerilmelerini incelemiştir. Arıbas vd. [55], kesitteki çarpılma etkisini kompozit tabakalı ve kesin geometri tanımı üzerinden tanımlanan konik helislerin statik ve serbest titreşim analizi üzerinden karışık sonlu elemanlar formülasyonu yöntemi ile detaylı olarak araştırmışlardır. Arıbas vd. [56], kesitteki çarpılma etkisinin dahil edildiği normal ve kayma gerilmelerini, tabakalı kompozit-geometrik olarak kesin eliptik konik helislerin zorlanmış titreşim analizi üzerinden karışık sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiştir. Jog ve Mokashi [51] tarafından sunulan yer değiştirme bazlı sonlu elemanlar kullanılarak kesit çarpılması gözetilen burulma rijitliği Arıbas [54], Arıbas vd. [55, 56] da iki düğüm noktalı eğrisel sonlu eleman matrisine eklenmiştir. Dairesel olmayan kesite sahip yapıların lineer olmayan ve burkulma analizleri üzerinde çarpılmanın etkisi oldukça önemlidir [57-60]. Lancret tipi dairesel olmayan helislerin [49] da verilen kesin geometri tanımı, [49] da düzlem eğrisi Archimedean veya logaritmik spiralden konik helisler, [50] de fiçi helis ve [56] da ise eliptik ve eliptik konik helisler için sunulurken; bu çalışma kapsamında hiperboloidal helise uygulanmıştır. Daha sonra, bu çalışma ile Timoshenko çubuk kuramı üzerinden eksenel FD dairesel olmayan fiçi, hiperboloidal ve eliptik türü helisel çubukların serbest titreşim analiz problemini ele alan karışık sonlu eleman formülasyonu, [54-56] da verilen çarpılma etkisinin de dâhil edildiği durum gözetilerek sonlu eleman matrisleri elde edilmiştir. Kesitteki çarpılmanın yanı sıra kayma etkileri ve dönül eylemsizlikler de dikkate alınmıştır. Parametrik çalışmalarda, farklı sınır koşullarının, malzeme gradyenti değerlerinin ve dairesel

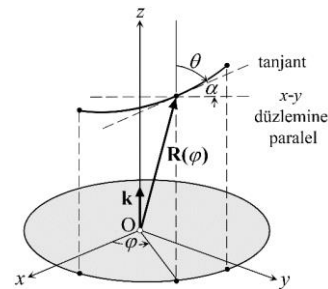
olmayan helis geometrilerinin etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada kesin geometri tanımı üzerinden ele alınan eksenel FD helisel çubuk örneklerinin tümü literatür için orijinaldir ve bazı kritik örnekler ise sonlu eleman yazılımı olan ANSYS'in SOLID186 [61] elemanlarından elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak doğrulanmıştır. Yazarın bilgisi dahilinde, kesin geometri tanımı üzerinden eksenel FD dairesel olmayan Lancret tipi helislerin serbest titreşim analizi problemi literatürde ilk defa bu çalışmada ele alınmıştır.

2 Materyal ve metod

Bu bölümde kesin helis geometrisi, helisel çubuk geometrisine ait alan denklemleri ve fonksiyonel, karışık sonlu eleman formülasyonu ile eksenel FD malzeme formülasyonu verilmiştir.

2.1 Kesin helis geometrisi

Sırasıyla, s ve φ genel helisin yay boyu ve yatay açısının göstermek üzere, helise ait kesin geometrik fonksiyonlar şu şekilde sıralanabilir: $\mathbf{r}^p(\varphi) = \{x(\varphi), y(\varphi), z(\varphi)\}$ helisin x - y düzleminde bulunan ilgili düzlem eğrisini göstermektedir. Helisin eğriliği $\chi(\varphi) = \chi^p(\varphi) \cos^2(\alpha)$ ve tabii burulması $\tau(\varphi) = \chi^p(\varphi) \cos(\alpha) \sin(\alpha)$, ilgili düzlem eğrisinin eğriliği $\chi^p(\varphi) = \|\mathbf{r}_{,ss}^p\|$ kullanılarak elde edilir. $\alpha = 90^\circ - \theta$ helisin yükselme açısıdır, θ ise helis açısıdır (Bkz. Şekil 1). Üst indis p düzlem eğriyi ifade etmektedir ve \mathbf{r}^p nin alt indisindeki virgül ise s parametresine göre türevi göstermektedir. Helisin diferansiyel yay boyu $ds = c(\varphi)d\varphi$ ile tanımlanır burada $c(\varphi) = \|\mathbf{R}_{,\varphi}\|$ yay boyunun gradyentini göstermektedir. $\mathbf{R}(\varphi)$, Kartezyen koordinat sisteminde genel helislerin yer vektörünü tanımlamaktadır (Bkz. Şekil 1), global eksenle düşey koordinat $z = \tan(\alpha) \int_0^\varphi \|\mathbf{r}_{,\psi}^p(\psi)\| d\psi$ eşitliği yardımıyla elde edilir.

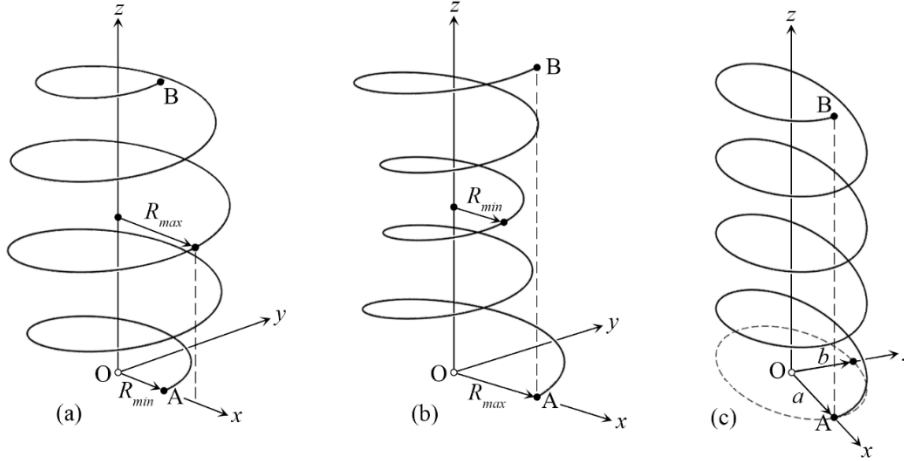


Şekil 1. Genel helis parçası. θ : helis açısı, α : yükselme açısı, φ : yatay açı, \mathbf{k} : Darboux göstericisi

Frenet birim vektörleri \mathbf{t} , \mathbf{n} , \mathbf{b} sırasıyla teğet, normal ve binormal birim vektörlerdir. Yukarıda bahsedilen fonksiyonlar, yükseklik/yükselme açısı ve Kartezyen koordinatlar ile Frenet koordinatları arasındaki dönüşüm

Tablo 1. Dairesel olmayan helislerin $x - y$ bileşenleri. $0 \leq \varphi \leq 2\pi n$ burada n tur sayısıdır.

Helis Tipi	$x(\varphi)$	$y(\varphi)$
Fıçı	$\left[R_{\max} + (R_{\min} - R_{\max})(1 - (\varphi/\pi n))^2 \right] \cos \varphi$	$\left[R_{\max} + (R_{\min} - R_{\max})(1 - (\varphi/\pi n))^2 \right] \sin \varphi$
Hiperboloidal	$\left[R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min})(1 - (\varphi/\pi n))^2 \right] \cos \varphi$	$\left[R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min})(1 - (\varphi/\pi n))^2 \right] \sin \varphi$
Eliptik	$R_{\max} \cos \varphi$	$R_{\min} \sin \varphi$



Şekil 2. Dairesel olmayan kesin helis geometrileri (a) fıçı helis, (b) hiperboloidal helis ve (c) eliptik helis ($a = R_{\max}$, $b = R_{\min}$)

matrisi ile ilgili detaylı bilgi Ermis ve Omurtag [49] da mevcuttur. Fıçı, hiperboloidal ve eliptik helislere ait ilgili düzlem eğrilerinin $\mathbf{r}^p(\varphi)$ xy düzlemindeki bileşenleri Tablo 1’de verilmiştir. Burada R_{\max} ve R_{\min} (Bkz. Şekil 2) sırasıyla en büyük ve en küçük yarıçap değerlerini göstermek üzere, tüm dairesel olmayan helis türleri için $\xi = R_{\min}/R_{\max}$ oranının tanım aralığı $0 < \xi < 1$ dir.

2.2 Fonksiyonel ve karışık sonlu eleman formülasyonu

Homojen izotrop helisel çubukların serbest titreşim ve statik analizine ait fonksiyonel [44, 62] verilmiştir. Karışık sonlu eleman formülasyonunda kullanılan fonksiyonel, Gâteaux türevi ve [63] de verilen potansiyel operatör konsepti kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada, Jog ve Mokashi [51] tarafından sunulan yer değiştirme bazlı sonlu elemanlar kullanılarak kesit çarpılması gözetilen burulma rijitliği [54-56] çalışmalarında sunulduğu gibi iki düğüm noktalı eğrisel sonlu eleman matrisine eklenmiştir ve daha önceki çalışmalarda izotrop ve homojen malzemeden oluşan helisel çubuğa ait fonksiyonel ve alan denklemleri, bu çalışma kapsamında aksenal FD helisel çubukların serbest titreşim analiz problemini ele alacak biçimde genişletilmiştir. Aksenal FD helislerin serbest titreşimi için elde edilen fonksiyonel aşağıda verilen Denklem (1)’deki gibi elde edilir.

$\mathbf{u}(u_t, u_n, u_b)$ yer değiştirme vektörünü, $\mathbf{\Omega}(\Omega_t, \Omega_n, \Omega_b)$ kesit dönmesi vektörünü, $\mathbf{T}(T_t, T_n, T_b)$ kuvvetleri ve $\mathbf{M}(M_t, M_n, M_b)$ moment vektörünü, $\rho = \rho(s)$ malzeme

yoğunluğunu, A kesit alanını, \mathbf{I} eylemsizlik moment vektörünü, \mathbf{C}_γ ve \mathbf{C}_κ kompliyans matrislerini, ω ise doğal açısal frekansı göstermektedir.

$$\mathbf{I}(\mathbf{y}) = \left. \begin{aligned} & -[\mathbf{u}, \mathbf{T}_{,s}] + [\mathbf{t} \times \mathbf{\Omega}, \mathbf{T}] - [\mathbf{M}_{,s}, \mathbf{\Omega}] - \frac{1}{2} [\mathbf{C}_\kappa \mathbf{M}, \mathbf{M}] \\ & - \frac{1}{2} [\mathbf{C}_\gamma \mathbf{T}, \mathbf{T}] - \frac{1}{2} A \omega^2 [\rho \mathbf{u}, \mathbf{u}] - \frac{1}{2} \omega^2 [\rho \mathbf{I} \mathbf{\Omega}, \mathbf{\Omega}] \\ & + [(\mathbf{T} - \hat{\mathbf{T}}), \mathbf{u}]_\sigma + [(\mathbf{M} - \hat{\mathbf{M}}), \mathbf{\Omega}]_\sigma + [\hat{\mathbf{u}}, \mathbf{T}]_\varepsilon + [\mathbf{\Omega}, \mathbf{M}]_\varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Denklem (1)’de verilen fonksiyoneldeki köşeli parantezler iç çarpımları ifade etmekte olup, şapkalı terimler sınırlardaki bilinen değerleri ifade etmektedir ve alt indis ε ve σ ise sırasıyla geometrik ve dinamik sınır koşullarını göstermektedir. İki düğüm noktalı eğrisel eleman her düğüm noktasında 12 tane değişkene sahiptir, Frenet koordinat takımında tanımlanan bu değişkenlerden üçü yer değiştirmeleri, üçü kesit dönmelerini, üçü kuvvetleri ve diğer üçü ise momentleri göstermektedir. Bu çalışmada ele alınan fonksiyonel analitik fonksiyonları kesin geometri tanımı üzerinden tanımlanan eğrilik, tabii burulması ve yay gradyenti üzerinden Ermis ve Omurtag [49] da belirtilen işlem adımları takip edilerek oluşturulmuştur. Dairesel olmayan kesitlerde çarpılmanın dahil edildiği burulma rijitliği eleman matrisine entegre edilmiştir.

2.3 Eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme

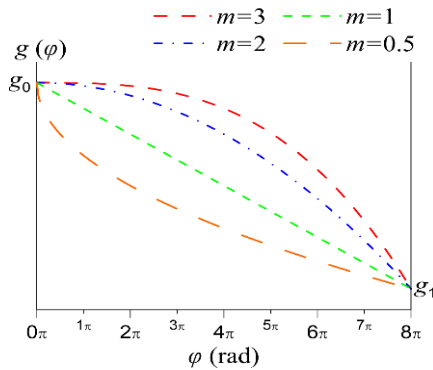
Eksenel FD malzemenin dağılımı üssel fonksiyon olarak değiştirildiği kabul edilmiştir. Boyu L olan doğru eksenli çubuklar için **Denklem (2)**:

$$g(x) = g_0 + (g_1 - g_0) \left(\frac{x}{L} \right)^m, \quad 0 \leq x \leq L \quad (2)$$

Tur sayısı n olan helisel çubuklar için **Denklem (3)**:

$$g(\varphi) = g_0 + (g_1 - g_0) \left(\frac{\varphi}{2\pi n} \right)^m, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi n \quad (3)$$

Burada, g malzeme özelliklerinden elastisite modülünü (E) ve malzeme yoğunluğunu (ρ) göstermektedir, m malzeme gradyenti parametresini, alt indis "0" ve "1" ise çubuk eksenini boyunca x ve φ değerlerinin ifade ettiği başlangıç ($x=0$, $\varphi=0$) ve bitiş ($x=L$, $\varphi=2\pi n$) noktalarındaki malzemeleri göstermektedir (Bkz. **Şekil 3**, **Denklemler (2)-(3)**). Burada, x doğru eksenli çubuk eksenini ve φ ise helisin xy düzlemindeki yatay açısını temsil etmektedir (**Şekil 1**). Malzeme sabitleri $E_0 = 200 \text{ GPa}$, $\rho_0 = 5700 \text{ kg/m}^3$, $E_1 = 70 \text{ GPa}$, $\rho_1 = 2702 \text{ kg/m}^3$ ve Poisson oranı $\nu = 0.3$ olarak seçilmiştir. **Denklem (3)** de helisel çubuklar için verilen eksenel FD malzeme özelliğinin değişim fonksiyonu, farklı malzeme gradyent parametreleri $m = 0.5, 1, 2, 3$ ve tur sayısı $n = 4$ için yatay açı φ ye göre değişimi çizilmiştir (Bkz. **Şekil 3**). **Şekil 4**'te ise eksenel FD fiçı helis örneği verilmiştir.



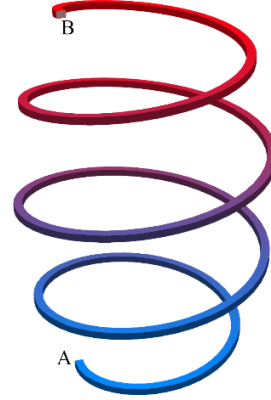
Şekil 3. Malzeme özellikleri fonksiyonu $g(\varphi)$ nin $0 \leq \varphi \leq 2\pi n$ ($n = 4$) aralığında farklı malzeme gradyent parametre değerlerine $m = 0.5, 1, 2, 3$ göre değişimi.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Karışık SEY eksenel FD doğru eksenli çubuk için literatür ile kıyaslanması

Eksenel FD malzemenin karışık sonlu SEY ile çözümü literatürde ([19], [22]) bulunan eksenel FD doğru eksenli çubuğa ait açılal frekans değerleri üzerinden doğrulanmıştır.

Malzeme parametreleri ve malzemenin çubuk eksenini boyunca değişimine ait fonksiyon bölüm 2.3 de verilmiştir, malzeme gradyent parametresi $m = 1, 2$ ve 3 seçilmiştir. Birimsiz atalet yarıçapı $r = I/(AL^2) = 0.01$ ve birimsiz



Şekil 4. Eksenel FD fiçı helis örneği

doğal frekans parametresi ise $\Gamma = \omega \sqrt{(\rho_0 AL^4)/(E_0 I)}$ olup burada A ve I sırasıyla kesit alanını ve eylemsizlik momentini göstermektedir. $n_e = 40$ sonlu eleman ait birinci doğal frekans sonuçları, $n_e = 50$ sonlu elemana ait sonuçlar üzerinde normalize edildiğinde, Tablo 2 de verilen sınır koşulları (SK) ve malzeme gradyenti parametreleri için aradaki fark %0.01 den azdır. Yakınsama analizi sonuçlarına göre, **Tablo 2**'de eksenel FD doğru eksenli çubuğun birimsiz doğal frekans parametresi (Γ) $n_e = 50$ sonlu eleman sonuçlarına göre sunulmuştur. Eksenel FD doğru eksenli çubuğun karışık SEY (bu çalışma) ile elde edilen sonuçlar literatür sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 2. Eksenel FD doğru eksenli çubuğun birimsiz doğal frekans parametresi Γ .

SK	m	[19] ¹	[19] ²	[22]	Bu çalışma
ankastre-serbest	1	3.8963	3.8963	3.896370	3.8962
	2	3.8828	3.8828	3.882898	3.8828
	3	3.7957	3.7956	-	3.7958
sabit-sabit	1	7.8459	7.8459	7.846103	7.8456
	2	7.9873	7.9872	7.987477	7.9867
	3	8.0645	8.0644	-	8.0636
ankastre-ankastre	1	12.9065	12.9064	12.90720	12.906
	2	12.6873	12.6871	12.68796	12.686
	3	12.6030	12.6028	-	12.600

DTEM¹: Diferansiyel dönüşüm eleman yöntemi, DQEL² :en düşük mertebeli diferansiyel kuadratik eleman

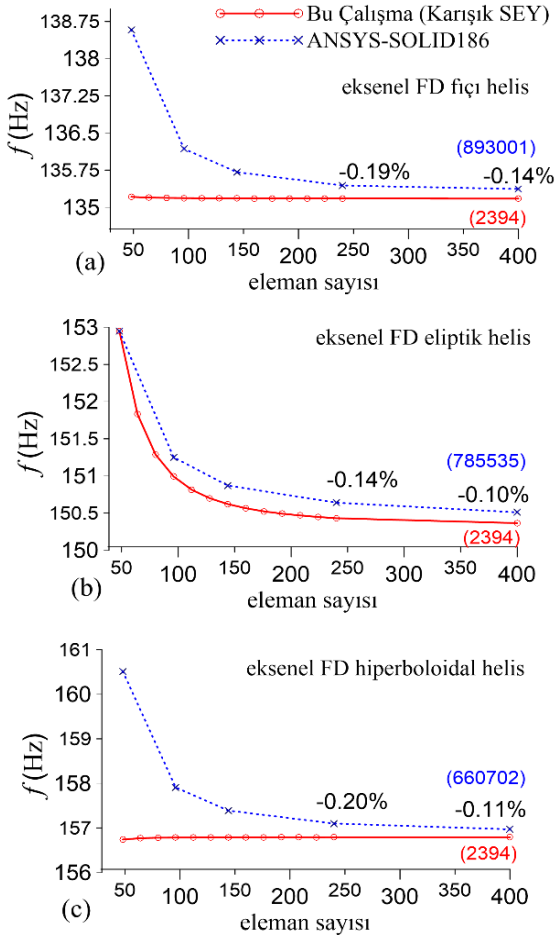
3.2 Eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş dairesel olmayan helisler

Bu örnekte, farklı sınır koşullarına sahip ve kesin geometri üzerinden tanımlanan eksenel FD dairesel olmayan (fiçı, eliptik, hiperboloidal) helisel çubukların ilk beş doğal frekansı, farklı malzeme gradyent parametreleri üzerinden araştırılmıştır. Tüm dairesel olmayan helis geometrileri için

ortak parametreler: helis yüksekliği $H = 45\text{mm}$, tur sayısı $n = 4$, $\xi = R_{\min}/R_{\max} = 0.6$ olup en büyük yarıçap değeri $R_{\max} = 15\text{mm}$ dir. Dikdörtgen kesit genişliği $w = 1\text{mm}$ olup yüksekliği ise $h = 0.8\text{mm}$ (b eksenine paralel) dir. Malzeme parametreleri ve helis eksen boyuna değişimleri bölüm 2.3 de (Bkz. Şekil 3) verilmiştir.

3.2.1 Yakınsama analizi

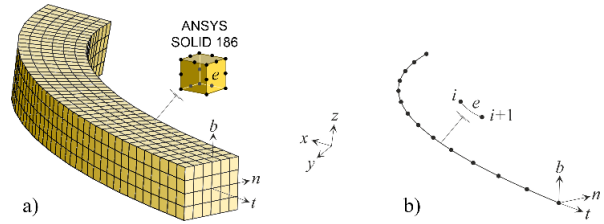
İlk olarak, 3B eğrisel yapı sisteminde eksen boyunca fonksiyonel değişen malzeme parametreleri için yapının serbest titreşim davranışını yansıtan karışık sonlu eleman formülasyonun yakınsama analizi yapılacaktır. Bu analiz, malzeme değişim parametresi $m = 1$ ve iki ucu tutulu sınır koşuluna sahip aksel FD fiçi, eliptik ve hiperboloidal helislerin birinci doğal frekans değerleri üzerinden yapılmış olup Şekil 5'te eleman sayısına (n_e) göre çizilmiştir.



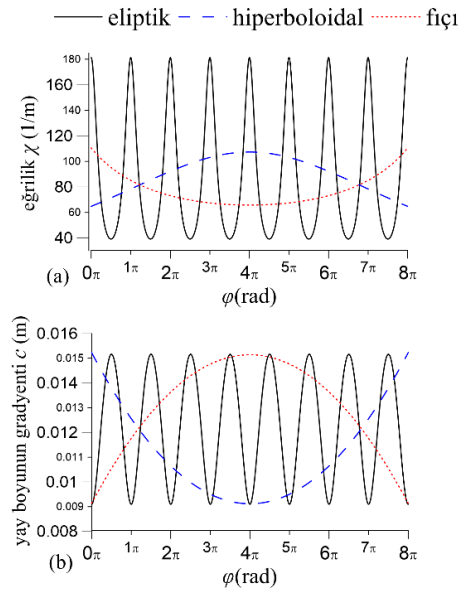
Şekil 5. Aksel FD fiçi, eliptik ve hiperboloidal helislerin birinci doğal frekans değerleri (f) için bu çalışma (karışık SEY) ve ANSYS-SOLID186 çözümlerine ait yakınsama analizi

ANSYS'den elde edilen sonuçlar karışık SEY'den elde edilen sonuçlara göre normalize edilerek yüzde farklar Şekil 5'te verilmiştir, ayrıca karışık SEY ve ANSYS-SOLID186 elemanına ait bilinmeyen sayıları parantez içinde sunulmuştur. ANSYS-SOLID186 elemanda, malzeme

özellikleri iki boyutlu eğrisel elemanın (Bkz. Şekil 6) düğüm noktalarındaki malzeme değerlerinin ortalaması olarak tanımlanmıştır. Şekil 5'te, karışık SE yöntemi kullanılarak hesaplanan fiçi ve hiperboloidal helisin birinci doğal frekans değerlerinin yakınsama hızının ANSYS-SOLID186 eleman kullanılarak elde edilen sonuçlara göre daha hızlı olduğu görülmektedir. Hatta, karışık sonlu eleman formülasyon sonuçları için frekans değerlerinin daha seyrek ağ sıklaştırma bölgelerinde bile yakınsadığı gözlenmektedir. Eliptik helise ait yakınsama hızı fiçi ve hiperboloidal helislere ait yakınsama hızları ile kıyaslandığında hem karışık SEY için hem de ANSYS-SOLID186 sonuçları için daha yavaştır ve aksel FD eliptik helis her iki çözüm yöntemi için daha yoğun ağ sıklaştırmasına ihtiyaç duymaktadır. Bunun nedenini, Şekil 7a'daki helis yayı boyunca eliptik helisin eğrilik değerindeki değişiminin hiperboloidal ve fiçi helise göre daha yüksek genliklerde ve daha küçük periyotlarda sürekli değişim salımlarına sahip olması ile açıklayabiliriz. Bu yüzden, eliptik helis daha fazla ağ sıklaştırmasına ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca, belirtilen helislerin yay boyu değişimlerine ait grafik Şekil 7b'de verilmiştir.



Şekil 6. Frenet koordinat takımında (t, n, b) a) ANSYS-SOLID186 elemanı ve b) karışık SE ait eğrisel eleman



Şekil 7. Eliptik, fiçi ve hiperboloidal helislerin eğrilik ve yay boyu gradyenti fonksiyonlarının yatay açı $0 \leq \varphi \leq 2\pi n$ aralığında değişimi

3.2.2 Parametrik analiz

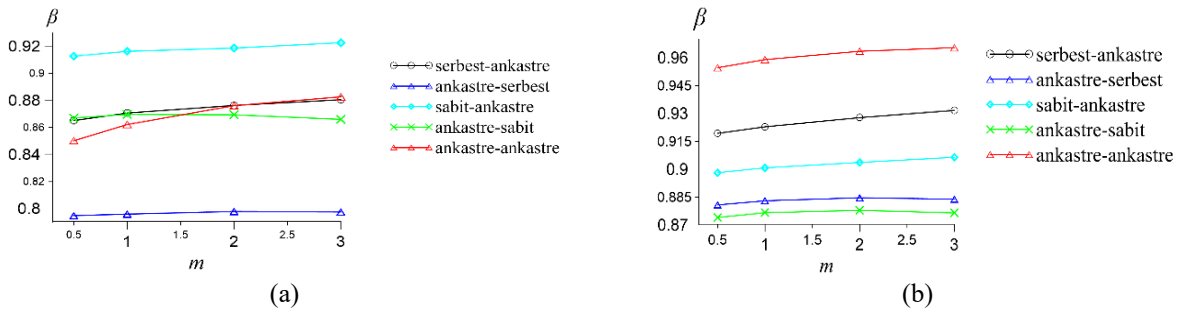
Bölüm 3.2.1’de sunulan yakınsama analizi sonuçlarına göre, eksenel FD fiçi ve hiperboloidal helis eliptik helise göre daha az sayıda elman ile yakınsasa da eliptik helis analizinde yeterli yakınsak sonuçları elde etmek için toplamda 400 karışık SE gerekmektedir. Bu nedenle, tüm helis türlerinde yetirince hassas sonuçları sağlayan 400 karışık SE sonuçları kullanılmıştır. Bölüm 3.2 ve 3.2.1 de verilen parametrelere ek olarak problemler ilave sınır koşullarının (ankastre-serbest, serbest ankastre, ankastre-sabit ve sabit-ankastre) yanı sıra ilave malzeme değişim parametreleri $m = 0.5, 2, 3$ için ele alınmıştır. Eksenel FD fiçi, eliptik ve hiperboloidal helislerin ilk beş frekans değerleri **Tablo 3**’te sunulmuştur. Parametrik analizden elde edilen sonuçlara (**Tablo 3**) göre: en küçük birinci doğal frekans değeri serbest-ankastre sınır koşulu (SK) ve malzeme değişim parametresi $m = 1$ değerine sahip eksenel FD fiçi helis için elde edilmiştir. En büyük birinci doğal

frekans değeri ise ankastre-ankastre SK ve malzeme değişim parametresi $m = 0.5$ değerine sahip eksenel FD hiperboloidal helis için elde edilmiştir. Burada, sınır koşulları sırasıyla helisel çubuğun başlangıç A ve bitiş B noktalarını göstermektedir (Bkz. **Şekil 4**). Eksenel FD fiçi ve eliptik helislerin birinci doğal frekans değerleri eksenel FD hiperboloidal helis sonuçlarına göre her bir malzeme değişim parametresi $m = 0.5, 1, 2, 3$ ve sınır koşulları için

$\beta = f_i^m / f_h^m$ ($i = f, e$ burada f, e ve h sırasıyla fiçi, eliptik ve hiperboloidal helisleri göstermektedir.) formülü üzerinden normalize edilmiştir (Bkz. **Şekil 8**). Bu oran en büyük değerini $\beta = 0.965$ olarak ankastre-ankastre sınır koşulu ve malzeme değişim parametresi $m = 3$ sahip eksenel FD eliptik helis için almaktadır. En küçük değerini ise $\beta = 0.795$ olarak ankastre-serbest sınır koşulu ve malzeme değişim parametresi $m = 0.5$ sahip eksenel FD fiçi helis için almaktadır.

Tablo 3. Eksenel FD dairesel olmayan helislerin ilk beş frekans (Hz) değeri. (400 karışık SE)

		fiçi helis				eliptik helis				hiperboloidal helis			
		$m=0.5$	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=0.5$	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=0.5$	$m=1$	$m=2$	$m=3$
serbest- ankastre	f_1	31.62	31.36	32.37	33.52	33.60	33.24	34.27	35.47	36.55	36.02	36.94	38.07
	f_2	31.73	31.50	32.56	33.76	34.27	33.92	34.98	36.21	36.92	36.49	37.58	38.84
	f_3	55.46	56.08	58.46	60.53	65.65	65.75	67.92	70.09	75.55	74.97	76.88	79.16
	f_4	77.37	77.13	79.07	81.30	90.32	90.20	92.79	95.51	104.02	104.14	107.53	110.70
	f_5	125.97	126.33	131.03	135.91	154.49	157.14	161.32	163.95	162.51	165.26	169.41	171.90
ankastre- serbest	f_1	47.46	49.73	49.58	48.49	52.59	55.17	54.97	53.74	59.71	62.48	62.14	60.80
	f_2	47.54	49.85	49.74	48.65	53.33	55.91	55.72	54.50	60.13	63.08	62.90	61.58
	f_3	71.74	75.37	76.42	75.60	89.07	93.13	93.67	92.36	107.79	111.88	111.44	109.51
	f_4	101.85	105.78	105.61	103.85	123.11	128.50	128.97	127.09	146.17	153.40	155.45	154.00
	f_5	166.63	172.58	175.96	173.43	182.09	188.62	192.92	194.07	190.74	197.12	203.24	206.34
sabit- ankastre	f_1	69.05	68.94	70.83	72.86	67.94	67.77	69.67	71.58	75.65	75.24	77.10	78.97
	f_2	104.46	105.37	106.76	108.03	102.31	102.88	104.36	105.89	113.21	113.34	114.73	116.43
	f_3	130.00	131.30	133.26	134.68	147.69	148.66	150.70	152.50	163.80	165.73	168.72	170.58
	f_4	151.81	153.46	154.04	154.46	182.06	182.83	181.67	180.94	197.08	196.62	194.41	193.63
	f_5	178.41	175.89	178.08	182.39	210.31	205.86	206.77	210.96	274.98	269.28	270.10	275.12
ankastre- sabit	f_1	90.77	94.38	94.57	93.19	91.50	95.14	95.50	94.32	104.69	108.53	108.78	107.61
	f_2	114.03	116.25	116.17	115.64	117.38	120.20	119.85	118.78	134.02	136.90	135.71	134.03
	f_3	145.53	148.39	148.85	148.73	169.61	172.91	173.00	172.46	186.96	189.84	190.61	191.23
	f_4	159.08	161.52	161.99	162.10	191.45	192.86	192.48	192.61	213.61	215.37	214.73	213.87
	f_5	222.60	227.08	230.44	231.98	257.65	263.50	267.83	269.30	308.82	308.63	307.52	308.43
ankastre- ankastre	f_1	134.28	135.18	134.21	133.78	150.77	150.36	147.59	146.32	157.94	156.79	153.19	151.57
	f_2	166.09	166.50	164.23	163.11	193.04	192.86	190.30	189.10	211.67	210.36	207.19	205.75
	f_3	177.39	178.21	177.37	177.20	206.68	206.48	203.78	202.39	237.49	235.11	230.08	228.05
	f_4	179.53	180.70	180.27	180.28	211.90	211.49	208.55	207.77	265.53	264.17	259.14	256.96
	f_5	233.04	237.86	241.27	242.70	280.52	285.07	288.67	290.19	341.61	350.11	358.21	361.51



Şekil 8. Eksenel FD hiperboloidal helis sonuçlarına göre normalize edilen (a) eksenel FD fiçi helis ve (b) eksenel FD eliptik helis sonuçlarına ait β oranının farklı malzeme gradyenti parametresine (m) göre değişimi

4 Sonuçlar

Bu çalışmanın ilk amacı, dairesel olmayan (fiçi, eliptik ve hiperboloidal) Lancret türü helislerin kesin eksen geometrisini tanımlamaktır. Kesin helis geometrisi üstünden yapısal analizler yaklaşık geometri üstünden yapılan analizlere göre hassasiyet anlamında büyük üstünlük sağlamaktadır. Bu değerlendirme hem Ermis ve Omurtag [49] da ve hem de Arıbas vd. [55] de kapsamlı bir biçimde incelenmiştir. Bu çalışmanın ikinci amacı, aksel FD malzemeden imal edilmiş dairesel olmayan (dönel simetrik) kesin geometri helislerin serbest titreşim analizini karışık SEY ile incelemektir. Bu çalışma kapsamında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Literatür ile doğrulama: Aksel FD doğru akseli çubukların temel doğal frekansları [19, 22] ile kıyaslanmış ve mükemmel bir uyum sağlanmıştır.
- Yakınsama: Dairesel olmayan aksel FD helisel çubukların yakınsama analizleri, temel doğal frekansları (Bölüm 3.2.1) üzerinden eğrisel karışık sonlu eleman formülasyonu ile ANSYS'in SOLID186 sonlu eleman sonuçları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Eğrisel karışık SE formülasyon sonuçları düğüm noktalarındaki toplam bilinmeyen sayıları göz önüne alındığında ANSYS'in SOLID186 eleman sonuçlarına kıyasla daha üstün bir yakınsama performansı göstermektedir (Bkz. Şekil 5).
- Parametrik analiz: Araştırmada seçilen malzeme değişim parametreleri ($m = 0.5, 1, 2, 3$) göz önüne alındığında sonuçlar göstermiştir ki; serbest-ankastre, sabit-ankastre ve ankastre-ankastre sınır koşulları için, m değeri arttıkça, aksel FD fiçi ve eliptik helise ait β oranları da artmaktadır (Bkz. Şekil 8).

Teşekkür

Destekleri için Sayın Prof. Dr. Mehmet H. OMURTAG'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çıkar çatışması

Çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Benzerlik oranı (iThenticate): %4

Kaynaklar

- [1] Li W and Han B. Research and application of functionally gradient materials. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 394, 1-7 2018. <https://doi.org/10.1088/1757899X/394/2/022065>.
- [2] M. R. Abbas, M. B. Uday, A. M. Noor, N. Ahmad and S. Rajoo, Microstructural evaluation of a slurry based Ni/YSZ thermal barrier coating for automotive turbocharger turbine application. Materials & Design, 109, 47-56, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.070>
- [3] S. R. Dhineshkumar, M. Duraiselvam, S. Natarajan, S. S. Panwar, T. Jena and M. A. Khan Enhancement of strain tolerance of functionally graded LaTi2Al9O19 thermal barrier coating through ultra-short pulse based laser texturing. Surface and Coatings Technology, 304,

- 263-271, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.07.018>.
- [4] S. M. Naga, M. Awaad, H. F. El-Maghraby, A. M. Hassan, M. Elhoriny, A. Killinger and R. Gadow Effect of La₂Zr₂O₇ coat on the hot corrosion of multi-layer thermal barrier coatings. Materials & Design, 102, 1-7, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.133>
- [5] K. B. Ghosh, J. Mukhopadhyay and R. N. Basu Functionally graded doped lanthanum cobalt ferrite and ceria-based composite interlayers for advancing the performance stability in solid oxide fuel cell. Journal of Power Sources, 328, 15-27, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.106>
- [6] A. Solla, D. Bellucci and V. Cannillo, Functionally graded materials for orthopedic applications – an update on design and manufacturing. Biotechnology Advances 34, 504–531, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.12.013>
- [7] J. Cherusseri, R. Scharma and K. K. Kar Helically coiled carbon nanotube electrodes for flexible supercapacitors. Carbon, 105, 113-125, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.04.019>
- [8] E. H. Egelman Three-dimensional reconstruction of helical polymers. Archives of Biochemistry and Biophysics, 581, 54-58, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2015.04.004>
- [9] X Jian, D. Wang, H. Liu, M. Jiang, Z. Zhou, J. Lu, X. Xu, Y. Wang, L. Wang, Z. Gong, M. Yang, J. Gou and D. Hui, Controllable synthesis of carbon coils and growth mechanism for twinning double-helix catalyzed by Ni nanoparticle. Composites Part B: Engineering, 61, 350-357, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.010>
- [10] A. Baratta and I. Corbi, Equilibrium models for helicoidal laterally supported staircases. Computers & Structures, 124, 21-28, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.11.007>
- [11] M. Angelillo, Static analysis of a Guastavino helical stair as a layered masonry shell. Composite Structures 119, 298-304, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.09.007>
- [12] N. Gao and Y. Zhang, A low frequency underwater metastructure composed by helix metal and viscoelastic damping rubber. Journal of Vibration and Control, 25(3), 538-548, 2018. <https://doi.org/10.1177/1077546318788446>
- [13] N. Barbieri, R. Barbieri, R. A. da Silva, M. J. Mannala and L.S.A.V. Barbieri, Nonlinear dynamic analysis of wire-rope isolator and Stockbridge damper. Nonlinear Dynamics 86, 501-512, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11071-016-2903-1>
- [14] L. Wu, Q.-s. Wang and I. Elishakoff, Semi-inverse method for axially functionally graded beams with an anti-symmetric vibration mode. Journal of Sound and Vibration, 284, 1190–1202, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.08.038>
- [15] M. Aydogdu, Semi-inverse method for vibration and buckling of axially functionally graded beams. Journal

- of Reinforced Plastics and Composites, 27, 683–691 2008. <https://doi.org/10.1177/0731684407081369>
- [16] 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, 801–808, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.017>.
- [17] Y. Huang, L.-E. Yang and Q.-Z. Luo, Free vibration of axially functionally graded Timoshenko beams with non-uniform cross-section. *Composites Part B: Engineering* 45, 1493–1498, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.015>
- [18] X.-F. Li, Y.-A. Kang and J.-X. Wu, Exact frequency equations of free vibration of exponentially functionally graded beams. *Applied Acoustics*, 74, 413–420, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.08.003>
- [19] S. Rajasekaran and E. N. Tochaei, Free vibration analysis of axially functionally graded tapered Timoshenko beams using differential transformation element method and differential quadrature element method of lowest-order. *Meccanica* 49(4), 995–1009, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11012-013-9847-z>
- [20] K. Sarkar and R. Ganguli, Closed-form solutions for axially functionally graded Timoshenko beams having uniform cross-section and fixed–fixed boundary condition. *Composites Part B: Engineering*, 58, 361–370, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.077>
- [21] F. F. Calim, Transient analysis of axially functionally graded Timoshenko beams with variable cross-section. *Composites Part B: Engineering* 98, 472–483, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.040>
- [22] Y. Zhao, Y. Huang and M. Guo, A novel approach for free vibration of axially functionally graded beams with non-uniform cross-section based on Chebyshev polynomials theory. *Composite Structures*, 168, 277–284, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.02.012>
- [23] D. Cao, Y. Gao, M. Yao and W. Zhang, Free vibration of axially functionally graded beams using the asymptotic development method. *Engineering Structures*, 173, 442–448, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.111>
- [24] S. Šalinic, A. Obradovic and A. Tomovic, Free vibration analysis of axially functionally graded tapered, stepped, and continuously segmented rods and beams. *Composites Part B: Engineering*, 150, 135–143, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.060>
- [25] X. Li, L. Li, Y. Hu, Z. Ding and W. Deng, Bending, buckling and vibration of axially functionally graded beams based on nonlocal strain gradient theory. *Composite Structures* 165, 250–265, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.01.032>
- [26] M. Sari, M. Shaat and A. Abdelkefi, Frequency and mode veering phenomena of axially functionally graded non-uniform beams with nonlocal residuals. *Composite Structures*, 163, 280–292, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.11.093>
- [27] M. H. Ghayesh and H. Farokhi, Mechanics of tapered axially functionally graded shallow arches. *Composite Structures* 188, 233–241, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.017>
- [28] M. Chen, G. Jin, Y. Zhang, F. Niu and Z. Liu, Three-dimensional vibration analysis of beams with axial functionally graded materials and variable thickness. *Composite Structures*, 207, 304–322, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.029>
- [29] X. Zhang, Z. Ye and Y. Zhou, A Jacobi polynomial based approximation for free vibration analysis of axially functionally graded material beams. *Composite Structures*, 225, 111070, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111070>
- [30] R. Talebitooti, S. O. Rezaadeh and A. Amiri, Comprehensive semi-analytical vibration analysis of rotating tapered AFG nanobeams based on nonlocal elasticity theory considering various boundary conditions via differential transformation method. *Composites Part B: Engineering*, 160, 412–435, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.085>
- [31] S. Rajasekaran, Analysis of curved beams using a new differential transformation based curved beam element. *Meccanica*, 49, 863–886, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11012-013-9835-3>
- [32] G. C. Tsiatas and A. E. Charalampakis, Optimizing the natural frequencies of axially functionally graded beams and arches. *Composite Structures*, 160, 256–266, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.057>
- [33] J. K. Lee and B. K. Lee, In-plane free vibration of uniform circular arches made of axially functionally graded materials. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 19, 1950084, 2019. <https://doi.org/10.1142/S0219455419500846>
- [34] 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>
- [35] B. Temel and A. R. Noori, Out-of-plane vibrations of shear-deformable AFG cycloidal beams with variable cross section. *Applied Acoustics*, 155, 84–96, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.05.010>
- [36] F.F. Calim and Y.C. Cuma, Vibration analysis of nonuniform hyperboloidal and barrel helices made of functionally graded material. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2020. <https://doi.org/10.1080/15397734.2020.1822181>
- [37] K. Nagaya, S. Takeda and Y. Nakata, Free vibration of coil springs of arbitrary shape. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 23, 1081–1099, 1986. <https://doi.org/10.1002/nme.1620230607>
- [38] V. Yıldırım, A parametric study on the free vibration of noncylindrical helical springs. *Journal of Applied*

- Mechanics, 65(1), 157-163, 1998. <https://doi.org/10.1115/1.2789019>
- [39] W. Busool and M. Eisenberger, Free vibration of helicoidal beams of arbitrary shape and variable cross section. *Journal of Vibration and Acoustic*, 124, 397–409, 2002. <https://doi.org/10.1115/1.1468870>
- [40] V. Yıldırım, A parametric study on the natural frequencies of unidirectional composite conical springs. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 20, 207–227, 2004. <https://doi.org/10.1002/cnm.661>
- [41] J. Lee, Free vibration analysis of non-cylindrical helical springs by the pseudospectral method. *Journal of Sound and Vibration* 305, 543–551, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.11.008>
- [42] A. Yu and Y. Hao, Effect of warping on natural frequencies of symmetrical cross-ply laminated composite non-cylindrical helical springs. *International Journal of Mechanical Sciences*, 74, 65–72 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.04.010>
- [43] N. Eratlı, M. Ermis, M. H. Omurtag, Free vibration analysis of helicoidal bars with thin-walled circular tube cross-section via mixed finite element method. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 33, 200–218, 2015.
- [44] N. Eratlı, M. Yılmaz, K. Darılmaz and M.H. Omurtag, Dynamic analysis of helicoidal bars with non-circular cross-sections via mixed FEM. *Structural Engineering and Mechanics*, 57, 221–238, 2016. <https://doi.org/10.12989/sem.2016.57.2.221>.
- [45] F. F. Çalım, Dynamic analysis of composite coil springs of arbitrary shape. *Composites Part B: Engineering*, 40, 741–757, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.017>.
- [46] F. F. Çalım, Forced vibration of helical rods of arbitrary shape. *Mechanics Research Communications*, 36, 882–891, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2009.07.007>.
- [47] A. Yampolsky and A. Opariy, Generalized helices in three-dimensional Lie groups. *Turkish Journal of Mathematics*, 43, 1447–1455, 2019.
- [48] Ü. Çiftçi, A generalization of Lancret’s theorem, *J. Geom. Phys.* 59, 1597–1603, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.geomphys.2009.07.016>.
- [49] M. Ermis and M.H. Omurtag, Static and dynamic analysis of conical helices based on exact geometry via mixed FEM. *International Journal of Mechanical Sciences*, 131, 296–304, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.07.010>.
- [50] M. Ermis, Static and dynamic analysis of non-circular helical bars based on exact geometry. Ph. D Thesis, Istanbul Technical University, İstanbul, Türkiye 2019.
- [51] C.S. Jog, I.S. Mokashi, A finite element method for the Saint-Venant torsion and bending problems for prismatic beams. *Computers & Structures*, 135, 62–72 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.01.010>
- [52] R. Barretta, L. Feo and R. Luciano, Some closed-form solutions of functionally graded beams undergoing nonuniform torsion. *Composite Structures*, 123, 132–136, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.027>
- [53] K. Darılmaz, E. Orakdögen and K. Girgin, Saint-Venant torsion of arbitrarily shaped orthotropic composite or FGM sections by a hybrid finite element approach. *Acta Mechanica*, 229, 1387–1398, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00707-017-2067-1>
- [54] U. N. Aribas Kompozit eğrisel kirişlerde kesit çarpılması gözetilerek normal ve kayma gerilmelerinin karışık sonlu elemanlarla analizi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(3), 16-29, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.619591>
- [55] U. N. Aribas, M. Ermis, N. Eratlı and M. H. Omurtag, The static and dynamic analyses of warping included composite exact conical helix by mixed FEM. *Composites Part B: Engineering*, 160, 285–297, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.018>
- [56] U. N. Aribas, M. Ermis, A. Kutlu , N. Eratlı and M. H. Omurtag, Forced vibration analysis of composite-geometrically exact elliptical cone helices via mixed FEM. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1-19, 2020. <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1824048>.
- [57] H.C. Tsai and J. M. Kelly, Buckling of short beams with warping effect included, *International Journal of Solids and Structures*. 42(1), 239–253, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.07.021>
- [58] Genoese, A. Genoese, A. Bilotta and G. Garcea, A geometrically exact beam model with non-uniform warping coherently derived from the Saint Venant rod. *Engineering Structures* 68, 33–46, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.02.024>
- [59] K. Yoon, P. S. Lee and D. N. Kim, Geometrically nonlinear finite element analysis of functionally graded 3D beams considering warping effects. *Composite Structures* 132, 1231–1247, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.024>
- [60] Di Egidio, A. Contento and F. Vestroni, The role of nonlinear torsional contributions on the stability of flexural–torsional oscillations of open-cross section beams. *Journal of Sound and Vibration* 358, 236–250 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.08.004>
- [61] ANSYS®, Academic Research Mechanical, Release 17.1, Canonsburg, Pennsylvania, 2016.
- [62] M. H. Omurtag and A. Y. Aköz, The mixed finite element solution of helical beams with variable cross-section under arbitrary loading.. *Computers & Structures*, 43, 325–331, 1992. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(92\)90149-T](https://doi.org/10.1016/0045-7949(92)90149-T).
- [63] J.T. Oden and J.N. Reddy, An introduction to the mathematical theory of finite elements, John Wiley & Sons, Limited, 1976.



Su içeriği ve ısıl kür süresinin atık bazalt tozu esaslı geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi

The effects of water content and thermal curing time on physical and mechanical properties of waste basalt powder based geopolymer mortars

Serhat Çelikten^{1,*} , İsmail İsa Atabey¹ 

¹ Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir, Türkiye

Özet

Bu çalışmada bazalt taşı kesim atıkları ile üretilen geopolimer harçların mekanik ve fiziksel özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla 4 farklı su içeriği ile geopolimer harçlar üretilmiştir. Harçlarda aktivatör olarak sodyum silikat kullanılmıştır. Üretilen geopolimer harçlar 4, 8 ve 24 saat olmak üzere 3 farklı sürede 90°C'de ısıl küre tabi tutulmuştur. Harçlar üzerinde yayılma, su emme-boşluk oranı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. En yüksek dayanım değerlerine en düşük su içeriği ile üretilen harçlarda ulaşılmıştır. 4 saat, 8 saat ve 24 saat ısıl küre tabi tutulan harçlarda en yüksek 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 8,1 MPa, 17,7 MPa ve 28,6 MPa olarak elde edilmiştir. Bu deneySEL çalışmanın bir sonucu olarak, atık bazalt tozunun geopolimer üretiminde değerlendirilebileceği ve bu sayede çevresel ve ekonomik fayda sağlanabileceği söylenebilir.

Anahtar kelimeler: Atık bazalt tozu, Geopolimer, Dayanım, Isıl kür

Abstract

In this study, the mechanical and physical properties of geopolymer mortars produced with cutting waste of basalt stone has been investigated. For this purpose, geopolymer mortars made with four different water content. Sodium silicate was used as activator in the mortars. The produced mortars subjected to heat-curing for 4, 8 and 24 hours at 90°C, separately. The flowing, water absorption-porosity, flexural and compressive strength tests were performed on the mortars. The highest strength values were obtained on the mortars made with the lowest water content. The highest 28-day compressive strengths were obtained as 8.1 MPa, 17.7 MPa and 28.6 MPa in mortars heat cured for 4 hours, 8 hours and 24 hours, respectively. Besides, it can be concluded that the waste basalt powder can be utilized for the geopolymer production and thus environmental and economic benefits can be obtained.

Keywords: Waste basalt powder, Geopolymer, Strength, Heat curing

1 Giriş

Madencilik ve endüstriyel faaliyetlerde atıkların azaltılması, son yıllarda temel çevre sorunlarından biri olmuştur. Bu nedenle, atıkları katma değerli ürünlere dönüştürmek için yeni teknolojiler geliştirmek oldukça önemlidir [1]. Puzolanlar doğal ve yapay olarak sınıflandırılırken doğal kaynaklar arasında volkanik kayalar en eski ve bol rezerve sahip olarak bilinir. Yapılarında yüksek miktarda silis ve zeolit içerirler. Son zamanlarda daha ekonomik ve çevresel etkileri azaltıcı puzolanik özelliklere sahip atıkların kullanılarak çimentoya alternatif bağlayıcı üretimi yaygınlaşmaktadır [2].

"Geopolimer" terimi, 1979'da Joseph Davidovits tarafından sodyum ve potasyum gibi alkalilerle aktive edilmiş alüminosilikatları tanımlamak için kullanıldı [3]. Alkali ile harç üretiminde uçucu kül [4], yüksek fırın cürufu [5], silis dumanı [6] gibi endüstriyel atıkların yanı sıra andezit tozu [7], mermer tozu [8] gibi doğal taşların işlenmesiyle ortaya çıkan atıklar da son zamanlarda kullanılmaktadır. Ayrıca atık tozları aktifleştirmek için sodyum hidroksit [9], sodyum silikat [10], sodyum hidroksit-sodyum silikat karışımı [11, 12] sıklıkla kullanılan aktivatör çeşitleridir.

Alkali aktivatörlerle ilgili çalışmalar uzun süredir araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmektedir. Bu bağlamda, atık toz malzemelerin alkali aktivatörler kullanılarak üretilmesi ile ilgili araştırmalar endüstriyel

atıkların çevresel etkileri nedeniyle kullanımına odaklanmıştır. Alüminosilikatların yeryüzünde en bol bulunan bileşikler olması nedeniyle, geopolimer üretme potansiyeline sahip, alümina ve silis açısından zengin çok sayıda hammadde kaynağı mevcuttur [13-17].

Doğal taş kesimi üretim süreci sonunda önemli oranda atık toz meydana gelmektedir. Tane boyutu 125µm dan daha küçük olabilen bu atık toz; hava, toprak ve su kirliliğine sebep olmaktadır. Ortaya çıkan tozun farklı alanlarda hammadde olarak kullanılması noktasında bazı araştırmalar yapılmaktadır [18]. Volkanik bir kayaç olan bazalt; lif katkı [19], agrega [20], mineral katkı [21] olarak kullanılabilirliği genel olarak araştırma alanlarını oluşturmaktadır. Ancak bu kayacın kesim atığı tozlarının agrega ve mineral katkı olarak kısmen kullanımının yanı sıra tamamen atık toz bağlayıcı olarak kullanılan alkali aktivasyon yöntemi de uygun bir araştırma alanıdır.

Önceki çalışmalarda atık bazalt tozunun çimento esaslı beton/harç üretiminde kullanımı üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Ancak alkali aktivasyon yöntemleri kullanılarak bazalt tozunun farklı alanda değerlendirilmesinin etkinliği üzerine çalışmalar kısıtlıdır. Bu çalışmada, atık bazalt tozu sabit aktivatör içeriği ile sabit ısıl kür sıcaklığında aktive edilerek geopolimer harçlar üretilmiştir. Harçlar 4 farklı su içeriği ile üretilmiş ve 3 farklı sürede ısıl küre tabi tutulmuştur. Üretilen harçların yayılma, su emme, boşluk oranı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı özellikleri araştırılmıştır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: scelikten@nevsehir.edu.tr (S. Çelikten)

Geliş / Received: 07.12.2020 Kabul / Accepted: 18.12.2020 Yayımlanma / Published: 15.01.2021
doi 10.28948/ngmuh.836998

2 Materyal ve metot

Çalışmada katı alümina silikat kaynağı olarak kullanılan atık bazalt tozu (ABT) Kayseri yöresinde bazalt kesimi yapan yerel bir firmadan temin edilmiştir. Tamamı 125 µm elekten geçebilen atık malzeme karışımların su içeriğinde farklılık oluşmaması için etüvde 105 °C'de 24 saat kurutulduktan sonra kullanılmıştır. ABT malzemesinin kimyasal kompozisyonu **Tablo 1**'de sunulmuştur. Geopolimer harç karışımlarında 0-4 mm tane boyutu aralığında dere kumu ve şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Dere kumunun doymun kuru yüzey özgül ağırlığı 2.67 ve su emme oranı %1.94'dür. Kuma ait elek analizi sonuçları **Tablo 2**'de verilmiştir. Karışımlarda kullanılan ABT malzemesinin görünümü **Şekil 1**'de yer almaktadır. Aktivatör olarak da ABT ağırlığının %10'u kadar Na₂O içeren sıvı sodyum silikat kullanılmıştır. Yapılan bir ön çalışmada [22], KOH, NaOH ve sıvı sodyum silikat içeriği ile üretilen bazalt esaslı geopolimer harçlarda en yüksek dayanım değerlerine sodyum silikat ile üretilen harçlarda elde edildiği rapor edilmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada da sodyum silikat tercih edilmiş, farklı deney parametreleri ile daha yüksek mekanik özellikler elde edilmeye çalışılmıştır.

Tablo 1. Atık bazalt tozunun kimyasal kompozisyonu

Oksit	%	Oksit	%
SiO ₂	46.73	Na ₂ O	3.21
Al ₂ O ₃	16.42	TiO ₂	2.72
CaO	10.97	K ₂ O	0.69
Fe ₂ O ₃	8.39	MnO	0.86
MgO	7.23	P ₂ O ₅	0.47

Tablo 2. Dere kumu elek analizi değerleri

Elek Çapı, mm	Geçen, %
4.00	99.1
2.00	65.1
1.00	40.2
0.5	21.3
0.25	9.9
0.125	3.7
0.063	0.9



Şekil 1. Atık bazalt tozu (ABT)

Deneyel çalışmada ABT ile 12 farklı geopolimer harç karışımı oluşturulmuştur. Harç üretiminde 3 gözlü 4×4×16 cm prizma kalıp için kullanılan malzeme miktarları **Tablo 3**'de sunulmuştur. Karışımlar 0.31, 0.35, 0.40 ve 0.45 olmak üzere 4 farklı su/ABT oranı ile oluşturulmuştur. En düşük su/ABT oranının 0,31 seçilmesinin sebebi %10 Na₂O oranında 228 gr Na₂SiO₃ içerisindeki su miktarının

bağlayıcıya oranı 0.31'e denk gelmesindedir. Karışımlarda öncelikle ABT ve aktivatör solüsyonları Hobart mikseri kabına yerleştirilmiş, kum daha sonra TS EN 196-1 standardında olduğu 30 sn içinde ilave edilmiştir. Üretilen karışımlar 3 gözlü prizma kalıplara döküldükten sonra 1 gün laboratuvar koşullarında ön küre tabi tutulmuş, daha sonra 90°C'de 4, 8 ve 24 saat olmak üzere 3 farklı sürede ısıl kür uygulanmıştır. Taze harçlara TS EN 1015-3 [23] standardına uygun olarak yayılma tablası deneyi gerçekleştirilerek işlenebilirlik değerleri belirlenmiştir. Harçlar üzerinde ısıl kürden 7 ve 28 gün sonra TS EN 196-1 [24] standardına göre eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. Harç karışımları

Seri	Karışım	ABT	Kum, g	Na ₂ SiO ₃ , g	Su, g
0.31	0.31-4	450	1350	228	0
	0.31-8	450	1350	228	0
	0.31-24	450	1350	228	0
0.35	0.35-4	450	1350	228	19
	0.35-8	450	1350	228	19
	0.35-24	450	1350	228	19
0.40	0.40-4	450	1350	228	41
	0.40-8	450	1350	228	41
	0.40-24	450	1350	228	41
0.45	0.45-4	450	1350	228	63
	0.45-8	450	1350	228	63
	0.45-24	450	1350	228	63

3 Bulgular ve tartışma

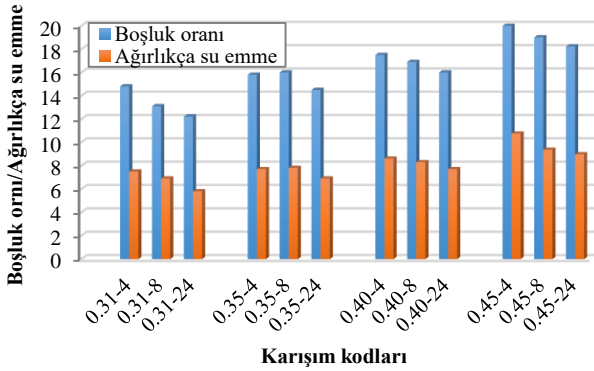
Çalışmada üretilen taze harçların yayılma değerleri **Tablo 4**'te sunulmuştur. Su/ABT oranı 0.31'den 0.45'e çıkmasıyla yayılma değeri 128 mm'den 154 mm'ye ulaşarak 26 mm'lik bir artış meydana gelmiştir.

Tablo 4. Taze harçların yayılma değerleri

Karışım Grubu	yayılma, mm
0.31	128
0.35	135
0.40	143
0.45	154

ABT ile elde edilen sertleşmiş geopolimer numunelerinin su emme ve boşluk oranı değerleri **Şekil 2**'de verilmiştir. Harçların boşluk oranları %12.2 ile %21.7 arasında değerler almıştır. En düşük boşluk oranı 0.31-24 kodlu harçlarda ulaşılrken, en yüksek boşluk oranı 0.45-4 kodlu harçlarda gözlenmiştir. Su içeriğinin azalması ile harçların boşluk oranları kademeli olarak azalmıştır. Öyle ki, 0.40 su/ABT içeriği ile üretilen harçların boşluk oranları 0.45 ile üretilenlere göre %2 ile %4 arasında daha düşük ve 0.31 su/ABT oranı ile üretilen harçların boşluk oranları da %2.5 ile %4 arasında daha düşük elde edilmiştir. Diğer taraftan, su içeriği fark etmeksizin harçlara uygulanan ısıl kür süresi arttıkça genel itibariyle boşluk oranlarında da azalma meydana gelmiştir. Isıl kür süresinin 4 saatten 24 saate çıkması ile harçların boşluk oranları %1.3 ile %3.5 arasında değişen oranlarda azalmıştır. ABT esaslı geopolimer harçların su emme değerleri %5.8 ile %10.8 arasında elde edilmiştir. Harçların su emme değerleri su içeriğinin azalması ve ısıl kür süresinin artması ile birlikte genellikle düşmüştür. Bu çalışmada üretilen ABT esaslı geopolimer

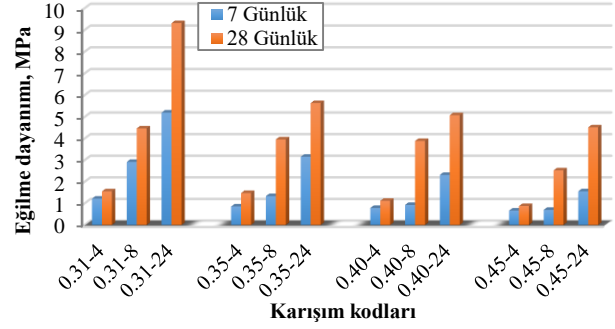
harçların deney sonuçlarını kıyaslayabilecek çalışma çok kısıtlıdır. Bu nedenle, farklı öncü aluminosilikat malzemelerin kullanıldığı çalışmalarla bulgular kıyaslanmış ve tartışılmıştır. Yapılan bir çalışmada [25], dere kumu ile üretilen F sınıfı uçucu küllü geopolimer harçların su emme ve görünür boşluk özellikleri araştırılmıştır. 28 günlük basınç dayanımı 22 MPa olan harçların su emme ve boşluk oranları sırasıyla %11.79 ve %21.51 olarak hesaplanmıştır. Çalışmamızda ise benzer dayanıma sahip ABT esaslı geopolimer harçların (0.35-24) su emme ve boşluk oranları sırasıyla %6.9 ve %14.5 olarak hesaplanmıştır. Diğer bir çalışmada [26], dere kumu ile volkanik kül esaslı geopolimer harçlar üretilmiştir. Üretilen harçlar 80 °C'de 24 saat ısı küre tabi tutulmuştur. Çalışmada 28 günlük basınç dayanımı 30 MPa olan geopolimer harçların su emme ve boşluk oranları sırasıyla yaklaşık olarak %6 ve %13 olarak hesaplanmıştır. Çalışmamızda ise benzer dayanıma sahip ABT esaslı geopolimer harçların (0.31-24) su emme ve boşluk oranları sırasıyla %5.8 ve %12.2 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada üretilen ABT esaslı geopolimer harçların benzer dayanıma sahip uçucu küllü [25] ve volkanik küllü [26] geopolimer harçlara kıyasla daha düşük su emme ve boşluk oranlarına sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 2. Geopolimer numunelerin su emme-boşluk oranları

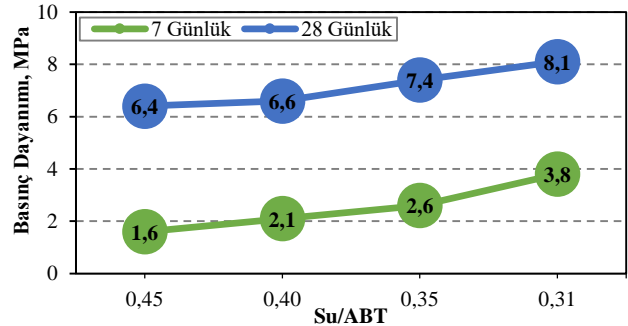
Sertleşmiş geopolimer numunelerin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları Şekil 3'de sunulmuştur. Harçların 7 günlük eğilme dayanımları 0.67 ile 5.2 MPa arasında değişirken, 28 günlük eğilme dayanımları 0.88 ile 9.32 MPa arasındadır. Harçların eğilme dayanımları su/ABT oranı azaldıkça artmıştır. Öyle ki, 0,31 su/ABT ile üretilen harçların eğilme dayanımı değerleri 0.45 ile üretilenlere göre yaklaşık %80 oranında daha yüksek elde edilmiştir. Geopolimer bağlayıcılarda su sadece alümino silikatlı aktive edilecek malzemelerin çözünmesi için ortam sağlamakla kalmaz, aynı zamanda çeşitli iyon transferleri ile Al ve Si monomerik ve oligomerik türlerin polikondensasyonuna yardımcı olur [27, 28]. Ancak, bu rolünün dışında işlenebilirliği artırmak amacıyla kullanılan fazla miktardaki serbest su, bağlayıcı fazının daha boşluklu olmasına ve geopolimerlerin mekanik özelliklerinin olumsuz etkilenmesine yol açabilmektedir. Bu durum literatürde metakaolin [29], uçucu kül [30, 31] tabanlı geopolimer bağlayıcılar için de rapor edilmiştir.

Bununla birlikte, harçların eğilme dayanımları ısı küre süresinin artması ile birlikte belirgin bir şekilde artmıştır. Numunelerde en yüksek eğilme dayanımı değerleri 0.31-24 kodlu harçlarda elde edilirken, en düşük değerler 0.45-4 kodlu harçlarda görülmüştür.

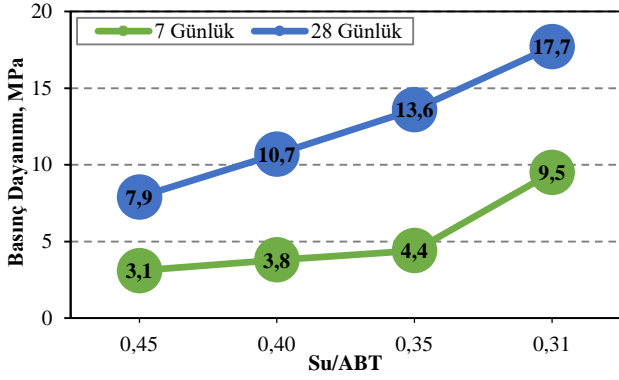


Şekil 3. Geopolimer harçların eğilme dayanımları

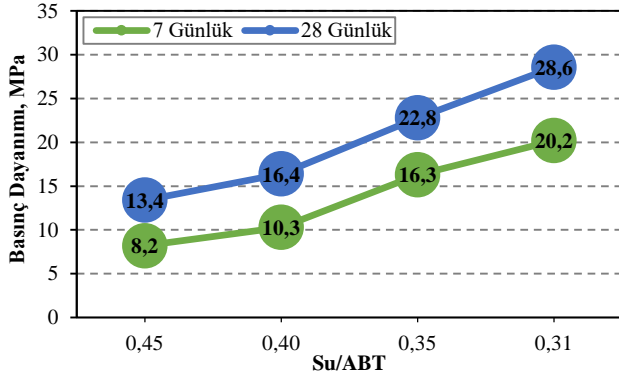
ABT esaslı geopolimer harçların basınç dayanımları 4 saatlik ısı küre için Şekil 4, 8 saatlik ısı küre için Şekil 5 ve 24 saatlik ısı küre için de Şekil 6'da verilmiştir. ABT ile üretilen geopolimer harçlarda en yüksek 28 günlük basınç dayanımı 28.6 MPa 0.31-24 kodlu harçlarda elde edilmiştir (Şekil 6). En düşük 28 günlük basınç dayanımı olan 6.4 MPa ise 0.45-4 harçlarda gözlenmiştir (Şekil 4). Harçların basınç dayanımlardaki değişimler, eğilme dayanımlarında görülen değişimlere benzer olmuştur. Harçların basınç dayanımları su içeriğinin azalması ve ısı küre süresinin artması ile birlikte belirgin bir şekilde artmıştır. ısı küre süresinin artması ile harçlarda görülen dayanım artışı, ABT malzemesindeki amorf fazlardan Al ve Si iyonlarının ısı küre etkisiyle daha fazla çözünmesine bağlanabilir. Bu durum daha önce yapılan çalışmalarda metakaolin [32], uçucu kül [33] ve perlit [34] esaslı geopolimerler için de rapor edilmiştir. ABT tabanlı geopolimer harçlardan elde edilen bulgular da bu çalışmaların sonuçları ile uyumludur. Elde edilen sonuçlar düşük Ca içerikli geopolimer bağlayıcıların ısı küre etkisinde benzer davranış sergilediğini göstermektedir. Bununla birlikte, harçların basınç dayanımları 7 günden 28 güne %40 ile %300 oranları arasında değişen oranlarda artmıştır. Kür yaşı ile harçların basınç dayanımlarında görülen artış daha kısa süre ısı küre maruz kalan harçlarda (4 ve 8 saat) 24 saat ısı küre tabi tutulan harçlara göre daha fazla olmuştur. Bunun nedeni olarak, uzun süre ısı küre tabi tutulan harçların nihai dayanıma daha yakın olması gösterilebilir.



Şekil 4. 4 saat ısı küre sonrası basınç dayanımları



Şekil 5. 8 saat ısı küt sonrası basınç dayanımları



Şekil 6. 24 saat ısı küt sonrası basınç dayanımları

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, bazalt taşı kesim atölyelerinden çamur şeklinde ortaya çıkan kesim atıkları ile üretilen geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

- Harçların mekanik ve fiziksel özellikleri, harçlardaki su içeriğinin azalması ve ısı küt süresinin uzaması ile birlikte gelişmiştir.
- En düşük su emme ve en düşük boşluk oranı sırasıyla %5.8 ve %12.2 olarak elde edilmiştir.
- Bazalt kesim atıkları ile 24 saat ısı küt süresi ve 0.31 su/ABT oranında 28 günlük eğilme dayanımı 9.32 MPa ve 28 günlük basınç dayanımı 28.6 MPa olan geopolimer harçlar üretilmiştir.
- Bazalt esaslı geopolimer harçlarda 8 saat gibi kısa sayılabilecek ısı küt süresinde düşük su içeriği ile 17.7 MPa 28 günlük basınç dayanımı elde edilmiştir.
- Geopolimer harçların dayanım değerlerinde küt yaşı ile birlikte farklı oranlarda artışlar görülmüştür.

Yapılan deneysel çalışma neticesinde, bazalt taşı kesim atıklarının geopolimer üretimi açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu anlaşılmıştır. Bu perspektif ile bu atıkların ekonomiye geri kazanımı ve çevreye verdiği zararların azaltılması mümkün olabilecektir. Ayrıca, bazalt taşı kesim atıklarının dayanıklılık özelliklerinin araştırılması sonraki çalışmalar için önerilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] G. Kürklü and G. Görhan, (2019). Investigation of usability of quarry dust waste in fly ash-based geopolymer adhesive mortar production. *Construction and Building Materials*, 217, 498-506, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.104>.
- [2] İ. Tekin, Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes. *Construction and Building Materials*, 127, 607-617, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.038>.
- [3] J. Davidovits, Geopolymers: Ceramic-like inorganic polymers, *J. Ceram. Sci. Technol.* 8, 335–350, 2017. <https://doi.org/10.4416/JCST2017-00038>.
- [4] M. Kaya, M. Uysal, K. Yılmaz, O. Karahan, C. D. Atiş, Mechanical properties of class C and F fly ash geopolymer mortars. *Gradevinar*, 72 (4), 297-309, 2020. <https://doi.org/10.14256/JCE.2421.2018>.
- [5] Ü. Yurt, High performance cementless composites from alkali activated GGBFS. *Construction and Building Materials*, 264, 120222, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120222>.
- [6] M. Rostami and K. Behfarnia, The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete. *Construction and building materials*, 134, 262-268, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.072>.
- [7] S. Çelikten, Mechanical and microstructural properties of waste andesite dust-based geopolymer mortars. *Advanced Powder Technology*, InPress, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.10.011>.
- [8] B. Coppola, P. Palmero, L. Montanaro, and J. M. Tulliani, Alkali-activation of marble sludge: Influence of curing conditions and waste glass addition. *Journal of the European Ceramic Society*, 40 (11), 3776-3787, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.11.068>.
- [9] U. Durak, O. Karahan, B. Uzal, S. İlkentapar, and C. D. Atiş, Influence of nano SiO₂ and nano CaCO₃ particles on strength, workability, and microstructural properties of fly ash-based geopolymer. *Structural Concrete*, 2020. <https://doi.org/10.1002/suco.201900479>.
- [10] C. Bilim and C. D. Atiş, Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 28(1), 708-712, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.018>.
- [11] İ. İ. Atabey, O. Karahan, C. Bilim, C.D. Atiş, The influence of activator type and quantity on the transport properties of class F fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, 264, 120268, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120268>.
- [12] S. Çelikten, M. Sarıdemir, and İ.Ö. Deneme, Mechanical and microstructural properties of alkali-activated slag and slag+ fly ash mortars exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 217,

- 50-61, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.055>.
- [13] C. Villa, E. T. Pecina, R. Torres, and L. Gómez, Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. *Construction and Building Materials*, 24 (11), 2084-2090, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.052>.
- [14] Ü. Yurt, B. Dündar, and E. Çınar, Jeopolimer betonlarda sülfürik asit etkisinin araştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8 (2), 1548-1561, 2020. <https://doi.org/10.29130/dubited.644176>.
- [15] M. Sarıdemir, Alkali ile aktive edilmiş öğütülmüş diatomitli harçların dayanım özellikleri. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2), 124-134, 2016. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.294970>.
- [16] Ü. Yurt, An experimental study on fracture energy of alkali activated slag composites incorporated different fibers. *Journal of Building Engineering*, 101519, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2020.101519>.
- [17] İ. İ. Atabey, O. Karahan, C. Bilim, and C. Atış, Very high strength Na₂SiO₃ and NaOH activated fly ash based geopolymer mortar. *Cement Wapno Beton*, 25, 292-305, 2020. <https://doi.org/10.32047/cwb.2020.25.4.4>.
- [18] V. Akyüncü, and M. T. Cihan, Bazalt tozu katkılı harçların mekanik ve geçirimsizlik özelliklerinin araştırılması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21 (2), 697-707, 2019. <https://doi.org/10.25092/baufbed.636998>.
- [19] H. Dilbas, and Ö. Çakır, Influence of basalt fiber on physical and mechanical properties of treated recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 254, 119216, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119216>.
- [20] P. P. Li, Q. L. Yu, and H. J. H. Brouwers, Effect of coarse basalt aggregates on the properties of Ultra-high Performance Concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, 170, 649-659, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.109>.
- [21] M. Dobiszewska, and A. Beycioğlu, Investigating the influence of waste basalt powder on selected properties of cement paste and mortar. *Materials Science and Engineering*, 245 (2), 2017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/2/022027>.
- [22] Çelikten S, Aktivatör türünün atık bazalt tozu esaslı jeopolimer harçların dayanım özelliklerine etkisi. *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi IMASCON, Online/Kocaeli/Türkiye. 4-5 Kasım 2020*.
- [23] TS EN 1015-3, Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayımla tablası ile). *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2006*.
- [24] TS EN 196 -1, Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2016*.
- [25] S. Thokchom, P. Ghosh, and S. Ghosh, Effect of water absorption, porosity and sorptivity on durability of geopolymer mortars. *ARPN Journal of engineering and Applied Sciences*, 4(7), 28-32, 2009.
- [26] J. N. Y. Djobo, A. Elimbi, H. K. Tchakouté, and S. Kumar, Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 124, 606-614, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.141>.
- [27] Z. Zuhua, Y. Xiao, Z. Huajun, and C. Yue, Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. *Applied Clay Science*, 43 (2) 218-23 2009. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.09.003>.
- [28] M. Lizcano, A. Gonzalez, S. Basu, K. Lozano, and M. Radovic, Effects of water content and chemical composition on structural properties of alkaline activated metakaolin-based geopolymers. *Journal of the American Ceramic Society*, 95(7), 2169-2177, 2012 <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2012.05184.x>.
- [29] R. Pouhet, M. Cyr, R. Bucher, Influence of the initial water content in flash calcined metakaolin-based geopolymer *Construction and Building Materials*, 201, 421-429, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.201>.
- [30] A. A. Aliabdo, M. Abd Elmoaty, and H. A. Salem, Effect of water addition, plasticizer and alkaline solution constitution on fly ash based geopolymer concrete performance. *Construction and Building Materials*, 121, 694-703, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.062>.
- [31] P. R. Vora, and U. V. Dave, Parametric studies on compressive strength of geopolymer concrete. *Procedia Engineering*, 51, 210-219, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.030>.
- [32] A. A. Aliabdo, M. Abd Elmoaty, and H. A. Salem, Effect of cement addition, solution resting time and curing characteristics on fly ash based geopolymer concrete performance. *Construction and building materials*, 123, 581-593 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.043>.
- [33] B. H. Mo, H. Zhu, X. M. Cui, Y. He, S. Y. Gong, Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. *Applied clay science*, 99, 144-148, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.06.024>.
- [34] S. Celikten, and B. Isikdag, Strength development of ground perlite-based geopolymer mortars. *Advances in concrete construction*, 9(3), 227-234, 2020. <https://doi.org/10.12989/acc.2020.9.3.227>.





Betonarme kolonların dayanım zarflarının kesme dayanımı modelleri ile karşılaştırılması

Comparison of strength envelopes of RC columns with shear strength models

Tamer Dirikgil¹ 

¹ Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri, Türkiye

Özet

Bu çalışmada sabit aksel yük ve çevrimsel yatay yük etkisi altında test edilen oniki adet betonarme kolonun deneysel dayanımları ile yaygın olarak kabul gören yedi kesme dayanımı modelinden elde edilen kesme kapasiteleri değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede kolonların kesme açıklığı oranları, etriye çapları, beton dayanımları ve aksel yük indeksleri birer parametre olarak dikkate alınmıştır. Değerlendirmeye alınan kesme dayanımı modellerinden üçü yönetmelik modelleridir. Diğer dört model ise artan duktilite talebine bağlı olarak çevrimsel yüklemeye ile kesme dayanımı azalmasını dikkate alan kesme dayanımı zarfı modelleridir. Değerlendirme neticesinde kesme dayanımı zarfları hem dayanımın belirlenmesinde hem de kesme dayanımı azalmasının benzeşiminde oldukça başarılı olmuştur. Yönetmelik modellerinin tasarımı yönelik olarak ihtiyatlı sonuçlar verdiği, ancak çevrimsel yüklemeye ile dayanım azalmasını dikkate alınması gerektiği görülmüştür. Kesme açıklığı oranı 1.5 olan kolonlar kesme hakim davranış için kritiktir ve yönetmeliklerde bu durum dikkate alınmalıdır. Aksel yük indeksinin çevrimsel yük etkisi altında davranışa etkisi tüm modeller tarafından ayrıca ele alınmalıdır.

Anahtar kelimeler: Betonarme kolon, Çevrimsel yük, Kesme dayanımı, Dayanım azalması modelleri

1 Giriş

Betonarme (BA) elemanların kesme kırılmaları genellikle düşük deformasyon seviyelerinde gerçekleşir ve yük tepkisi ani bir şekilde azalma eğilimi gösterir. Bu nedenle, modern yönetmeliklerin öngördüğü tasarımlarda daha büyük deformasyon kabiliyeti ve duktil davranışla eğilmeden kaynaklı akmanın kesme kırılmasından önce gerçekleşmesi sağlanarak kesme kırılmasının önüne geçilmesi hedeflenir. Şu noktada kesme kırılması riskinin modern yönetmeliklere göre detaylandırılmamış elemanlar için daha tehlikeli olduğu söylenebilir de, FEMA274 [1]’de modern yönetmeliklere göre tasarlanmış elemanlarda da kesme kırılmalarının meydana geldiği rapor edilmiştir. BA elemanların kesme dayanımları çevrimsel yük etkisi altında eğilme dayanımından daha hızlı bir şekilde düşer [2]. Bu nedenle BA yapısal elemanlar için tekdüze yüklemeye değerinin altında kalan ve çevrimsel yüklemeye bağlı olarak gelişen kesme dayanımı azalması dikkate alınmalıdır.

Dünya çapındaki birçok standart, yönerge veya yönetmelikte çok sayıda kesme dayanımı modelleri ve tasarım formülasyonları bulunmaktadır. Genel olarak tasarım amaçlı kullanılan standart/yönetmelik formülasyonları yaklaşık bir asır önce Ritter ve Mörsch [3, 4] tarafından önerilen kafes analogisi modeline dayanır. Kafes analogisi modeli, eleman doğrultusuyla 45° açı yapan

Abstract

The experimental strengths of twelve reinforced concrete columns, tested under the effect of constant axial load and cyclic lateral load, and the shear capacities obtained from seven widely accepted shear strength models were evaluated in this study. The shear spans, stirrup diameters, concrete strength, and axial load indexes of the columns were considered as parameters. Three of the shear strength models evaluated were regulation/code models. The other five models were shear strength envelope models that consider the shear strength degradation depending on cyclic loading and increasing ductility demand. The evaluation result showed that models of shear strength envelope are quite successful in both determining strength and simulating shear strength degradation. Regulation models take a conservative approach to design, but it has been observed that strength degradation with cyclic loading should be considered. Columns with a shear span of 1.5 are critical to shear-dominant behavior and regulations should take this into account. A further consideration is required for all models in assessing the effect of axial load index on behavior under cyclic loading.

Keywords: RC columns, Cyclic load, Shear strength, Strength degradation models

beton basınç çubukları ile kesme donatılarını ve boyuna donatıları temsil eden çekme çubuklarının oluşturduğu kafes örgüsü modeline dayanmaktadır. Kafes analogisi, mevcut elemanların kesme dayanımlarının hesaplanmasında kafes çubuk eğimi ve (eğilme-kesme etkileşimi, aderans kaybı, lineer olmayan davranış gibi durumların dikkate alınması için) beton basınç dayanımı üzerindeki ciddi kısıtlamalar nedeniyle çoğunlukla ihtiyatlı şekilde düşük sonuçlar vermektedir [5, 6]. Bu noktada salt kesme etkisinin dikkate alındığı vurgulanmalıdır.

Tasarım formülasyonlarının yanı sıra, klasik teorik yaklaşımların eksikliklerinin giderilmesi için başka teorik öneriler de söz konusu olmuştur. Bunlardan biri bilgisayar yazılımlarının da doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi yapılmasında esas aldığı Değiştirilmiş Basınç Alanı Teorisi [7] (MCFT-Modified Compression Field Theory)’dir. MCFT kesmeye maruz kalan iki boyutlu çatlamış betonarmenin yük-deformasyon davranışını tanımlayan genel bir modeldir. MCFT modeldeki en önemli varsayım, betonarmede çatlamış betonun amprik olarak tanımlanan gerilme-şekil değiştirme yaklaşımı ile yeni bir malzeme olarak değerlendirilmesidir. Bu model Bentz vd. [8] tarafından 100 adet salt kesme etkisi altındaki eleman üzerinde yapılan deneysel çalışmalarla önemli ölçüde basitleştirilmiştir. Basitleştirilen bu model SMCFT

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: dirikgil@erciyes.edu.tr
Geliş / Received: 08.12.2020 Kabul / Accepted: 18.12.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021
doi: 10.28948/ngmuh.837836

(Simplified Modified Compression Theory) olarak tanıtılmış ve bazı standart ya da yönergelerde [9, 10] yer almıştır.

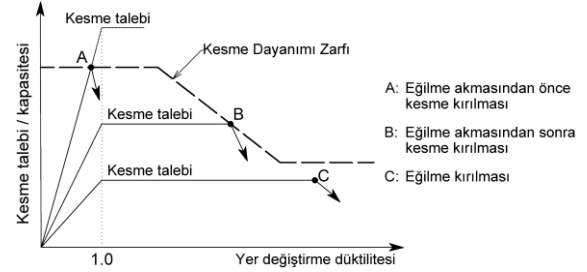
Son yıllarda, BA elemanların kesme dayanımlarının belirlenmesindeki doğruluğu artırmak için bazı kapasite modelleri ve basitleştirilmiş formülasyonlar önerilmiştir. Özellikle, deneysel çalışma verilerinin ve test parametrelerinin artması, bu basitleştirilmiş modellerin genel uygulamalarda kullanılabilmesi için kalibre edilmelerine ve değerlendirilmelerine olanak sağlamıştır. Bu modeller deneysel verilerin ortalama değerleri dikkate alınarak kalibre edilmiştir. Bu modellerde çevrimsel yük etkisi altında kesmeyi kritik hale getiren dayanım azalması sünekliğin bir fonksiyonu olarak dikkate alınmaktadır. Bu doğrultuda yapılan çalışmalarda, deneysel bulguların özellikle yönetmeliklere uygun olmayan BA elemanlarda çevrimsel yükleme ile sünekliğin azaldığını, kesme kırılmalarının erken gerçekleştiğini [11-13], dolayısıyla bu durumun elemanın yatay tepkisini önemli ölçüde etkilediğini [14] gösterdiği belirtilmiştir. Süneklik talebindeki artışla kesme dayanımındaki azalma, sünek eğilme kırılması davranışını eğilme akmasından sonra ani dayanım kaybı ile tehlikeli kesme kırılmasına yönlendirebilir [15]. Kesmenin hakim olduğu bu kesmeli eğilme davranışı, sünekliğin 1 olduğu noktadan sonra dayanımdaki azalmayı tarifleyen modern kapasite modelleri ile hesaba katılmaktadır. Bu modellerin bazıları bazı modern yönetmelik ve/veya yönergeler tarafından benimsenmiştir.

Kesme dayanımının sünekliğin bir fonksiyonu olarak azalmasını tarifleyen ilk çalışmalardan biri Priestley vd. [16] tarafından öne sürülmüştür. UCSD (University of California at San Diego) modeli olarak bilinen bu modelde, BA kolonlar için betonun, kesme donatısının ve eksenel yükün kesmeye katkısının dikkate alındığı bir dayanım zarfı modeli önerilmiştir. Bunun ardından, kesme açıklığı oranını ve boyuna donatı oranının beton kesme kapasitesi üzerindeki etkisini dikkate almayan orijinal UCSD modelinin bu eksikliğini gidermek için Kowalsky ve Priestley tarafından revize edilmiş UCSD modeli sunulmuştur [17]. Bu model dairesel kolonlar ve perde duvarlar için oluşturulmuş olsa da, genellikle yaygın uygulamada dikdörtgen kolonlar için kullanılmaktadır [2].

ATC sismik tasarım yönergesi [18] yer değiştirme düktilitesi ile kesme dayanımının azalmasını dikkate alan bir kesme kapasitesi eğrisi önermiştir (Şekil 1).

Sezen ve Moehle [19] tarafından; kolonların kesme açıklığı oranının, eksenel yükün ve kesme donatısı oranının yer değiştirme düktilitesine bağlı olarak kesme dayanımına katkısını dikkate alan bir başka model önerilmiştir. Biskinis vd [2] tarafından iki model önerisi sunulmuştur. Bunlardan ilki; eksenel yükün kesme dayanımı üzerindeki etkisini diyagonal basınç çubuğu (strut) mekanizması ve kesme donatılarının kesme dayanımına katkısını klasik kafes analogisini esas alarak tanımlayan bir modeldir. İkinci model ise diyagonal basıncın 45°'den farklı bir açıda kolonun köşegeni boyunca olduğunu varsayar. Biskinis ve Fardis [20] elemanın kırılma modunu dikkate alarak, ilk modeli "stirrup-yielding" (etriye akması), ikinci modeli ise "web-crushing" (gövde ezilmesi) olarak tanımlamışlardır. Bu modellerden her biri betonun, kesme ve boyuna donatı oranlarının

(Biskinis-web crushing kesme donatısı oranını dikkate almaz), kesme açıklığı oranının, en kesit boyutlarının ve eksenel yükün kesme dayanımına katkısını dikkate alan kesme dayanımı zarfları önermektedir.



Şekil 1. ATC kesme dayanımı zarfı modeli [18]

Bu çalışmada çevrimsel yükleme altında testi gerçekleştirilmiş olan on iki adet BA kolonun kesme dayanımları, yukarıda belirtilen açıklamalar doğrultusunda seçilen yedi ayrı kesme dayanımı modeli kullanılarak tahmin edilmiş ve elde edilen bulgular deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Testi gerçekleştirilen kolonlar modern yönetmeliklerin [21-23] tasarım koşullarına uygun olarak üretilmiş boyut ve donatı detay bakımında kusurlu olmayan kolonlardır. Test kolonları; kesme açıklığı oranı, etriye çapı, beton dayanımı ve eksenel yük indeksi farklı olan kolonlardan seçilerek en kesit boyutlarına göre gruplandırılmıştır. Çalışma kapsamında kesme açıklığı oranı, etriye çapı, beton dayanımı ve eksenel yük indeksinin parametre olarak belirlendiği deneysel veriler kullanılarak kesme dayanımı modellerinin tahmin öngörülerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2 Materyal ve metot

Bu çalışmada sabit eksenel yük ve tersinir tekrarları yatay yük etkisi altında test edilen on iki adet BA kolonun dayanım zarfları ile kesme dayanımı modellerinin tahminlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Bu karşılaştırmanın farklı parametreler dikkate alınarak yapılabilmesi için, test kolonları yazarın kolonların güçlendirilmesine yönelik yaptığı bir Tübitak projesi kapsamında yer alan güçlendirilmemiş kolonlar arasında seçilmiştir. Seçilen kolonlarla birlikte bu çalışma kapsamında yedi mevcut kesme dayanımı formülasyonu değerlendirmeye alınmıştır. Bunlardan ikisi kafes analogisini esas alan yönetmelik modelleri [21, 24], biri değiştirilmiş basınç alanı teorisinin basitleştirilmiş versiyonunu (SMCFT-simplified modified compression field theory) esas alan model [9] ve dördü ise düktiliteye bağlı olarak kesme dayanımı azalmasını esas alan modeller [2, 17, 19] olarak belirlenmiştir. Kolonların deneysel olarak belirlenmiş dayanım zarfları ile kesme dayanımı modellerinden elde edilen kapasite sonuçları kıyaslanarak ortaya konulmuştur.

2.1 Test kolonları

Bu çalışmada yer alan test kolonları iki gruba ayrılmıştır. Birinci grup aynı enkesit boyutlarına sahip ve ortak üretimle imal edilen ancak kesme açıklığı oranları ve etriye çapları farklı olan kolonlardan oluşmaktadır. İkinci grup ise en kesit boyutları ve kesme açıklığı oranları aynı ancak beton

dayanımları ve aksel yük indeksleri (n) farklı olan kolonlardır. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında kesme dayanımı zarfı modellerinin tahminlerinin değerlendirilmesinde; birinci grup için kesme açıklığı oranının ve etriye çapının bir parametre olarak dikkate alınması, ikinci grup için ise beton dayanımı ve aksel yük indeksi parametrelerinin değerlendirilmesi mümkün olmaktadır. Tüm kolonlar 8Ø16 boyuna donatıya sahiptir.

Birinci grup (Grup-1) kolonlarının en kesit boyutları 400×400mm² olup, kolonlara yatay yük 800mm, 600mm ve 400mm seviyelerinden uygulanmıştır. Dolayısıyla Grup-1 kolonlarının kesme açıklığı oranları (α_s) sırasıyla 2, 1.5 ve 1'dir. Kesme açıklığı oranı 2.5'den az olan kolonlarda kesme deformasyonunun etkisi yatay yük ile birlikte artmaktadır [25, 26]. Şu durumda dikkate alınan kesme açıklığı oranlarına bağlı olarak davranışta eğilmenin yanı sıra kesme etkileşiminin ve buna bağlı hasarların da göz önüne alınması amaçlanmıştır. Kesme oranı $\alpha_s=M/Vh$ ile tariflenmekte olup, tek eğrilikli kolonlar için $\alpha_s=M/Vh=L_s/h$ 'dir. Şu durumda birinci grup kesme açıklığı oranı $\alpha_s=2-1.5-1$ olarak değişen üç seriden oluşmaktadır. Her seride etriye çapı Ø10 ve Ø12 olan iki kolon yer almaktadır. Dolayısıyla birinci grupta 3 (seri)×2 (etriye çapı) olmak üzere toplam altı adet kolon yer almaktadır. Grup-1 kolonlarının tamamı etriye aralığı 100mm olan ve güncel yönetmelik şartlarını [21-23] sağlayan kusursuz kolonlardır. Grup-1 kolonlarının en kesit ve boykesit detayları Şekil 2.(a)'da görsel olarak verilmiştir. Tablo 1'de ise kolonlara ait değişkenler sayısal olarak görülebilir.

İkinci grup (Grup-2) kolonlarının en kesit boyutları 300×300mm²'dir. Kolonlara yatay yük 450mm seviyesinden uygulanmıştır. Dolayısıyla Grup-2 kolonlarının tamamı için kesme açıklığı oranı aynı olup $\alpha_s=1.5$ 'tir. Grup-2 kolonları beton dayanımı (BD) ve aksel yük indeksi (n) değişimine göre iki seriye ayrılmıştır. İkinci grubun beton dayanımı serisinde beton dayanımı sırasıyla yaklaşık BD=30-40-50MPa olan üç kolon, aksel yük indeksi serisinde ise n=0.3-0.4-0.5 olan üç kolon yer almaktadır. İkinci grupta 2 (seri)×3 (BD veya n) olmak üzere toplam altı adet kolon yer almaktadır. İkinci grup kolonlarının tamamında Ø10/100 etriye kullanılmış olup, bu kolonlar da güncel yönetmelik şartlarını [21-23] sağlayan kusursuz kolonlardır. BD serisinde aksel yük indeksi n=0.2 olarak sabit iken, n serisinde ise ortalama beton dayanımı 22.13MPa'dır. Grup-2 kolonlarının en kesit ve boykesit detayları Şekil 2.(b)'de görsel olarak verilmiştir. Tablo 1'de ise kolonlara ait değişkenler sayısal olarak görülebilir.

Kolonlar $BK_G-\alpha_s-BD-n-\varnothing_w$ şeklinde notasyonlandırılmıştır. Çalışmanın devamında bu notasyonlar içerisinde gruplara ait değişkenler parantez içinde verilerek vurgulanacaktır. Burada:

BK: Betonarme Kolon

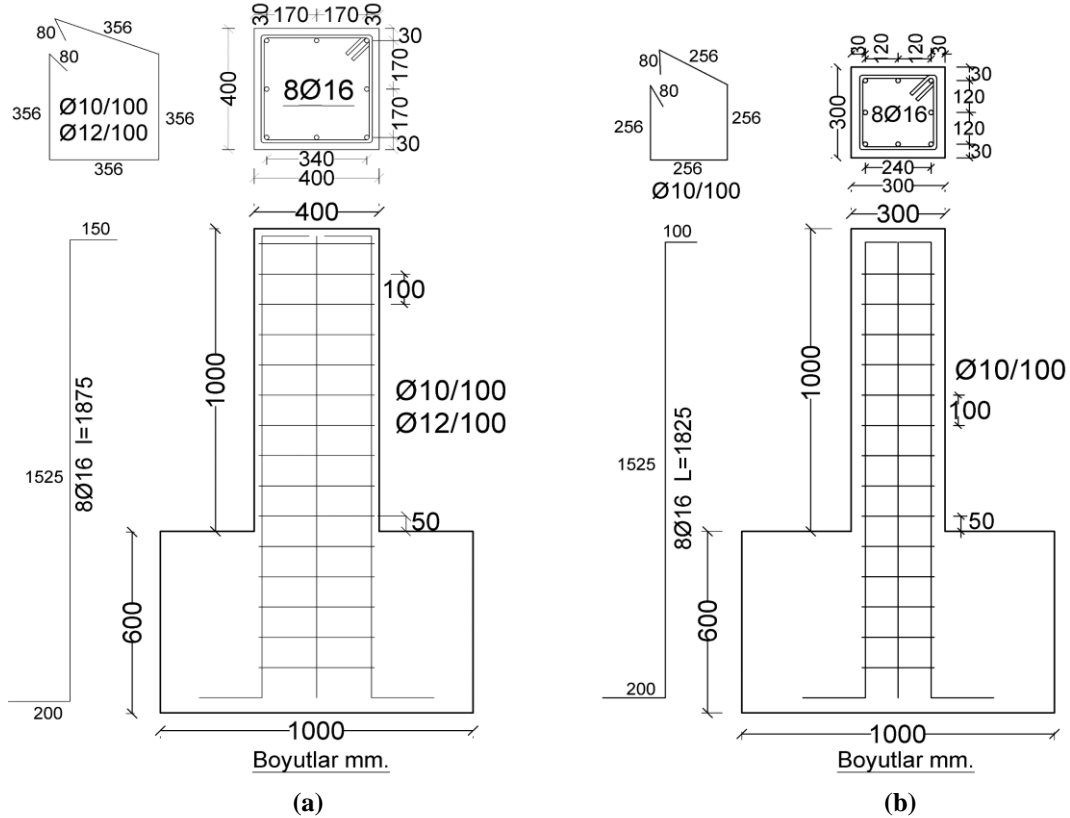
G: Grup

BD: beton dayanımını temsilen beton sınıfı

α_s : kesme açıklığı oranı

n: aksel yük indeksi

\varnothing_w : etriye çapıdır.



Şekil 2. (a) Grup 1 (b) Grup 2 kolonlarının en kesit ve boy kesit detayları

Tablo 1. Kolonların boyut ve parametreleri

Kolon	$b \times h$ mm ²	α_s	f_c MPa	n	ρ_l	ρ_w	f_y MPa	f_{yw} MPa
BK ₁ -(2)-C25-0.2-(Ø10)	400×400	2	28.07	0.2	0.010053	0.003927	448.13	521.07
BK ₁ -(2)-C25-0.2-(Ø12)	400×400	2	28.07	0.2	0.010053	0.005655	448.13	485.11
BK ₁ -(1.5)-C25-0.2-(Ø10)	400×400	1.5	28.07	0.2	0.010053	0.003927	448.13	521.07
BK ₁ -(1.5)-C25-0.2-(Ø12)	400×400	1.5	28.07	0.2	0.010053	0.005655	448.13	485.11
BK ₁ -(1)-C25-0.2-(Ø10)	400×400	1	28.07	0.2	0.010053	0.003927	448.13	521.07
BK ₁ -(1)-C25-0.2-(Ø12)	400×400	1	28.07	0.2	0.010053	0.005655	448.13	485.11
BK ₂ -1.5-(C30)-0.2-Ø10	300×300	1.5	32.24	0.2	0.017872	0.005236	453.28	520.02
BK ₂ -1.5-(C40)-0.2-Ø10	300×300	1.5	39.27	0.2	0.017872	0.005236	453.28	520.02
BK ₂ -1.5-(C50)-0.2-Ø10	300×300	1.5	51.73	0.2	0.017872	0.005236	453.28	520.02
BK ₂ -1.5-C20-(0.3)-Ø10	300×300	1.5	22.13	0.3	0.017872	0.005236	453.28	520.02
BK ₂ -1.5-C20-(0.4)-Ø10	300×300	1.5	22.13	0.4	0.017872	0.005236	453.28	520.02
BK ₂ -1.5-C20-(0.5)-Ø10	300×300	1.5	22.13	0.5	0.017872	0.005236	453.28	520.02

2.2 Deneý düzeneđi

Deneý düzeneği iki yatay yüklemeye ünitesi ve bir düşey yüklemeye ünitesinden oluşmaktadır. Bu ünitelerde yük hücreleri, mafıallar ve diğer bağlantı elemanları yer almaktadır. Test kolonları tam ölçekli olduğundan, özellikle $\alpha_s=1$ kesme oranına sahip kolonlarda, oldukça büyük yatay yük seviyelerine ulaşılmaktadır. Büyük yatay yük seviyelerinde tek noktadan çevrimsel yüklemeye yapılması bağlantı elemanlarının aşırı zorlanmasına neden olmakta ve iş sağlığını tehlikeye atmaktadır. Bu nedenle kolonlara karşılıklı yatay yük uygulanarak çevrimsel yüklemeye yapılmıştır [27]. Krikolardan biri yüklemeye yaparken diğerinin yađ basıncı serbest bırakıldığında karşı bir tepki oluşmamaktadır [28]. Deneý düzeneğinin bir görünümü Şekil 3’de verilmektedir.

2.3 Yükleme prosedürü

Yatay yüklemeye prosedürü FEMA461’de [29] belirtilen yapısal bileşenlerin yer değiştirme kontrollü olarak yüklenmesine ilişkin statik yük uygulaması takip edilerek uygulanmıştır. Kolonların gevrek davranış karakterleri nedeniyle, küçük yer değiştirme değerlerinde büyük hasarlar meydana gelmesi olası olduğundan, küçük yer değiştirme artışları ile deneye devam edilmesi daha uygun olmaktadır. Böylece hem davranış daha net gözlemlenmekte, hem de birkaç döngü sonra meydana gelecek ani göçmelerden sakınılmış olmaktadır. Yüklemenin sıfır-itme-çekme-sıfır yolunu izlemesi bir döngüdür. Her döngü prosedür gereği 2 kez tekrarlanmaktadır. Dolayısıyla peş peşe tekrarlanan 2 döngü 1 adımı oluşturmaktadır. Prosedür gereği en az 10 adım çevrimsel yüklemeye uygulanması gerektiğinden, yük adımları hedef yer değiştirmelere 10.adımda ulaşılacak şekilde belirlenmiştir. Hedef yer değiştirme kolonun etkili boyuna göre %3 görelitelenme olarak dikkate alınmıştır. Prosedür gereği, yük adımları 10.adıma kadar her adımda 1.4 kat, kolonun kırılmaması durumunda 10.adımdan sonra 1.3kat artırılarak uygulanmıştır. Yatay yüklemeye prosedürü yer değiştirme-adım grafiği Şekil 4’de verilmektedir.

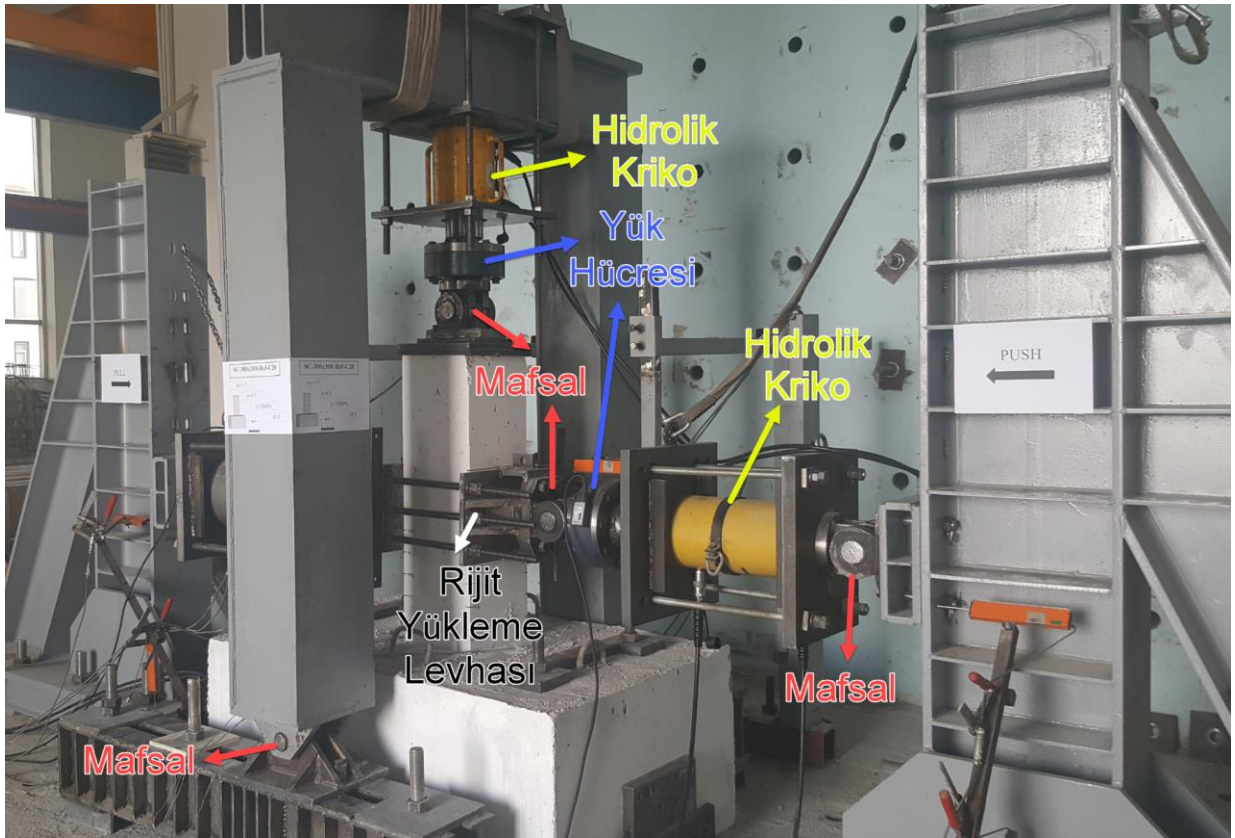
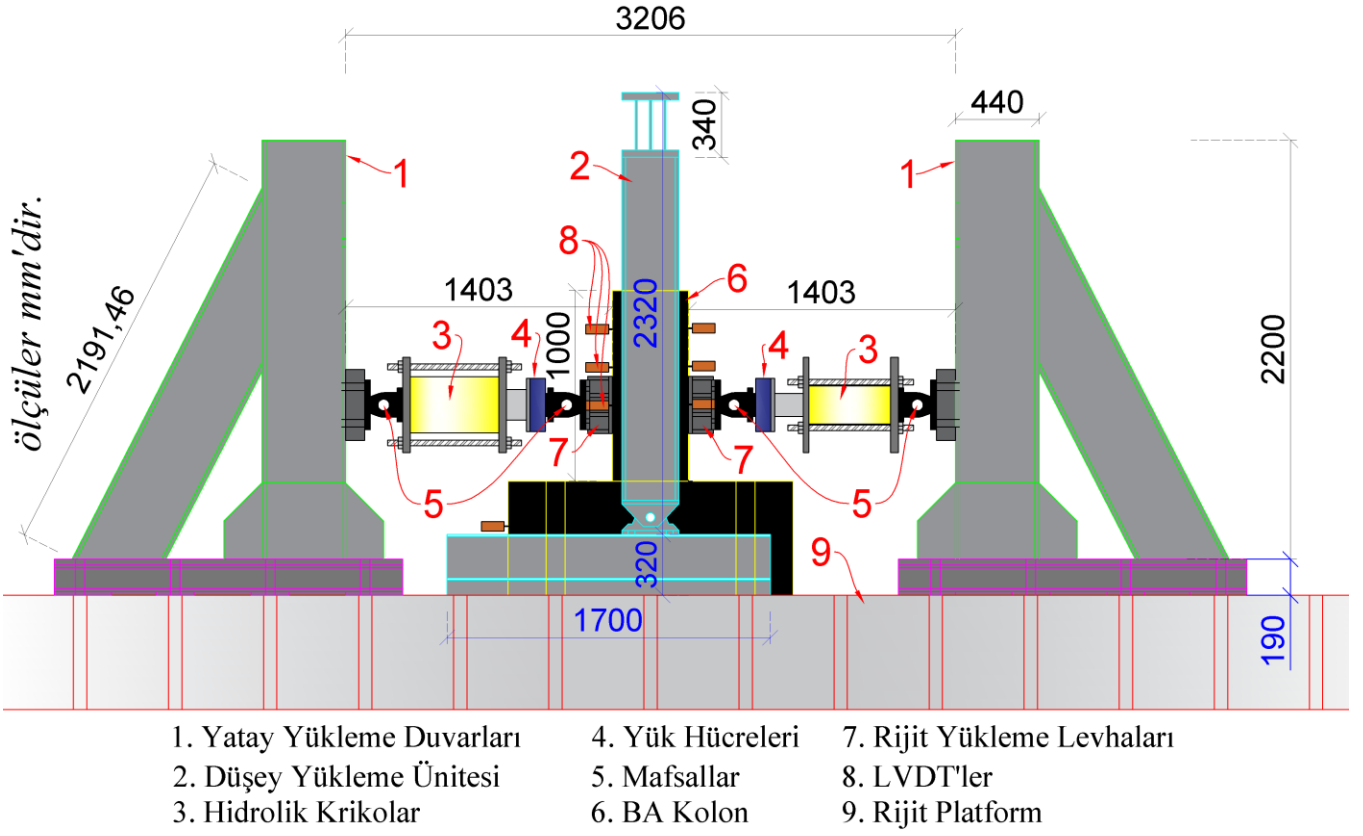
Kolonlara çevrimsel yüklemelerden önce eksenel yük indeksine (n) bağlı olarak eksenel yük uygulanmış ve eksenel yük seviyesi deneýler boyunca sabit tutulmuştur. Grup-1 kolonlarına ve Grup-2 BD serisi kolonlara $n= 0.2$, Grup-2 n serisi kolonlara ise $n=0.3-0.4 -0.5$ indeksleri ile eksenel yük ($N=nA_c f_c$) uygulanmıştır.

2.4 Kesme dayanımı modelleri

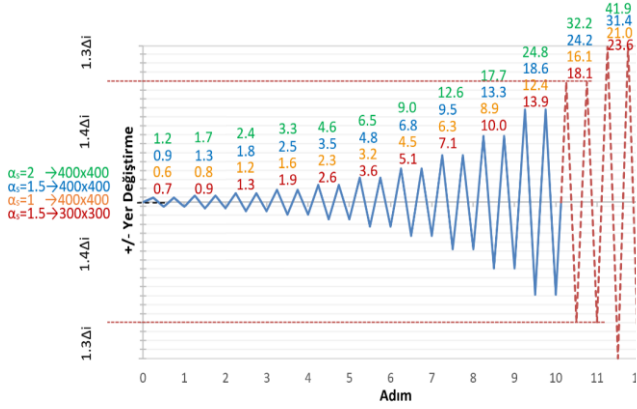
Bu çalışma kapsamında, deneysel olarak belirlenen BA kolon yatay yük dayanımlarının, yönetmelik ve diğer dayanım modellerinin amprik ifadelerinden elde edilen kapasite sonuçlarıyla kıyaslanması için yaygın kullanıma sahip yedi kesme dayanımı modeli dikkate alınmıştır. Yönetmelik modelleri tasarıma yönelik olarak mevcut dayanımı belirlemek yerine kesme kırılmasından uzak kalma amacıyla ihtiyatlı bir yaklaşım benimserken, kesme dayanımı zarfı (KDZ) modelleri olarak adlandırılan dayanım azalması modelleri çevrimsel yüklemeye ve artan düktilite talebine bağlı olarak oluşturulan zarflarla davranışı yakalamayı amaçlamaktadır. şu noktada yönetmelik modellerinden mevcut dayanımı belirlemesi değil, hesaplanan dayanım aşıldıktan sonra hangi seviyede kesme kırılmasının meydana geldiğini sorgulamak gerekir. Yönetmelikler belirli bir güven aralığı da dikkate aldıklarından, mevcut dayanım hesaplanan değerin biraz üstünde olsa dahi kesme kırılması beklenmeyebilir. Bu çalışmada yönetmeliklerin ihtiyatlı yaklaşım için belirlediği güven aralığının çevrimsel yüklemeye maruz kalan kolonlar için değerlendirilmesi yapılırken, KDZ modellerinin ise mevcut dayanımın belirlenmesinde ve mevcut davranışın benzeşiminde uyumlulukları incelenmiştir. Çalışma kapsamında dikkate alınan kesme dayanımı modelleri bu kısımda genel hatlarıyla açıklanmış, amprik ifadeleri ise Ek A’da verilmiştir. Çalışma içerisindeki tablolarda ve amprik ifadelerde yer alan kısaltmaların açıklamaları Ek B’de kısaltmalar listesi olarak verilmiştir.

2.4.1 Kafes analogisi modelleri

Kafes analogisi modelleri, genellikle yeni yapıların sismik tasarımı için yönetmelikler tarafından önerilir ve genellikle değerlendirme amacıyla kullanılır. Ayrıca, kafes modelleri, mevcut elemanlar için FRP tabanlı kesme güçlendirmesi çözümlerinin tasarımında da inşa edilmiş eleman kapasitesini tahmin etmek için sıklıkla kullanılır [30-32]. Mevcut tasarımı yönetmeliklerinde döngüsel yüklemeye altında kesme dayanımındaki azalma iyi bilinmektedir. Bununla birlikte, dayanım azalması elemanın deformasyon seviyesi açısından açık bir şekilde tanımlanmaz ve ihtiyatlı bir hesaplama yoluna gidilir [33]. Bu çalışma kapsamında ACI318-19 [21] ve TS500/2000 [24] kodlarında kesit kesme kapasitesinin hesaplanması için verilen amprik ifadeler dikkate alınmıştır. Bu tasarım kodlarında yer alan kesme



Şekil 3. Deney düzeneğinin görünümü



Şekil 4. Yükleme prosedürü yer değiştirme-adım grafiği

dayanımı ifadelerinde kolonların kesme açıklığı oranları dikkate alınmamaktadır. Tasarıma yönelik hesaplamalarda bazı malzeme katsayılarının kullanılması öngörülse de; bu çalışma kapsamında kullanılan malzemelerin dayanımları deneysel olarak belirlendiğinden, kesme kapasitesi hesaplamalarında malzeme katsayısı kullanılmamıştır.

2.4.2 Basitleştirilmiş değiştirilmiş basınç alanı teorisi modeli

BA elemanların kesme dayanımını tahmin etmek için bir diğer alternatif, basınç alanları teorisinin basitleştirilmiş bir versiyonu olan ve çeşitli standart ya da yönetmeliklerde önerilen SMCFT [8] modelidir. SMCFT maksimum dayanımda basınç ve çekme gerilmeleri eğiminin hesaplanmasını sağlayan basit denklemlerle orijinal teoriyi [7] basitleştirir. Hem enine hem de boyuna donatılandırılmış betonun plastik bir kafes mekanizması ile olası farklı asal basınç açıları için kesme dayanımını dikkate alır. Çalışma kapsamında BA elemanların kesme dayanımlarının hesaplanmasında SMCFT modelini esas alan CSA.A23.3-19 göz önüne alınmıştır.

2.4.3 Dayanım azalması modelleri (Kesme dayanımı zarfları)

Deneysel bulgular [11-13] kesme hakim davranış sergileyen ya da iyi detaylandırılmamış BA elemanların düşük süneklığe sahip olduğunu ve erkenden kesme kırılmasına maruz kaldığını göstermiştir. Döngüsel yüklemeye ve artan eğilme talebine bağlı deformasyonlar elemanın yatay tepkisini dolayısıyla kesme dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir [14]. Artan süneklilik talebine bağlı olarak kesme dayanımının azalması, sünek eğilme kırılması modunu akmanın gerçekleşmesinden sonraki yatay yük kapasitesinin ani bir şekilde düştüğü tehlikeli ve gevrek kesme kırılması moduna dönüştürebilir. Bu sebeple geniş deneysel bulgulara dayanan, çevrimsel yüklemeye ve artan süneklilik talebine bağlı olarak dayanım azalmasını dikkate alan modern kesme dayanımı zarfı (KDZ) modelleri önerilmiştir. Bu çalışma kapsamında bazı yönerge ve yönetmeliklerde de dikkate alınan Kowalsky ve Priestley [17], Biskinis vd. [2] ile Sezen ve Moehle [19] tarafından önerilen kesme dayanımı zarfı modelleri göz önüne alınmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Bu çalışmada çevrimsel yüklemeye ve sabit eksenel yük etkisi altında testleri gerçekleştirilen on iki adet BA kolonun deneysel olarak elde edilen yatay yük dayanımları ile göz önüne alınan yedi kesme dayanımı hesap modelinden elde edilen kapasite sonuçları kıyaslanmıştır. Deneysel bulguları değerlendirmeye alınan kolonlar farklı kesme açıklığı oranları, beton dayanımları ve eksenel yük indekslerine sahip olduklarından, bu parametrelerin hesap modellerinin tahmini üzerindeki etkileri incelenmiştir.

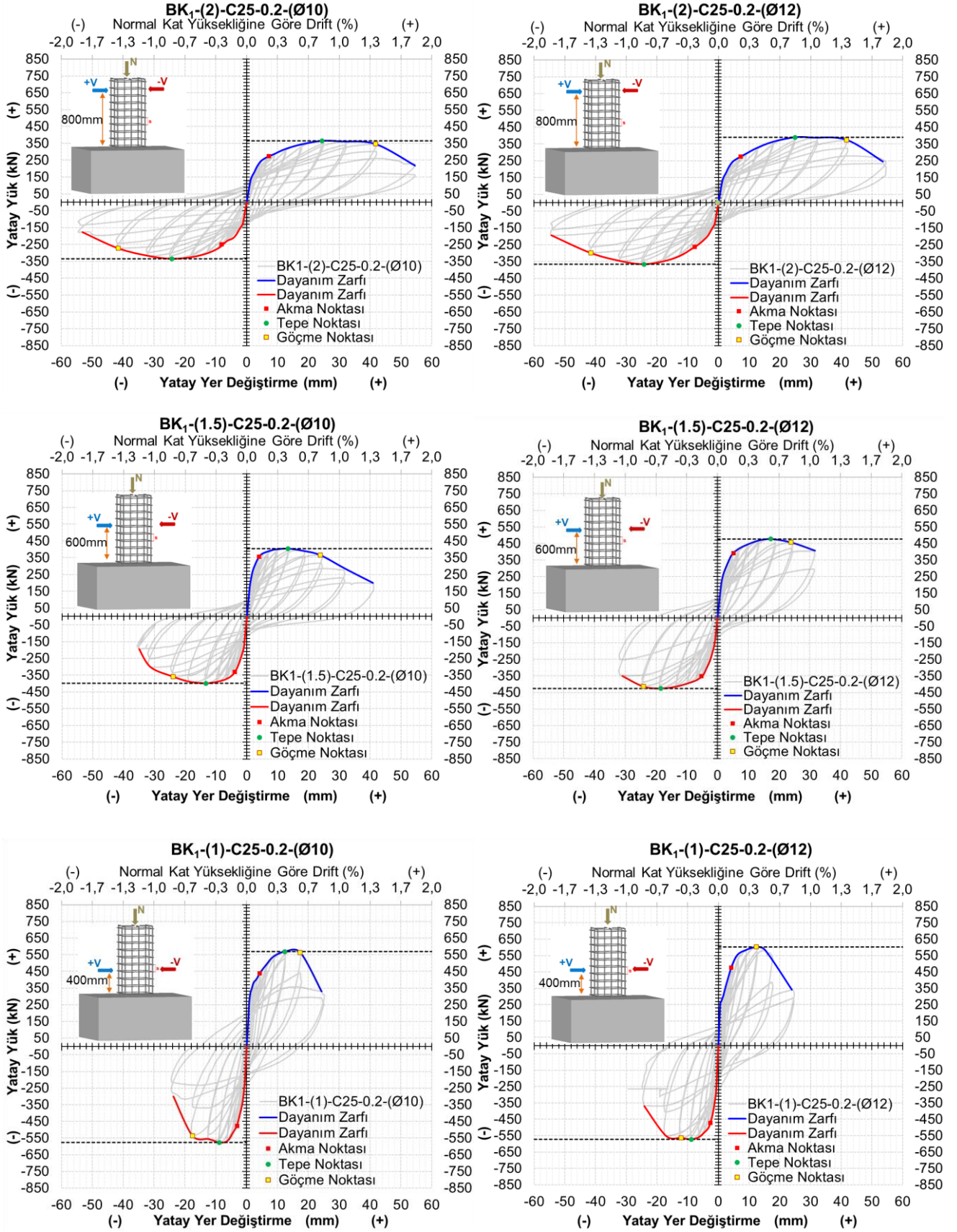
3.1 Test kolonlarının dayanım zarfları

Test kolonlarının histeretik davranışları ve dayanım zarfları Şekil 5-6'da verilmektedir. Kolonların akma noktaları (●), tepe yükü noktaları (●) ve göçme noktaları (■) dayanım zarfları üzerinde işaretlenmiştir. Kolonların göçme noktaları, tepe yükünden sonraki $0.80V_{\max}$ seviyesine kadar değerlendirilmiştir. Göçme noktaları aynı zamanda kolonların performans seviyelerinin değerlendirildiği noktadır. Performans değerlendirmelerinde göçme noktalarının ötesindeki davranış dikkate alınmamıştır.

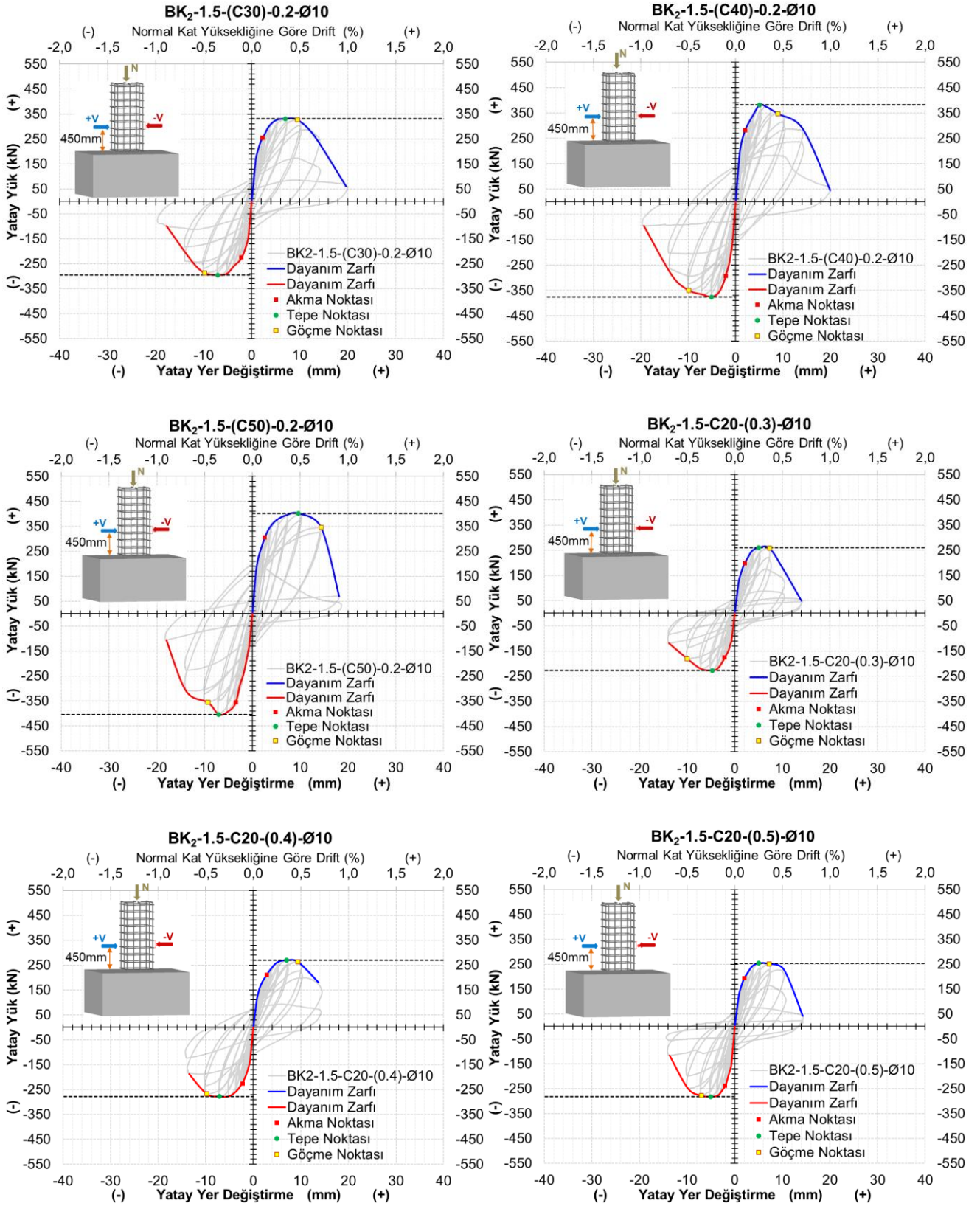
3.2 Kesme dayanımı modellerinin sonuçları

Kolonların yatay yük dayanımları itme ve çekme yüklemelerinde birbirine yakın olsa da, malzemenin anizotrop yapısı, kesit boyutları ve detaylarının kusursuz olamaması, çatlak gelişimleri vb. kontrol altına alınamayan nedenlerden ötürü farklılık göstermektedir. Bu nedenle kolon dayanımlarının net ve tek bir değer üzerinden kesme modelleri ile karşılaştırılabilmesi için, kolonların dayanımları itme-çekme yüklemelerinden elde edilen V_{\max} değerlerinin ortalaması olarak göz önüne alınmıştır. Bu noktada kolonların davranışlarında ve yatay yük dayanımlarında moment etkisinin de söz konusu olduğunu belirtmek gerekir. Yönetmelik modelleri salt kesme davranışını dikkate alırken, KDZ modelleri deneysel verilerle oluşturulduklarından düktilite talebindeki artışı esas alarak gayri ihtiyari olarak eğilme davranışını da dikkate alabilmektedir.

Kısım 2.4.1 ve 2.4.2'de tanımlanan kesme dayanımı modellerinde kesit için tek bir kesme dayanımı elde edilmektedir. Bu modeller için ilgili amprik ifadelerinden elde edilen kesme dayanımları esas alınmıştır. 2.4.3'de tanımlanan dayanım azalması modelleri ise düktiliteye bağlı olarak azalan kesme dayanımı zarfları ile tanımlanmaktadır. Bu modellerden elde edilen kesme dayanımları; dayanım zarfı ile kesme dayanımı zarfının kesişme noktası ya da (dayanım zarfı ile kesme dayanımı zarfı kesişmiyorsa) dayanım zarfının tepe noktasındaki düktilite değerine karşılık gelen kesme dayanımı zarfı değeri olarak dikkate alınmıştır. Kolonların ortalama dayanımları ile kesme dayanımı modellerinden elde edilen sonuçlar Tablo 2'de sayısal olarak, Şekil 7 ve Şekil 9'da ise görsel olarak özetlenmektedir. Değerlendirmelerde ACI→ACI 318-19'u, TS→TS500/2000'i, CSA→CSA.A23.3-19'u, B-SY→Biskinis-Stirrup Yielding, B-WC→Biskinis-Web Crushing, KP→Kowalsky&Priestley ve SM→Sezen&Moehle dayanım modellerini tarif etmek için kullanılmıştır.



Şekil 5. Grup 1 test kolonlarının histeresis eğrileri ve dayanım zarfları



Şekil 6. Grup 2 test kolonlarının histeresis eğrileri ve dayanım zarfları

Tablo 2. Test kolonlarının yatay yük dayanımları ve kesme dayanımı modellerinden elde edilen kapasite bulguları

Kolon	Ortalama Deneysel Dayanım kN	Biskinis-Web Crushing (B-WC) kN {A/D}	Biskinis-Stirrup Yielding (B-SY) kN {A/D}	Kowalsky & Priestley (KP) kN {A/D}	Sezen & Moehle (SM) kN {A/D}	CSA-AASHTO (CSA) kN {A/D}	ACI-318 (ACI) kN {A/D}	TS500 (TS) kN {A/D}
BK ₁ -(2)-C25-0.2-(Ø10)	349.88	344.73 {0.99}	363.32 {1.04}	376.74 {1.08}	406.92 {1.16}	523.35 {1.50}	489.56 {1.40}	501.59 {1.43}
BK ₁ -(2)-C25-0.2-(Ø12)	377.77	348.59 {0.92}	412.03 {1.09}	447.08 {1.18}	509.52 {1.35}	657.87 {1.74}	592.66 {1.57}	604.70 {1.60}
BK ₁ -(1.5)-C25-0.2-(Ø10)	401.50	434.00 {1.08}	401.92 {1.00}	454.66 {1.13}	515.35 {1.28}	523.35 {1.30}	489.56 {1.22}	501.59 {1.25}
BK ₁ -(1.5)-C25-0.2-(Ø12)	451.40	436.95 {0.97}	468.15 {1.04}	520.19 {1.15}	580.73 {1.29}	657.87 {1.46}	592.66 {1.31}	604.70 {1.34}
BK ₁ -(1)-C25-0.2-(Ø10)	572.75	581.02 {1.01}	495.19 {0.86}	543.59 {0.95}	698.86 {1.22}	523.35 {0.91}	489.56 {0.85}	501.59 {0.88}
BK ₁ -(1)-C25-0.2-(Ø12)	587.32	583.41 {0.99}	559.33 {0.95}	586.65 {1.00}	750.46 {1.28}	657.87 {1.12}	592.66 {1.01}	604.70 {1.03}
BK ₂ -1.5-(C30)-0.2-Ø10	313.11	321.99 {1.03}	341.90 {1.09}	331.51 {1.06}	366.22 {1.17}	362.99 {1.16}	329.63 {1.05}	336.67 {1.08}
BK ₂ -1.5-(C40)-0.2-Ø10	379.03	350.48 {0.92}	373.28 {0.98}	368.33 {0.97}	366.37 {0.97}	370.79 {0.98}	340.94 {0.90}	348.71 {0.92}
BK ₂ -1.5-(C50)-0.2-Ø10	403.00	377.67 {0.94}	395.02 {0.98}	391.67 {0.97}	423.71 {1.05}	383.06 {0.95}	358.73 {0.89}	367.64 {0.91}
BK ₂ -1.5-C20-(0.3)-Ø10	243.71	298.38 {1.22}	349.70 {1.43}	340.50 {1.40}	371.60 {1.52}	350.09 {1.44}	313.09 {1.28}	319.03 {1.31}
BK ₂ -1.5-C20-(0.4)-Ø10	273.50	322.03 {1.18}	370.22 {1.35}	362.88 {1.33}	381.52 {1.39}	350.09 {1.28}	322.34 {1.18}	328.73 {1.20}
BK ₂ -1.5-C20-(0.5)-Ø10	267.74	350.60 {1.31}	401.53 {1.50}	397.74 {1.49}	411.88 {1.54}	350.09 {1.31}	331.60 {1.24}	338.44 {1.26}

{A/D}: Analitik/Deneysel

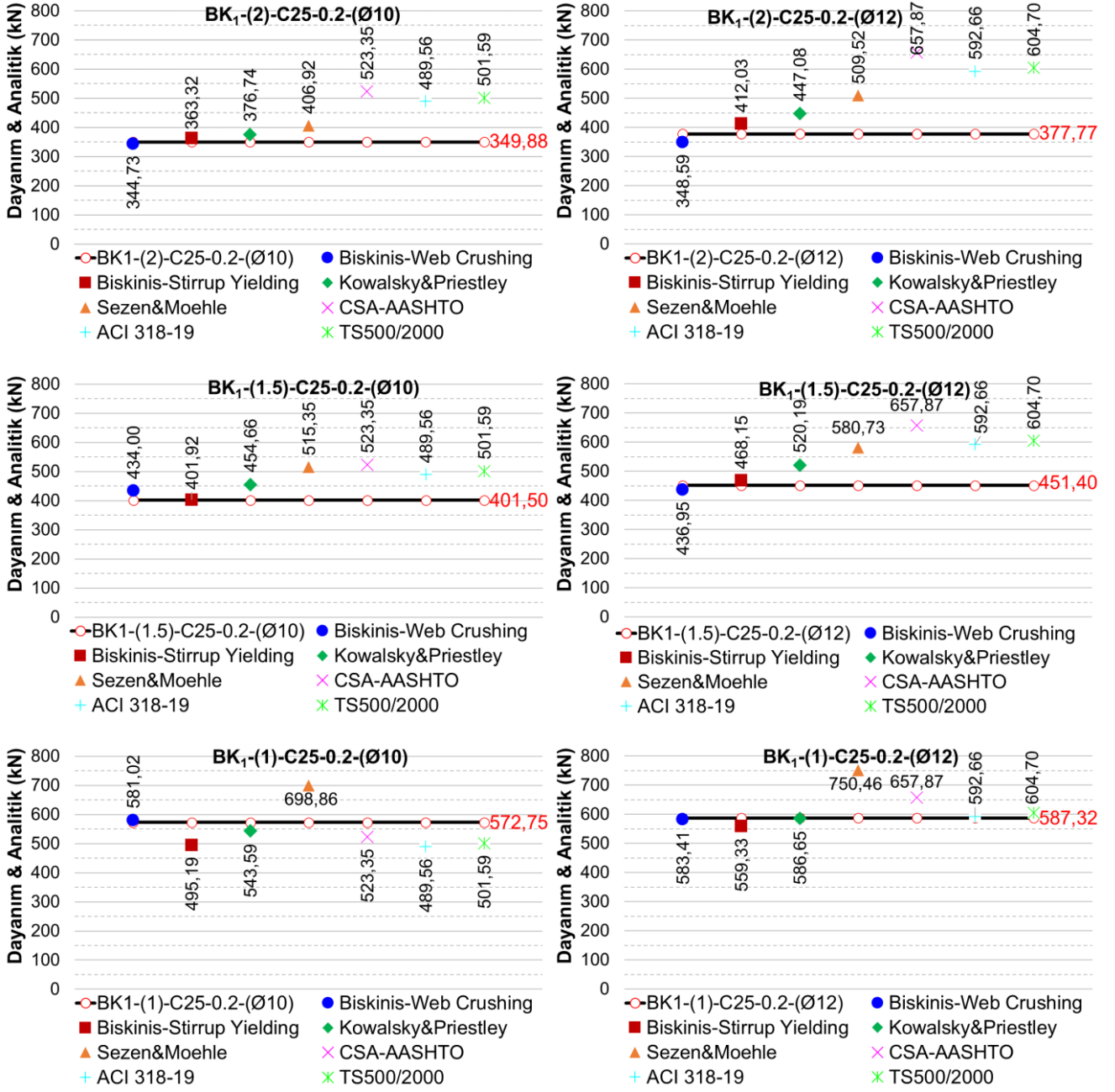
3.2.1 Kesme açıklığı oranı ve kesme donatısı çapının etkisi

Grup-1 kolonlarında kesme açıklığı oranları ve etriye çapları birer parametredir. Kesme açıklığı fazla olan kolonlarda eğilme davranışının daha etkili olmasından dolayı dayanım az, düktilite fazladır. Kesme açıklığı oranı azaldıkça kesme hakim davranış etkili olmaktadır. Kesme açıklığı oranı davranışta kesme etkileşimini artıran en önemli faktörlerden biridir. Kesme donatısı oranı ise kesitin kesme kapasitesini artıran bir parametredir. Şekil 7’de Grup-1 kolonlarının ortalama deneysel dayanımları ile kesme dayanımı modellerinden elde edilen bulgular görsel olarak verilmektedir. $\alpha_s=2$ olan kolonlar eğilme hakim davranış sergilemişlerdir. ACI, TS ve CSA ampirik kesme kapasiteleri ortalama deneysel dayanımlardan Ø10 etriyeye sahip kolonlarda 1.40-1.50, Ø12 etriyeye sahip kolonlarda ise 1.57-1.74 kat daha yüksektir. Yönetmelik modelleri ile belirlenen kesme değerlerinin deneysel dayanımın oldukça üzerinde olmasının nedeni, kolonların eğilme hakim davranış sebebiyle kesme kapasitelerine ulaşmamasıdır. KDZ modellerinden elde edilen sonuçlar ise Ø10 etriyeye sahip kolonlarda 0.99-1.08, Ø12 etriyeye sahip kolonlarda 0.92-1.18 aralığındadır. $\alpha_s=2$ için B-WC, B-SY ve KP modellerinin öngörülleri deneysel bulgularla oldukça uyumlu sonuçlar vermiştir.

$\alpha_s=1.5$ olan kolonlarda; ACI, TS ve CSA modellerinin sonuçlarının deneysel dayanıma oranı azalarak Ø10 ve Ø12 etriyeye sahip kolonlar için sırasıyla 1.22-1.30 ve 1.31-1.46 olmuştur. 400×400 mm² en kesite sahip bu kolonlarda da güç tükenmesi eğiliminin hakim olduğu bir davranış sonucunda

gerçekleşmiştir. Ancak yönetmelik modelleri ile deneysel dayanım oranlarının azalması davranışta kesme etkileşiminin arttığını göstermektedir. KDZ modellerinden elde edilen oranlar ise Ø10 ve Ø12 etriyeli kolonlar için sırasıyla 1.00-1.28 ve 0.97-1.29 aralığında değişmektedir. B-WC, B-SY ve KP modellerine ait öngörülerin kesme davranışını tahmini ve belirlediği dayanım zarfı sınırları deneysel davranışla oldukça uyumludur. Kesme açıklığı oranının azalması SM modelinin kesme dayanımı zarfı sınırlarını yönetmelik öngörülerinin seviyesine çekmiştir.

$\alpha_s=1$ olan kolonlarda; ACI, TS ve CSA modellerinin sonuçları BK₁-Ø10 kolonu için ortalama deneysel dayanım verilerinin altına düşmüştür. BK₁-Ø12 kolonu ise yönetmelik modellerinin belirlediği kesme kapasitesi sınırındadır. Bu modellerden elde edilen sonuçların ortalama deney dayanımlarına oranı Ø10 ve Ø12 etriyeye sahip kolonlar için sırasıyla 0.85-0.91 ve 1.01-1.12 aralığındadır. Yönetmelik modelleri tasarıma yönelik olduğundan, kesme dayanımlarının belirlenmesinde oldukça ihtiyatlıdır. Kesitin salt kesme dayanımının dikkate alındığı bu modellerde belirli bir güven aralığı da benimsenerek tehlikeli kesme kırılmasından uzaklaşmak amaçlanır. Dolayısıyla kesmenin hakim olduğu elemanlarda deneysel olarak belirlenen kesme dayanımının yönetmelik modellerinden daha yüksek olması beklenir. Nitekim BK₁-Ø10 kolonunun dayanımı yönetmelik modellerinden daha yüksektir. Ancak aradaki fark yönetmeliklerin dikkate aldığı güven aralığından küçüktür. Bunun yanı sıra BK₁-Ø12 kolonunun deneysel dayanımı ise yönetmelik modelleri ile belirlenen kapasite seviyesindedir ve söz konusu güven aralığı ortadan kalmıştır. Dolayısıyla



Şekil 7. Grup 1 test kolonlarının dayanımları ile kesme dayanımı modellerinin karşılaştırılması

kesitin güven aralığı dikkate alınmadan taşıyabileceği kesme kuvvetinin, başka bir deyişle kesitin gerçek kesme kapasitesinin daha yüksek olması ve kesitin kesme kırılmasına uğramaması beklenir. Ancak her iki kolon da kesme kırılması ile güç tükenmesine ulaşmıştır. Yönetmelik modellerinin güven aralıklarının azalması ya da ortadan kalkması çevrimsel yüklemenin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Şu noktada kesmenin hakim olduğu elemanlar için tasarıma yönelik olarak kesitin kesme dayanımının belirlenmesinde çevrimsel yük etkisinin dikkate alınması, kesme davranışı beklenen elemanların kesme kırılmasına uğramamaları için elzem görülmektedir. KDZ modellerinden elde edilen sonuçların ortalama deneysel dayanımlara oranı Ø10 ve Ø12 etriyeye sahip kolonlar için

sırasıyla 0.86-1.22 ve 0.95-1.28 aralığındadır. B-WC ve KP modellerinin oldukça başarılı olduğu, B-SY modelinin buna yakın bir başarı sergilediği görülmüştür. SM modeli kesme oranı 1 olan kolonların deneysel kesme dayanımlarının belirlenmesinde (bu çalışma kapsamında dikkate alınan kolonlar için) aynı başarıyı gösterememiştir.

Grup-1 kolonlarında kesme açıklığı oranının azalması davranıştaki kesme etkileşimini önemli ölçüde artırmıştır. KDZ modellerinin bu kesme etkileşiminin belirlenmesi için oluşturulan kesme dayanımı sınırlarının davranışı oldukça başarılı bir şekilde simüle ettiği görülmüştür. B-WC, B-SY ve KP modellerinin öngörülleri hem kesme açıklığı oranı ve hem de etriye çapının değişmesi durumunda deneysel dayanıma yakın sonuçlar vermiştir. Dolayısıyla gerek eğilme

gerekse kesme hakim davranış sergileyen kolonların mevcut kesme kapasitelerinin analitik olarak belirlenmesinde bu modellerin kullanılması tavsiye edilebilir. Ancak bu modellerin özellikle kesme kritik elemanlarda tasarıma yönelik olarak kullanılması için bir güven aralığına ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 8’de Grup-1 kolonlarının deneysel dayanım zarfları ile kesme dayanımı zarfları birlikte verilmektedir.

3.2.2 Beton dayanımı ve eksenel yük indeksinin etkisi

Grup-2 kolonlarında beton dayanımları ve eksenel yük indeksleri birer parametredir. Beton dayanımının ve eksenel yük indeksinin artması kolonların yatay tepkilerinin artmasına neden olmuştur. Beton dayanımının artması kolonların dayanımlarının artmasında eksenel yüke göre daha etkili iken, eksenel yük indeksinin artması ise düktilitenin azalmasında etkili olmuştur. Dolayısıyla eksenel yük indeksindeki artış, yer değiştirme tepkisini azaltarak kesme hakim davranışın etkisini artırmıştır. Şekil 9’da Grup-2 kolonlarının ortalama deneysel dayanımları ile kesme dayanımı modellerinden elde edilen bulgular görsel olarak verilmektedir.

Grup-2 BD serisi kolonlarda; ACI, TS ve CSA modellerinden elde edilen sonuçların deneysel dayanıma oranları 0.89-1.16 arasında değişmektedir. $400 \times 400 \text{ mm}^2$ en kesite sahip Grup-1 kolonlarında $\alpha_s=1.5$ için kesme kırılması meydana gelmezken, aynı kesme oranına sahip $300 \times 300 \text{ mm}^2$ en kesitli Grup-2 kolonlarında kesme kırılması meydana gelmiştir. Grup-1 kolonlarında en kesit alanının büyüklüğüne bağlı olarak kesme dayanımının fazla olması, elemanın kesme kapasitesine ulaşmadan eğilme dayanımına ulaşarak kırılmasına neden olmuştur. Bu durum yönetmelik modelleri ile belirlenen kapasitelerin deneysel dayanıma oranlarından da görülmektedir. Kolon en kesit alanının azalması, beton dayanımının artmasına rağmen $\alpha_s=1.5$ oranını kesme kırılması açısından kritik hale getirmiştir. BD serisinde yönetmelik modelleri ile belirlenen kapasiteler deneysel dayanım verilerine oldukça yakındır. Bu noktada yönetmeliklerin ihtiyatlı yaklaşımla benimsediği güven aralığı dikkate alınır, kesitin gerçek dayanımının daha büyük olması ve yönetmelik kapasitelerinin hemen yakınında kesme kırılmasına uğramaması beklenir. Ancak Grup-1 $\alpha_s=1$ kolonlarında bahsedildiği gibi, çevrimsel yüklemeye ve artan yer değiştirme talebi bu kolonların kesme kırılmasına uğramasına neden olmuştur. Kesme kırılmaları akma sonrasında meydana gelmiştir. Bu durum çevrimsel yüklemeye altında akmadan sonra kesme dayanımının azaldığını ve bunun dikkate alınması gerektiğini doğrulamaktadır. KDZ modelleri BD serisi kolonların dayanımlarının belirlenmesinde oldukça başarılı olmuştur. KDZ modellerinden elde edilen analitik sonuçların deneysel dayanımlara oranları 0.92-1.17 arasında değişmektedir. B-WC, B-SY, KP ve SM modelleri dayanımın belirlenmesi ve davranışın benzeştirilmesi açısından bu seride oldukça başarılı olmuştur.

Grup-2 n serisi kolonlarda; ACI, TS ve CSA modellerinden elde edilen sonuçların deneysel dayanımlara

oranları 1.18-1.44 arasında değişmektedir. "n serisi" beton dayanımlarının diğerlerine göre düşük olması kesitin kesme dayanımını azaltan faktörlerden biridir. Ancak kolonlar ihtiyatlı sonuçlar veren yönetmelik modellerinden elde edilen kapasite değerlerine dahi ulaşmadan kesme kırılmasına uğramışlardır. Ayrıca şu noktaya kadar; gerek kesme oranı, gerek kesme donatısı alanı gerekse beton dayanımındaki değişime rağmen oldukça tutarlı sonuçlar veren KDZ modellerinin öngörülleri de deneysel dayanımların üzerinde kalmıştır. Bu noktada eksenel yük indeksinin etkisinin olduğu açıktır. "n serisi" kolonlarda dikkate alınan eksenel yük indeksleri için kolonun dayanımı fazla değişmezken, bu kolonların yer değiştirme cevapları BD serisine göre daha sınırlı kalmıştır. Çevrimsel yüklemeye altında artan yer değiştirme talebine cevap veremeyen kolonlar tahmin edilen kesme kapasitelerine ulaşmadan kesme kırılmasına uğramışlardır. Dolayısıyla gerek yönetmeliklerde gerekse KDZ modellerinde eksenel yükün kesmeye katkısının dikkate alınmasından çok, düktiliten azaltıcı yöndeki etkisinin dikkate alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Şekil 10’da Grup-2 kolonlarının deneysel dayanım zarfları ile kesme dayanımı zarfları birlikte verilmektedir.

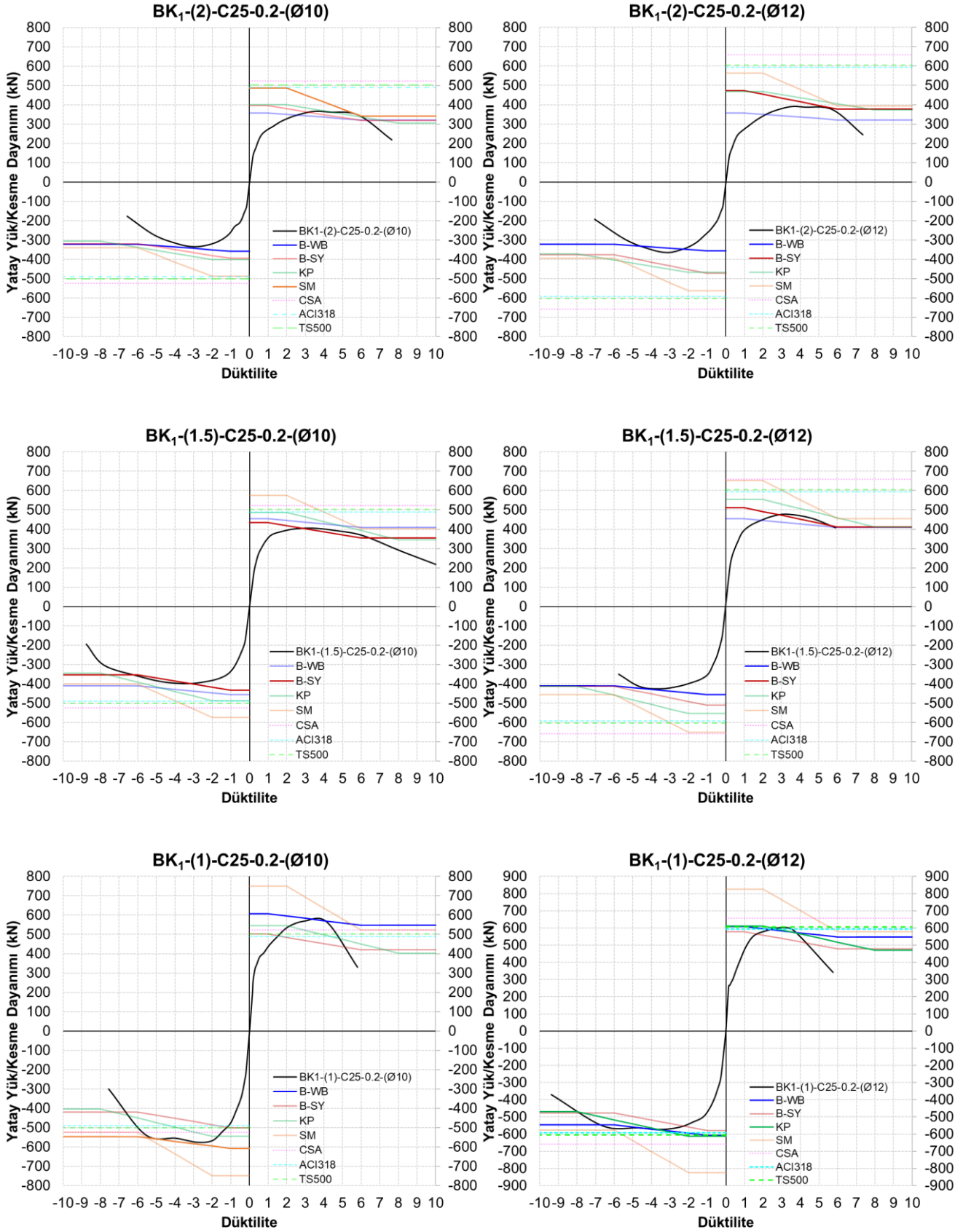
4 Sonuçlar

Bu çalışmada sabit eksenel yük ve çevrimsel yatay yük altında test edilen BA kolonların yatay yük dayanımları ile hali hazırda kullanılan ya da yaygın olarak kabul gören kesme dayanımı modellerinden elde edilen kesme dayanımları karşılaştırılmıştır. Çevrimsel yük altında test edilen BA kolonların kesme dayanımlarının belirlenmesinde ele alınan kesme dayanımı modellerinin öngörülleri değerlendirilmiştir. Bu noktada testleri gerçekleştirilen kolonların güncel yönetmeliklerin tasarım koşullarını sağlayan kusursuz kolonlar olduğunu vurgulamak gerekir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

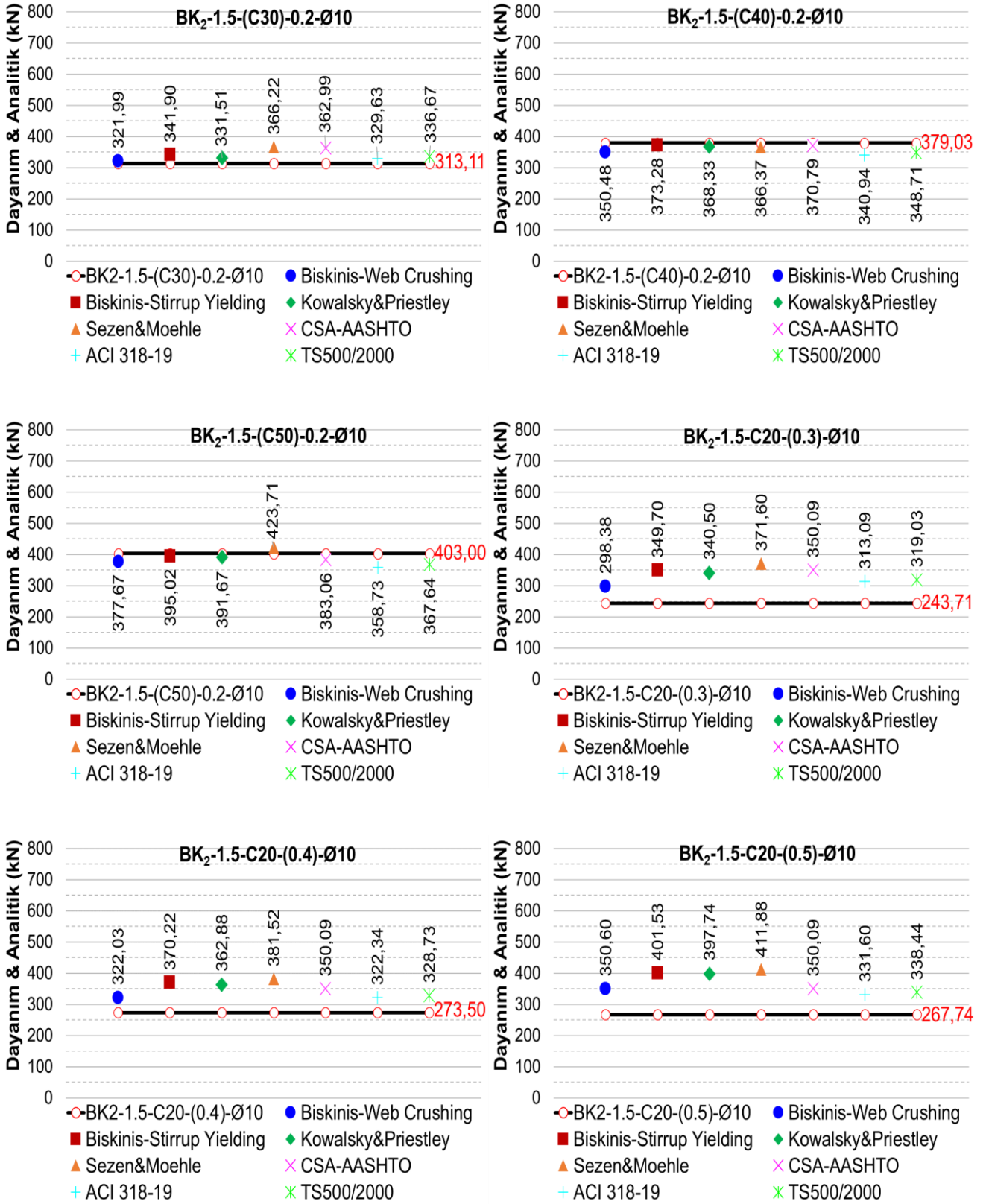
- ACI-318 ve TS500’de kafes analogisini esas alan hesaplarla belirlenen kesme dayanımları, SMCFT’yi esas alan CSA’dan elde edilen dayanımlardan küçüktür. Dolayısıyla ACI ve TS500 öngörülleri CSA’ya göre daha ihtiyatlı sonuçlar vermektedir.

- Kesme dayanımı zarfı modellerinden B-WC, B-SY ve KP modelleri deneysel dayanımın belirlenmesinde ve davranıştaki kesme etkileşiminin benzeştirilmesinde oldukça başarılı olmuştur.

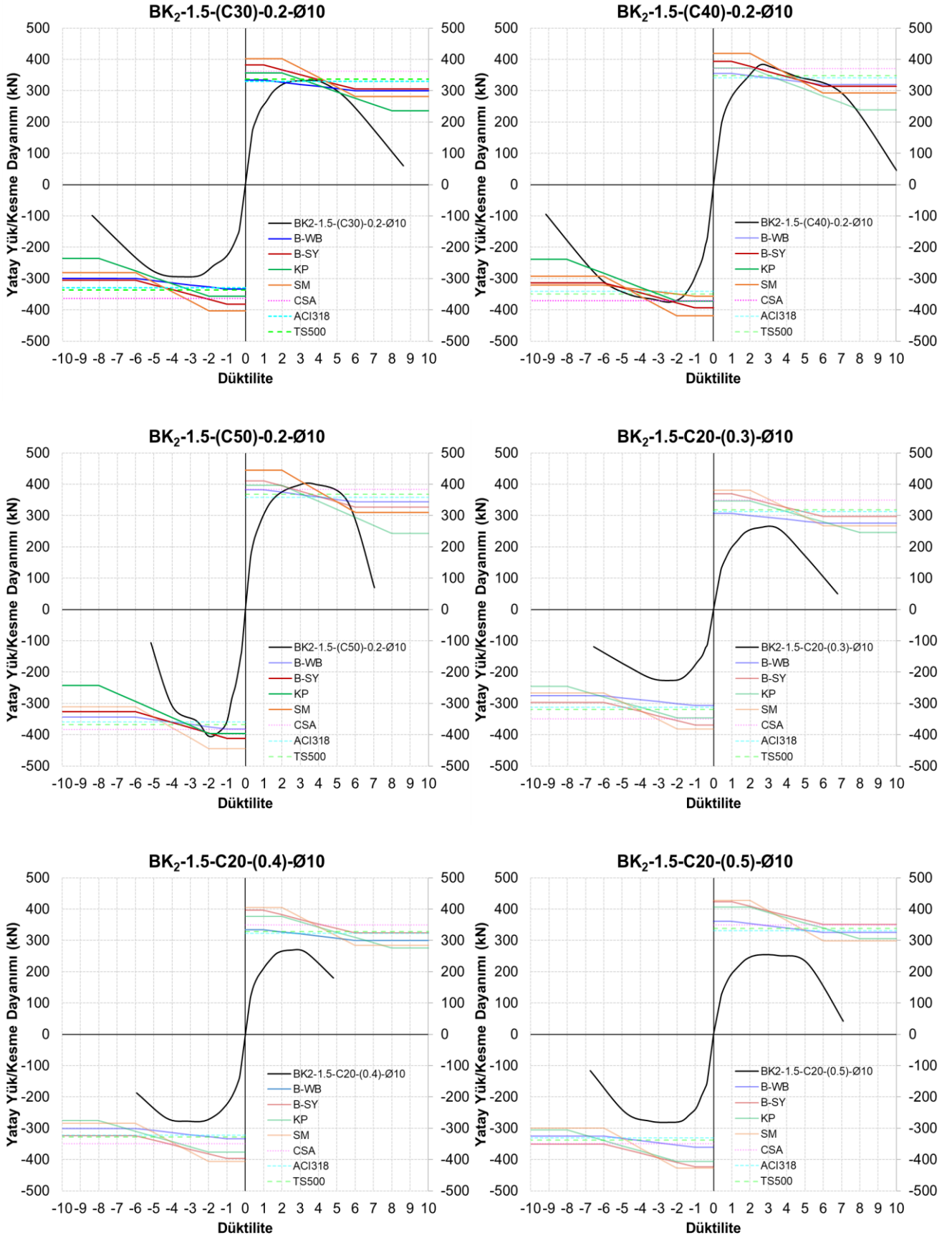
- Yönetmeliklerde verilen tasarım esaslarından elde edilen sonuçların elemanın dayanımından daha düşük sonuçlar vermesi beklenir. Tasarım yapılırken mevcut kesit dayanımının belirli katsayılarla azaltılarak daha ihtiyatlı bir yaklaşım benimsenmesi ve tasarımın buna göre yapılması, tehlikeli olan kesme kırılmasının gerçekleşmemesi için bir güven aralığı oluşturur. Bunun yanı sıra kesit dayanımı salt kesme dayanımı olarak dikkate alınır. Dolayısıyla kesme hakim davranış sergileyen bir elemanın gerçek kesme dayanımının yönetmelik modellerinin öngördüğünün üzerinde olması beklenir. Nitekim bu durum kesme açıklığı oranı 1 olan kolonlarda görülmüştür. Ancak çevrimsel yük



Şekil 8. Grup 1 kolonlarının dayanım zarfları ile kesme dayanımı zarflarının karşılaştırılması



Şekil 9. Grup 2 test kolonlarının dayanımları ile kesme dayanımı modellerinin karşılaştırılması



Şekil 10. Grup 2 kolonlarının dayanım zarfları ile kesme dayanımı zarflarının karşılaştırılması

ve artan yer değiştirme talebi kesitin kesme dayanımını azaltmakta ve bahsedilen güven aralığının ortadan kalkmasına neden olmaktadır. Yönetmeliklerin güven aralığını koruyarak kesme dayanımını azalması modellerini göz önünde bulundurması ve bunu eğilme kapasitesi ile birlikte ele almak suretiyle tasarıma yönelmesi tavsiye edilebilir.

- En kesit boyutları Grup-1 kolonlarına göre küçük olan Grup-2 kolonlarında meydana gelen kesme kırılmaları, $\alpha_s=1.5$ seviyesinin de kesme açısından kritik olduğunu göstermiştir. Bu durum yeterli kesme donatısı detayına sahip olmayan kolonlarda $\alpha_s=2$ değerinin de kritik olabileceği fikrini uyandırmaktadır. Bu çalışma kapsamında dikkate alınan kolonlar yeterli kesme donatısı detayına sahip olduklarından, kesme kırılmaları akmadan sonra gerçekleşmiştir. Benzeri incelemelerin kesme donatısı oranı daha az ya da yetersiz olan kolonlar için de yapılması tavsiye edilebilir.

- Eksenel yük indeksi davranışın kesmeye yönlenmesinde oldukça etkilidir. Yönetmelik modelleri ve KDZ modellerinden elde edilen sonuçlara göre n serisi kolonlarda kesme kırılması beklenmezken, bu kolonlar kesme kırılmasına uğramışlardır. Dolayısıyla gerek yönetmeliklerde gerekse KDZ modellerinde eksenel yükün kesmeye katkısının dikkate alınmasından çok, duktiliteyi azaltıcı yöndeki etkisinin dikkate alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

- Kesme dayanımı zarfı modelleri mevcut davranışın tahmininde oldukça başarılı olduklarından gerek eğilme gerekse kesme hakim davranış sergileyen kolonların mevcut kesme kapasitelerinin analitik olarak belirlenmesinde bu modellerin kullanılması tavsiye edilebilir. Ancak bu modellerin özellikle kesme kritik elemanlarda tasarıma yönelik olarak kullanılması için bir güven aralığına ihtiyaç duyulmaktadır.

- Kesme dayanımı modelleri kesitin özelliklerinden ve yük koşullarından yola çıkarak kesme davranışını benzeştirmektedir. Beklenen ötelenme ya da duktilite talebine göre kesitin kesme dayanımının tahmin edilmesinde başarılı oldukları da görülmüştür. Ancak bu zarflar kesitin kesme dayanımından yola çıkarak duktilite cevabının belirlenmesi için kullanılmamalıdır.

Teşekkür

Bu çalışmanın deneysel çalışmaları TÜBİTAK tarafından 115M264 kodu ile desteklenen proje kapsamında ERÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü yapı mekaniği laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

[1] FEMA 274.NEHRP commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. Federal Emergency Management Agency. Applied Technology Council. Washington D.C., 1997.

- [2] D.E. Biskinis, G.K. Roupakias and M.N. Fardis. Degradation of shear strength of reinforced concrete members with inelastic cyclic displacements. *ACI Structural Journal*. 101 (6). 773–783. 2004. <https://doi.org/10.14359/13452>
- [3] W. Ritter. Die bauweise hennebique Schweizerische Bauzeitung. 33. 59–61. 1899.
- [4] E. Mörsch. Concrete-steel construction (English translation by E. P. Goodrich of the original manuscript of the 1902). New York: McGraw-Hill; 1909.
- [5] F. De Luca and G.M. Verderame. A practice-oriented approach for the assessment of brittle failures in existing reinforced concrete elements *Engineering Structures*. 48. 373–388. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.09.038>
- [6] R. Park and T. Paulay. Reinforced Concrete Structures. John Wiley & Sons. Inc.; 1975.
- [7] F. J. Vecchio and M. P. Collins. The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete elements subjected to shear, *ACI Journal*. 83(2), 219–231. 1986. <https://doi.org/10.14359/10416>
- [8] E. C. Bentz, F. J. Vecchio and M. P. Collins. Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements. *ACI Structural Journal*. 103 (4). 614–624. 2006. <https://doi.org/10.14359/16438>
- [9] CSA. Standard A23.3-04. Concrete Design Handbook. Cement Association of Canada. Canada: 2006.
- [10] AASHTO LRFD. Bridge design specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington DC. 2012.
- [11] M. J. N. Priestley, F. Seible, Y. Xiao and R. Verma. Steel jacket retrofitting of reinforced concrete bridge columns for enhanced shear strength Part 2: Test results and comparison with theory. *ACI Material Journal*. 91 (2), 537–551. 1994. <https://doi.org/10.14359/4168>
- [12] A. Lynn, Seismic evaluation of existing reinforced concrete building columns. University of California at Berkeley; 1999.
- [13] H. Sezen and J. P. Moehle, Seismic behavior of shear-critical reinforced concrete building columns. Seventh U.S. National Congress of Earthquake Engineering. Boston: Massachusetts: Earthquake Engineering Research Institute; 3847-385, 2002.
- [14] P. Colajanni, A. Recupero and N. Spinella, Shear strength degradation due to flexural ductility demand in circular RC columns. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13. 1795–1807. 2015. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9691-0>
- [15] C. Del Vecchio, M. Del Zoppo, M. Di Ludovico, G.M. Verderame and A. Prota, Comparison of available shear strength models for non-conforming reinforced concrete columns. *Engineering Structures*. 148, 312–327. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.045>

- [16] M. J. N. Priestley, R. Verma and Y. Xiao, Seismic shear strength of reinforced concrete columns. *Journal of Structural Engineering*. vol. 120(8). 2310–2329. 1994. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1994\)120:8\(2310\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1994)120:8(2310))
- [17] M. J. Kowalsky and M. J. N Priestley, Improved analytical model for shear strength of circular reinforced concrete columns in seismic regions. *ACI Structural Journal*, 97(3), 388–396. 2000. <https://doi.org/10.14359/4633>
- [18] ATC 32. Applied Technology Council. Improved Seismic Design Criteria for California Bridges. Provisional Recommendations. 1996.
- [19] H. Sezen and J.P. Moehle, Shear strength model for lightly reinforced concrete columns. *Journal of Structural Engineering*. 130(11), 1692–1703. 2004. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)07339445\(2004\)130:11\(1692\)](https://doi.org/10.1061/(asce)07339445(2004)130:11(1692))
- [20] D. Biskinis and M. N. Fardis. Cyclic shear resistance for seismic design. based on monotonic shear models in fib Model Code 2010 and in the 2018 draft of Eurocode 2. *Structural Concrete*, 21, 1-22. 2019. <https://doi.org/10.1002/suco.201900037>
- [21] ACI 318-19. Building code requirements for structural concrete. American Concrete Institute. Farmington Hill, MI; 2019.
- [22] Eurocode-8. Design of structures for earthquake resistance. Part-1. General rules. seismic actions and rules for buildings. European Committee for Standardization. Brussels. 2004.
- [23] TBDY'18. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-Deprem etkisi altında binaların tasarımı için esaslar. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Ankara. 2018.
- [24] TS500/2000. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara. 2000.
- [25] H. Banchman. Seismic Conceptual Design of Buildings – Basic principles for engineers, architects, building owners and authorities. Swiss Agency for Development and Cooperation, 3th edition, Bern; 2003.
- [26] M. Moretti, and T. P. Tassios, Behaviour of short columns subjected to cyclic shear displacements: experimental results. *Engineering Structures*, 29(8), 2018-29, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.11.001>
- [27] T. Dirikgil, and O. Atas, Experimental investigation of the performance of diagonal reinforcement and CFRP strengthened RC short columns. *Composite Structures*, 223, 1-15, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110984>
- [28] T. Dirikgil, Experimental investigation of the contributions of CFRP and externally collar strengthening to the seismic performance of RC columns with different cross-sections. *Structures*, 24, 266-281, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.067>
- [29] FEMA 461. Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components. Federal Emergency Management Agency. Washington. D. C., 2007.
- [30] FIB - Task Group 9.3. Bulletin 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Lausanne. Switzerland: federation internationale du beton; 2001. <https://doi.org/10.35789/fib.bull.0014.ch01>
- [31] ACI 440. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. Farmington Hills, MI: 2008. <https://doi.org/10.14359/51700867>
- [32] CNR-DT 200. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. R1 ed. Rome: 2013.
- [33] H-G. Park. E-J. Yu and K-K. Choi, Shear-strength degradation model for RC columns subjected to cyclic loading. *Engineering Structures*, 34, 187-197, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.08.041>



Ek A

Ek Tablo A. Kesme dayanımı modellerinin ampirik ifadeleri

Model	V_d	V_c	V_s	$k(\mu_A)$	θ	V_N	
Kafes Analijisi	ACI318-19	$V_c + V_s$	$0.17 \left(1 + \frac{N}{14A_g}\right) \cdot \sqrt{f_c} b_w d$	$\frac{A_s d f_{yw}}{s}$	—	45°	—
	TSS500/2000	$V_c + V_s$	$0.8(0.65 f_{ct} b_w d) \cdot \left(1 + 0.07 \frac{N}{A_g}\right)$	$\frac{A_s d f_{yw}}{s}$	—	45°	—
SMCFT	CSA	$\min(V_s + V_c; V_{nak})$	$\frac{0.4}{1 + 1500 \epsilon_x} \sqrt{f_c} \cdot b(0.9d)$	$\frac{A_s}{s} 0.9d f_{yw} \cot \theta$	—	$29^\circ + 7000 \epsilon_x \leq 75^\circ$	—
Biskinis-Web Crushing	<i>Dogrudan dyaagonal basing dikkate alınmaktadir.</i>	$k(\mu_A) \cdot (V_c)$	$\frac{4}{7} (1 + 0.45 \rho_l) \cdot \min(\sqrt{f_c}; 7) b_w z \sin 2\theta \cdot \left(1 + 1.35 \frac{N}{A_c f_c}\right)$	$1 - 0.02 \min(5; \mu_A)$	$tg^{-1} \left(\frac{h}{2L_s}\right)$	—	
							Biskinis-Stirrup Yelding
Dayanım Azalması (Kesme Dayanımı Zarfi)	Kowalsky & Priestley	$k(\mu_A) V_c + V_s + V_N$	$0.255 \min\left(1.5; 3 - \min\left(2; \frac{L_s}{h}\right)\right) \cdot \min(1; 0.5 + 20 \rho_l) b_w d \sqrt{f_c}$	$\rho_w b_w f_{yw} (d - x) \cot \theta$	$0.16 \leq 1 - 0.12 \min(7; \text{mak}(1; \mu_A)) \leq 0.88$	30°	$N \cdot \frac{h-x}{2L_s}$

Ek B

Kısaltmalar Listesi

A_c	Net kesit alanı	s	Kesme donatısı aralığı
A_g	Brüt kesit alanı	V_c	Betonun kesmeye katkısı
A_s	Kesme donatısı alanı	V_N	Eksenel yükün kesmeye katkısı
b, b_w	Kesit genişliği	V_s	Kesme donatısının kesmeye katkısı
d	Faydalı derinlik	x	Tarafsız eksen derinliği
f_c	Betonun basınç dayanımı	z	Yüklemeye dik yüzlerdeki iki boyuna donatı sırasının arasındaki mesafe
f_y	Boyuna donatının akma dayanımı	α_s	Kesme açıklığı oranı
f_{yw}	Kesme donatısının akma dayanımı	ϵ_x	Etkili kesme derinliğinin ortasındaki şekil değiştirme
h	Kesit derinliği	θ	Basınç çubuğu veya gerilme alanının düşeyle yaptığı açı
$k(\mu_\Delta)$	Düktilite talebi ile kesme dayanımı azalma katsayısı	μ_Δ	Düktilite talebi
L_s	Kesme açıklığı	ρ_l	Boyuna donatı oranı
N	Eksenel yük	ρ_w	Kesme donatısı oranı
n	Eksenel yük indeksi		

Tekrarlı trafik yükleri altında farklı kil içeriklerine sahip orta-sıkı kum-kil karışımlarının esneklik modülünün incelenmesi

Investigation of resilient modulus of medium-dense sand-clay mixtures with different clay contents under repeated traffic loads

Halil İbrahim Fedakar^{1,*} 

¹ Abdullah Gül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 38080, Kayseri Türkiye

Özet

Esneklik modülü, tekrarlı trafik yükleri altında yol temel tabakalarının uzun dönem deformasyon performansının tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, bu malzeme özelliğinin doğru tayini yol tasarımlarında büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada, orta sıkı kum-kil karışımlarının esneklik modülü, dinamik üç eksenli ve kalp şekli gerilme izleri ile araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, ağırlıkça %0, %5, %10 ve %20 kil içeren kum-kil numuneleri %50 başlangıç rölatif sıklıkta hazırlanmış ve yarıklı silindirik deney cihazı kullanılarak test edilmiştir. Deney sonuçlarına göre kum-kil karışımlarının esneklik modülü değerleri dinamik üç eksenli gerilme izi ile daha fazla tahmin edilmektedir. Bu durum ise orta-sıkı kum-kil karışımlarının trafik yükleri altındaki deformasyon davranışının kalp şekli gerilme izine kıyasla daha düşük tahmin edilmesine sebep olmaktadır. Bu çalışmanın bulgularına dayanarak, kum-kil karışımlarının esneklik modülünün yol tasarımları için daha doğru bir şekilde tahmin edilmesinde kalp şekli gerilme izinin göz önüne alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Esneklik modülü, Kum-kil karışımı, Kalp şekli gerilme izi, Dinamik üç eksenli gerilme izi

1 Giriş

Esneklik modülü (M_r), zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışını tanımlayan temel malzeme özelliklerinden biridir. Bundan dolayı tekrarlı trafik yüklerine maruz kalan zeminlerin deformasyon davranışını tahmin etmek için mekanik-ampirik yol tasarımlarında ana girdi parametresi olarak kullanılmaktadır. Yol temel tabakalarında (temel (base), alt temel (subbase) ve taban zemini (subgrade)) kullanılacak olan zeminlerin esneklik modülünün doğru bir şekilde belirlenmesi, daha dayanıklı ve ekonomik yol tasarımları için büyük önem arz etmektedir. Bundan dolayı zeminlerin esneklik modülünün laboratuvar deneyleri ile belirlenmesi konusu yoğun olarak çalışılmaktadır [1-7]. Yapılan bu çalışmalarda, daha çok dinamik üç eksenli deneyleri kullanılmıştır.

Zemin daneleri, hareketli tekerlek yüklerinden dolayı asal gerilme dönmelerine (principal stress rotation) maruz kalmaktadır. Bu gerilme durumu, laboratuvar ortamında kalp şekli gerilme izi (heart-shaped stress path) ile başarılı bir şekilde simüle edilebilmektedir [3, 8-11]. Ancak geleneksel dinamik üç eksenli deneyleri, trafik yüklerinden dolayı yol zemin tabakalarının maruz kaldığı bu gerilme durumunu simüle edememektedir [8, 12]. Bu nedenle kalp şekli gerilme izi gibi kompleks gerilme izini laboratuvar ortamında simüle etmek için daha gelişmiş deney sistemlerine ihtiyaç

Abstract

Resilient modulus is commonly used in prediction of long-term deformation performances of pavement foundation layers under repeated traffic loads. For this reason, the determination of this material property accurately has a great importance in pavement designs. In this study, resilient modulus of medium-dense sand-clay mixtures was investigated through cyclic triaxial and heart-shaped stress paths. For this purpose, sand-clay specimens having a clay content as 0%, 5%, 10%, and 20% by weight were prepared at an initial relative density of 50% and tested using hollow cylinder testing apparatus. According to the test results, the resilient modulus values of sand-clay mixtures are overestimated by cyclic triaxial stress path, which results in the underestimation of deformation behavior of medium-dense sand-clay mixtures under traffic loads compared to heart-shaped stress path. Based on the findings of this study, it is concluded that a heart-shaped stress path should be taken into consideration for a more accurate prediction of resilient modulus of sand-clay mixtures for pavement designs.

Keywords: Resilient modulus, Sand-clay mixture, Heart-shaped stress path, Cyclic triaxial stress path

duyulmaktadır. Yarıklı silindirik deneyi (hollow cylinder test), bu amaç için başarılı bir şekilde uygulanan deneylerdendir [3, 8-14]. Kalp şekli gerilme izi ile yapılan çalışmalara göre zeminlerin trafik yükleri altındaki deformasyon davranışı geleneksel üç eksenli gerilme izi ile daha düşük tahmin edilmektedir.

Zeminlerin esneklik modülü, su içeriği ve maruz kalınan gerilme durumlarının yanı sıra zemin türüne bağlı olarak da değişmektedir. Yumuşak ince daneli zeminler, dinamik yükler altında yüksek sıkışma ve deformasyon davranışı gösterdiği için yol uygulamalarında daha çok iri daneli zeminler kullanılmaktadır. Ancak doğal zeminler genellikle iri ve ince daneli zeminlerin karışımından oluşmaktadır. Bundan dolayı kum-kil karışımlarının mühendislik özellikleri yoğun olarak araştırılmaktadır [15-19]. Farklı oranlarda kil içeren kum-kil karışımları üzerine yapılan çalışmalarda, kumun taşıma kapasitesi, hidrolik geçirgenlik ve deformasyon davranışı gibi mühendislik özelliklerinin kil içeriğine bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Simpson ve Evans [15]'a göre kum-kil karışımları için kritik bir kil içeriği bulunmaktadır. Bu kritik kil içeriğinde, kum daneleri deplasman yaşamadan kum-kil karışımlarında minimum boşluk oranı meydana gelmektedir. Böylelikle kritik kil içeriğine kadar kil içeren kum-kil karışımlarında yük altında daha çok iri daneli zeminin davranışı hakim olmaktadır [15].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: halilibrahim.fedakar@agu.edu.tr (H. İ. Fedakar)
Geliş / Received: 21.11.2020 Kabul / Accepted: 05.01.2021 Yayınlanma / Published: 15.01.2021
doi: 10.28948/ngmuh.829513

Bundan dolayı düşük oranlarda kil içeren kum-kil karışımları da yol uygulamalarında kullanılmaktadır.

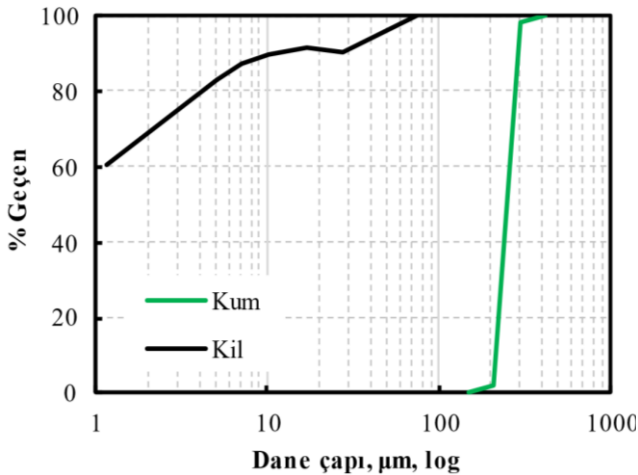
Düşük rölatif sıklığa (D_r) sahip zeminler yük altında daha fazla deformasyon davranışı sergilemektedir. Bundan dolayı taşıma gücünü artırmak ve deformasyon davranışını iyileştirmek için zemin tabakaları yol mühendisliği uygulamalarında daha yüksek rölatif sıklıkta sıkıştırılmaktadır. Ancak uygulanan bu kompaksiyon enerjisinin zemin tabakalarının rölatif sıklık değerine etkisi derinlikle azalmaktadır [20]. Bundan dolayı artan derinliklerde daha az rölatif sıklık değeri elde edilmektedir.

Literatür araştırmasına göre düşük miktarlarda kil içeren orta-sıkı kum-kil karışımlarının esneklik modülü kalp şekli gerilme izi ile araştırılmamıştır. Bu çalışmanın amacı, saha şartlarında asal gerilme dönmesine maruz kalan orta-sıkı kum-kil karışımlarının esneklik modülünün dinamik üç eksenli ve yarı silindirik deneyleri ile daha doğru bir şekilde belirlenmesidir. Dinamik üç eksenli deneyleri ile, kum-kil numuneleri sadece tekrarlı eksenel gerilmeye (cyclic axial stress, σ_z^{cyc}) maruz kalmaktadır. Diğer yandan kalp şekli gerilme izini laboratuvar ortamında simüle edebilmek için tekrarlı eksenel gerilmenin yanı sıra burulmalı kayma gerilmesi (torsional shear stress, $\tau_{z\theta}$) de yarı silindirik deneyleri ile kum-kil numunelerine uygulanmıştır. Elde edilen dinamik üç eksenli ve yarı silindirik deney sonuçları asal gerilme dönmelerinin zeminlerin esneklik modülüne etkilerini daha iyi tanımlayabilmek için birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Malzemeler

Bu çalışmada, Ottawa kumu ve kaolin kili kullanılmıştır. Bu zeminlere ait dane çapı dağılımları Şekil 1’de sunulmuştur. Ayrıca bu zeminlerin bazı mühendislik özellikleri de Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’deki bilgilere göre bu çalışmada kullanılan iri daneli ve ince daneli zeminler Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS)’ne göre sırası ile kötü derecelenmiş kum (SP) ve yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 1 Bu çalışmada kullanılan zeminlerin dane çapı dağılımları

Tablo 1. Zeminlerin bazı mühendislik özellikleri

Mühendislik Özellikleri	Kum	Kil
Eğrilik katsayısı (C_c)	0.97	-
Üniformluk katsayısı (C_u)	1.22	-
Maksimum boşluk oranı (e_{maks})	0.78	-
Minimum boşluk oranı (e_{min})	0.61	-
Likit limit (LL) (%)	-	62
Plastik limit (PL) (%)	-	41
Özgül ağırlık (G_s)	2.65	2.65

2.2 Numune hazırlama ve deney prosedürleri

Bu çalışmada kullanılacak olan kil içeriğini belirlemek için ağırlıkça %0, %5, %10, %20 ve %30 oranlarında kil içeren kum-kil karışımlarının minimum boşluk oranları sırası ile 0.61, 0.60, 0.55, 0.53 ve 0.66 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara dayanarak bu çalışmadaki kritik kil içeriği %20 olarak belirlenmiştir. Bundan dolayı düşük kil içeriğine sahip kum-kil karışımlarını temsil etmek için bu çalışmada ağırlıkça %0, %5, %10 ve %20 kil içeren kum-kil numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bütün numuneler yarı silindirik şeklinde olup 200 mm yüksekliğe, 100 mm dış çapa ve 60 mm iç çapa sahiptir. Deneye tabi tutulacak kum-kil karışımları önceden belirlenen oranlarda kuru olarak bir kap içerisinde dikkatlice karıştırılarak elde edilmiştir. Elde edilen bu karışımlar kuru çökeltme (dry deposition) yöntemi ile yarı silindirik şeklindeki deney kalıplarına huni kullanarak önceden belirlenen miktarlarda on tabaka olarak dökülmüş ve bu tabakalar her bir numune %50 başlangıç rölatif sıklık değerine sahip olacak şekilde tokmak yardımıyla sıkıştırılmıştır.

Bir sonraki aşamada, numunelerin dik durabilmesi için vakum basıncı (20 kPa) uygulanmış ve numuneler yarı silindirik deney sistemine yerleştirilmiştir. İç ve dış hücreler havası alınmış saf su ile doldurulduktan sonra numunelere iç (inner) ve dış (outer) hücre basınçları (30 kPa) uygulanmıştır. Hücre basınçlarından hemen sonra numuneye uygulanan vakum basıncı salıverilmiştir. Bu aşamadan sonra numunelerin içerisindeki havayı çıkartmak için havası alınmış saf su numunenin içerisinde aşağıdan yukarıya doğru dolaştırılmıştır. Numunelerin içerisindeki hava çıkarıldıktan sonra iç ve dış hücre basınçları ve geri basıncı kademeli olarak sırasıyla 320 kPa ve 300 kPa değerlerine artırılmıştır. Bu basınç değerlerinde numunelerin suya doyurma işlemi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin suya doygunluğu ise Skempton’ın B katsayısına göre belirlenmiştir. Suya doyurma işleminden sonra bütün numuneler 0.95’ten daha yüksek B değerleri vermiştir. Bu durum uygulanan basınçlar altında numunelerin suya doygun hale geldiğini göstermektedir. Suya doyurma işleminden sonra numuneler konsolidasyon işlemine tabi tutulmuştur. Bu aşamada uygulanan geri basıncı sabit tutulurken, eksenel gerilme ve iç/dış hücre basınçları kademeli olarak sırasıyla 360 kPa ve 330 kPa değerlerine artırılmış ve numuneler bu basınç değerlerinde anizotropik olarak ($K_0=0.5$) konsolide edilmiştir. Konsolidasyon aşamasının hemen sonrasında numuneler Tablo 2’de belirtilen deney programına uygun olarak dinamik eksenel gerilme ve burulmalı kayma gerilmelerine maruz bırakılmıştır.

Trafik yükünün gerçek frekansı 0.5 Hz ile 5 Hz arasında değişmektedir [10]. Bundan dolayı trafik yükünü simüle

etmek için bu çalışmadaki numuneler 1 Hz yükleme frekansına tabi tutulmuştur [3, 12, 21]. Ayrıca tekrarlı yüklemeye maruz kalan zeminlerde meydana gelen toplam deformasyon gelişiminin büyük bir kısmı ilk 1000 tekrarlı yüklenme sayısında gerçekleşmektedir [11-13]. Bu nedenle kum-kil numuneleri bu çalışmada 5000 tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmıştır.

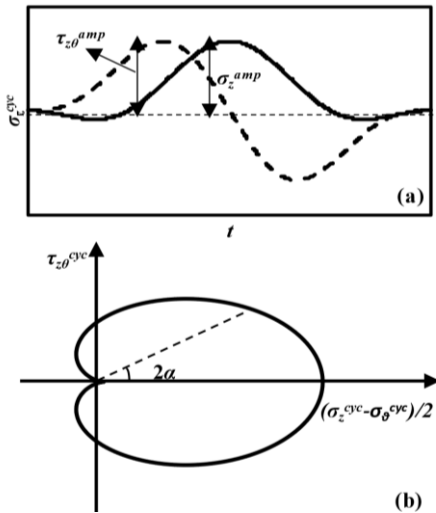
Tablo 2. Deney programı

Deney	Kum (%)	Kil (%)	σ_z^{cyc} (kPa)	$\tau_{z\theta}^{cyc}$ (kPa)
Üç eksenli	100	0	12	0
	95	5		
	90	10		
	80	20		
Yarı silindirik	100	0	12	4
	95	5		
	90	10		
	80	20		

2.3 Kalp şekli gerilme izi

Yukarıda da bahsedildiği üzere hareketli tekerlek yükünden dolayı yol zemin tabakaları asal gerilme dönmelerine maruz kalmaktadır. Böylesi gerilme durumu ise kalp şekli gerilme izi ile başarılı bir şekilde simüle edilebilmektedir. Bir kalp şekli gerilme izi deviatorik gerilme uzayında ($\tau_{z\theta}$ vs $(\sigma_z - \sigma_\theta)/2$, σ_θ : çevresel gerilme (Denklem (1)), aksel gerilme (σ_z) ve burulmalı kayma gerilmesinden ($\tau_{z\theta}$) oluşmaktadır. Denklem (1)'deki p_o , p_i , r_o ve r_i , sırasıyla dış hücre basıncı, iç hücre basıncı, dış yarıçap ve iç yarıçapı temsil etmektedir. Gerilme dalgaformlarının ve kalp şekli gerilme izinin tipik örneği ise Şekil 2'de gösterilmiştir.

$$\sigma_\theta = \frac{p_o r_o - p_i r_i}{(r_o - r_i)} \quad (1)$$



Şekil 2 (a) Gerilme dalgaformları ve (b) kalp şekli gerilme izi

Şekil 2'de gösterilen α ise en büyük asal gerilmenin düşey eksen ile yaptığı açıyı ifade etmektedir. Kalp şekli gerilme izi için uygulanacak olan gerilme dalgaformlarının matematiksel ifadeleri Denklem (2) ve (3)'te verilmiştir.

Denklem (2) ve (3)'te yer alan t ve T ifadeleri sırasıyla yüklenme süresi ve periyodu ifade etmektedir.

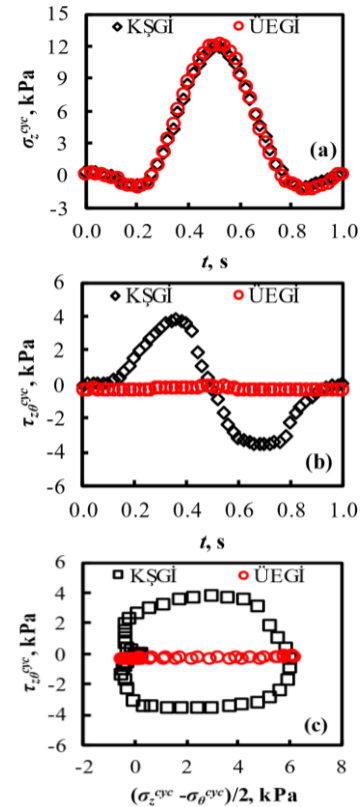
$$\sigma_z^{cyc} = 0.5\sigma_z^{amp} \left[\frac{1}{2} \cos\left(\frac{4\pi}{T}t\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{1}{2} \right] \quad (2)$$

$$\tau_{z\theta}^{cyc} = 0.77\tau_{z\theta}^{amp} \left[\sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) - \frac{1}{2} \sin\left(\frac{4\pi}{T}t\right) \right] \quad (3)$$

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Gerilme izi

Tablo 2'de sunulan deney programına göre üç eksenli gerilme izini (ÜEGİ) yarı silindirik deney sisteminde simüle etmek için numuneler sadece tekrarlı aksel gerilmeye maruz kalmıştır. Diğer yandan kalp şekli gerilme izini (KŞGİ) simüle etmek için ise tekrarlı aksel gerilmenin yanı sıra tekrarlı burulmalı kayma gerilmesi de kum-kil numunelerine uygulanmıştır. Uygulanan aksel gerilme ve burulmalı kayma gerilmesine ait dalgaformlarının ve elde edilen gerilme izlerinin örnekleri Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3 Uygulanan (a) tekrarlı aksel gerilme (σ_z^{cyc}) ve (b) tekrarlı burulmalı kayma gerilmesine ($\tau_{z\theta}^{cyc}$) ait örnek dalgaformları ve çalışmada uygulanan (c) gerilme izleri

Şekil 3'e göre Tablo 2'de belirtilen aksel gerilme ve burulmalı kayma gerilmesine ait genlik (amplitude) değerleri üç eksenli ve yarı silindirik deneylerinde başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Ayrıca uygulanan kalp şekli ve üç eksenli gerilme izleri de bu çalışmada başarılı bir şekilde üretilmiş ve uygulanmıştır. Şekil 3'te sunulan deney verilerine göre bu deneysel çalışmada KŞGİ ve ÜEGİ başarılı bir şekilde

simüle edilmiştir. Bundan dolayı bu çalışmada elde edilen deney sonuçlarının kabul edilebilir bir güvenilirliğe sahip olduğu söylenebilir.

3.2 Esneklik modülü ve şekil değiştirme davranışı

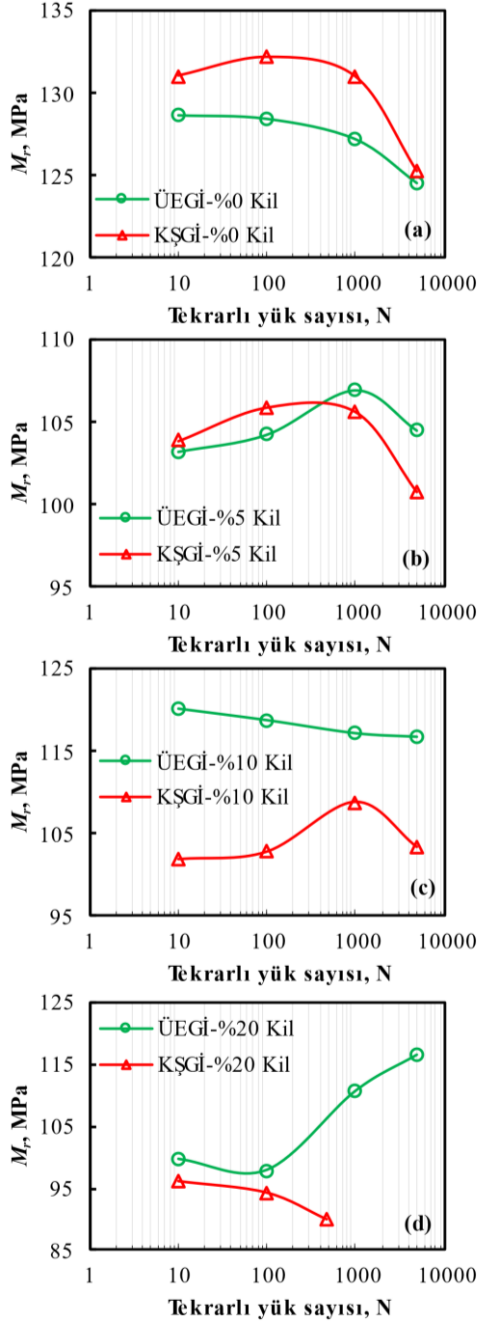
Bu çalışmada, KŞGİ-%20 Kil numunesi (kalp şekli gerilme izi ve %20 kil) haricindeki diğer numuneler uzun dönemli davranışı analiz etmek için 5000 tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmıştır. Bu numunelerde, esneklik modülünün tekrarlı yüklemeye sayısı ile değişimini incelemek için farklı tekrarlı yüklemeye sayılarında (N=10, 100, 1000 ve 5000) hesaplanan esneklik modüllerinin değişimi Şekil 4'te sunulmuştur. Diğer yandan KŞGİ-%20 Kil numunesi 478 tekrarlı yüklemeye göçtüğü için ($\varepsilon_z^p \geq 5\%$) bu numunenin esneklik modülünün tekrarlı yüklemeye sayısı ile değişiminde N=10, 100 ve 478 tekrarlı yüklemeye sayıları kullanılmıştır (Şekil 4(d)). Guo vd. [3] yumuşak zeminler üzerinde yaptıkları yarık silindir deneylerinde esneklik modülünü (M_r) maksimum gerilme farkının ($\Delta\sigma_z^{maks}$) elastik şekil değiştirmeye (ε_z^r) oranı olarak tanımlamışlardır ($M_r = \Delta\sigma_z^{maks} / \varepsilon_z^r$). Farklı tekrarlı yüklemeye sayılarında ve gerilme izlerinde kum-kil numunelerinde ölçülen maksimum aksel gerilme farkı ve elastik aksel şekil değiştirme değerleri Tablo 3'te sunulmuştur. Ayrıca yukarıda belirtilen farklı tekrarlı yüklemeye sayılarında ölçülen elastik aksel şekil değiştirmenin bu tekrarlı yüklemeye sayılarındaki toplam aksel şekil değiştirmeye oranı ($\varepsilon_z^r / \varepsilon_z^t$) da Tablo 3'te verilmiştir. Esneklik modülünün farklı tekrarlı yüklemeye sayılarında ve gerilme izlerinde kümülatif kalıcı aksel şekil değiştirmeye ($(\varepsilon_z^p)_{kümülatif}$) etkisi de Şekil 5'te gösterilmiştir.

Şekil 4'te açıkça görüldüğü üzere kum zeminin esneklik modülü değerleri her iki gerilme izi (ÜEGİ ve KŞGİ) altında artan kil içeriği ile azalmaktadır. Kum numunelerde, (%0 kil) 1000 tekrarlı yüklemeye kadar esneklik modülü değerlerinde çok az bir değişim olmaktadır (Şekil 4(a)). Ancak 1000 tekrarlı yüklemeye sonra bu numunelerin esneklik modülü değerleri daha fazla azalmaktadır. Bundan dolayı kum zemin kullanan yol yapılarının daha güvenli ve ekonomik tasarımı için nihai esneklik modülü değerleri kullanılmalıdır. Kum numunelerde, KŞGİ altında daha az aksel gerilme farkı ölçülmüştür (Tablo 3). Buna rağmen kum numune KŞGİ altında daha yüksek esneklik modülü değeri vermektedir. Bu durum ise kum numunenin KŞGİ altında daha az elastik şekil değiştirme davranışı sergilemesinden kaynaklanmaktadır (Tablo 3). Ayrıca 1000 tekrarlı yüklemeye sayısından sonra esneklik modülünde meydana gelen azalma KŞGİ altında daha fazla olmaktadır. Şekil 5(a)'ya göre 1000 tekrarlı yüklemeye sayısından sonra KŞGİ'ne maruz kalan kum zeminin esneklik modülünde meydana gelen daha fazla azalma 1000 tekrarlı yüklemeye sayısından sonra bu numunede daha fazla kalıcı deformasyonun gelişimine sebep olmaktadır. 1000 tekrarlı yüklemeye sayısına kadar ise kum zeminde farklı gerilme izlerinden dolayı meydana gelen kalıcı şekil değiştirme performansları benzer sonuçlar vermiştir. 5000 tekrarlı yüklemeye sayısında ise kum numuneler her iki gerilme izi altında benzer esneklik modülü davranışı sergilemektedir. Şekil 4(a)'daki sonuçlara göre bu çalışmada uygulanan farklı gerilme izleri kum zeminlerin

uzun dönem esneklik modülü değerlerinde benzer sonuçlar vermektedir. Buna göre kum numunelerin bu çalışmada maruz kaldıkları gerilme durumlarında asal gerilme dönmesinin esneklik modülü değerine etkisi çok az olmaktadır. Ancak Şekil 5(a)'daki sonuçlar da göz önüne alındığında kum zeminlerin esneklik modülünün belirlenmesinde KŞGİ'nin göz önüne alınması gerektiği sonucuna da varılabilmektedir. Ayrıca her iki gerilme izi altında yukarıda belirtilen tekrarlı yüklemeye sayılarında meydana gelen toplam şekil değiştirmenin büyük kısmını elastik şekil değiştirme oluşturmaktadır ($\varepsilon_z^r / \varepsilon_z^t > 98$) (Tablo 3).

Tablo 3. Farklı tekrarlı yüklemeye sayılarında (N) ölçülen maksimum aksel gerilme farkı ($\Delta\sigma_z^{maks}$), elastik şekil değiştirme (ε_z^r) ve elastik şekil değiştirme/toplam şekil değiştirme oranı ($\varepsilon_z^r / \varepsilon_z^t$) sonuçları

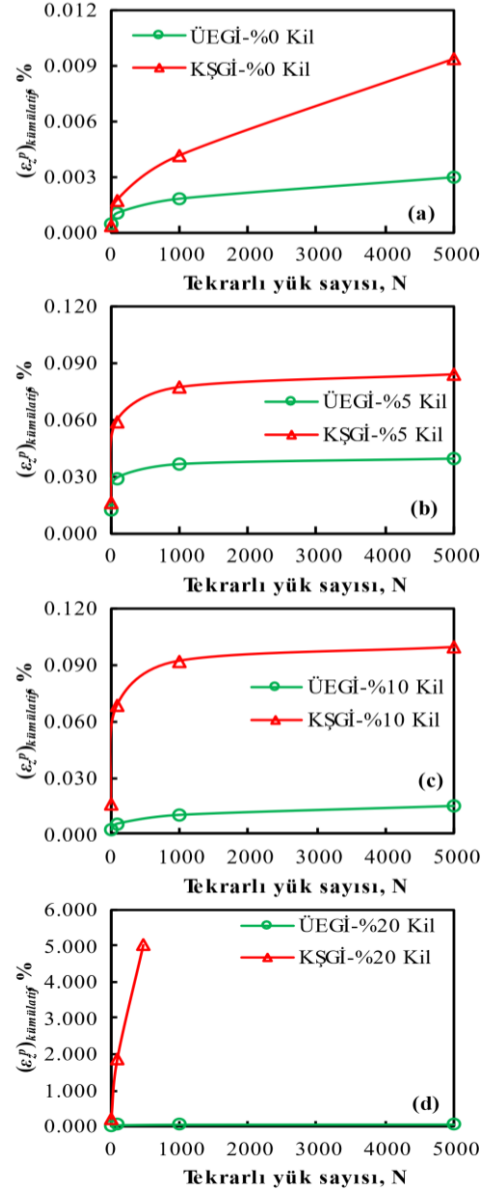
Numune	N	$\Delta\sigma_z^{maks}$ (kPa)	ε_z^r (%)	$\varepsilon_z^r / \varepsilon_z^t$ (%)
ÜEGİ-%0	10	11.9668	0.00930	99.47
	100	11.8826	0.00925	100.00
	1000	11.9588	0.00940	99.47
	5000	12.2656	0.00985	99.49
KŞGİ-%0	10	11.7947	0.00900	99.45
	100	11.7640	0.00890	98.89
	1000	12.1839	0.00930	100.00
	5000	12.0878	0.00965	100.00
ÜEGİ-%5	10	11.6086	0.01125	94.14
	100	11.8837	0.01140	99.56
	1000	11.8762	0.01110	100.00
	5000	11.8611	0.01135	100.00
KŞGİ-%5	10	11.3229	0.01090	88.98
	100	11.9167	0.01125	98.25
	1000	11.6242	0.01100	100.00
	5000	11.5407	0.01145	99.57
ÜEGİ-%10	10	11.8961	0.00990	98.51
	100	11.9403	0.01005	100.00
	1000	11.9033	0.01015	99.51
	5000	12.0937	0.01035	99.52
KŞGİ-%10	10	11.1052	0.01090	89.71
	100	11.6148	0.01130	98.26
	1000	11.5352	0.01060	100.00
	5000	11.5246	0.01115	100.00
ÜEGİ-%20	10	12.2158	0.01225	93.16
	100	12.1456	0.01240	99.20
	1000	12.2816	0.01110	99.55
	5000	12.5826	0.01080	99.54
KŞGİ-%20	10	9.7979	0.01020	30.00
	100	10.2206	0.01085	43.14
	478	10.2015	0.01135	65.61



Şekil 4. Esneklik modülünün tekrarlı yüklemeye sayısı (N), kil içeriği ve gerilme izi ile değişimi

%5 kil içeren kum-kil numunelerde ise kum numunelerde olduğu gibi 1000 tekrarlı yüklemeye sayısına kadar esneklik modülü değerlerinde çok az bir değişim olmaktadır ve 1000 tekrarlı yüklemeye sayısından sonra esneklik modülü değerlerinde meydana gelen azalma KŞGİ altında daha fazla olmaktadır (Şekil 4(b)). Ayrıca 5000 tekrarlı yüklemeye sayısında %5 kil içeren kum-kil numunesi KŞGİ altında daha düşük esneklik modülü değeri vermiştir. Tablo 3'te görüldüğü üzere bu kum-kil numunelerinde meydana gelen şekil değiştirmenin büyük bir kısmı elastik şekil değiştirmedir ($\epsilon_z^f/\epsilon_z^t > 88$). Ancak küçük tekrarlı yüklemeye sayılarında %5 kil içeren kum-kil numunelerinde KŞGİ'den dolayı daha fazla kalıcı şekil değiştirme meydana

gelmektedir (Tablo 3 ve Şekil 5(b)). Artan tekrarlı yüklemeye sayılarında ise KŞGİ'ne maruz kalan numunede meydana gelen elastik aksenal şekil değiştirmenin oranı artmaktadır (Tablo 3). Bu durum kil zeminin KŞGİ altında daha fazla sıkışma davranışı göstermesinden kaynaklanmaktadır. Artan tekrarlı yüklemeye sayılarında ise bu numune daha stabil bir davranış sergilemektedir (Şekil 5(b)). Şekil 4(b)'ye göre %5 kil içeren orta-sıkı kum-kil numunelerinin tasarım esneklik modülü belirlenirken tekrarlı yüklemeye sayısı ve KŞGİ göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 5 Farklı tekrarlı yüklemeye sayılarından (N) sonra kum-kil numunelerinde ölçülen kümülatif kalıcı aksenal şekil değiştirme sonuçlarının $((\epsilon_z^f)_{kümülatif})$, gerilme izleri (ÜEGİ ve KŞGİ) ve kil içeriği ile değişimi

%10 kil içeren numunelerde gerilme izinin esneklik modülüne etkisi daha belirgin olmaktadır. Şöyle ki, KŞGİ altında bütün tekrarlı yüklemeye sayılarında daha düşük esneklik modülü değerleri elde edilmiştir (Şekil 4(c)). Bu

durum %10 kil içeren numunede KŞGİ altında daha az aksel gerilme farkı ve daha fazla elastik şekil değiştirmenin elde edilmesinden kaynaklanmaktadır (Tablo 3). Ayrıca tekrarlı yükleme sayıları ile esneklik modülünde meydana gelen değişim de bu numunede çok az olmaktadır (Şekil 4(b)). Ancak %10 kil içeren numune %5 kil içeren numuneye kıyasla ÜEGİ altında daha fazla esneklik modülü vermektedir (Şekil 4(b) ve 4(c)). Bu durum ise %5 kil içeren numunede daha az aksel gerilme farkı ölçülmesine rağmen %10 kil içeren numunede daha az elastik şekil değiştirmenin meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır (Tablo 3). Ayrıca başlangıç tekrarlı yükleme sayılarında KŞGİ'ne maruz kalan numunede daha fazla kalıcı şekil değiştirme meydana gelmiştir (Tablo 3). Artan tekrarlı yükleme sayıları ile elastik aksel şekil değiştirmenin toplam aksel şekil değiştirmeye oranı da artmakta ve bundan dolayı her iki numune de daha stabil bir aksel şekil değiştirme davranışı sergilemektedir (Tablo 3 ve Şekil 5(c)). %10 kil içeren kum-kil numunelerinin tasarım esneklik modülü belirlenirken tekrarlı yükleme sayısı ve KŞGİ göz önünde bulundurulmalıdır.

%20 kil içeren numunelerde, KŞGİ altında daha düşük esneklik modülü elde edilmektedir. Elde edilen esneklik modülü değerleri ise tekrarlı yükleme sayısı ile azalmaktadır. Ancak ÜEGİ'ne maruz kalan numunede, esneklik modülü değerleri artan tekrarlı yükleme sayısı ile artmaktadır (Şekil 4(d)). Bunun nedeni ise bu numunede daha fazla aksel gerilme farkının ölçülmesidir (Tablo 3). Küçük tekrarlı yükleme sayılarında ($N \leq 100$), %20 kil içeren numuneler her iki gerilme izi altında benzer sonuçlar vermektedir. Bunun nedeni KŞGİ'ne maruz kalan numunede, kalıcı aksel şekil değiştirmenin daha hızlı gelişmesi ve buna bağlı olarak daha düşük aksel gerilme farklarının elde edilmesidir (Tablo 3). ÜEGİ altındaki numunede ise aksel şekil değiştirmenin büyük bir kısmı elastik olarak gerçekleşmektedir ($\epsilon_z'/\epsilon_z' > 93$). Ancak KŞGİ altındaki numunede ise kalıcı aksel şekil değiştirme daha fazla gerçekleşmekte ve bundan dolayı düşük tekrarlı yükleme sayılarında göçme meydana gelmektedir (Tablo 3 ve Şekil 5(d)). KŞGİ'ne maruz kalan numunede kalıcı aksel şekil değiştirmenin hızlı bir şekilde gelişmesi ve buna bağlı olarak göçmenin meydana gelmesi, KŞGİ yükleme koşullarında kritik kil içeriğine sahip olan bu karışımda kum daneleri arasındaki kenetlenmenin olumsuz etkilenmesi ve ince daneli zeminin yük altındaki davranış özelliklerinin bu karışımda daha baskın hale gelmesi ile açıklanabilir. Diğer kil içeriklerinde bu durumun etkisi çok az görülmüştür. Şekil 4(d) ve Şekil 5(d)'ye göre %20 kil içeren kum-kil karışımlarının esneklik modülü KŞGİ hesaba katılarak belirlenmelidir. Aksi takdirde trafik yüklerinden dolayı yol yapısında meydana gelecek olan aksel şekil değiştirme davranışı çok daha düşük tahmin edilmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, ağırlıkça %0, %5, %10 ve %20 oranlarında kil içeren ve tekrarlı trafik yüklerine maruz kalan orta-sıkı kum-kil karışımlarının esneklik modülü parametreleri kalp şekli gerilme izi (KŞGİ) ve üç aksel gerilme izi (ÜEGİ) ile araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, her iki gerilme izi de yarı silindirik deney

cihazı kullanılarak kum-kil numuneleri üzerinde uygulanmıştır. Kum-kil numuneleri ÜEGİ altında sadece tekrarlı aksel gerilmeye maruz kalmıştır. Ancak KŞGİ'ne maruz kalan kum-kil numunelerinde ise bu gerilme izini ve asal gerilme dönmesini simüle etmek için tekrarlı aksel gerilme ve burulmalı kayma gerilmesi aynı anda uygulanmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre asal gerilme dönmesinin kum zeminin (%0 kil) esneklik modülü parametresine etkisi çok az olmaktadır. Ayrıca artan tekrarlı yükleme sayısı ile esneklik modülünde azalma meydana geldiği için kum zeminin tasarım esneklik modülü belirlenirken nihai ($N=5000$) esneklik modülü değeri kullanılmalıdır. Diğer yandan kum zeminin esneklik modülü artan kil içeriği ile azalmaktadır. Artan kil içeriği ile asal gerilme dönmesinin ve KŞGİ'nin esneklik modülüne etkisi daha belirgin olmaktadır. Şöyle ki, KŞGİ'ne maruz kalan ve %5'ten daha fazla kil içeren kum-kil numuneleri daha düşük esneklik modülü değerleri vermiştir. Bu durum ise bu numunelerde daha fazla kalıcı aksel şekil değiştirmenin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bundan dolayı orta-sıkı kum-kil karışımlarının kullanıldığı yol yapılarının tasarımında tasarım esneklik modülü belirlenirken KŞGİ ve asal gerilme dönmesinin etkileri göz önüne alınmalıdır. Aksi takdirde, elde edilen deney sonuçlarına göre tekrarlı trafik yüklerinden dolayı yol yapılarında meydana gelecek olan kalıcı aksel şekil değiştirmeler daha düşük tahmin edilmektedir. Bu durum ise özellikle yol bakım maliyetlerinin önemli miktarda artmasına sebep olabilir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK yurt dışı doktora sonrası araştırma bursu (2219) ile Iowa Eyalet Üniversitesi İnşaat, Yapı ve Çevre Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında Dr. Cassandra Rutherford ve Doç. Dr. Bora Çetin'in bilgileri dahilinde gerçekleştirilmiştir.

Çıkar çatışması

Bu çalışmada, herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Benzerlik oranı (iThenticate): %4

Kaynaklar

- [1] Md. Jibon, D. Mishra and E. Kassem, Laboratory characterization of fine-grained soils for Pavement ME Design implementation in Idaho. Transportation Geotechnics, 25, 100395, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100395>.
- [2] G. Ma, H. Li, B. Yang, H. Zhang and W. Li, Investigation on the deformation behavior of open-graded unbound granular materials for permeable pavement. Construction and Building Materials, 260, 119800, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119800>.
- [3] L. Guo, Y. Cai, R. J. Jardine, Z. Yang and J. Wang, Undrained behaviour of intact soft clay under cyclic paths that match vehicle loading conditions, Canadian Geotechnical Journal, 55, 90–106, 2018. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0636>.

- [4] A. Cetin, Z. Kaya, B. Cetin and A. H. Aydilek, Influence of laboratory compaction method on mechanical and hydraulic characteristics of unbound granular base materials. *Road Materials and Pavement Design*, 15 (1), 220-235, 2014. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.869505>.
- [5] I. Haider, Z. Kaya, A. Cetin, M. Hatipoglu, B. Cetin and A. H. Aydilek, Drainage and mechanical behavior of highway base materials. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140 (6), 04014012, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.19434774.0000708](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.19434774.0000708).
- [6] S. H. He, Z. Ding, T.D. Xia, W. H. Zhou, X. L. Gan, Y. Z. Chen and F. Xia, Long-term behaviour and degradation of calcareous sand under cyclic loading. *Engineering Geology*, 276, 105756, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105756>.
- [7] N. Venkatesh, M. Heeralal and R. J. Pillai, Resilient and permanent deformation behaviour of clayey subgrade soil subjected to repeated load triaxial tests. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24 (9), 1414-1429, 2020. <https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1472041>.
- [8] Y. Cai, Q. Sun, L. Guo, C. H. Juang and J. Wang, Permanent deformation characteristics of saturated sand under cyclic loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 52, 795-807, 2015. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0341>.
- [9] L. Guo, J. Chen, J. Wang, Y. Cai and P. Deng, Influences of stress magnitude and loading frequency on cyclic behavior of K_0 -consolidated marine clay involving principal stress rotation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 84, 94-107, 2016. <http://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.01.024>.
- [10] J. G. Qian, Y. G. Wang, Z. Y. Yin and M. S. Huang, Experimental identification of plastic shakedown behavior of saturated clay subjected to traffic loading with principal stress rotation. *Engineering Geology*, 214, 29-42, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.09.012>.
- [11] Y. Q. Cai, L. Guo, R. J. Jardine, Z. X. Yang and J. Wang, Stress-strain response of soft clay to traffic loading. *Géotechnique*, 67(5), 446-451, 2017. <https://doi.org/10.1680/jgeot.15.P.224>.
- [12] H. I. Fedakar, W. Cai, C. J. Rutherford and B. Cetin, Evaluation of deformation behavior of sand-clay mixture under traffic loads. *Geo-Congress 2020, ASCE Geotechnical Special Publications (GSP 317)*, sayfa 201-209, Minneapolis, Minnesota, ABD, 25-28 Şubat 2020.
- [13] Y. Cai, T. Wu, L. Guo and J. Wang, Stiffness degradation and plastic strain accumulation of clay under cyclic load with principal stress rotation and deviatoric stress variation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144 (5), 04018021, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001854](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001854).
- [14] Q. Yang, Y. Tang, B. Yuan and J. Zhou, Cyclic stress-strain behaviour of soft clay under traffic loading through hollow cylinder apparatus: effect of loading frequency. *Road Materials and Pavement Design*, 20 (5), 1026-1058, 2019. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1428219>.
- [15] D. C. Simpson and T. M. Evans, Behavioral thresholds in mixtures of sand and kaolinite clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142 (2), 04015073, 2016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001391](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001391).
- [16] H. Choo, W. Lee and C. Lee, Compressibility and small strain stiffness of kaolin clay mixed with varying amounts of sand. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21 (6), 2152-2161, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-1787-4>.
- [17] M. Cubrinovski and S. Rees, Effects of fines on undrained behaviour of sands. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV, ASCE Geotechnical Special Publications (GSP 181)*, sayfa 1-11, Sacramento, California, ABD, 18-22 Mayıs 2008.
- [18] P. V. Lade, C. D. Liggio and J. A. Yamamuro, Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 21 (4), 336-347, 1998. <https://doi.org/10.1520/GTJ11373J>.
- [19] A. Miftah, A. H. B. Garoushi and H. Bilsel, Effects of fine content on undrained shear response of sand-clay mixture. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 6 (10), 2020. <https://doi.org/10.1007/s40891-020-0193-7>.
- [20] B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning, CT, ABD, 2010.
- [21] C. Chazallon, P. Hornych and S. Mouhoubi, Elastoplastic model for the long-term behavior modeling of unbound granular materials in flexible pavements. *International Journal of Geomechanics*, 6 (4), 279-289, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1532-3641\(2006\)6:4\(279\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1532-3641(2006)6:4(279)).





Direct Red BWS tekstil boyası adsorpsiyonunun Taguchi L₉(3⁴) ortogonal deney tasarımı ile araştırılması

Investigations of adsorption of Direct Red BWS textile dye using Taguchi L₉(3⁴) orthogonal experimental design

Erbil Kavcı^{1,*} 

¹Kafkas Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 36100, Kars, Türkiye

Özet

Adsorpsiyon, sulu çözümlerden boyar maddelerin giderimi için tercih edilen bir yöntemdir. Bu çalışmada, tekstil fabrikasından temin edilen Direct Red BWS boyar maddesinin fıstık kabuğu ile adsorpsiyonu incelenmiştir. Sıcaklık, başlangıç boya konsantrasyonu, başlangıç pH'ı ve adsorbent miktarı adsorpsiyona etki eden parametreler olarak seçilmiştir. Parametrelerin etkin seviyeleri Taguchi L₉ ortogonal deney matrisi ile S/N (Sinyal/Gürültü) değerleri hesaplanarak belirlenmiştir. Daha sonra ham verilerden, parametrelerin görece önemini görmek için ANOVA analizi yapılmıştır. Çalışma, başlangıç pH'ının en etkili parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Onu, başlangıç boya konsantrasyonu, adsorbent miktarı ve sıcaklık takip etmektedir. Adsorpsiyon deneylerinde etkisi en az olan parametre sıcaklıktır. Optimum şartlar, sıcaklık 23 °C, başlangıç boya konsantrasyonu 150 mg.l⁻¹, başlangıç pH'ı 2.5, adsorbent miktarı 50 mg olarak bulunmuş ve adsorpsiyon kapasitesi q_e=50.57 mg.g⁻¹ olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Artıma, Fıstık kabuğu, Tekstil atıksuyu, Adsorpsiyon, Taguchi

Abstract

Adsorption is a preferred method for the removal of dyes from aqueous solutions. In this study, Adsorption of Direct Red BWS obtained from the textile plant onto the peanut shell was investigated. Temperature, initial dye concentration, initial pH, and adsorbent dose were selected as affecting parameters for adsorption. S/N (Signal/Noise) values were calculated and the effective level of the parameters were determined using Taguchi L₉ orthogonal array. Then, Analysis of Variance (ANOVA) has been used to identify the significant parameters. The study revealed that initial pH was the most effective parameter followed by initial concentration, adsorbent dose, and temperature. The temperature is found to be the least significant parameter in adsorption experiments. The optimum levels of parameters are temperature 23 °C, initial dye concentration 150 mg.l⁻¹, initial pH=2.5 and, adsorbent dose 50 mg respectively and adsorption capacity is q_e=50.57 mg.g⁻¹.

Keywords: Treatment, Peanut shell, Textile effluent, Adsorption, Taguchi

1 Giriş

Boyar maddeler çok çeşitli endüstrilerde (tekstil, plastik, kâğıt, boya, deri, gıda işlemleri, ilaç sanayisi) kullanılan renklendirici maddelerdir. Bu boyar maddeler kullanıldıktan sonra atık sularla çevreye deşarj edilmektedir. Çevreye verildiğinde kimyasal olarak kararlı yapılar oluşturan bu maddeler her türlü canlı ve bitkinin hayatına zarar vermektedir [1-3].

Boyar maddeler asit boyarmaddeler, reaktif boyar maddeler, bazik boyar maddeler, azo boyar maddeler, direk boyar maddeler, vat ve dispers boyar maddeler olarak sınıflandırılabilir. Daha geniş bir sınıflandırmada ise katyonik, anyonik ve non-iyonik olarak sınıflandırılabilir. Direk, asit, reaktif ve azo boyar maddeler anyonik boyar maddeler sınıfına girmektedir [4]. Direk boyar maddeler ise bir veya daha fazla azo gruplara sahip olan, selülozik elyafların boyama ve baskı işlemlerinde oldukça tercih edilen boya gruplarıdır [5]. Kolay uygulanabilmesi, ucuz olması ve geniş bir uygulama alanına sahip olmasından dolayı çokça kullanılmaktadır [6]. Yapısında azo grupları ve sülfonik gruplar bulunduran bu boyar maddeler oldukça düşük konsantrasyonlarda bile gözle görülebilir. Kanserojendir, insan sağlığı ve sucul ekosistem için de zararlıdır. Kompleks yapıları ve sentetik olması sebebiyle biyo bozunamaz ve doğal yolla parçalanamazlar [7].

Dolayısıyla fiziksel veya kimyasal olarak atık sulardan giderilmesi gerekir.

Boya gideriminde flokülasyon, elektroflokülasyon, çöktürme, iyon değiştirme, membran filtrasyonu, ozonlama, adsorpsiyon yöntemleri kullanılır. Uygulama kolaylığı, prosenin basitliği ve yan ürün oluşmaması adsorpsiyon proseslerini avantajlı hale getirmektedir. Adsorpsiyon için adsorbent seçimi de önemlidir [8]. Doğada kolay bulunabilmeleri, ucuz olmaları, düşük seviyede biyolojik veya kimyasal atık oluşturmaları tercih sebebidir [9, 10]. Boyar maddelerin gideriminde birçok bitkisel atık madde adsorbent olarak kullanılmaktadır.

Boyar maddelerin adsorpsiyon proseslerinde, adsorpsiyonu etkileyen birçok parametre vardır. Bunların arasında başlangıç pH'ı, başlangıç boya konsantrasyonu, temas süresi, adsorbent miktarı, sıcaklık sayılabilir. Bu parametrelerin sayısı arttıkça deney sayısı artar. Buda daha fazla zaman kaybı, daha fazla maliyet demektir [11, 12].

Bir optimizasyon çalışması sistematik bir yaklaşım getirir ve bu sayede performansı etkileyen faktörleri ve etkileri daha az deney yaparak belirlenebilir [13]. Taguchi optimizasyon metodu tek değişkenli optimizasyon tekniklerine nazaran daha güçlü ve avantajlıdır [14]. Bu teknik, varyasyonları ölçerek verileri Sinyal/Gürültü (S/N) oranına dönüştürür [15].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: erbilkavci@gmail.com (E. Kavcı)

Geliş / Recieved: 03.01.2020 Kabul / Accepted: 20.11.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.669972

Bu çalışmada, doğada çokça bulunan ticari bir değeri olmayan fıstık kabuğu adsorbent olarak kullanılmıştır. Adsorpsiyon proseslerinde tutunmayı etkileyen parametreler olarak sıcaklık, başlangıç boya konsantrasyonu, başlangıç pH'ı ve adsorbent miktarı seçilmiştir ve sulu çözeltilerdeki Direct Red BWS (DR-BWS) boyar maddesinin fıstık kabuğuna adsorpsiyonu için L₉ ortogonal deney tasarımı kullanılmıştır. Ayrıca ANOVA analizi yapılarak en etkin parametreler belirlenmiştir.

2 Materyal ve metot

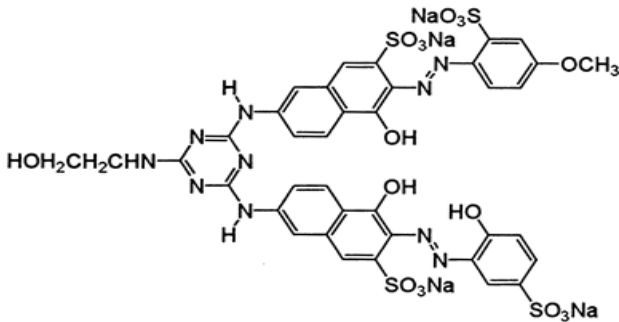
2.1 Adsorbent ve adsorbatın hazırlanışı

Adsorbent olarak kullanılan fıstık kabukları yerel bir marketten alınmıştır. Üzerindeki tozlar, kirler saf suyla yıkanarak temizlenmiştir. Sonra etüvde 80 °C sıcaklıkta 16 saat kurutulmuştur. Daha sonra öğütülmüş ve elenerek 600 meşin altındaki numuneler adsorbent olarak kullanılmıştır.

DR-BWS boyar maddesi bir tekstil fabrikasından temin edilmiş ve molekül yapısı Şekil 1'de verilmiştir. Dalga boyu 517 nm ve molekül ağırlığı 1116.91 g.mol⁻¹'dir. 1000 mg.l⁻¹ stok çözeltisi hazırlanmış ve istenen diğer konsantrasyonlar bu çözeltilerden seyreltilerek elde edilmiştir. 50 ml DR-BWS çözeltisi, 250 ml'lik behere konulmuş ve deneyler NB-303 model orbital çalkalamalı-sıcaklık ayarlı çalkalayıcıda yapılmıştır. Başlangıçta pH ayarlaması için 0.1 mol.l⁻¹ HCl ve NaOH çözeltileri hazırlanmıştır. Konsantrasyon ölçümleri MAPADA – V1100D marka UV-visible spektrofotometre kullanılarak yapılmıştır. Adsorplanan boyar madde miktarı q_e ise Denklem (1)'den hesaplanmıştır.

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) \times V}{m} \quad (1)$$

Burada C_o, C_e, sırasıyla boyar maddenin başlangıçta, denge anında boyar madde konsantrasyonunu (mg.l⁻¹), q_e, birim adsorbent miktarı başında adsorplanan boya miktarını (mg.g⁻¹), V çözelti hacmini (l), m ise adsorbent miktarını temsil etmektedir (g).



Şekil 1. Direct Red BWS boyar maddesinin molekül yapısı

2.1.1 Taguchi L₉ deney tasarımı

Taguchi optimizasyon metodu, ortogonal deney tasarımı kullanarak deney sayısında azalma sağlayan bir optimizasyon tekniğidir. Ortogonal deney tasarımının en önemli avantajı çok sayıda faktörü daha az sayıda kullanmak ve seviyelerini eş zamanlı olarak

değiştirebilmektir [16]. Bu teknik elde edilen verileri sinyal/gürültü (S/N) oranına çevirir. S/N oranının kullanıldığı deneyin karakteristiğine bağlı olarak üç tipi vardır. Bunlar “en büyük en iyi”, “en küçük en iyi”, “nominal en iyi” şeklindedir. Özellikle bu çalışmada en fazla boya adsorplanması istendiğinden en büyük en iyi yaklaşımı kullanılmıştır [17, 18]. Bu kritere göre, Taguchi eşitliği aşağıda Denklem (2)'de verilmiştir. Optimum şartlarda doğrulama deneyi yapılmıştır [19].

$$S/N = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (2)$$

y_i, performans karakteristik değerini, n tekrar sayısını ifade etmektedir.

2.1.2 ANOVA analizi

Taguchi analizini yaptıktan sonra ham veriler kullanılarak varyans (ANOVA) analizi yapılır. Burada amaç parametrelerin etkinliklerinin derecesini, performans kriterine en çok etki eden parametreyi belirlemektir. Burada Fisher testi (F değeri) ve olasılık (p değeri) parametrenin önemini ve istatistiksel olarak uygunluğunu belirler. Fα(ν1, ν2) α, güven aralığı ν1, parametrelerin serbestlik derecesi, ν2 hatanın serbestlik derecesidir. Hesaplan F değeri, okunan F değerinden büyük ise parametrenin etkin olduğu söylenir. F değerinin büyüklüğü ise seçilen parametrenin performans karakteristiği üzerinde daha büyük etki yaptığını göstermektedir [20–22].

3 Bulgular ve tartışma

Boya giderimine etki eden parametreler sıcaklık, başlangıç boya konsantrasyonu, başlangıç pH'ı ve adsorbent miktarı olarak seçilmiştir. Bu incelenen değişkenler ve seviyeleri Tablo 1'de, Taguchi L₉(3⁴) ortogonal matrisinin 4 parametrelili 3 seviyeli tasarımına ait deney tasarımına ait deney planı da Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Çalışılan Parametrelerin değerleri ve seviyeleri

Parametre Kodları	Parametre	Seviyeler		
		1	2	3
A	Sıcaklık (°C)	23	30	37
B	Baş. Boya konsantrasyonu (mg.l ⁻¹)	50	100	150
C	Başlangıç pH'ı (±0.03)	2.5	3	3.5
D	Adsorbent miktarı (mg)	50	100	150

Taguchi L₉ deney planına göre yapılan her bir deney iki kez tekrarlanmıştır. Deney sonuçları ve “en büyük en iyi” kriterine göre hesaplanmış, S/N oranları Tablo 3'de verilmiştir. Sonuçlar Minitab 13 programında analiz edilmiş ve optimum parametre seviyeleri Şekil 2'de ve parametrelerin S/N cinsinden etkinlik değerleri Tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 2. L₉ ortogonal deney planı

Deney No	Parametreler			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Şekil 2’den sıcaklık parametresinin birinci, başlangıç boya konsantrasyonunun üçüncü, başlangıç pH’ının ve adsorbent miktarının birinci seviyesi optimum parametrelerdir. Adsorpsiyon kapasitesi (q_e) S/N oranı ile ilişkili olduğundan S/N oranları üzerinden adsorpsiyon kapasitelerinin nasıl etkilendiği değerlendirilebilir. Sıcaklık (A) parametresi incelendiğinde, A₁ seviyesi en büyük değeri almıştır. A eğrisinde çok keskin azalmalar olmasa da, sıcaklık arttıkça adsorpsiyon kapasitesinde (q_e) bir azalma gözlenmiştir. Sıcaklığın artışıyla, adsorpsiyon kapasitesindeki azalma, prosesin endotermik olduğuyla açıklanabilir.

Konsantrasyon parametresi (B) incelendiğinde, birinci seviyeden ikinci seviyeye geçerken hızlı bir artış olmuş ve üçüncü seviyede artış devam etmiştir. En yüksek adsorpsiyon kapasitesi B₃ seviyesidir.

Tablo 3. q_e ve S/N oranları

Deney No	Parametreler				q _{e1}	q _{e2}	S/N
	A	B	C	D			
1	1	1	1	1	32.38	30.43	29.93
2	1	2	2	2	28.69	24.59	28.43
3	1	3	3	3	14.83	11.83	22.33
4	2	1	2	3	12.36	11.05	21.33
5	2	2	3	1	19.88	17.93	25.50
6	2	3	1	2	37.48	33.18	30.91
7	3	1	3	2	9.35	7.01	17.99
8	3	2	1	3	27.07	28.50	28.87
9	3	3	2	1	39.02	43.71	32.29

Konsantrasyonun artışı ile kütle transferi sürükleyici kuvveti artmış, dolayısıyla kütle transferi direnci azalmış ve adsorpsiyon kapasitesi artmıştır. Başlangıç pH’ı (C) eğrisi incelendiğinde, pH’ın artması ile q_e değeri, hızlı bir şekilde azalmaktadır. Bu adsorpsiyon üzerinde en etkin parametrenin pH olduğunu göstermektedir. C₁ seviyesinde en fazla q_e değerine sahip olmuştur.

Ortamın pH’ı düşükçe adsorbent yüzeyi (+) yüklenmiş ve bu sayede anyonik boya ile arasındaki elektrostatik çekim kuvveti artışı daha fazla boyar maddenin tutunmasını

sağlamıştır. Adsorbent miktarı (D) artışıyla adsorpsiyon kapasitesinde azalma gözlemlenmiştir. Adsorbent miktarındaki artış ile adsorbent parçacıkların birbirine teması, birikmesi, topaklanması daha fazla olabilir.

Boyar maddenin adsorbent ile temas eden yüzey alanını azaltan bu durumdan dolayı adsorpsiyon kapasitesi azalmış olabilir. D₁ seviyesinde maksimum q_e değerine sahiptir. Bu durumda en yüksek q_e değeri elde edilecek parametre kodlaması A₁B₃C₁D₁ şeklindedir.

Tablo 4. Parametrelerin S/N cinsinden etkinlik değerleri

Seviyeler	A (Sıcaklık)	B (Baş. Boya Kons.)	C (Başlangıç pH’ı)	D (Adsorbent miktarı)
1	28.5251	27.0675	29.5110	29.2781
2	28.1709	28.8051	28.6122	27.9927
3	28.1636	28.987	26.7364	27.5888

3.1 ANOVA analizi

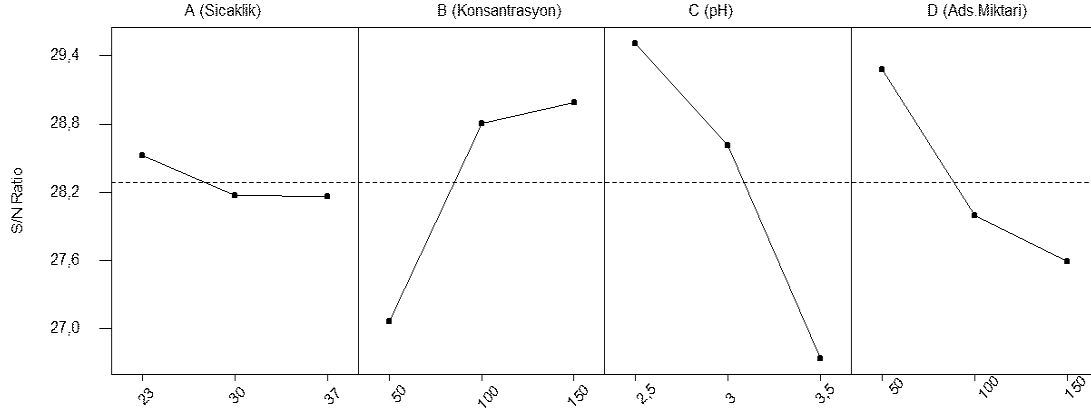
ANOVA analizinde ana amaç bütün parametrelerin toplam varyans ile her bir parametrenin varyansını karşılaştırarak etkisini belirlemektir [23]. Böylece seçilen parametrelerin birbirlerine göre etkisini değerlendirilebilir [24]. Tablo 5’de parametrelerin etkilediği q_e değerlerinden faydalanılarak %95 güven aralığında ANOVA analizi sonuçları verilmiştir.

F tablosundan %95 güven aralığında kritik F değeri (F_{0,05;2;9}) =4.26 olarak okunmuştur [25]. Bu durumda, Sıcaklık (A), başlangıç boya konsantrasyonu (B), başlangıç pH’ı (C) ve adsorbent miktarının (D) parametrelerinin F değerleri F_{kr}=4.26’dan büyük olduğundan bütün parametrelerin etkin olduğu görülmektedir. Tablo 5’den başlangıç pH’ı için F=112.84, adsorbent miktarı için F=54.69, başlangıç boya konsantrasyonu için F=54.49 ve sıcaklık için F=4.68 hesaplanmıştır.

F değerleri karşılaştırıldığında en etkin parametre en büyük F değerine sahip olan başlangıç pH’ıdır. Daha sonra adsorbent miktarı, başlangıç boya konsantrasyonu ve sıcaklık gelmektedir. Katkı yüzdelerinin ise başlangıç pH’ının %48.82, adsorbent miktarının %23.65, başlangıç boya konsantrasyonunun %23.56, sıcaklığın %2.02 olduğu görülmektedir.

Dolayısıyla en büyük katkıyı en etkin parametre olan başlangıç pH’ı yapmaktadır. Ardından, sırasıyla adsorbent miktarı, başlangıç boya konsantrasyonu ve sıcaklık gelmektedir. P değerlerinin 0.05 den küçük olması seçilen parametrelerin etkisinin de istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir [26]. Yapılan ön denemelerde, ortamın asitliğindeki çok az değişimin bile adsorplanan madde miktarına çok etki ettiği görülmüş, hatta ortam bazikleştikçe adsorpsiyon gerçekleşmemiştir.

Bu durum, başlangıç pH’ının parametresinin etkisini açıklamaktadır. Başlangıç boya konsantrasyonu ve adsorbent miktarının etkisi birbirine yakındır. Konsantrasyon artışı kütle transferi için itici gücü artırmaktadır. Ayrıca sabit hacimde adsorbent miktarındaki artış adsorbent parçacıklarının birbirlerine yakın temasından dolayı birikmeler, küçük yığınlar oluşturabileceği için



Şekil 2. Farklı seviyelerdeki S/N oranları

Tablo 5. DR-BWS adsorpsiyonu için ANOVA analizi

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	Faktör Katkısı(%)	F değeri	P
Sıcaklık	2	43.27	21.64	2.02	4.68	0.040
Başlangıç kons.	2	503.21	251.65	23.56	54.49	0.000
pH	2	1042.4	521.2	48.82	112.84	0.000
Adsorbent miktarı	2	505.19	254.6	23.65	54.69	0.000
Hata	9	41.57	4.62	1.95		
Toplam	17	2135.74				

adsorbent sitelerinin azalmasına sebep olacaktır [27]. Bu nedenle adsorbent miktarının azalması adsorplanan boyar madde miktarını (q_e) artırmıştır.

Adsorbent miktarının en düşük seviyede (D_1) ve başlangıç boya konsantrasyonun en yüksek seviyede (B_3) olması ile konsantrasyon farkından doğan kütle transferindeki itici güçle artmış ve daha fazla madde adsorplanmıştır. Optimum şartlarda ($A_1B_3C_1D_1$), etkin parametrelerden hesaplanan S/N değeri: $\eta = 28.29 + [(28.987 - 28.29) + (29.511 - 28.29) + (29.278 - 28.29)] = 31.43$ olarak bulunmuştur.

Bu değer, $q_e = 52.54 \text{ mg.g}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Optimum şartlarda yapılan doğrulama deneyinde ise $q_e = 50.57 \text{ mg.g}^{-1}$ olarak bulunmuştur.

4 Sonuçlar

DR-BWS tekstil boya maddesinin kil ile adsorpsiyonu incelenirken seçilen parametreleri optimize edebilmek için Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır. Adsorplanan madde miktarını artırmak için “en büyük en iyi” performans testi seçilmiştir. Bu durum için en iyi parametre seviyeleri: sıcaklığın birinci seviyesi 23 °C, konsantrasyonun üçüncü seviyesi 150 mg.l^{-1} , başlangıç pH'nın birinci seviyesi 2.5 adsorbent miktarının birinci seviyesi 50 mg olarak tespit edilmiştir ($A_1B_3C_1D_1$). Parametrelerin görece etkilerini incelemek için ANOVA analizi yapılmış ve bu analizden başlangıç pH'nın adsorpsiyonu en çok etkileyen faktör

olduğu bulunmuş ondan sonra ise başlangıç boya konsantrasyonu, adsorbent miktarı ve sıcaklık gelmektedir. Optimum parametre seviyelerinde ($A_1B_3C_1D_1$) yapılan deneyde, 50.57 mg.g^{-1} DR-BWS boya maddesi adsorplanmıştır

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %3

Kaynakları

- [1] A. Khenifi, Z. Bouberka, F. Sekrane, M. Kameche and Z. Derriche, Adsorption study of an industrial dye by an organic clay. Adsorption, 13(2), 149-158, 2007. doi:10.1007/s10450-007-9016-6.
- [2] B. A. Fil, Isotherm, kinetic, and thermodynamic studies on the adsorption behavior of malachite green dye onto montmorillonite clay Particulate Science and Technology, 34(1), 118-126, 2016. doi: 10.1080/ 0272 6351.2015.1052122.
- [3] J. Erkmen, The use of hydroxyethyl cellulose as a transparent filling material in finishing polish. Pigment & Resin Technology, Tem. 2018. doi: 10.1108/PRT-06-2017-0060.
- [4] S. Dawood and T. Sen, Review on dye removal from its aqueous solution into alternative cost effective and

- non-conventional adsorbents. *Journal of Chemical and Process Engineering*, 1(104), 1-11, 2014. <http://hdl.handle.net/20.500.11937/48131>
- [5] X. He, M. Du, H. Li, and T. Zhou, Removal of direct dyes from aqueous solution by oxidized starch cross-linked chitosan/silica hybrid membrane. *International Journal of Biological Macromolecules*, 82, 174-181, 2016. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2015.11.005.
- [6] E. S. Z. El Ashtouky, Loofa egyptiaca as a novel adsorbent for removal of direct blue dye from aqueous solution. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2755-2761, 2009, doi: 10.1016/j.jenvman.2009.03.005.
- [7] N. Liu, H. Wang, C.-H. Weng, and C.-C. Hwang, Adsorption characteristics of Direct Red 23 azo dye onto powdered tourmaline. *Arabian Journal of Chemistry*, 11(8), 1281-1291, 2018, doi:10.1016/j.arabjc.2016.04.010.
- [8] O. Korkut, E. Sayan, O. Lacin, and B. Bayrak, Investigation of adsorption and ultrasound assisted desorption of lead (II) and copper (II) on local bentonite: A modelling study. *Desalination*, 259(1), 243-248, 2010. doi:10.1016/j.desal.2010.03.045.
- [9] Ö. Gök, A. S. Özcan, and A. Özcan, Adsorption behavior of a textile dye of Reactive Blue 19 from aqueous solutions onto modified bentonite. *Applied Surface Science*, 256(17), 5439-5443, 2010, doi:10.1016/j.apsusc.2009.12.134.
- [10] N. K. Amin, Removal of direct blue-106 dye from aqueous solution using new activated carbons developed from pomegranate peel: Adsorption equilibrium and kinetics. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1), 52-62, 2009, doi:10.1016/j.jhazmat.2008.09.067.
- [11] M. Rahmani, M. Kaykhaii, and M. Sasani, Application of Taguchi L16 design method for comparative study of ability of 3A zeolite in removal of Rhodamine B and Malachite green from environmental water samples. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 188, 164-169, 2018. doi: 10.1016/j.saa.2017.06.070.
- [12] R. Pundir, G. H. V. C. Chary, and M. G. Dastidar, Application of Taguchi method for optimizing the process parameters for the removal of copper and nickel by growing *Aspergillus* sp. *Water Resources and Industry*, 20, 83-92, 2018. doi:10.1016/j.wri.2016.05.001.
- [13] G. Karacan ve E. Sayilgan, Glukonik asit ve hidroklorik asit ile atık alkali pillerden çinko ve mangan gideriminin incelenmesi: Taguchi deney tasarımı. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 31-38, 2017, doi: 10.21605/cukurovaummfd.357181.
- [14] J. Li, J. Cai, L. Zhong, H. Cheng, H. Wang, ve Q. Ma, Adsorption of reactive red 136 onto chitosan/montmorillonite intercalated composite from aqueous solution. *Applied Clay Science*, 167, 9-22, 2019. doi: 10.1016/j.clay.2018.10.003.
- [15] M. P. Elizalde-González and L. E. García-Díaz, Application of a Taguchi L16 orthogonal array for optimizing the removal of Acid Orange 8 using carbon with a low specific surface area. *Chemical Engineering Journal*, 163(1), 55-61, 2010. doi: 10.1016/j.cej.2010.07.040.
- [16] H. Serencam ve M. Uçurum, Yeşil Bayburt taşının adsorban olarak kullanılabilirliğinin istatistiksel deney tasarımı ile incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 352-361, 2019. doi: 10.28948/ngumuh.517139.
- [17] C. E. Yılmaz, M. A. A. Aslani, ve C. K. Aslani, *Helianthus Annuus* çekirdeği kabuklarında toryum sorpsiyonunun taguchi metodu kullanılarak incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21(63), 741-747, 2019. doi:10.21205/deufmd.2019216306
- [18] B. Bayrak, O. Laçın, ve H. Saraç, Ham manyezit cevherinin glukonik asit çözeltilerinde çözündürülmesinin optimizasyonu. *Anadolu Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi A - Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik*, 16(2), 195-202, 2015. doi: 10.18038/btd-a.35162.
- [19] F. N. Azad, M. Ghaedi, K. Dashtian, S. Hajati, and V. Pezeshkpour, Ultrasonically assisted hydrothermal synthesis of activated carbon-HKUST-1-MOF hybrid for efficient simultaneous ultrasound-assisted removal of ternary organic dyes and antibacterial investigation: Taguchi optimization. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, 383-393, 2016, doi: 10.1016/j.ultsonch.2016.01.024.
- [20] N. Daneshvar, M. Ayazloo, A. R. Khataee, and M. Pourhassan, Biological decolorization of dye solution containing Malachite Green by microalgae *Cosmarium* sp. *Bioresource Technology*, 98(6), 1176-1182, 2007. doi: 10.1016/j.biortech.2006.05.025.
- [21] S. H. Dhawane, T. Kumar, and G. Halder, Biodiesel synthesis from *Hevea brasiliensis* oil employing carbon supported heterogeneous catalyst: Optimization by Taguchi method. *Renewable Energy*, 89, 506-514, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.027>.
- [22] M. K. Bilici, Application of Taguchi approach to optimize friction stir spot welding parameters of polypropylene, *Materials & Design*, 35, 113-119, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.033>
- [23] M. R. Sohrabi, A. Khavaran, S. Shariati, and S. Shariati, Removal of Carmoisine edible dye by Fenton and photo Fenton processes using Taguchi orthogonal array design. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S3523-S3531, 2017, doi: 10.1016/j.arabjc.2014.02.019.
- [24] J. Zolgharnein, N. Asanjarani, and T. Shariatmanesh, Taguchi L16 orthogonal array optimization for Cd (II) removal using *Carpinus betulus* tree leaves: Adsorption characterization. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, 66-77, 2013, doi: 10.1016/j.ibiod.2013.06.010.
- [25] D. Santra, R. Joarder, and M. Sarkar, Taguchi design and equilibrium modeling for fluoride adsorption on cerium loaded cellulose nanocomposite bead.

- Carbohydrate Polymers, 111, 813-821, 2014. doi: [10.1016/j.carbpol.2014.05.040](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.05.040).
- [26] U. Morali, H. Demiral, and S. Şensöz, Optimization of activated carbon production from sunflower seed extracted meal: Taguchi design of experiment approach and analysis of variance. Journal of Cleaner Production, 189, 602-611, 2018. doi: [10.1016/j.jclepro.2018.04.084](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.084).
- [27] T. B. Gupta and D. H. Lataye, Adsorption of indigo carmine and methylene blue dye: Taguchi's design of experiment to optimize removal efficiency. Sādhanā, 43, 170, 2018. doi: [10.1007/s12046-018-0931-x](https://doi.org/10.1007/s12046-018-0931-x).





Design and development of an autonomous bicycle Otonom bir bisikletin tasarımı ve geliştirilmesi

İlyas Kacar^{1,*} , Mehmet Ali Eroğlu^{1,2} , Mehmet Kürşat Yalçın¹ 

¹ Department of Mechatronics Engineering, Niğde Ömer Halisdemir University, Niğde 51240, Turkey

² Technical Sciences Vocational School, Niğde Ömer Halisdemir University, Niğde 51240, Turkey

Abstract

In this study; a design to build study has been carried out for a self-balancing bicycle. Also support and rising up systems to bring it the equilibrium position in case of its fall are added. Finite element simulation of the bicycle frame is performed to get its dynamics and structural responses. Finally, an autonomous bicycle frame with self-balancing capability is designed. Self-balancing has been performed by means of a control momentum gyroscope including a single axis gimbal. The performance of the design has been evaluated for varying loading, driving speed and torque conditions. Implementation of this study with control algorithms will be performed as a future work.

Keywords: Autonomous navigation, Balancing, Gyroscope, Flywheel, Control momentum gyroscope

1 Introduction

Unmanned air, land, marine and under water vehicles are called autonomous vehicles. They detect, collect, and transmit data wirelessly to headquarters. For autonomy, single track vehicles like bicycles require not only unmanned driving but also robotic balancing [1, 2] Autonomous driving requires more accuracy on self-balancing. Single track vehicles need active balancing during its driving because they have unstable equilibrium position while driving. This study focuses on design and mechanical analysis of self-balancing and rising up mechanisms of a two-wheeled bicycle.

It is seen that there are four types of self-balancing method for a bicycle [3], such as control momentum gyroscope (CMG) [4], mass balancing [5], use of steering control [6], and using reaction wheels/spheres [7]. Indeed, CMG's and reaction wheels are the same mechanically, but reaction wheels work at lower speed and provide less momentum while CMG's work at higher speed and can deliver more momentum. Both transfer angular momentum. The direction of angular momentum vector can be changed by changing the rotation vector's direction of the spinning rotor in gimbal system of CMGs. Consequently, any change in angular momentum leads to a gyroscopic reaction torque, known as "precession". The gyroscopic precession torque is used to provide the required balancer torque for self-balancing vehicles. Since CMGs bring gyroscopic effects onto the system dynamics, the interaction of gimbal and bicycle frame plays important role on gyroscopic system designs. Also a successful controller design depends on that interaction. In this study, CMG is chosen due to its short response time and the ability to produce a great amount of

Özet

Bu çalışmada; kendi kendini dengeleyebilen bir bisiklet için bir tasarım çalışması yapılmıştır. Ayrıca düşmesi durumunda denge konumuna getirmek için destek ve kaldırma sistemleri eklenmiştir. Sonlu eleman simülasyonu yapılarak, bisiklet çerçevesinin dinamikleri ve yapısal tepkileri elde edilmiştir. Netice olarak, kendi kendini dengeleme özelliğine sahip otonom bir bisiklet tasarımları gerçekleştirilmiştir. Kendinden dengeleme, tek eksenli bir gimbal içeren kontrol torqu jiroskopu ile gerçekleştirilmiştir. Tasarımın performansı değişen yüklemeye, sürüş hızı ve sürüş torqu açısından değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın kontrol algoritmaları ile uygulanması müteakip çalışma olarak planlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Otonom navigasyon, Dengeleme, Jiroskop, Volan, Kontrol momentum jiroskopu

balancing torque which is suitable for self-balancing bicycles.

It is seen that new solutions are based on gyros on self-balancing and autonomous navigation [8]. CMGs are firstly implemented in 1960s to control the attitude of the satellite bodies [9] up to 30 kg due to precise and fast attitude maneuvering capability [10]. Nowadays, CMGs have been used as single or in multiple configurations for different applications including balancing of bicycles' frames.

But CMGs have control difficulties, besides, higher power consumption and vibration due to continuous spinning of its flywheel [11]. Some strategies are applied to overcome control issues [12-14]. Optimal design studies are presented for minimum power consumption [15, 16]. Mutually-working double CMG configurations provide the gyroscopic torque twice and cancel out the unwanted moments and vibrations [17].

In the light of previous researches, it is seen that using CMGs is a reasonable choice since they provide a large amount of gyroscopic torque, they don't need any contact with earth ground for action, and their stability is maintained even if they don't move [18, 19]. So, experiences cause us to investigate the parameters which are effective on gyroscopic moment on various design alternatives for a two-wheeled bicycle. The aim of this study is to build a self-balancing system design based on a single-gimbal CMG for a two-wheeled bicycle. Its implementation onto an autonomous two-wheeled bicycle and control issues are in our future study plan. Finite element simulations are performed to obtain structural responses and to investigate its dynamics. Parameters from a real bicycle frame are used to constitute the finite element model.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ikacar@gmail.com (İ. Kacar)

Geliş / Received: 02.10.2019 Kabul / Accepted: 25.11.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.628580

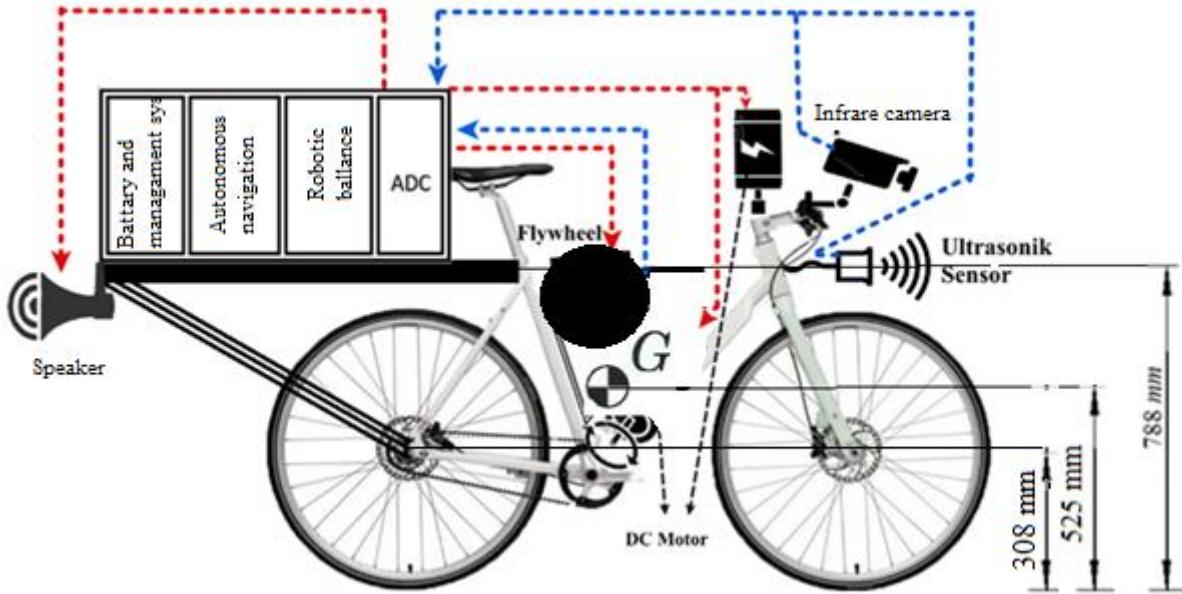


Figure 1. Part layout

Relationships between gyroscopic moment and load, driving torque, spin, stability angle are determined. Simulation results show the performance of active balancing for the bicycle. Relation between driving torque and gimbal torque is determined. Also front or rear wheel's effects on the gyroscopic torque is investigated.

2 Materials and methods

Relations between gyroscopic torque and load, driving torque, spin, stability angle are studied on a conceptual design by considering the effect of driving wheel and orientation of the CMG's gimbal on a riderless bicycle frame. Design alternatives for supporting and rising up are analyzed.

2.1 Conceptual design

A part layout including mechanic and electronic subsystems is seen in Figure 1 for the self-balancing two-wheeled riderless bicycle. Technical specifications used for calculations are based on a mountain bike's frame and given in Table 1.

Table 1. Parameters for static bicycle

Parameter	Description	Value	Unit
m_b	The mass off the bicycle frame	17.5	kg
m_L	Additional mass on bicycle	5	kg
L	Height of frame in reference with ground	788	mm
L_G	Height of gravity center (CG) in reference with ground	525	mm
I_b	Mass moment of inertia with respect to the wheel-ground	1.61	kg.m ²

2.2 Background on CMG

When a flywheel rotating around its main axis with a rotational velocity \mathbf{P} is disturbed by another rotation namely precession (or gimbal angular velocity $\mathbf{\Omega}=\dot{\psi}$) about its any

other axis perpendicular to the direction vector of \mathbf{P} , a gyroscopic reaction torque \mathbf{M} , known as gimbal torque, arises as shown in Figure 2. The direction of the gyroscopic gimbal moment vector is orthogonal to the plane where \mathbf{P} and $\mathbf{\Omega}$ are inside.

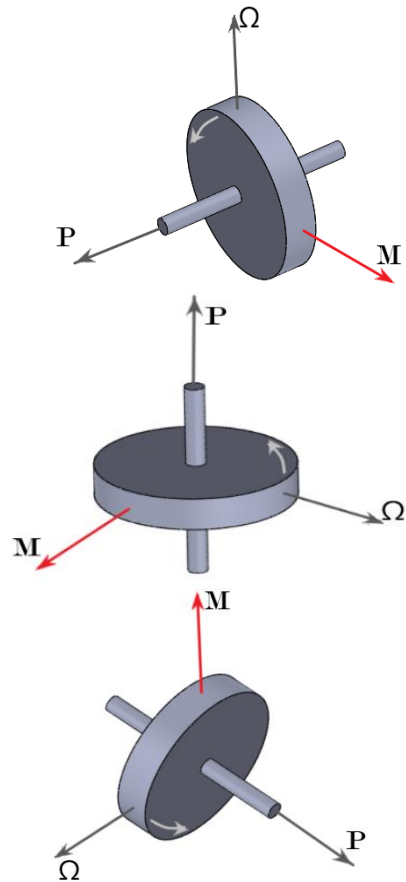


Figure 2. Gyroscopic gimbal moment vectors for various flywheel orientations

In CMG design, it is necessary to know the angular velocity and angular momentum of the flywheel. In the Figure 3, it is seen that a rotating flywheel has a new position after disturbing by a rotation around Y axis in θ angle and $\dot{\psi}$ precession velocity while its initial position is located on Z axes. X, Y, Z are axes on fixed coordinate system and x, y, z are new axes on rotated position. ϕ, θ, ψ shows Euler angles.

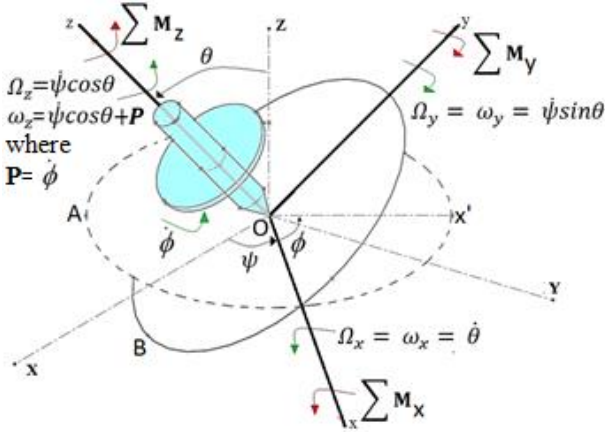


Figure 3. Vector diagram

While the flywheel's own rotational velocity components are $\omega_x, \omega_y, \omega_z$; the rotational velocity components of the x, y, z axes become $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ and written as shown in Eq. (1) [20].

$$\begin{aligned} \Omega_x &= \omega_x = \dot{\theta} \\ \Omega_y &= \omega_y = \dot{\psi} \sin \theta \\ \Omega_z &= \dot{\psi} \cos \theta \quad \omega_z = \dot{\psi} \cos \theta + P \\ &\text{where } P = \dot{\phi} \end{aligned} \quad (1)$$

It should be noted that unlike the rotational velocity components in the x and y axes of the flywheel, the z component also has an additional term depending on the spin P. The angular momentum components H_x, H_y, H_z can be written by using Equation (2).

$$\begin{aligned} H_x &= I_{xx} \omega_x = I_0 \dot{\theta} \\ H_y &= I_{yy} \omega_y = I_0 \dot{\psi} \sin \theta \\ H_z &= I_{zz} \omega_z = I(\dot{\psi} \cos \theta + P) \end{aligned} \quad (2)$$

where $I_{zz}=I$ represents the polar moment of inertia with respect to the center of rotation about O, and $I_{xx}=I_{zz}=I_0$ indicates the moment of inertia about the principal axes. In the most general sense, there is a relation between angular momentum \mathbf{H} and moment as $\sum \mathbf{M} = \dot{\mathbf{H}}$. The equation is defined with respect to the fixed coordinate system. Considering the rotated coordinate system, it becomes $\sum \mathbf{M} = \dot{\mathbf{H}} + \Omega \times \mathbf{H}$. Its Cartesian form is given in Equation (3).

$$\begin{aligned} \sum \mathbf{M} &= (\dot{H}_x - H_y \Omega_z + H_z \Omega_y) \mathbf{i} \\ &+ (\dot{H}_y - H_z \Omega_x + H_x \Omega_z) \mathbf{j} \\ &+ (\dot{H}_z - H_x \Omega_y + H_y \Omega_x) \mathbf{k} \end{aligned} \quad (3)$$

Substitution the rotational velocity and momentum components into Equation (3), the gyroscopic gimbal moment exerted on the x, y, z axes can be found as in Equation (4).

$$\begin{aligned} \sum M_x &= I_0 (\ddot{\theta} - \dot{\psi}^2 \sin \theta \cos \theta) + I \dot{\psi} (\dot{\psi} \cos \theta \\ &\quad + P) \sin \theta \\ \sum M_y &= I_0 (\ddot{\psi} \sin \theta + 2 \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta) \\ &\quad - I \dot{\theta} (\dot{\psi} \cos \theta + P) \\ \sum M_z &= I \frac{d}{dt} (\dot{\psi} \cos \theta + P) \end{aligned} \quad (4)$$

where $\ddot{\theta}$ and $\ddot{\psi}$ are second derivative of rotations corresponding rotational accelerations about y and x axes respectively. $\frac{d}{dt}$ shows time derivation. If the rotor has a constant spin speed P, the angle of precession θ is constant, and the frame is in static equilibrium, a particular case corresponding the single-gimbal CMG occurs where there is just one rotation component in the axis (z). It is expressed in Equation (5).

$$\begin{aligned} \dot{\psi} &= \text{constant}, \ddot{\psi} = 0 \\ \theta &= \text{constant}, \dot{\theta} = \ddot{\theta} = 0 \\ P &= \text{constant}, \dot{P} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

For this particular case, the y and z components of the moment will be zero. Thus, Eq. (4) becomes as in Eq. (6).

$$\begin{aligned} \sum M_x &= \dot{\psi} \sin \theta [I(\dot{\psi} \cos \theta + P) - I_0 \dot{\psi} \cos \theta] \\ \sum M_y &= 0 \\ \sum M_z &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

This formula will be used to calculate the gyroscopic moment on a single-gimbal CMG. Equation (6) mean that a flywheel rotating around the z axis in a static equilibrium does not generate any gimbal moment on the y and z axes. In addition, for the constant values of $\theta, \dot{\psi}$ and p, the magnitude of the gimbal moment M_x becomes constant. Its direction becomes perpendicular to the y-z plane.

2.3 CMG mounting on the bicycle frame

A single gimbal gyroscope will be enough to make the bicycle stabilized. However, the mounting location and orientation of the gyroscope will affect the gimbal moment to be transferred to the frame. Figure 4 shows two suitable installation alternatives schematically. Both are fit for stabilization. The spin, precession, and gimbal moment to balance the bicycle are also shown. It is seen that the mounting schema in Figure 4 (b) has been studied mostly [17, 21, 22].

2.4 Automatic support and rising-up

In case of unrecoverable wobbling, tilting or completely falling over, support and rising up mechanisms are required to bring the bicycle back to its equilibrium position

riderlessly. Mechanisms based on pinion-rack gear and pinned levers driven by pneumatic pistons are investigated. Whichever will be used, both must provide rotation on its longitudinal axis only during rising up. That requirement is satisfied as long as the frame doesn't lost not only force but also moment balance during rising up. Power requirements are calculated for simple comparison with each other. Figure 4 shows two available configurations to produce the gimbal moment directed along the main axis of the bicycle. The figures include just conceptual designs which will be re-designed in relation with the simulation results.

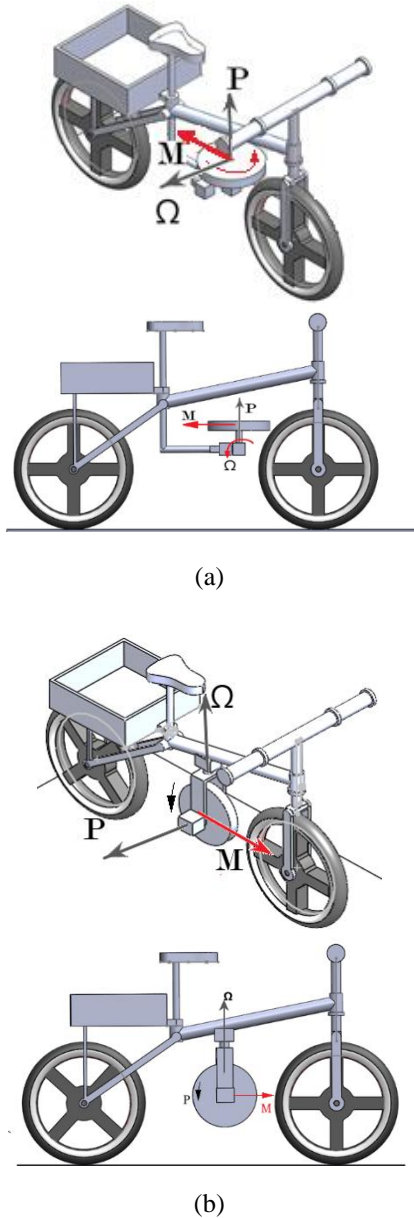


Figure 4. Mounting alternatives of a single gimbal CMG on a bicycle frame (a) Horizontal installation (b) Vertical installation

2.4.1 Pinion-rack gear mechanism

Two telescopic (linearly expandable) auxiliary bars are attached on both side of the frame by revolute joints which gives rotation DOF (degree of freedom) to bar as shown in Figure 5. While that DOF is driven by a ball-screw mechanism, the telescopic movement is obtained by a pinion-rack gear mechanism. They can be mounted separately on anywhere on the bicycle frame to ensure that the rotation will be about the longitudinal axis only.

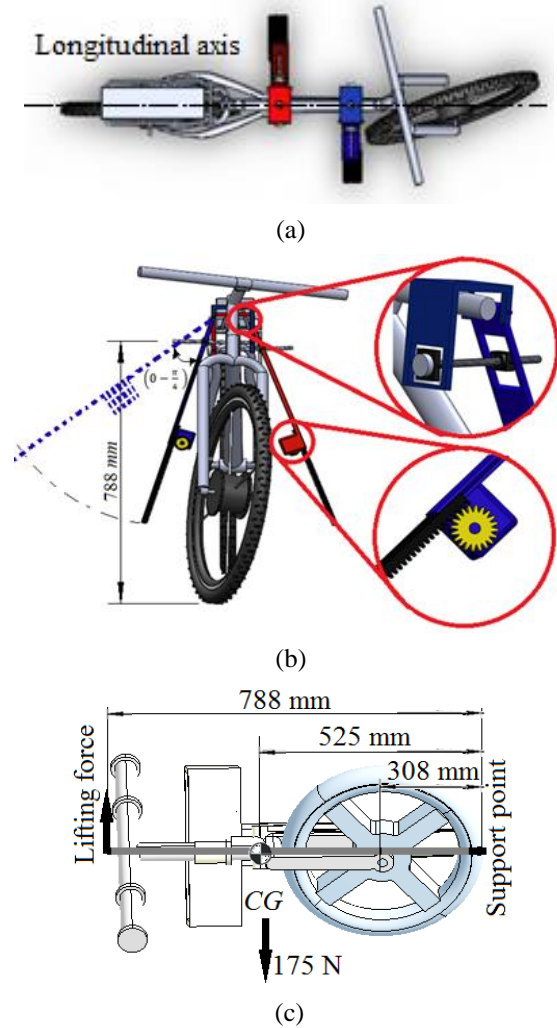


Figure 5. The arms (a) on the frame, (b) front view, (c) force equilibrium when it falls

The weight of the bicycle is $F = 175 \text{ N}$ and its vertical height is 788 mm at equilibrium position. By assuming that all weight are concentrated on its CG, the moment required to rise a completely fallen bicycle up; $M = r * F = 0.525 * 175 = 91.875 \text{ Nm}$. So the force to be exerted by the pinion gear rack mechanism will be $F_{GR} = 91.875 / 0.788 = 116.59 \text{ N}$. It will consume $P = F * V = 116.59 * 0.3 = 34.98 \text{ Watt}$ when its velocity is $V = 0.3 \text{ m/s}$. For the revolute joint, the ball screw mechanism will carry the same force too. Both will work sequentially.

2.4.2 Pinned levers driven by pneumatic pistons

Pneumatically driven cylinders push the pinned lever to provide the reaction force from the lever-ground contact. Figure 6 gives two different configurations. The support levers equipped with two rotatable wheels bring the frame to its initial equilibrium position by their circular motion. Using four levers attached to the frame's various locations will satisfy that the frame will stay balanced both statically and dynamically during rising up.

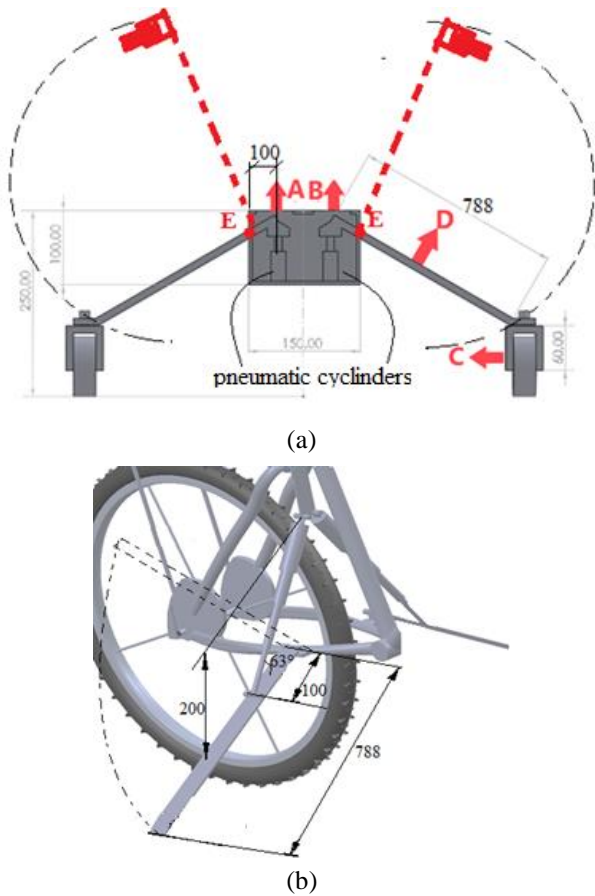


Figure 6. Pinned levers driven by pneumatic pistons (a) working envelope (b) its kinematics.

The lever rule gives the force requirement $F = 83.83\text{N}$ for both configurations. So the pressure required to carry this load should be $P = \frac{F}{A} = \frac{83.83}{0.0016848} = 49755.02 \text{ Pa} = 0.497 \text{ bar}$ when the total surface area of one piston = 0.0016848 m^2 .

2.5 Structural analyses

In this section, finite element analyses of the frame are performed to obtain the stress, deformation results and the moment requirements for the gyroscope with respect to time. Structural analyses are carried out statically and dynamically by using ANSYS© software [23].

2.5.1 Static analysis

The cases where loads are applied either steadily or slowly are analyzed by using static structural analysis. It verifies whether the applied load exceeds the yield strength.

Figure 7 shows the finite element model, applied loads, and boundary conditions. The loads consist of the frame's weight and additional 100 kg mass even designing additional mass is 5 kg. Standard earth gravity is applied. Structural steel whose yield point is 300 MPa is used as engineering material for the frame. In order to avoid meshing errors due to smaller dimension of the rim wires, rim wires are omitted in the model. Instead, the inner surface of the wheel rim and the outer surface of the hub shaft are connected as bonded contacts for both wheels. Figure 8 shows the deformation and stress results.

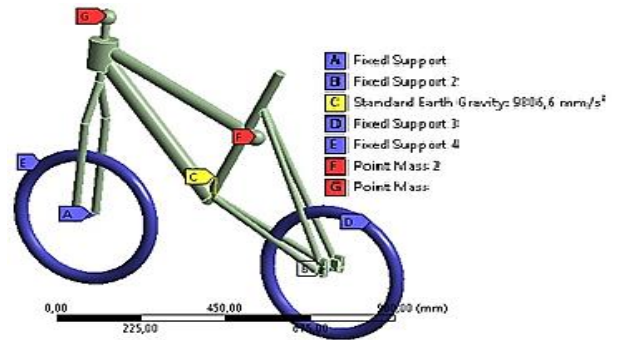


Figure 7. Load and boundary conditions applied to finite element model

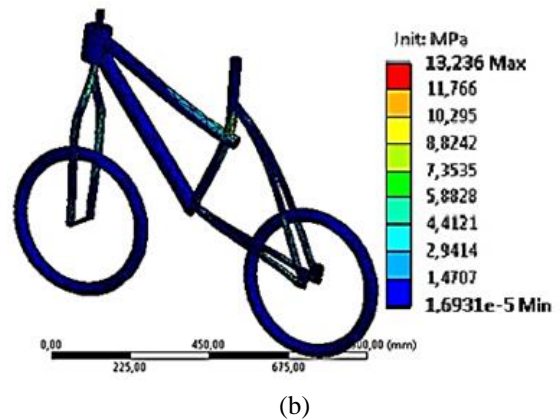
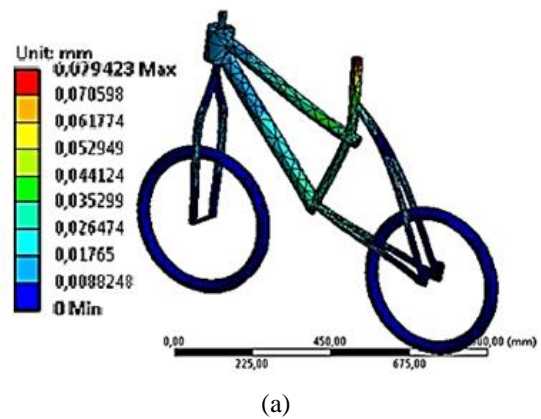


Figure 8. (a) Counterplot of deformation (b) the stress state

It is seen that the biggest stress in the structure is 13.236 MPa which is far away from the yield point. The largest deformation is 29.23 microns. But in daily life, loads are not slowly applied to the structure. They may be time-dependent. So dynamic analyses are also performed to understand the response of the structure.

2.5.2 Dynamic analysis

The rear and front wheels are revolutionary connected to the frame. The handlebar is also fixed with the frame. A flat plate is used as a floor and it is fixed to the ground. As shown in Figure 9, the rotating surfaces of both wheels are connected to plate surface by rough contacts to simulate the road-wheel interaction. Other contact types (bonded, frictionless, no separation, forced frictional sliding) lead to undesirable conditions such as sliding, flying, turning and bouncing. Standard earth gravity is applied. Additional masses are applied at the points A and B. At the beginning, the frame is set its vertical equilibrium position.

By means of that analysis, firstly, the maximum gyroscopic moment requirement is determined from the balance and torque history. Subsequently, the front/rear wheels will be driven sequentially to investigate if any influence on the gyroscopic moment. The analysis is repeated by changing the driving torque and additional masses.

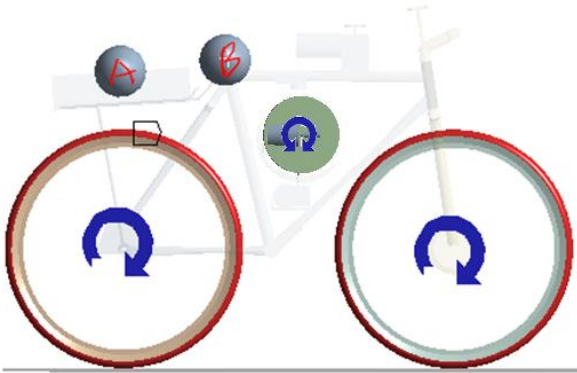


Figure 9. Contact surfaces between rear/front wheel and point mass loads, $A=B=2.5$ kg

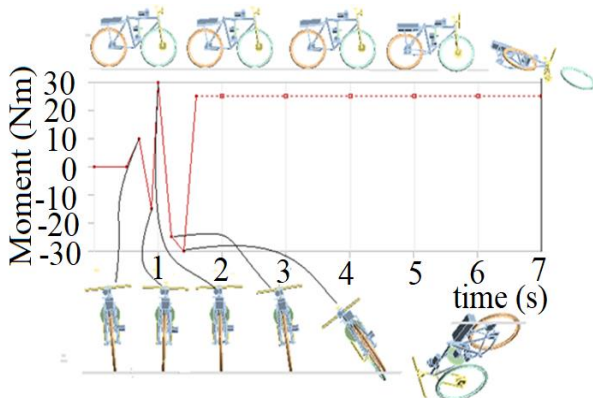


Figure 10. The gyroscopic moment history applied to the autonomous bicycle

It is seen that the bicycle continued to go forward by maintaining its equilibrium up to 0.7 second in the absence of any additional mass (the frame's own mass of 17.5 kg only). So 10 Nm gyroscopic moment is applied and it leads the frame to come to equilibrium up to 0.9 second. It starts to tilt again toward opposite side. So -11.8 Nm gyroscopic moment is applied at 0.9 second. It leads the frame to equilibrium again. Eventually, 30 Nm is applied to balance the frame and so on. In this way, the torque history given in Figure 10 is applied on the bicycle to prevent falling every time when the balance is disturbed. It is concluded that the maximum moment will be 30 Nm to balance the frame.

2.6 Gimbal design

As a result of the dynamic analysis, the maximum moment requirement is determined as 30 Nm. So the CMG to provide that torque is designed based on Equation (6). The disk has to have constant mass value due to manufacturing limitations. When the given parameters are used, the gimbal will produce 32.84 Nm as seen in Table 2.

Table 2. Parameters of the gyroscope

Parameters	Description	Value	Unit
P	Disk rotation speed (spin)	300	<i>rpm</i>
ψ	Angular rate of gimbal of CMG (precession)	6	<i>rad/s</i>
θ	Gimbal angle of CMG (motion angle)	10	<i>derece</i>
m	Mass of disk	3.5	<i>kg</i>
r	Radius of disk	8	<i>cm</i>
I	Moment of inertia with respect to the axis of rotation of the disk	0.0112	<i>kg.m²</i>
I_0	Moment of inertia of the disk with respect to other axes	0.0056	<i>kg.m²</i>
M	Gyroscopic moment (from Equation 6)	32.84	<i>N.m</i>

3 Results and discussions

3.1 Relation between gyroscopic moment, spin, gimbal angle, and angular rate

Based on Eq. (6), how the spin P , gimbal angle θ , and gimbal's angular rate ψ influence on the gimbal moment M is calculated when $\Omega = \psi = 1, 2, 3$ rad/sec at $\theta = 10^\circ$ and -10° for $P = 0-3000$ rpm. It is seen from the graphs in Figure 11 that the direction of the moment changes when the direction of precession changes. The relation between gyroscopic moment and flywheel spin is linear. The spin is getting increased, the moment increases as expected. Similarly, while the angular rate of gimbal is getting increased, it increases.

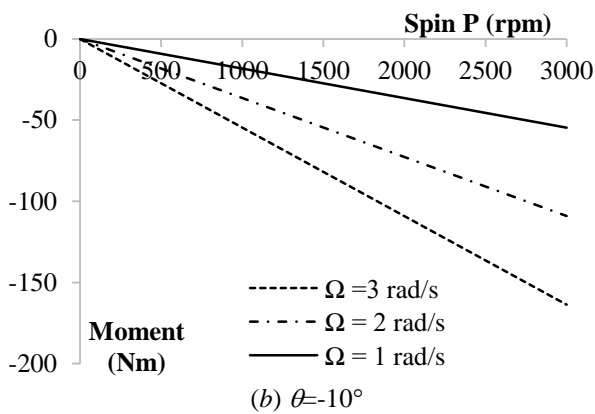
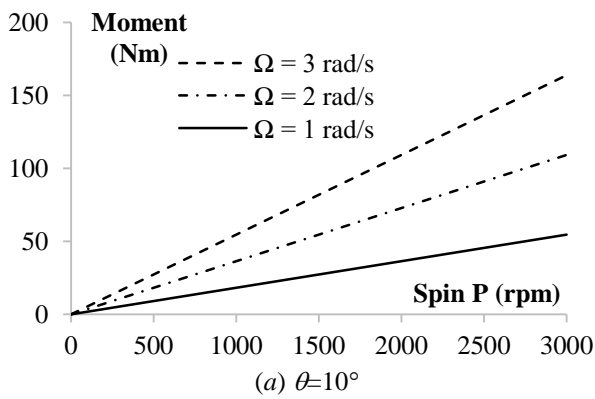


Figure 11. Gyroscopic moment versus spin for various gimbal rates

3.2 Relation between load, gyroscopic moment and tilt angle

In order to check and validate the results, data collected from finite element analyses are compared with those from literature. At the beginning, the frame is set its equilibrium position without any tilt angle and the bicycle is started moving. To check its balance, tilt angle is probed for different loading cases by adding point masses. In all cases the frame falls after a while. Stability is lost earlier than others in the case where the load is 1 kg. While the weight is getting increased, the tilt from equilibrium point decreases contrary to expectations as in Figure 12. Park and Yi (2020) [17] can achieve a stationary balance. Their experimental bicycle model has just 2.36 kg mass and 148 mm length and gimbal angles between -6° and 7° . They use a linear quadratic regulation (LQR) algorithm for the gimbal motor control. Their models include double CMG. Load, dimension, and control method are main actors on balance. So its balance control is done easier due to lesser load, smaller dimension, and a control strategy. He and Zao (2015) [2] use the model having 9.77 kg mass and 660 mm length and gimbal angles between -0° and 28.65° . They use state feedback control. Active balance cannot be achieved without a control method.

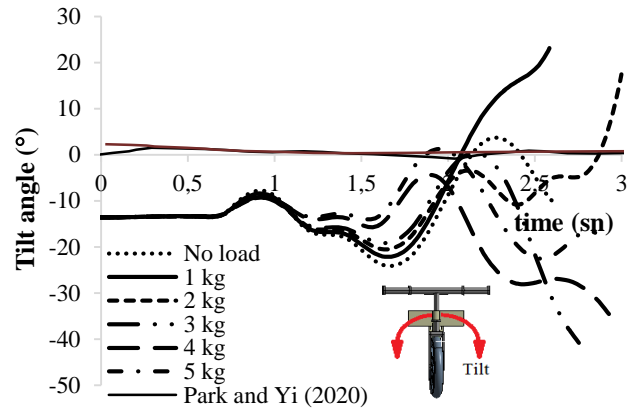


Figure 12. (a) Simulation results on tilt angle

Masses are located on both points equally. Figure 13 shows that the maximum gyroscopic moment requirement is getting increased as the additional load increases. In the case of 5 kg mass, the torque requirement is 30 Nm and used for the CMG design.

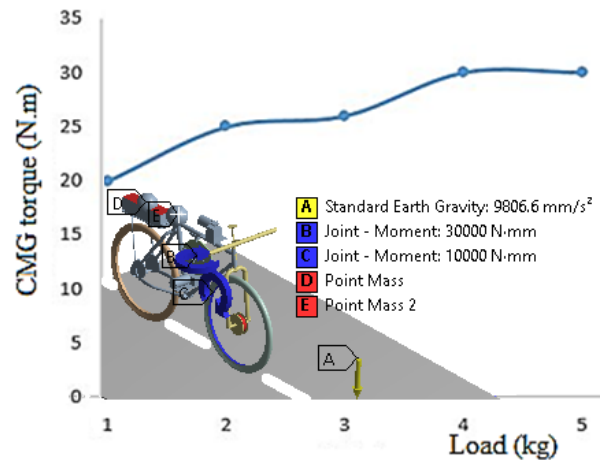


Figure 13. Maximum gyroscopic moment requirement for balancing with increased load

Rear and front wheels are separately driven and the effect of the drive torque on the gyroscope moment is also investigated. Whichever wheel is driven has no effect on the gyroscopic moment. Also driving torque doesn't have any effect on the gimbal torque as seen in Figure 14.

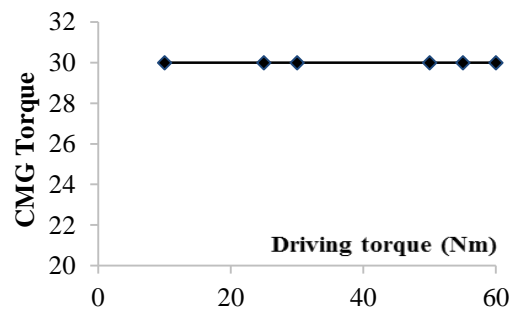


Figure 14. Effect of drive torque on gyroscopic torque

4 Conclusions

In this study, a CMG with a single-axis gimbal is designed for a self-balancing bicycle including support and rising up systems. Structural analyses based on finite element simulation are performed to get the system's responses. The main conclusions of the study are as follows:

- The gyroscopic moment increases with increasing flywheel spin and angular rate of gimbal.
- Additional load leads the gyroscopic moment requirement to increase.
- Which one from the front or rear wheel drives the bicycle is not effective on the gyroscopic moment.
- Driving torque doesn't have any effect on the gimbal torque.
- The type of wheel-road contact must be set as rough. Other contacts lead to slip, fly, turn, and bounce.
- A control strategy is compulsory to achieve an active self-balancing.

Within the scope of this study, a CMG to be used for self-balancing is calculated and analyzed. Implementation of this study having a control algorithm will be performed as a future work.

Acknowledgments

The authors appreciate the valuable comments from the reviewers.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no conflict of interests and competing interests regarding the publication of this paper.

Similarity index: 5%

References

- [1] H. Demirtaş, Robotik işleme yöntemi üzerine bir derleme. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(2), 1077-1089, 2020. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.600588>
- [2] J. He and Z. Mingguo, Control system design of self-balanced bicycles by control moment gyroscope. Lecture Notes in Electrical Engineering, 338, 205-214, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46466-3_21
- [3] P. Y. Lam, Design and development of a self-balancing bicycle using control moment gyro. Master Thesis, National University of Singapore, Singapore, 49, 2012.
- [4] A. V. Beznos, A. M. Formal'sky, E. V. Gurfinkel, D. N. Jicharev, A. V. Lensky, K. V. Savitsky, and L. S. Tchesalin. Control of autonomous motion of two-wheel bicycle with gyroscopic stabilisation. Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3, 2670-2675, Leuven, Belgium, 1998. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1998.680749>
- [5] M. Yamakita and A. Utano, Automatic control of bicycles with a balancer. 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 1245-1250, Monterey, CA, 2005. <https://doi.org/10.1109/AIM.2005.1511181>
- [6] Y. Tanaka and T. Murakami, Self-sustaining bicycle robot with steering controller. The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control AMC '04, pp. 193-197, Kawasaki, Japan, 2004. <https://doi.org/10.1109/amc.2004.1297665>
- [7] T. M. B. Website. Murata Boy. <https://corporate.murata.com/en-sg/about/mboymgirl/mboy> [Accessed: Sept 27, 2019]
- [8] B. V. Melkounian, New solutions for autonomous control and navigation. Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites IX, 59781Q, 21 October 2005. <https://doi.org/10.1117/12.614741>
- [9] L. Morine, T. O'Connor, J. Carnazza, H. Varner, and D. Poor, Control moment gyroscope gimbal actuator study. Endix Corp Teterboro NJ Eclipse-Pioneer Div, AD0801885, 1966. <https://doi.org/10.21236/ad080185>
- [10] L. Arena, F. Piergentili, and F. Santoni, Design, manufacturing, and ground testing of a control-moment gyro for agile microsattellites. Journal of Aerospace Engineering, 30(5), 2017. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)as.1943-5525.0000754](https://doi.org/10.1061/(asce)as.1943-5525.0000754)
- [11] C. Guo, Q. Hu, Y. Zhang, and J. Zhang, Integrated power and vibration control of gyroelastic body with variable-speed control moment gyros. Acta Astronautica, 169, 75-83, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.12.027>
- [12] S. Jia and J. Shan, Vibration control of gyroelastic spacecraft using input shaping and angular momentum devices. Acta Astronautica, 159, 397-409, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.03.062>
- [13] E. I. Druzhinin, Calculation of program control not generating singularities in gyrosystems. Journal of Computer and Systems Sciences International, 58(2), 260-269, 2019. <https://doi.org/10.1134/s1064230719020060>
- [14] G. Li, M. Lu, J. Y. Zhang, D. Y. Wu, and D. Z. Wei, Denoising of 1 000 Nms control momentum gyroscope. Guangxue Jingmi Gongcheng/Optics and Precision Engineering, 20, 117-124, 2012.
- [15] F. Liu, F. Gao, W. Zhang, B. Zhang, and J. He, The optimization design with minimum power for variable speed control moment gyroscopes with integrated power and attitude control. Aerospace Science and Technology, 88, 287-297, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.03.028>
- [16] D. Sawyer Elliott, M. Peck, and I. A. D. Nenas. Optimal solution for torque capability of control moment gyroscopes. 2019 IEEE Aerospace Conference Proceedings, 1-17, Big Sky, MT, USA 2019. <https://doi.org/10.1109/aero.2019.8742213>
- [17] S. H. Park and S. Y. Yi, Active balancing control for unmanned bicycle using scissored-pair control moment gyroscope. International Journal of Control, Automation and Systems, 18(1), 217-224, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12555-018-0749-7>

- [18] M. Alshahadat, M. Zohaib, I. Hussain, and A. U. Rahman, Autonomous single track vehicle. 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), 163-166, Ankara, Turkey, 2018. <https://doi.org/10.1109/ismsit.2018.8567283>
- [19] N. Tamaldin, H. Yusof, M. F. B. Abdollah, G. Omar, and M. Rosley, Design self-balancing bicycle. Proceedings of Mechanical Engineering Research Day 2017, pp. 160-161, Melaka, Malaysia, 30 March 2017.
- [20] J. L. Meriam and L. G. Kraige, Engineering Mechanics: Dynamics. Wiley, 2012.
- [21] S. Tamayo-León, S. Pulido-Guerrero, and H. Coral-Enriquez, Self-Stabilization of a riderless bicycle with a control moment gyroscope via model-based active disturbance rejection control. 2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC), 1-6, Cartagena, 2017. <https://doi.org/10.1109/CCAC.2017.8276434>
- [22] H. Yetkin, S. Kalouche, M. Vernier, G. Colvin, K. Redmill, and U. Ozguner, Gyroscopic stabilization of an unmanned bicycle. 2014 American Control Conference, 4549-4554, Portland, OR, 2014. <https://doi.org/10.1109/acc.2014.6859392>
- [23] Ansys, Theory Manual Version 9.0. ANSYS Inc.: Canonsburg, PA, USA., 2004.



Yüksek ısı akılı hareketli bir plakadan olan ısı transferine nanoakışkanların ve çarpan jetlerin müşterek etkisinin sayısal incelenmesi

Numerical investigation of combined effect of nanofluid and impinging jet on heat transfer from a high heat flux moving surface

Mustafa Kılıç^{1,*}, Murat Gökçek²

¹ Adana Alparlan Türkçe Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 01250, Adana Türkiye

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

Özet

Gelişen teknoloji endüstriyel cihazlar üzerindeki ısı yükler gün geçtikçe artmaktadır. Bu ısı yüklerin cihazlara vereceği tahribatı engellemek için ısı transferinin artırılması çözülmesi gereken önemli bir problem haline gelmiştir. Bu çalışmada; üzerinde yüksek ısı akısı olan hareketli bir plakadan olan ısı transferinin, nanoakışkanlar ve çarpan jet kullanılarak iyileştirilmesinin sayısal incelemesini hedeflemiştir. Farklı nanoakışkan giriş hızları için hesaplanan Reynolds sayılarının ($Re=8000, 16000, 24000, 32000$), farklı nanoakışkan hacim oranları ($\phi=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$), farklı nanoakışkan parçacık çaplarının ($D_p=10, 20, 30, 40$ nm) ve farklı plaka hızlarının ($V_{plaka}=0, 0.5, 1, 2$ m/s) ısı transferine etkisi sayısal olarak çalışılmıştır. Tüm parametreler için temel akışkan olarak $Al_2O_3-H_2O$ nanoakışkanı kullanılmıştır. Sayısal çalışmada PHOENICS hesaplamalı akışkanlar dinamiği programının $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Çalışma sonucunda; Reynolds sayısı $Re=8000-32000$ aralığında arttırıldığında Nu_{ort} değerinde %54.9 artış olduğu tespit edilmiştir. Nanoakışkan hacimsel oranı $\phi=0.5-2.0$ aralığında arttırıldığında ortalama Nusselt sayısında % 2.5'lik bir artış olduğu belirlenmiştir. Nanoakışkan parçacık çapı $D_p=40-10$ nm aralığında azaltıldığında ortalama Nusselt sayısında % 9.1'lik bir artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Farklı plaka hızlarında ise ortalama Nusselt sayısının genel olarak arttığı belirlenmiştir. Bu artışın; plaka hızı ve akışkan hızının ters yönde olduğu bölgede, aynı olduğu bölgeye göre daha belirgin bir şekilde ortaya çıktığı tespit edilmiştir. $V_{plaka}=0-2$ m/s aralığında Nu_{ort} değerindeki artışın %40,9 olarak meydana geldiği belirlenmiştir. Ayrıca sayısal model sonuçları, literatürdeki deneysel sonuçlarla da doğrulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Çarpan jet, Hareketli plaka, Isı transferi, Nanoakışkan.

1 Giriş

Gelişen teknoloji ile özellikle elektronik sistemler, havacılık-uzay çalışmaları ve sağlık alanında yapılan çalışmalar sonucunda; geliştirilen endüstriyel cihazlar üzerindeki ısı yükler gün geçtikçe artmaktadır. Bu ısı yüklerin cihazlara vereceği tahribatı engellemek maksadıyla ısı transferinin artırılması, çözülmesi gereken önemli bir problem haline gelmiştir. Bu durum yeni arayışlara yönelmeye sebep olmuştur. Bu sebeple, gelişen teknoloji ile birlikte nanoteknoloji üzerine yapılan çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmaların bir ürünü olarak ortaya çıkan nanoakışkanlar, 1-100 nm parçacık boyutlarından oluşan metallerin temel bir sıvı içerisine belli şartlar altında karıştırılmasıyla oluşturulur. Oluşan bu yeni karışımın ısı iletim katsayısı geleneksel ısı transferi akışkanlarına göre oldukça yüksektir. Su, glikol, yağ gibi geleneksel ısı transferi

Abstract

Besides technological developments heat loads on industrial systems are also increasing. So increasing rate of heat transfer to prevent demolition of the systems by high heat flux is a significant problem to solve. In this study, enhancement of heat transfer from a moving high heat flux surface with nanofluids and impinging jets was studied numerically. Effects of different Reynolds number for different fluid velocities ($Re=8000, 16000, 24000, 32000$), different volume ratio of nanofluids ($\phi=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$), different particle diameter of nanofluids ($D_p=10, 20, 30, 40$ nm) and different plate velocities ($V_{plate}=0, 0.5, 1, 2$ m/s) on heat transfer were investigated. $Al_2O_3-H_2O$ is used as a base fluid for all parameter. $k-\epsilon$ turbulence model of PHOENICS CFD program was used for numerical analysis. As a result; increasing Re number from $Re=8000$ to $Re=32000$ causes an increase of 54.9% on Nu_{avg} , increasing nanofluid volume ratio from $\phi=0.5$ to $\phi=2.0$ causes an increase of 2.5% on Nu_{avg} , decreasing nanofluid particle diameter from $D_p=40$ nm to $D_p=10$ nm causes an increase of 9.1% on Nu_{avg} . It was also determined that increasing plate velocity causes an increase on Nu_{avg} . This increase can be assigned at the region of fluid velocity and plate velocities were at the same direction according to the opposite direction. Increasing plate velocity from $V_{plate}=0$ m/s to $V_{plate}=2$ m/s causes and increase of 40.9% on Nu_{avg} . Additionally, numerical results were also verified with some experimental results in literature.

Keywords: Impinging jet, Moving plate, Heat transfer, Nanofluid.

akışkanlarını küçük boyutlu uygulamalarda kullanmak güçtür. Bu sebeple nanoakışkanlar son dönemde geleneksel ısı transferi akışkanlarının yerine kullanılmaya başlanmıştır. Isı transferini arttırmak için kullanılan bir başka yöntem ise çarpan jetlerdir.

Literatürde nanoakışkan ve çarpan jetlerle ilgili ayrı ayrı çalışmalar mevcut olmasına rağmen, iki etkinin birlikte kullanıldığı çok az çalışma mevcuttur. Çarpan jetlerle ilgili çalışmalar incelendiğinde; sınırlandırılmış akışkan jetlerde ısı transferini incelendiği deneysel çalışmada; Reynolds sayısının ve jet-hedef plaka mesafesinin etkilerini gözlemlenmiştir. Jet-hedef plaka mesafesindeki değişimin ısı transferine etkisinin çok önemli olmadığı, ancak Reynolds sayısındaki artışın ısı transferini artırdığı tespit edilmiştir [1]. Çoklu jetlerin uygulandığı çalışmalarda silindir bir yüzeye farklı geometrilerdeki yarıklardan

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta/e-mail: mkilic@atu.edu.tr (M. Kılıç)

Geliş / Recieved: 06.06.2020 Kabul / Accepted: 02.10.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.748791

gönderilen jet akışını deneysel olarak incelemiştir. İki farklı jet/silindir konfigürasyonu denenmiştir. Birinci uygulamada; yarık uzunluğu silindir uzunluğuna eşit olacak şekilde jet akışı uygulanmıştır. İkinci uygulamada; yarık uzunluğu silindir çapına eşit olacak şekilde üç ayrı yarıktan silindire jet akışı uygulanmıştır. Sonuç olarak silindirin çoklu yarıklarla soğutulması tek bir yarıkla soğutulmasından daha etkin soğutma sağlamıştır [2]. Jet Reynolds sayılarının, jet akışlarının duvar üzerindeki konumunun, jetlerin birbirine olan mesafesinin ısı transferine olan etkisi incelenmiştir. Akışkan olarak $Pr=0.71$ olan hava kullanılmıştır. Kanal içinde iki jetin birbirine olan etkisi sonucunda çarpma bölgesinde çok katmanlı bir akış meydana gelmiştir. Ortalama Nusselt sayısı Reynolds sayısının artışı ile doğrusal olarak artmıştır. İlk jetin Reynolds sayısı ikinci jetten daha fazla olduğunda ısı transferinin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak; iki jet birbirine yaklaştıkça ikinci jetin etkisinin azaldığı tek bir jet gibi davranıldığı gözlemlenmiştir [3]. Farklı Reynolds sayılarının ve boyutsuz kanal yüksekliklerinin incelendiği çalışmalarda; Nusselt sayısının $Re = 4000-10000$ aralığında %49.5, $H/Dh = 4-10$ aralığında ise, %17.9 oranında arttığı tespit edilmiştir [4]. Farklı nozul geometrilerinin ısı transferine etkisinin incelendiği çalışmalarda; farklı geometrilerdeki nozulun düz çıkışlı nozula göre ısı transferinde artışa sebep olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda şekil verdirilmiş nozuldan çıkan uniform akışın türbülanslı akışa sebep olan akış bozulmalarını geciktirdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak; yüzeydeki ısı transferinin artırılmasında yüzeye gelen akış geometrisinin önemli olduğu belirlenmiştir [5]. Jet akışına kanatçıkların etkisinin incelendiği çalışmalarda; girdap oluşum bölgesinin, yerel Nusselt sayısının, türbülans kinetik enerjisinin, jet ve kanatçık genişliğinden, jetler arası mesafeden, kanatçık kalınlığından ve jet Reynolds sayısından büyük ölçüde etkilendiği gözlemlenmiştir. Kanatçıkların yerlerinin jetlere göre değişiminin ısı transferini önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir [6]. Farklı jet kombinasyonlarının, farklı akış özelliklerinde incelendiği deneysel çalışmalarda ise; jet geometrisi yanında jet konumlarının da yüzeyden olan ısı transferini önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir [7, 8].

Nanoakışkan kullanılarak ısı transferinin incelendiği çalışmalarda; CuO-Su nanoakışkanı kullanarak farklı hacimsel oranlarda ısı transferini incelemişlerdir. Sonuç olarak hacim oranı arttıkça ve Reynolds sayısı arttıkça ısı transfer katsayısının da arttığı tespit edilmiştir [9]. Nanoakışkan kullanıldığında yalnızca su kullanılması durumuna göre ısı transferinde önemli bir artış sağlanabildiği, basınç düşüşünde önemli bir değişim olmadığı belirlenmiştir [10].

Al_2O_3 -Su nanoakışkanı kullanıldığı durumda, sınırlandırılmış akışkan jetlerin ısı transferine etkisini incelemiştir. Reynolds sayısı ve akışkan içerisindeki parçacık yoğunluğu arttıkça yerel ısı transfer katsayısının ve Nusselt sayısını arttırdığı, ortalama ısı transfer katsayısındaki en yüksek artışın (%36) $H/W=10$ ve nanoakışkan farklı Reynolds sayılarında ($Re=3000-32000$) ve nanoakışkanları farklı hacimsel oranlarında ($\phi=0-10$) incelenmiştir. Akışkan içindeki nanoparçacıkları arttırdıkça, saf su

kullanıldığı duruma ısı transfer katsayısında %62 oranında bir artış sağlanabildiği, akışkan olarak CuO-Su kullanıldığı durumda ısı transferinde Al_2O_3 nanoakışkanı kullanılması durumuna göre %8.9 ve TiO_2 -Su nanoakışkanı kullanılması durumuna göre %12 oranında bir artış sağlanabildiği görülmüştür [12]. Kapalı devre titreşimli ısı borusunun ısı performansının incelendiği çalışmada ise; sistem ısı direncinin azaldığını belirlenmiştir [13].

Cu-Su nanoakışkanı kullanıldığı durumda; nanoakışkanların ve çoklu jetlerin ısı transferine ve akış özelliklerine etkisi incelemişlerdir. Sonuç olarak; nanoakışkan hacim oranının $\phi=2-4$ aralığında artırıldığında ortalama Nu sayısının %10.4 arttığı, en iyi performansın Cu-Su nanoakışkan ile elde edildiği ve çoklu jetlerin konumlarının ısı transferinde önemli bir belirleyici olduğunu tespit etmişlerdir [14]. Farklı Re sayılarının, parçacık çaplarının ve nanoakışkanların ısı transferine etkisinin incelendiği çalışmada; $Re= 12000-18000$ aralığında artırıldığında Nuort değerinin %28 arttığı, hacimsel oran; $\phi=2$ den $\phi=8$ 'e çıkarıldığında ortalama Nusselt sayısında %7.1 oranında bir artış olduğu ve Cu-Su nanoakışkanı kullanılması durumunda; geleneksel bir ısı transferi akışkanı olan saf suya göre ortalama Nusselt sayısında %8.3 oranında bir artış sağlandığı tespit edilmiştir [15].

Gümüş nanoparçacık ve su kullanılması durumunda; 10 nm nanoparçacıklar kullandığında saf su kullanımına göre ısı direncin %50 azaldığı ve parçacık çapı 35 nm olduğunda ısı direnci % 80 oranında azalma olduğu belirlenmişlerdir [16].

Nanoakışkanların pulsatif akışta ısı transferine etkilerinin incelendiği çalışmada; nanoakışkanların pulsatif akışı durumunda pulsatif parametrelerin artması ile sürtünme faktöründe artış ve ısı transferinde iyileşme olduğu belirlenmiştir [17-19].

Literatürdeki mevcut çalışmaların çoğunda nanoakışkanların termal özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar ile çarpan jetlerin sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış uygulamaları bulunmaktadır. Ancak nanoakışkan ve çarpan jetlerin ısı transferine etkisi ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu çalışma; literatürden farklı olarak yüksek ısı akılı, hareketli bir plakadan olan ısı transferinin, nanoakışkanlar ve çarpan jetler kullanılarak iyileştirilmesinin müşterek etkisinin sayısal incelemesini hedeflemiştir. Farklı parametrelerin ısı transferine etkisi sayısal olarak incelenmiş ve sayısal modelin deneysel sonuçlarla doğrulanması sağlanmıştır.

2 Materyal ve metod

Bu çalışmada; yüksek ısı akılı hareketli bir plakadan nanoakışkanlar ve çarpan jet kullanılarak soğutulması sayısal olarak, dört farklı parametre için (farklı Re sayılarında, farklı nanoakışkan hacim oranı, farklı nanoakışkan parçacık çapı ve farklı plaka hızlarında) incelenmiştir.

2.1. Matematiksel tanımlar

Yüzeyden olan ısı transferi iletim, taşınım ve ışınım ile gerçekleşecektir.

$$Q_{tasnm} = Q_{toplamlam} - Q_{iletim} - Q_{ısınım} \quad (1)$$

Yüzeyden konveksiyonla olan ısı transferi;

$$Q_{tasnm} = h.A.\Delta T \quad (2)$$

Burada h ısı taşınım katsayısı, A taşınım yüzey alanı, ΔT ($\Delta T = T_w - T_{ygn}$) ölçülen yüzey sıcaklığı ile akışkan ortalama sıcaklığı arasındaki farktır. Nusselt sayısı (Nu); taşınım ile olan ısı transferinin iletimle olan ısı transferine oranını gösteren boyutsuz parametredir. Dolayısı ile Nusselt sayısı akışkan tabakalarındaki ısı transferindeki iyileşmeyi gösterir. Nusselt sayısı;

$$Nu = \frac{(Q_{tasnm} \cdot D_h)}{(T_{yücey} - T_{ygin}) \cdot k_{nf}} \quad (3)$$

Burada T_s ölçülen yüzey sıcaklığı, D_h hidrolik çap ve k_{nf} ise nanoakışkan ısı iletkenlik katsayısıdır. Reynolds sayısı ise;

$$Re = \frac{(\rho_{nf} \cdot V_{jet} \cdot D_h)}{(\mu_{nf})} \quad (4)$$

Burada ρ_{nf} nanoakışkan yoğunluğu, V_{jet} jet çıkış hızı ve μ_{nf} nanoakışkan dinamik viskozitesidir. Nanoakışkan yoğunluğu ise;

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi) \cdot \rho_{bf} + \varphi \cdot \rho_p \quad (5)$$

Burada ρ_{bf} temel akışkan (su) yoğunluğu, φ nanoakışkan hacimsel oranı, ρ_p ise nanoakışkan içerisindeki katı parçacıkların yoğunluğudur. Nanoakışkan hacimsel oranı ise;

$$\varphi = \frac{1}{(1/\omega) \cdot (\rho_p - \rho_{bf})} \quad (6)$$

Burada ω nanoakışkan ile temel akışkanın (su) yoğunlukları arasındaki farktır. Nanoakışkan özgül ısısı ise;

$$C_{p_{nf}} = \frac{\varphi \cdot (\rho \cdot C_p)_p + (1 - \varphi) \cdot (\rho \cdot C_p)_f}{(\rho_{nf})} \quad (7)$$

Burada $C_{p(p)}$ parçacığın özgül ısısı, $C_{p(f)}$ temel akışkanın özgül ısısıdır. Nanoakışkanın ısı iletim katsayısı ise [20] ;

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + 4.4 Re_{(p)}^{0.4} Pr^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}} \right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^{0.03} \varphi^{0.66} \quad (8)$$

Burada $Re_{(p)}$ nanoparçacık Reynolds sayısı, Pr temel akışkanın Prandtl sayısı. k_p nanoparçacıkların ısı iletim katsayısı, φ parçacık hacimsel oranı, T nanoakışkanın sıcaklığı (K), T_{fr} temel akışkanın donma noktasıdır.

Nanoparçacık Reynolds sayısı ise;

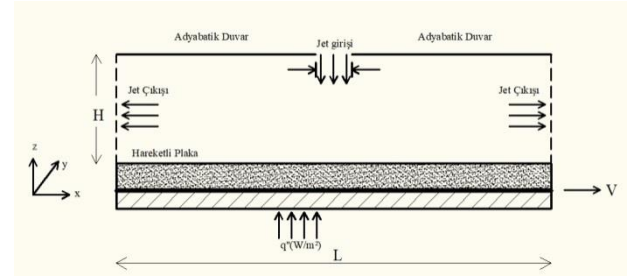
$$Re = \frac{2 \rho_f k_b \tau}{\pi \mu_f^2 d_p} \quad (9)$$

K_b Boltzmann sabitidir. Nanoakışkanın dinamik viskozitesi ise şu şekilde formüle edilmiştir;

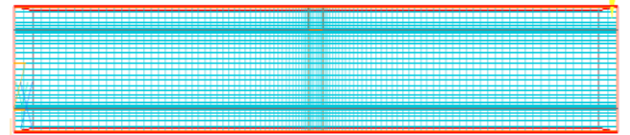
$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + 2,5 \varphi + 4,698 \varphi^2) \quad (10)$$

2.2. Sayısal Model

Bu çalışmada sayısal analiz için PHONEICS HAD programının standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Bu model; sınırlandırılmış çarpan jet uygulamalarında, hareketli duvar etkilerini daha iyi bir şekilde ortaya koyabilmesi ve uygulanan Reynolds değeri deney sonuçları ile uyumlu sonuçlar elde edilebilmesi sebebiyle tercih edilmiştir. Analizde kullanılan HAD modeli ve hücre yapısı Şekil 1 ve Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 1. HAD modeli



Şekil 2. Hücre yapısı

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (11)$$

Momentum denklemi:

$$\rho U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho u'_i u'_j \right] \quad (12)$$

Enerji denklemi:

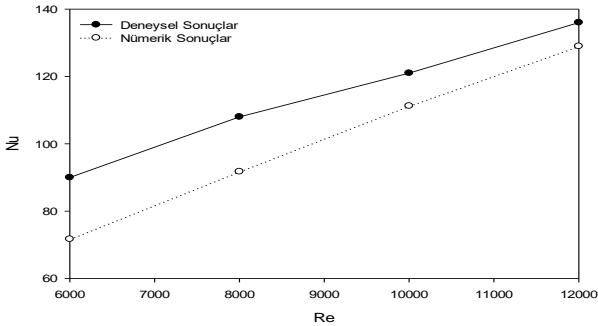
$$\rho c_p U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho c_p u'_i T' \right] \quad (13)$$

Bu çalışmada kullanılan sınır şartları Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Sınır Şartları

	U(m/s)	V(m/s)	W(m/s)	T (K)	k	ε
Jet	U=0	V=0	W= W _{giriş}	T=T _{giriş}	$(T_1 W_{jet})^2$	$(C_\mu C_d)^{3/4} k^{3/2} / L$
Plaka	U=U _{plaka}	V=0	W=0	$q''=q''_{yüze}$ y	k=0	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0$
Çıkış	$\frac{\partial U}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial V}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial W}{\partial x} = 0$	T=T _{çıkış}	$\frac{\partial k}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$
Ön Duvar	U=0	V=0	W=0	$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$	-	-
Üst Duvar	U=0	V=0	W=0	$\frac{\partial U}{\partial z} = 0$	-	-

Bu çalışmada 110x40x32 hücre sayısı kullanılmıştır. Hücre yapısı akış şartlarına göre ayarlanmış olup daha hassas bir sonuç alabilmek için jet girişleri ve bakır plakanın yüzeyinde hücreler yoğunlaştırılmıştır. İterasyon sayısı 1000 ve 5000 arasında, hücre sayısı 25 ve 34 aralığında çalışılmıştır. Buna göre hücre sayısı 110x40x32 ve iterasyon sayısı 3000 olduğunda sonuçların hücre sayısından ve iterasyon sayısından bağımsız olduğu görülmüştür. Sayısal model, literatürdeki deney sonuçlarına göre doğrulanmıştır [21]. Şekil 3'te görüldüğü üzere sayısal model ve deneysel sonuçlar arasındaki fark Re=12000 için %5'in altındadır. Mevcut uygulamada Re=16000 olarak çalışılmıştır.



Şekil 3. Sayısal Modelin Kıyaslanması

3 Bulgular ve tartışma

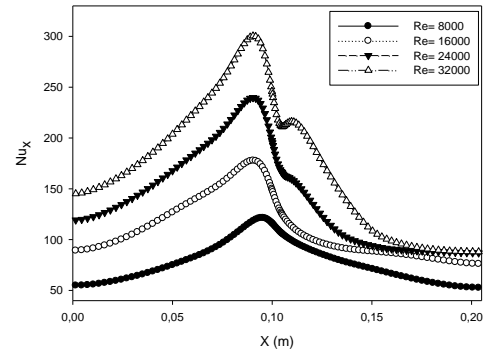
3.1. Farklı Reynolds sayılarının ısı transferine etkisi

Reynolds sayısı arttıkça (hidrodinamik sınır tabakanın artması ve ısıl sınır tabakanın azalmasına bağlı olarak) ortalama Nusselt Sayısının arttığı ve yüzey sıcaklığının düştüğü belirlenmiştir. Ancak Reynolds sayısındaki bu artış miktarının yüksek Reynolds sayılarında azalarak arttığı tespit edilmiştir. Duvar jeti bölgesinin etkisinin plaka hareketi yönünde göreceli hız azalmasına bağlı olarak azaldığı ve bu bölgede yerel Nusselt sayısının azaldığı ve aksi yönde, plaka hızına aksi yönde akan akışkanın hidrodinamik sınır tabaka artışına bağlı olarak, ısıl sınır tabakanın azaldığı ve yerel Nusselt sayısının azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 4'te farklı Reynolds sayılarında yerel Nusselt sayılarının değişimi verilmiştir. Bu sonuçlara göre; Re=8000-16000 aralığında arttırıldığında Nu_{ort} değerinde %38.3 artış olduğu, Re=16000-24000 aralığında

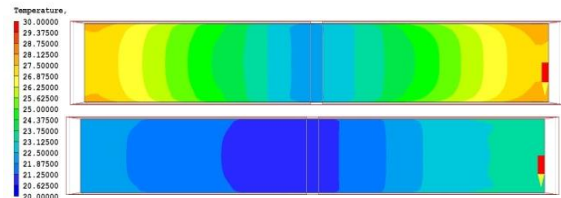
arttırıldığında Nu_{ort} değerinde %28,9 artış olduğu, Re=24000-32000 aralığında arttırıldığında Nu_{ort} değerinde %24,3 artış olduğu, Re=8000-32000 aralığında arttırıldığında Nu_{ort} değerinde %54.9 artış olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5'te plaka yüzeyinde oluşan sıcaklık konturları Re=8000 ve Re=32000 değerleri için gösterilmiştir.

3.2. Farklı nanoakışkan hacim oranlarının ısı transferine etkisi

Nanoakışkan hacimsel oran arttıkça plakadan olan ısı transferinin arttığı, ancak bu artışın azalarak devam ettiği tespit edilmiştir. Şekil 6'te farklı hacim oranları için yerel Nusselt sayılarının değişimi, Şekil 7'te ortalama Nusselt sayısının değişimi verilmiştir. Jet giriş sıcaklığı T_{giriş}= 20 °C, Re= 16000 ve plaka hızı= 2 m/s olduğu şartlarda; hacimsel

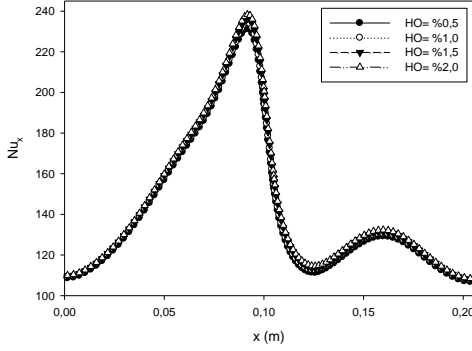


Şekil 4. Farklı Reynolds sayılarında yerel Nusselt sayıları

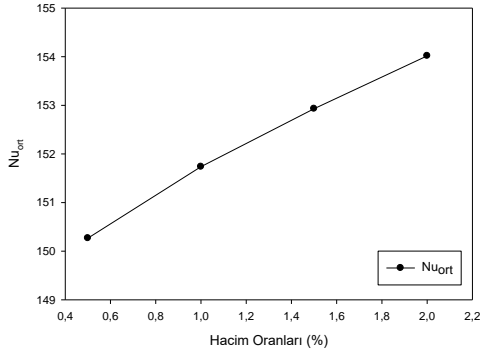


Şekil 5. Plaka Sıcaklık konturları (a) Re= 8000 (b) Re=32000

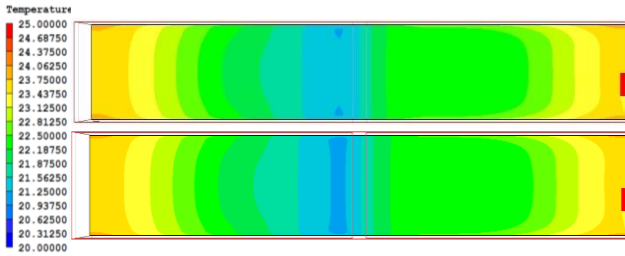
oran $\phi=0,5-1,0$ aralığında arttırıldığında ortalama Nusselt sayısında %0,98, $\phi=1,0-1,5$ aralığında arttırıldığında ortalama Nusselt sayısında %0,79, $\phi=1,5-2,0$ aralığında arttırıldığında ortalama Nusselt sayısında % 0,71 oranında artış olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak; hacimsel oran dört kat arttırıldığında ($\phi=0,5-2,0$ aralığında arttırıldığında) ortalama Nusselt sayısında %2,5'lik bir artış olduğu belirlenmiştir. Nanoakışkan hacim oranının arttırılması özellikle çarpma bölgesinde belirgin bir sıcaklık azalmasına ve duvar jeti bölgesinin daha belirgin bir şekilde oluşmasını ve jet etkisinin daha fazla bir bölgede görülebilmesini sağlamıştır. Şekil 8'de plaka yüzeyinde oluşan sıcaklık konturları $\phi=0,5$ ve $\phi=2,0$ değerleri için gösterilmiştir.



Şekil 6. Farklı hacim oranlarında yerel Nusselt sayıları



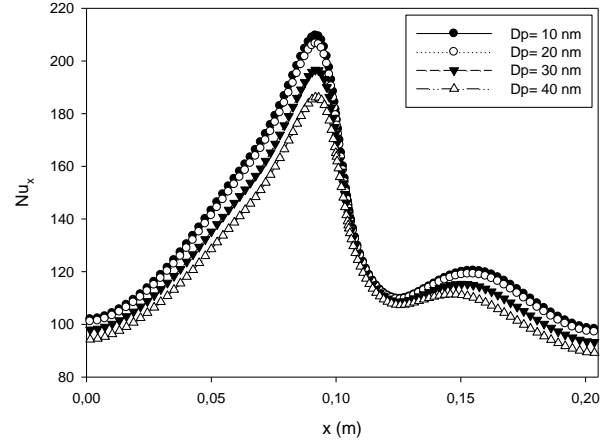
Şekil 7. Farklı hacim oranlarında Ortalama Nusselt sayıları



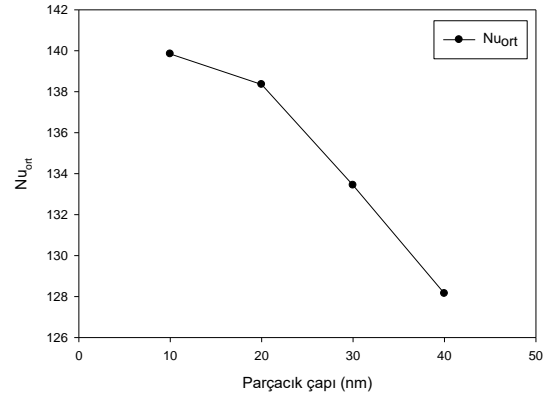
Şekil 8. Plaka Sıcaklık konturları (a) $\phi=0.5$ (b) $\phi=2.0$

3.3. Farklı nanoakışkan parçacık çaplarının ısı transferine etkisi

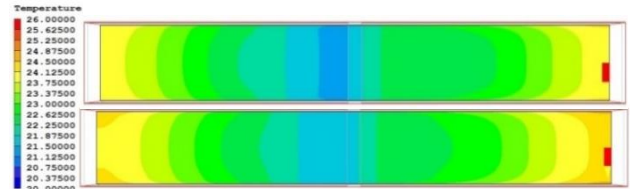
Jet giriş sıcaklığı $T_{giriş} = 20$ °C, $Re = 16000$ ve plaka hızı $V_{plaka} = 2$ m/s olduğu durumda, nanoakışkan parçacık çapı azaldıkça (katı parçacık yüzey alanının artmasına bağlı olarak) ortalama Nusselt Sayısının arttığı ve yüzey sıcaklığının düştüğü belirlenmiştir. Şekil 9'te farklı hacim oranları için yerel Nusselt sayılarının değişimi, Şekil 10'te ortalama Nusselt sayısının değişimi verilmiştir. Ancak ortalama Nusselt sayısındaki bu artışın, azalan parçacık çapları için azalarak devam ettiği tespit edilmiştir. Parçacık çapı $D_p = 40-30$ nm aralığında azaltıldığında ortalama Nusselt sayısında %4.1'lik bir artış olduğu, $D_p = 30-20$ nm aralığında azaltıldığında ortalama Nusselt sayısında %3.7'lik bir artış olduğu, $D_p = 20-10$ nm aralığında azaltıldığında ortalama Nusselt sayısında %1.1'lik bir artış olduğu tespit edilmiştir. En yüksek ısı transferi artışı, $D_p = 40-10$ nm aralığında azaltıldığında ortalama Nusselt sayısında %9.1'lik bir artış olarak meydana gelmiştir. Şekil 11'de plaka yüzeyinde



Şekil 9. Farklı parçacık çaplarının yerel Nusselt sayısına etkisi



Şekil 10. Farklı parçacık çaplarının ortalama Nusselt sayısına etkisi



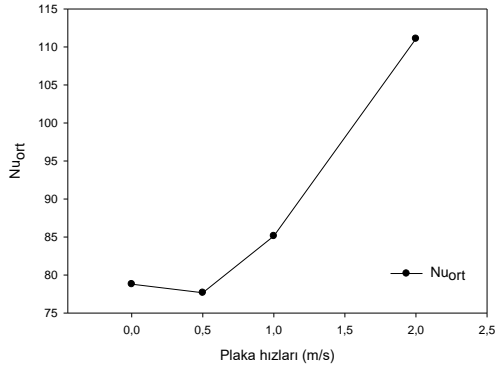
Şekil 11. Plaka Sıcaklık konturları (a) $D_p=10$ (b) $D_p=40$

oluşan sıcaklık konturları $D_p=10$ ve $D_p=40$ değerleri için gösterilmiştir.

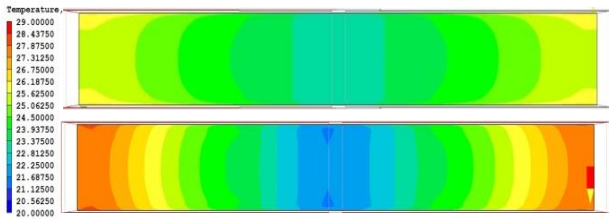
3.4. Farklı plaka hızlarının ısı transferine etkisi

Jet giriş sıcaklığı $T_{giriş} = 20$ °C, $Re = 16000$ ve soğutucu akışkan olarak %2 hacimsel orandaki Al_2O_3-Su nanoakışkanı kullanıldığı durumda, Ortalama Nusselt sayısının plaka hızı arttıkça genel olarak arttığı tespit edilmiştir. Şekil 12'da farklı plaka hızlarının ortalama Nusselt sayısına etkisi verilmiştir. $V_{plaka}=0-0.5$ m/s aralığında plaka hareketinin aksi yönde oluşan duvar jeti bölgesinde hız azalmasına bağlı olarak Nu_{ort} değerinin %1.4 azaldığı, $V_{plaka}=0.5-1$ m/s aralığında plaka hareketinin akış hızını iyileştirici yönde bir etkisinin olduğu ve Nu_{ort} değerinde %9.6 oranında bir artışa sebep olduğu, bu artışın $V_{plaka}=1-2$ m/s aralığında %30.5'e ulaştığı ve $V_{plaka}=0-2$ m/s

aralığında Nu_{ort} değerindeki artışın % 40.9 olarak meydana geldiği tespit edilmiştir. Plaka hızı arttıkça çarpma bölgesinde oluşan türbülans yoğunluğuna bağlı olarak yerel sıcaklık değerlerinde bir azalma olduğu, ancak duvar jeti bölgesinde özellikle plaka hızına ters yöndeki akışta bağlı akışkan hızı azalmasına bağlı olarak plaka sıcaklık değerlerinde bir artış olduğu belirlenmiştir. Şekil 13’de farklı plaka hızları için çarpma plakası üzerinde oluşan sıcaklık konturları görülmektedir.



Şekil 12. Farklı plaka hızlarının ısı transferine etkisi



Şekil 13. Plaka Sıcaklık konturları (a) $V_{plaka}=0$ m/s (b) $V_{plaka}=2$ m/s

4 Sonuçlar

Bu çalışmada; yüksek ısı akıllı hareketli bir plakanın nanoakışkanlar ve çarpan jet kullanılarak soğutulması sayısal olarak, dört farklı parametre için incelenmiştir. Sonuç olarak;

a. $Al_2O_3-H_2O$ nanoakışkanı için; nanoakışkan hızına bağlı Reynolds sayısı arttıkça Nu_{ort} değerinde de artış olduğu tespit edilmiştir. Ancak bu artışın Re sayısı arttıkça azalarak devam ettiği tespit edilmiştir. Re sayısı 8000-32000 aralığında arttırıldığında Nu_{ort} değerinde %54.9’luk bir artış olduğu belirlenmiştir.

b. Nanoakışkan hacimsel oranı arttıkça (akışkan içerisindeki parçacık sayısının artışına bağlı olarak) ortalama Nusselt Sayısının arttığı ve yüzey sıcaklığının düştüğü belirlenmiştir. Ancak ortalama Nusselt sayısındaki bu artışın, artan hacimsel oranlar için azalarak devam ettiği tespit edilmiştir. Hacimsel oran $\phi=0.5-2.0$ aralığında arttırıldığında ortalama Nusselt sayısında %2.5’lik bir artış olduğu belirlenmiştir.

c. Nanoakışkan parçacık çapı azaldıkça (katı parçacık yüzey alanının artışına bağlı olarak) ortalama Nusselt Sayısının arttığı ve yüzey sıcaklığının düştüğü belirlenmiştir. Ancak ortalama Nusselt sayısındaki bu artışın, azalan parçacık çapları için azalarak devam ettiği tespit edilmiştir.

Parçacık çapı $D_p= 40-10$ nm aralığında azaltıldığında ortalama Nusselt sayısında %9.1’lik bir artış olduğu belirlenmiştir.

ç. Plaka hızı arttıkça genel olarak yerel Nusselt sayısında plaka ile aynı yönde akışın olduğu bölgede yerel Nusselt sayısında azalma ve aksi yönde artış olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebinin akışın ters yöne olduğu bölgede hidrodinamik sınır tabakanın azalmasını ve ısıl sınır tabakanın artmasını olduğu söylenebilir. Bu sebeple; genel olarak plaka hızı arttıkça ısı transferinde artışın artarak devam ettiği belirlenmiştir. $V_{plaka}= 0-2$ m/s aralığında Nu_{ort} değerindeki artışın %40.9 olarak meydana geldiği tespit edilmiştir.

d. Müteakip çalışmalarda; farklı tipte nanoakışkanların (ferromanyetik, hibrit vb.), farklı geometrilere (gözenekli yapılarda vb.), farklı soğutma teknikleri ile, farklı ısıl özellikleri için incelenerek, ısı transferine etkisinin belirlenmesinin faydalı olacağı değerlendirilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi’nin 18103006 no’lu Bilimsel Araştırma Projesi ile desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %19

Kaynaklar

- [1] Z.H. Lin, Y.J. Chou, and Y. H. Hung, Heat transfer behaviours of a confined slot jet impingement, International Journal of Heat and Mass Transfer, 49, 2760-80, 1996. [https://doi.org/10.1016/00179310\(96\)00135-4](https://doi.org/10.1016/00179310(96)00135-4)
- [2] S.A. Nada, Slot/Slots air jet impinging cooling of a cylinder for different jets-cylinder configuration, Department of Mechanical Engineering Technology BenhaUniversity, 2006. <https://doi.org/10.1007/s0023100601003>
- [3] I. Dagtekin, H. Oztop, Heat transfer due to double laminar slot jets impingement onto an isothermal wall one side closed long duct, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, 35, 5, 75, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.05.013>
- [4] M. Kilic, T. Çalışır and Ş. Başkaya, Experimental and numerical study of heat transfer from a heated flat plate in a rectangular channel with an impinging jet, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 48, 1-16, 2016.
- [5] A. McGuinn, T. Persoons, T. O’donovan and D. Murray, Surface heat transfer from an impinging synthetic air jet, International Journal of Heat and Mass Transfer, 20, 1333-38, 2007.
- [6] S. Khudheyer, F. Oztop and I. Yılmaz, Analysis of turbulent flow and heat transfer over a double forward facing step with obstacles, Heat and Mass Transfer, 39, 1395-1403, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.07.011>

- [7] T. Demircan, Numerical analysis of cooling an electronic circuit component with cross flow and jet combination, *Journal of Mechanics*, 35, 3, 395-404, 2019. <https://doi.org/10.1017/jmech.2018.11>
- [8] T. Demircan, H. Türkoğlu, The Numerical Analysis of Oscillating Rectangular Impinging Jets, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 58, 146-161, 2010. <https://doi.org/10.1080/10407782.2010.496669>
- [9] A. Umer, S. Naveed and N. Ramzan, Experimental study of laminar forced convection heat transfer of deionized water based copper (I) oxide nanofluids in tube with constant wall heat flux, *Heat Mass Transfer*, 52, 2015-25, 2015.
- [10] B. Sun, Y. Qu and D. Yang, Heat transfer of single impinging jet with cu nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, 102, 701-7, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.166>
- [11] O. Manca, D. Ricci, S. Nardini and Lorenzo G., Thermal and fluid dynamics behaviours of confined laminar impinging slot jets with nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 70, 15-26, 2016.
- [12] M.A. Teamah, M.M. Dawood and A. Shehata, Numerical and experimental investigation of flow structure and behavior of nanofluids flow impingement on horizontal flat plate, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 74, 235-246, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.12.012>
- [13] J. Qu, H.Y. Wu and P. Cheng, Thermal performance of an oscillating heat pipe with Al₂O₃-water nanofluids, *International Communication Heat and Mass Transfer*, 37, 111-15, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.10.001>
- [14] M. Kilic, H.M. Ali, Numerical investigation of combined effect of nanofluids and multiple impinging jets on heat transfer, *Thermal Science*, 23, 3165-73, 2019. <https://doi.org/10.2298/TSCII171204094K>
- [15] M. Kilic, O. Ozcan, Farklı parametreler için nanoakışkanlar ve çarpan jetlerin müşterek etkisinin sayısal incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34, 1501-16, 2019.
- [16] S. W. Kang, W. C. Wei, S. H. Tsia and S. H. Yang, Experimental investigation of silver nanofluid on heat pipe thermal performance, *Applied Thermal Engineering*, 26, 2377-82, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.020>
- [17] S. Akcay, U. Akdag, Parametric investigation of effect on heat transfer of pulsating flow of nanofluids in a tube using circular rings, *Pamukkale University, Journal of Engineering Sciences*, 24(4), 597-604, 2018.
- [18] U. Akdag, S. Akcay and D. Demirel, Heat transfer enhancement with nanofluids under laminar pulsating flow in a trapezoidal-corrugated channel, *Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal*, 17, 302-12, 2017. <https://doi.org/10.1504/PCFD.2017.086322>
- [19] U. Akdag, M.A. Komur and S. Akcay, Prediction of heat transfer on a flat plate subjected to a transversely pulsating jet using artificial neural networks, *Applied Thermal Engineering*, 100, 412-20, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.147>
- [20] M. Corcione, Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids, *Energy Conversion and Management*, 52, 789-793, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.072>
- [21] Q. Li, Y. Xuan and F. Yu, Experimental investigation of submerged single jet impingement using cu-water nanofluid, *Applied Thermal Engineering*, 36, 426-33, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.10.059>





Experimental study for artificial neural network (ANN) based prediction of electric energy production of diesel engine based cogeneration power plant

Dizel motorlu kojenerasyon santralının elektrik enerjisi üretiminin yapay sinir ağı (YSA) ile tahmini üzerine deneysel çalışma

Andaç Batur Çolak^{1,*} 

³ Niğde Ömer Halisdemir University, Mechanical Engineering Department, 51240, Niğde, Turkey

Abstract

In this study artificial neural network (ANN) has been developed in order to estimate the electricity production of cogeneration power plant, which produces a total of 11.52 MW electric power, consisting of two V type and 12 cylinders each of which is 5.760 kW diesel engines running with heavy fuel oil no 6. In the ANN which was developed for the estimation of electric power generation of cogeneration, power plant(W), Time period (t), working hours (h), fuel consumption (m) and internal power consumption (Wp) values were used as input variables. After evaluating the performance of different ANNs, an ANN, consisting of one hidden layer and 10 neurons, was considered to be the most ideal one. As a result of the comparison with experimental data, it is concluded that this model estimates the electricity generation values of the cogeneration power plant with an R-value of 0,99073 and mean square error 4.734e-8

Keywords: Cogeneration, Diesel engine, Power plant, Electricity consumption, Artificial Neural Network

1 Introduction

With the increase in population, the developing industrial industry has brought more energy needs. The studies of the International Energy Agency (IEA) show that world electricity demand in 2040 will increase by 80% compared to 2012 [1]. The types of electric power plants are vital in meeting the increasing demand for electricity. Consumption of electricity where it is produced is one of the most preferred and useful methods since it eliminates the factors causing the decrease in efficiency such as energy losses in transmission lines. In the industrial area, cogeneration power plants are frequently preferred as high-efficiency energy production system in case there is a need for electrical power as well as heat power (hot water, steam etc.). It is possible to define the cogeneration system as a system where electricity and heat energy are produced simultaneously using a single fuel source. The cogeneration system is used in domestic applications as well as in industrial systems which need electricity and heat energy [2]. Because of the high financial savings due to the high fuel efficiency obtained from the system, it is seen that legal subsidies are applied in many countries for cogeneration systems which are frequently preferred owing to their environmental advantages [3-5]. The cogeneration system, which can also be known as combined heat and power (CHP) plant, is not a new concept. At the end of the 1800s, when steam was the major energy source in the industry, the concept of cogeneration emerged

Özet

Bu çalışmada iki adet V tipi 12 silindirli dizel motordan oluşan ve her biri 5.760 kW olmak üzere toplam 11.52 MW elektrik enerjisi üreten kojenerasyon enerji santralının elektrik üretiminin tahmin edilmesi için yapay sinir ağı (YSA) geliştirilmiştir. 6 no'lu fuel oil ile çalışın için geliştirilen YSA'da, zaman (t), çalışma saatleri (h), yakıt tüketimi (m) ve iç tüketim (Wp) değerleri giriş değişkenleri olarak kullanılmıştır. Farklı YSA'ların performansı değerlendirildikten sonra, bir gizli katman ve 10 nörondan oluşan YSA en ideal model olarak değerlendirilmiştir. Deneysel verilerle yapılan karşılaştırma sonucunda, bu modelin kojenerasyon enerji santralının elektrik üretim değerlerini 0,99073 R değeri ve 4.734e-8 MSE ile tahmin edebileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Kojenerasyon, Dizel motor, Enerji sanrali, Elektrik tüketimi, Yapay Sinir Ağı

as a result of replacing mechanical driven systems with electrically driven systems and replacing steam-driven belt-pulley mechanisms with electricity and motors [6, 7]. Demand for cogeneration systems is increasing day by day due to the ability to produce the required electricity and thermal energy from a single fuel source such as oil or natural gas and with a high efficiency ratio. The energy efficiency of cogeneration systems can reach up to 80% compared to conventional electricity generation systems [8]. The high fuel efficiency values in electrical and thermal energy production are the main advantages of the cogeneration system. Because waste heat from conventional systems is converted into useful thermal energy in cogeneration systems, a smaller amount of fuel is needed to produce the equivalent amount of energy as conventional systems (turbine, steam boilers, etc.) to produce electrical and thermal energy in the cogeneration system [9, 10]. As they reduce the impact of greenhouse gases by up to 50% with their technical and economic advantages, the environmental advantages of cogeneration systems reach considerable proportions [11, 12]. Although they have many different applications, the most common application in cogeneration power plants is the power plants established with internal combustion engines and open cycle gas turbines. Heavy fuel diesel power plants, a low-grade oil refinery product, operate on diesel fuel, which is relatively inexpensive than other types. This technology, which can produce hundreds of megawatts of energy, stands out with

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta/e-mail: andacaturcolak@hotmail.com (A. B. Çolak)
 Geliş / Recieved: 18.06.2020 Kabul / Accepted: 01.10.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021
 doi: 10.28948/ngumuh.754411

the advantages of being able to be installed quickly in less than twelve months [13]. According to their capacity, diesel engine cogeneration power plants can be classified into three main categories as low capacity (15 - 1000 kW), medium capacity (1 - 6 MW) and high capacity (over 6 MW). The diesel cogeneration power plant has four available waste heat sources: exhaust gas, engine jacket cooling water, lubricating oil cooling water and charge air cooling water. Exhaust gases from diesel cogeneration power plants have a substantial sum of thermal energy that can be used to recover waste heat. The heat recovered from the exhaust gas is generally considered to be hot water or steam production. The resulting recycling energy can be used for an assortment of process needs, heating and cooling applications [14]. In many studies on energy efficiency in the literature, the advantages of cogeneration plants have been scientifically proven [15-18]. In the literature, many studies have been done on diesel engines and cogeneration power plants.

While some of the studies on diesel engines have carried out analyzes on the second law of thermodynamics [19, 20], some researchers have studied the effects of diesel engine parameters on performance and emission values [21-23]. Previous studies on cogeneration power plants have mostly focused on the efficiency of power plant and exergy analysis. Ust et al. [24] in their study on a gas turbine regeneration system, optimizing the external performance criteria of the power plant, demonstrated the advantages of this method. In his study for cogeneration power plants, Ertesva [25] evaluated the external comparisons of efficiency indicators for cogeneration power plants and consequently stated that external improvements were achieved to a limited extent by several energy-based efficiency indicators. Khaliq and Han [26] analyzed the heat and power system of a gas turbine cogeneration plant using the first and second laws of thermodynamics. The case study on a diesel engine-operated cogeneration plant was also carried out with only the first laws in mind [27]. In the management of the electrical energy system, it is of excessive prominence to estimate the production capacities of the power plants operating in the grid. In cases where the total capacity of electrical energy that the power plants in the system can produce is lower than the amount of electrical energy required, power outages begin to occur. Power cuts in the system, especially unplanned power outages, bring technical and economic problems. Considering that the sudden power outages, stopping in industrial processes, deterioration of the materials in the production system, interruption of production and re-commissioning, serious losses are observed [28]. Unstable operation of power generation systems with interruptions can also cause malfunctions in mechanical systems and generator units. In view of all these reasons, accurate estimation of the generation capacity of an electric power plant is of great importance both in terms of providing the required energy stably and sustainably and in the management of the electricity grid [29].

In the literature, many studies have been conducted on the estimation of the electricity generation capacity of power plants. Since data mining techniques are used in the methods used in such studies, it is possible to estimate the electricity

generation capacities only for local cases in the database. In the data mining technique, the structure of the database can be examined, and estimated values can be obtained [30]. In the absence of the data required to create a model in the database, errors can also occur in the estimation results. For example, since the decrease in the performance of an electrical power plant will increase as the working hours increase, long-term data of the power plant are needed to estimate the performance decline using long-term data for performance estimation by data mining technique. In the absence of sufficient data, the estimation results will not be accurate. It is seen that this method is frequently used in the literature due to the advantage that the characteristics and performance factors of the power plant can be evaluated simultaneously [31-33]. One of the methods for estimating the desired values is the artificial intelligence (AI) thanks to the algorithms developed using the obtained data. In the literature, artificial intelligence applications for estimating the performance and production values of power plants are frequently encountered. Smrekar et al. [34] and Tunckaya et al. [35] used statistical data and artificial neural network (ANN) model in their study on estimating the performance of coal-fired power plants. Boksteen et al. [36] used the Bayesian calibration model to estimate the power plant performance, while Tüfekci [37] preferred the machine learning model developed with long-term data to estimate the performance of combined cycle power plants. Many different studies have been made on the estimation of performance and production values of cogeneration power plants by ANN. Optimization of power plant parameters and development of ANN to achieve efficiency increase [38-41], modeling of the manners of power plant components such as steam boiler and turbine with ANNs [42-46], development of ANN for estimation of thermal efficiency and air pollution [47-51], optimization of power plant load distribution [52, 53], power plant production according to demands [54] are some examples of ANN studies on cogeneration power plants by researchers.

In this study, an ANN model has been developed in order to predict electrical energy production values of a diesel engine cogeneration power plant. However, many applications of ANNs in different areas are also included in the literature [55]. Although there are various studies in the literature on cogeneration power plants, there is no study on estimating the electrical energy production values of diesel engine cogeneration power plants using ANNs. This study is important in that it aims to fill this gap in the literature.

2 Description of cogeneration power plant

The cogeneration power plant investigated in this study was established to meet the electricity, hot water and steam needs of five different textile factories. The cogeneration power plant has two MAN brand diesel engines of type 12V32/40, each of which can produce 5760 kW of power. 12V32/40 refers to the 12 is the number of cylinders, V engine type (Vee engine), 32 cylinders bore (cm) and 40 is the piston stroke (cm). In Figure 1, cross-sectional view of the V32/40 diesel engine, in Figure 2 and Table 1, main dimensions of MAN 12V32/40 diesel engine are given [56].

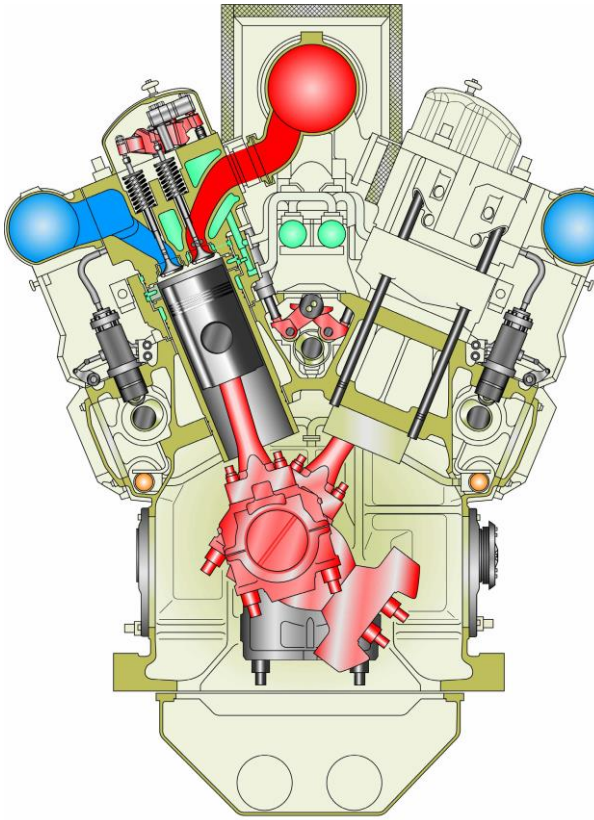


Figure 1. MAN 12V32/40 diesel engine cross section view on coupling side

In the calculations carried out for the cogeneration power plant, which has a total capacity of 11.52 MW, the data of one unit was used because the values of both diesel engines were the same. Heavy fuel oil No:6 is used as fuel in the cogeneration power plant. Although the purpose of using this type of fuel, which is also considered as heavy fuel, is its economic advantage compared to other types of fuel,

operational difficulties due to the components contained in the fuel content (necessity of using fuel separator, maintenance requirements due to mechanical equipment contamination, yield reduction, etc.) can also be evaluated as disadvantages. The technical characteristics of the fuel used are given in [Table 2](#).

Table 1. Main dimensions of MAN 12V32/40 diesel engine

A (mm)	B (mm)	C (mm)	H (mm)	W (mm)	Weight (tons)
6.475	4.215	10.690	4.795	3.370	98

In the cogeneration power plant, hot water and steam production are integrated with electricity generation, and all three energy types are transmitted to the enterprises to meet the electricity and process needs of five different power plants. Exhaust excavation at a temperature of approximately 520 °C enters the boiler and helps to produce a total of 4.5 t/h of steam at a pressure of 6 bar and a temperature of 165 °C. The process of removing the corrosive gases contained in the feed water fed to the steam serpentine in the boilers and reaching them to a temperature of 102 °C before the boiler is carried out by means of degasser. The schematic diagram of the cogeneration power plant is given in [Figure 3](#) [57].

In the cogeneration power plant, hot water and steam production are integrated with electricity generation, and all three energy types are transmitted to the enterprises to meet the electricity and process needs of five different power plants. Exhaust excavation at a temperature of approximately 520 °C enters the boiler and helps to produce a total of 4.5 t/h of steam at a pressure of 6 bar and a temperature of 165 °C. The process of removing the corrosive gases contained in the feed water fed to the steam serpentine in the boilers and reaching them to a temperature of 102 °C before the boiler is carried out by means of degasser.

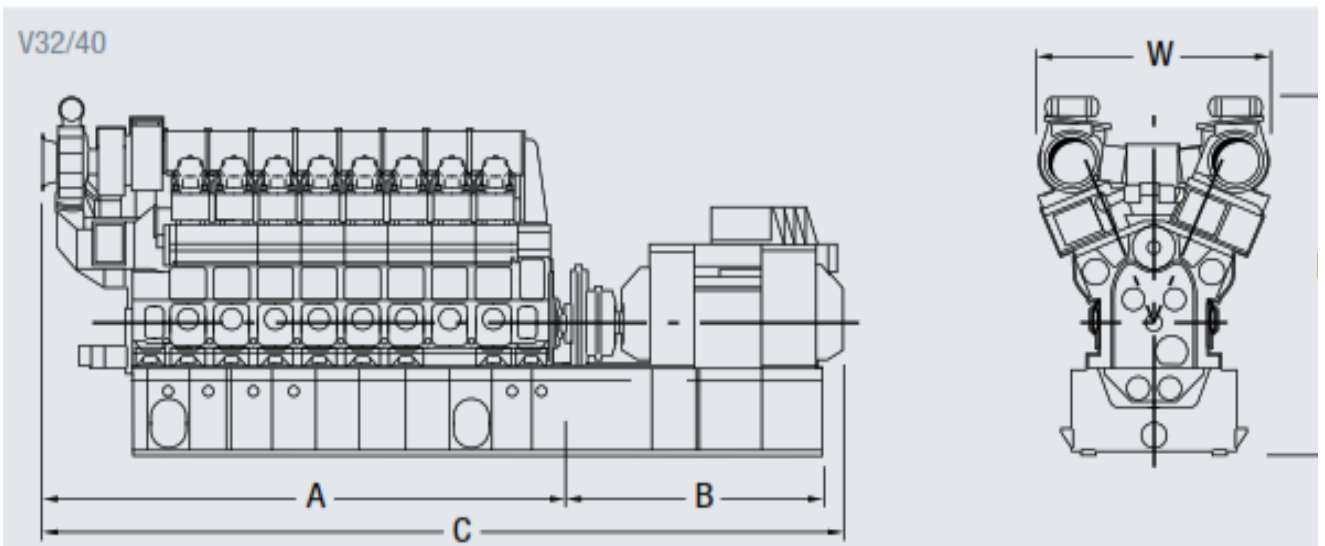


Figure 2. Main dimensions of MAN 12V32/40 diesel engine

The schematic diagram of the cogeneration power plant is given in Figure 3 [57]. The system in cogeneration power plant; diesel engine, exhaust gas turbine, compressor, heat recovery heat exchangers, charge air cooler, oil cooler, cooling tower, cooling tower heat exchanger and five circulation pumps. As a result of the combustion in the four-stroke diesel engine, the rotational movement of the crankshaft is converted to electrical energy by means of the generator (alternator). The first movement to diesel engines is given by 30 bar compressed air produced by the piston start air compressor.

Table 2. HFO technical characteristics

Heavy Fuel No:6 Typical Specifications	
Ca (weight%)	86.5 - 90.2
H (weight%)	9.5 - 12.0
S (weight%)	8.51 - 7.68
Viscosity (CSt @38°C)	260 - 750
BS&W (%)	0.05 - 2.0
HHV (BTU/LB)	17410 - 18990

When the diesel engine starts, the exhaust gas flow resulting from combustion gives a rotational motion to the exhaust gas turbine. With the rotational movement of the air compressor connected to the same shaft, the compressed air required for the combustion reaction is sent to the cylinder. The entire exhaust gas turbine and air compressor unit, which is connected to the same charge and is integrated into a single case, is called a turbocharger. The charge air, which

reaches high temperatures after the compressor, is gradually cooled in the charge air cooler using HT then LT water and then sent to the cylinder. The exhaust gas exiting the diesel engine first enters the turbocharger unit and gives the turbine movement.

After leaving the turbocharger, it enters the waste heat boilers and turns the hot water fed into the serpentine into steam. The steam produced is transferred from the waste heat boilers to the steam tank and then to the enterprises. LT provides water, oil cooling and charge air cooling. HT water, which has a higher thermal capacity, cools the engine, and at the same time, warm water from the engine is obtained by means of heat recovery heat exchanger with a capacity of 140 t/h and 85 °C. Information about the cogeneration power plant system is given in Table 3 [57].

3 Cogeneration power plant data analysis

In this study, which has been carried out in order to estimate the electrical energy production of the cogeneration power plant with ANN, the production values of the power plant for five-years (60-months) have been used. Time, working hours, internal power consumption and fuel consumption values were used as input variables. Monthly working hours of 5.760 kW diesel engine were recorded during the 60-month period on which the study was based. Working hours of the cogeneration power plant may vary according to months. The reason is that the downtime of the power plant due to breakdowns, maintenance and the downtime of the plants where energy is supplied. The cogeneration power plant worked for a total of 32.106 hours, with an average of 535,1 hours per month, ranging from 334 to 657 hours per month during the 60-month period of the study. The graph of the operating hours of the cogeneration power plant in the 60-month period is given in Figure 4.

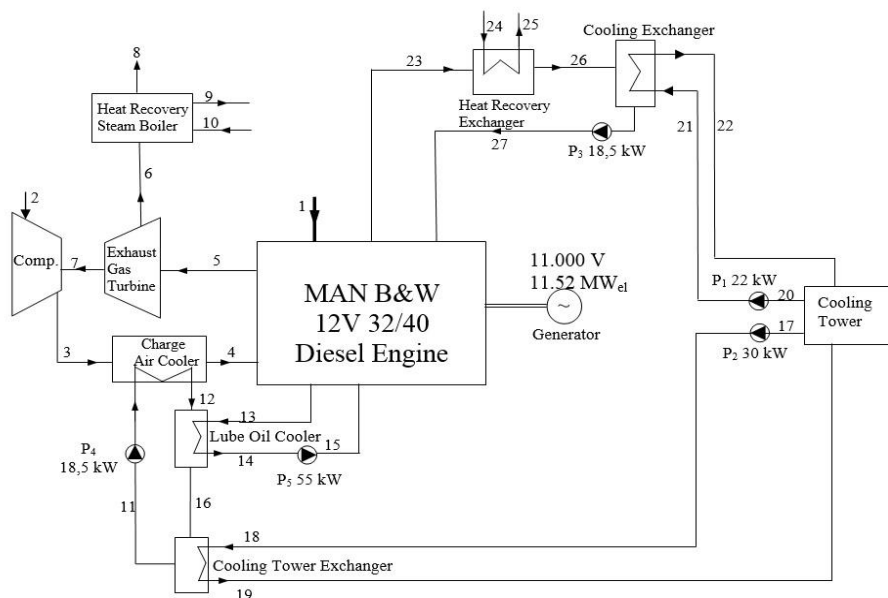


Figure 3. Schematic diagram of the cogeneration power plant

Table 3. Values about cogeneration power plant

No	Flow identification	m (kg/h)	T (°C)	P (kPa)
1	Inlet fuel	0.318	125	640
2	Air inlet (before compressor)	11	27	2
3	Air (after compressor)	11	225	300
4	Air (for charge)	11	55	300
5	Exhaust gas (before turbine)	11.31	520	-
6	Exhaust gas (after turbine)	11.31	330	2.5
7	Shaft	-	-	-
8	Exhaust gas	11.31	210	2.5
9	Steam for factory	12.50	165	600
10	Make up water	12.50	102	700
11	LT water (inlet)	31.67	35	260
12	LT water (outlet)	31.67	40	260
13	Lube oil (inlet) cooler	38.88	75	420
14	Lube oil (outlet) cooler	38.88	65	420
15	Inlet lub oil	38.88	65	420
16	Charge air (inlet) water for CT HE	31.66	50	260
17	Water (outlet) CT	31.94	30	300
18	LT (Inlet) water	31.94	30	300
19	LT (Outlet) water	31.94	40	300
20	Heat Recovery (Engine) Exchanger	31.66	25	300
21	HT (Inlet) water	31.66	25	300
22	HT (Outlet) water	31.66	25	300
23	Heat Recovery (Outlet)	20	90	420
24	Water (Return line)	38.88	70	600
25	Water (to factory)	38.88	90	550
26	HT Exchanger (inlet)	20	70	420
27	HT Exchanger (outlet)	20	80	420

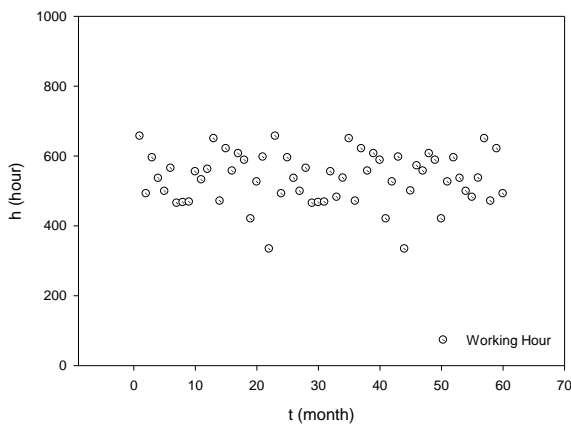


Figure 4. Operating hours of the cogeneration power plant

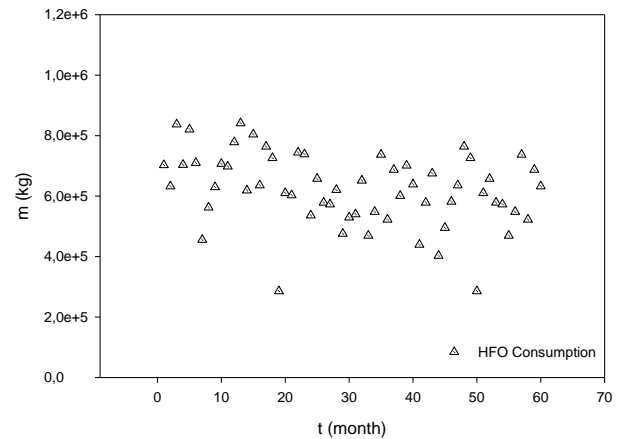


Figure 5. Fuel consumed in the cogeneration power plant

The graph of the amount of fuel consumed in the cogeneration power plant operating with heavy fuel oil no:6 over a period of 60 months is shown in Figure 5. In this process, between 285.698 kg and 841.073 kg fuel was consumed in the power plant and a total of 37.729.499 kg of fuel consumption was realized, with an average of 621.325 kg per month. The reason for the difference in fuel consumption in the power plant is that the working hours differ each month due to the circumstance that the power plant stops owing to the reasons explained previously.

During the operation of the cogeneration power plant, the equipment such as the fuel module, instrument air compressors, separators, lubrication and cooling water pumps, water treatment system and lighting consume electrical energy. Such consumption in the power plant is expressed as the internal consumption or internal need of the power plant. During the 60-month period in which the study data were taken, the total electricity consumption of 6.305.137 kWh was realized for the internal consumption of the cogeneration power plant ranging from 73.350 kWh to 132.062 kWh, with an average of 105.086 kWh per month. Figure 6 indicates the graph of the internal consumption of the cogeneration power plant.

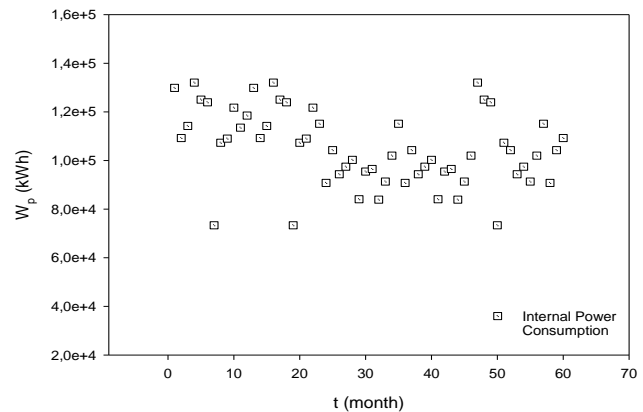


Figure 6. Internal consumption of the cogeneration power plant

4 Artificial Neural Network

One of the ideal methods for estimating the electricity generation of a cogeneration power plant is the use of ANN. ANNs generally be made of three separate layers: input, hidden and output layers. The input layer is where data is received and behaves like a self-determining variable. The sum of input layer neurons unwavering by the structure of the model depends on the sum of arguments. The other layer, the hidden layer, does not characterize any impression and only affords midway results to calculate output values and calculates the sum of each unit in ANNs by multiplying the weights corresponding to the input values. The sum of the calculated morals is then mapped to the output value using a transfer function [58]. Multi-layer perceptron (MLP) model is one of the most widely used ANN models. In ANNs developed using this model, prediction of nonlinear mathematical equations can be performed at high performance levels.

The multi-layer perceptron model includes an input layer, as a minimum one hidden layer, and an output layer, each layer being entirely linked to the next layer. These bonds between layers consist of neurons, the basic processing element. Neurons are identified by bias (b), weights (w) and a transfer function (f). The weight values fixed using a unsystematic number generator are multiplied by the input values of each neuron, and the values obtained are added to each other and to the bias value. The neuron value is calculated as follows:

$$Y_j = f\left(\sum_{i=1}^n W_{j,i}x_i + b_j\right) \quad (1)$$

Where Y is the neuron output, n is the number of neurons that connect to the jth neuron, and x is the incoming signals.

In the ANN developed using multi-layer perception, the process of determining the appropriate weight and bias for learning the functional relationship between input and output is entitled "training". One of the most efficient and common algorithms used for training ANN is feed-forward backpropagation (FF-BP) algorithm. In this algorithm, information processing is performed in the feed-forward phase and this process is propagated from the input layer to the output layer. The errors between the predicted and actual data are calculated in the backward processing stage and sent back to the input layer to adjust the biases and weights. This process continues step by step until the error rate in the ANN is minimized. In estimating the energy production values of cogeneration power plants, since the operating hours of the plant, the amount of fuel consumed and the internal consumption values of the plant are the parameters that affect the result, these three parameters are defined as the input value. The output parameter is the amount of electrical energy manufactured by the cogeneration power plant, and this value is obtained in the one-dimensional output layer. The basic structure and configuration topology of the developed ANN is presented in Figure 7 and 8, respectively.

In the developed ANN model, the sum of hidden layers and neurons are the most imperative factors that

unswervingly affect the predictive performance [59]. The presence of a small number of hidden layers and neurons in an ANN causes the ANN to be incorrectly trained, and the accuracy of prediction is low. With the purpose of minimize the guesstimate error, the excessive number of neurons is not an accurate approach. It is important to optimize the data to be used in the ANN in order to obtain the ideal estimation accuracy. In this study, feed-forward back-propagation multi-layer perceptron ANN has been developed by using data obtained from a diesel engine cogeneration power plant, and this model has been used to estimate the electricity generation values of the cogeneration power plant. In the ANN developed using 60 data, the data were separated into three groups as training, testing and validation. 42 (70%) of the 60 data were used for the training phase, 9 (15%) for the test phase and 9 (15%) for the validation phase. The values obtained from the mean square error (MSE) and R equations given in Equation (2) and (3), respectively, were chosen as norms for the optimization and performance analysis of the developed ANN.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (W_{exp(i)} - W_{ANN(i)})^2 \quad (2)$$

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^N (W_{exp(i)} - W_{ANN(i)})^2}{\sum_{i=1}^N (W_{exp(i)})^2}} \quad (3)$$

Where N is the number of data points, W_{exp} is the experimental production value of the cogeneration power plant, and W_{ANN} is the production value obtained from the ANN model. The flow chart of this ANN with 10 neurons is presented in Figure 9.

5 Results and discussion

In this study, a single hidden layer feed-forward multi-layer perceptron method was chosen as an ANN modeling, and Levenberg-Marquardt backpropagation algorithm, which is one of the most proper models for training ANN, was preferred. As transfer functions of hidden and output layers, Tangent sigmoid (Tan-Sig) and linear (Purelin) functions are selected respectively.

The Tan-Sig transfer function and purelin are presented in Equation (4) and (5)

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (4)$$

$$\text{purelin}(x) = x \quad (5)$$

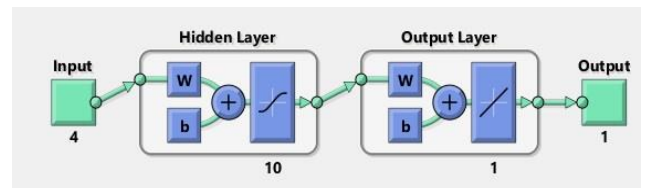


Figure 7. Basic structure of the ANN

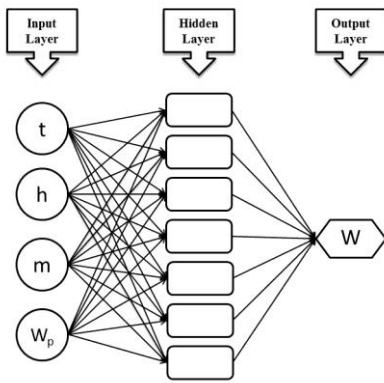


Figure 8. Configuration topology of the ANN

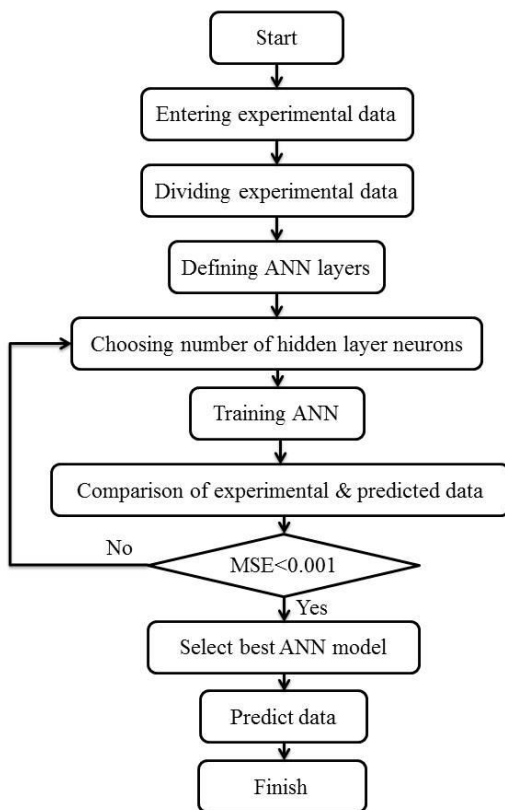


Figure 9. The flow chart of the ANN

In Figure 10, the deviation between the values obtained from the cogeneration power plant and the values obtained from the ANN is plotted. As can be seen in Figure 10, when the training phase of the ANN starts, the high MSE value decreases with increasing periods (epoch). It means that the training stage of the developed ANN model is premeditated acceptably. According to the graph, the MSE rate drops continuously and it is the best result with the lowest MSE value of 27112400562 immediately after 5 iterations. The reason that the ANN achieves the ideal result with the minimum MSE value with a low iteration like 5 is an indication that the data optimization used in the experiment set is done in an ideal way. Figure 11 shows the training

status of the ANN model. As shown in Figure 11, the errors were repeated 6 times after epoch 6 and stopped at epoch 11. This error showed that the over-matching of the repeated data starting from the 6th epoch is very good. Thus, the fifth epoch was chosen as the base, but their weights were chosen as final weights. Furthermore, due to the errors repeated six times before the process is stopped, the validation process is equal to 6. Figure 12 shows the error histogram of the training, validation and testing of the ANN. The distribution of the error distribution around the zero line indicates that the designed ANN can estimate the electrical energy production of the cogeneration power plant with an ideal accuracy rate. Figure 13 appearances the assessment of the experimental results with the data used for training the ANN.

The fact that the training data located on the compatibility line is compatible with the experimental data and the R-value obtained as 0.99586 is an indication that the training process of the ANN is finalized with high accuracy and precision. Figure 14 shows the comparison of tentative data with the data used for testing the ANN.

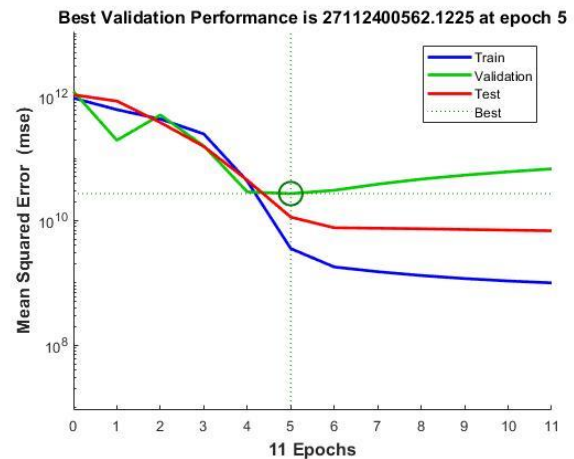


Figure 10. Performance chart of artificial neural network

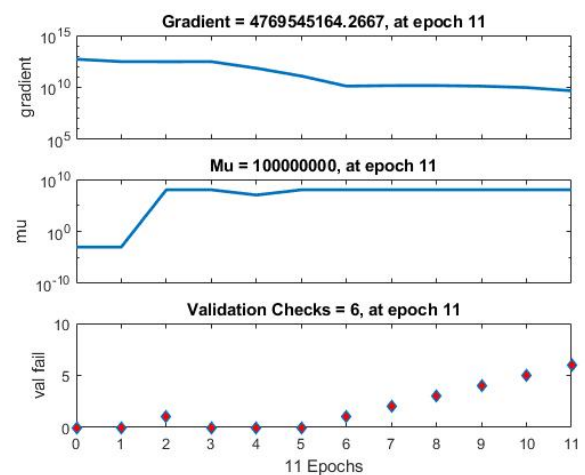


Figure 11. Training status of artificial neural network model

The performance of the test data is important in assessing the suitability and performance of the ANN. The position of the test data close to the equality line and the R-value of the

test data, which is 0.97918, can be interpreted as the ideal performance of the improved ANN. Figure 15 shows the validation outcomes of the ANN. The proximity of the validation data to the equality line is indicative of the proper modeling of the ANN. It can be seen that the R-value for the validation results is 0.99227. All the data of the ANN, designed with 60 tentative data, are shown in Figure 16. As can be seen from the graph, all data points obtained from the ANN are located very close to the equality line. This closeness of the data points to the compatibility line indicates that the developed ANN model is capable of generated electrical energy from the cogeneration power plant; time, working hours, fuel consumption and internal power consumption of the plant. The R-value for all ANN results is 0.99073. The performance values of the ANN developed for the purpose of estimating the electricity generation values of the cogeneration power plant are given in Table 4 and Figure 17. The electrical energy production values of the cogeneration power plant are associated with the data obtained from the ANN developed with experimental data. The results have shown that the ANN can accurately predict the electrical energy generation of the cogeneration power plant based on four different input variables. Figure 18 shows the comparison of the values obtained from the ANN with the production values of the cogeneration power plant.

Table 4. ANN performance values

Data Set	MSE	MoD (%)	R	Number of Data
Train	3.48E-03	-0,65	0.99586	42
Test	5.69E-03	-1,02	0.97918	9
Validation	5.64E-04	0,06	0.99227	9
All	4.48E-04	-0,61	0.99073	60

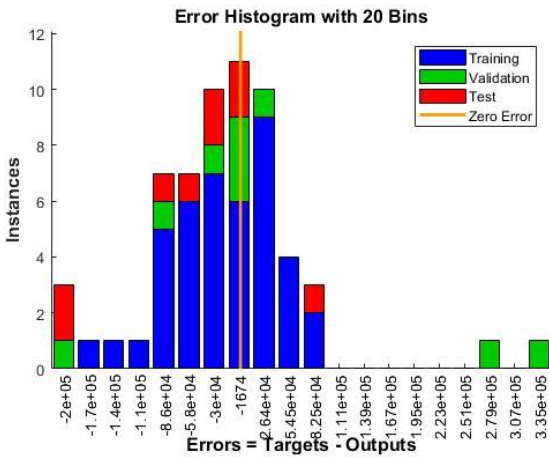


Figure 12. Error histogram

One of the methods used to evaluate the performance of the developed ANN is a standard deviation analysis. The values obtained from the ANN were compared with the electrical energy generation values of the cogeneration power plant, and the deviation values realized for each value were calculated. In the graph given in Figure 19, the electric energy generation values of the cogeneration power plant are

placed on the x-axis, and the production values obtained from the ANN developed on the y-axis are placed. The positioning of the data points around the equality line is an indication that the developed ANN accurately predicts the electrical energy generation values of the cogeneration power plant. The deviation between the output values of the ANN and electrical energy generation values of the cogeneration power plant was calculated using the theoretical correlation given in Equation (6) [60].

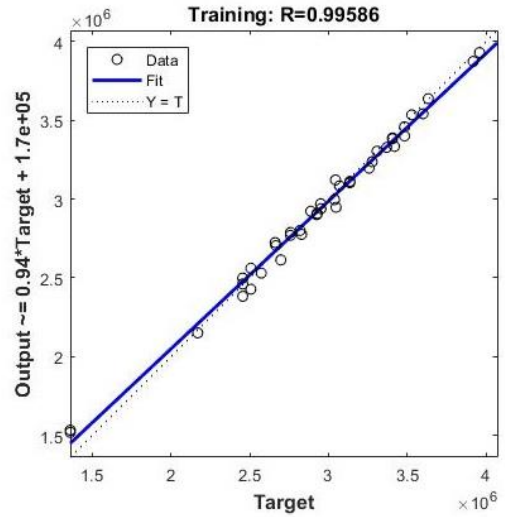


Figure 13. Training data performance

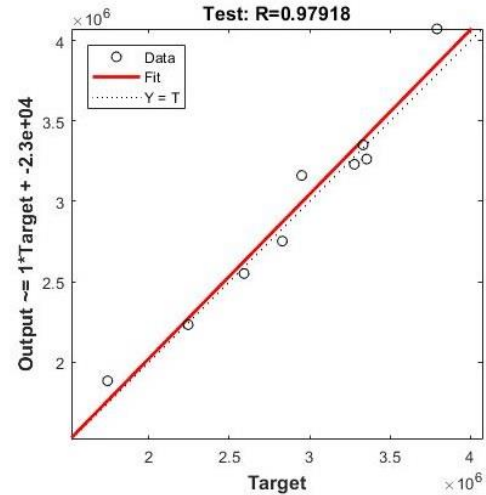


Figure 14. Test data performance

$$\text{Margin of Deviation} = \left[\frac{W_{\text{exp}} - W_{\text{ANN}}}{W_{\text{exp}}} \right] \times 100\% \quad (6)$$

The electricity generation values of the cogeneration power plant were compared according to the number of data obtained by using an ANN. The comparison was performed separately for three different data sets used in the development of the ANN.

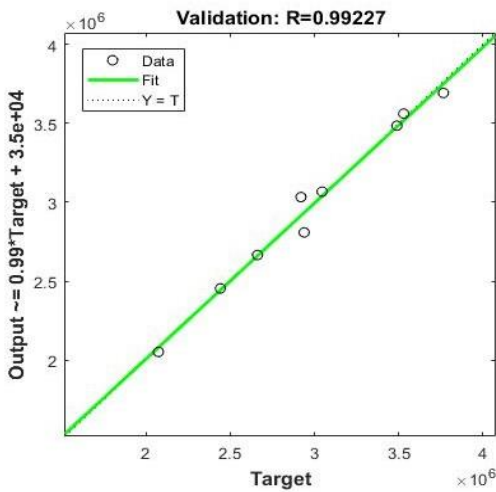


Figure 15. Validation Data Performance

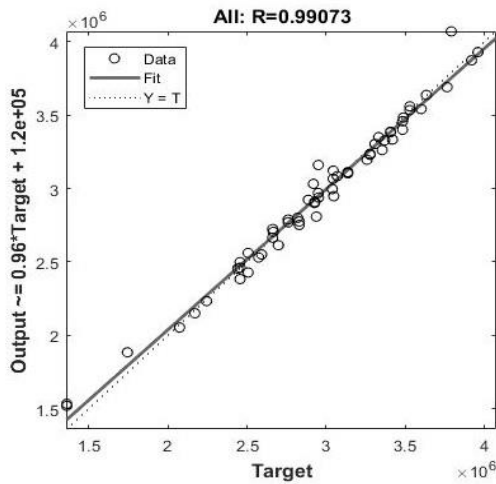


Figure 16. General performance

As can be seen in Figure 20, the estimated values using the ANN and the production values of the cogeneration power plant are very close to each other. It means that the ratio between the values estimated by the ANN and the production values of the cogeneration power plant is acceptable. In Figure 21, error rates of electrical energy generation values estimated using the ANN are shown based on the number of data. Determination of error rates is one of the studies conducted to evaluate the performance of the ANN model whose training phase has been completed. The amount of deviation between the electrical energy generation values of the cogeneration power plant and the data obtained from the ANN was calculated using Equation (6).

The calculated deviation amounts are shown in separate graphs for each training, test and validation data set used in the ANN. As can be seen in Figure 21, the production values predicted by the ANN are very close to the zero line and the deviation amounts are very low and acceptable. These error rates indicate that the results obtained from the ANN are accurate with acceptable deviation rates. As can be seen in the three-dimensional graph given in Figure 22, the ANN was able to estimate the electrical energy generation values

of the cogeneration power plant in the range of -5.34% to 2.57% with an average deviation of -0.61%. In the graph, the intensity of the zero error area indicated by the green region is an expression of the good agreement between experimental results and ANN outputs.

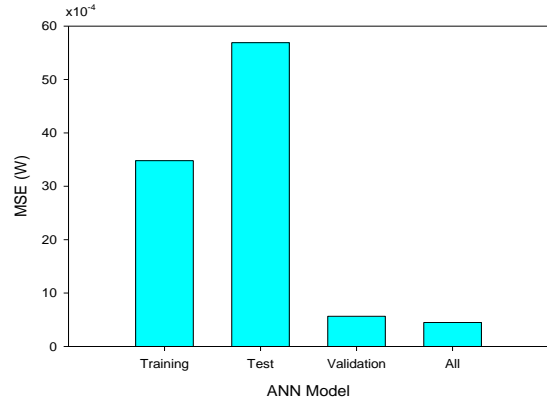


Figure 17. Mean square error values for training, validation, test, and all data

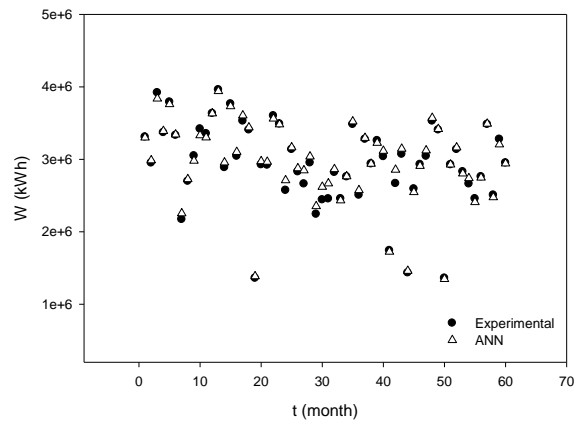


Figure 18. Comparison of production values with ANN outputs

Comprehensive studies have been carried out on the energy and exergy analysis of this cogeneration power plant, where electricity energy generation values are predicted using ANNs [57, 61].

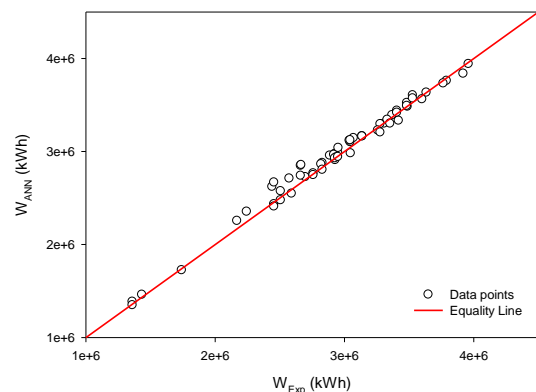


Figure 19. Comparison of experimental production data with artificial neural network data

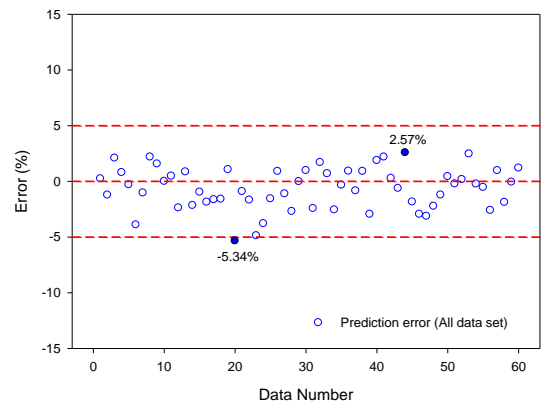
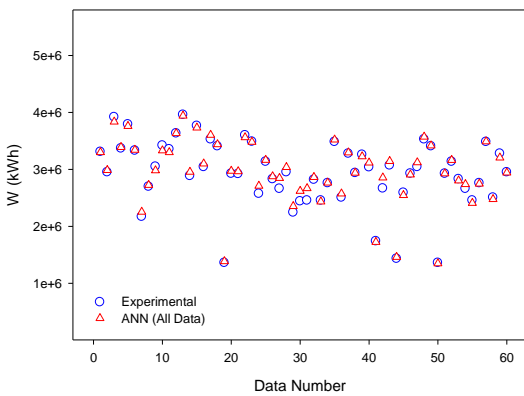
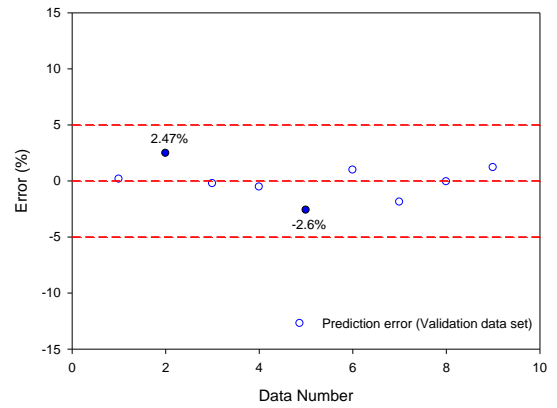
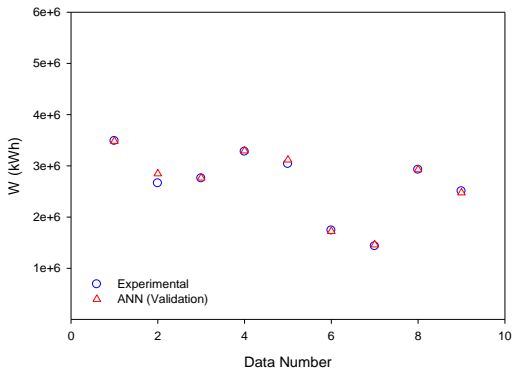
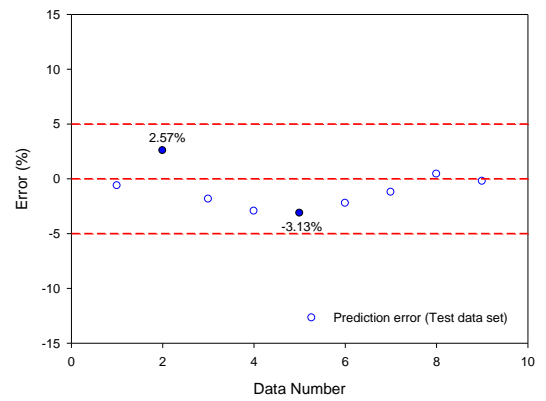
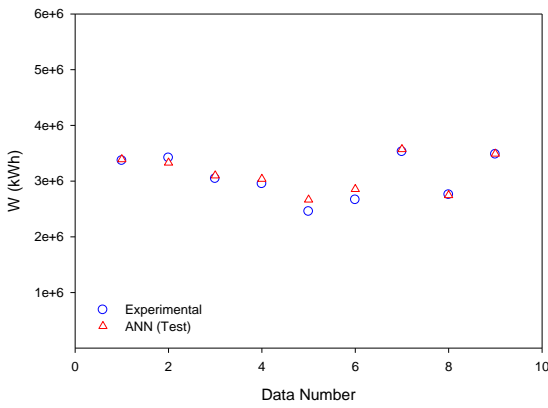
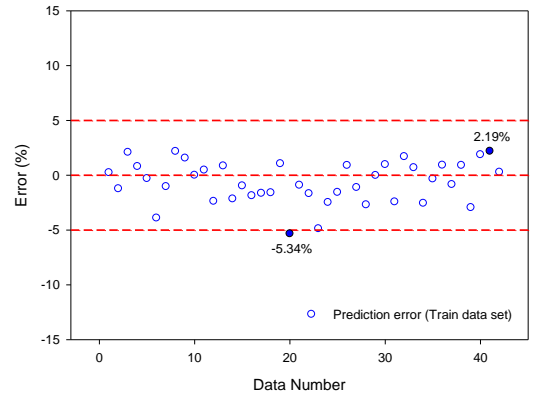
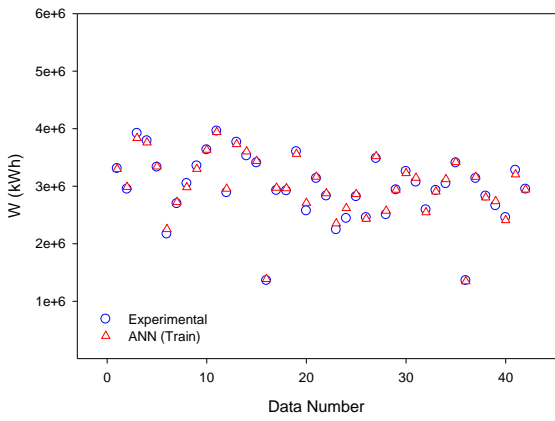


Figure 20. Comparison of ANN and plant production values according to data number

Figure 21. Prediction error by ANN according to data number

6 Conclusion

Numerous studies on cogeneration power plants in the literature have focused on the efficiency and exergy analysis of cogeneration power plants, while various optimization studies with ANNs are also available. In this study, in order to estimate the electricity generation values of a 12-cylinder 32/40 type diesel engine cogeneration power plant operating with heavy fuel oil, a multi-layer perception forward-feed backpropagation ANN was developed through the Levenberg-Marquardt algorithm.

In the ANN model, time (t), working hours (h), fuel consumption (m) and power plant internal consumption (W_p) are defined as input variables, and the electricity generation values (W) of the cogeneration power plant are estimated based on these four input values.

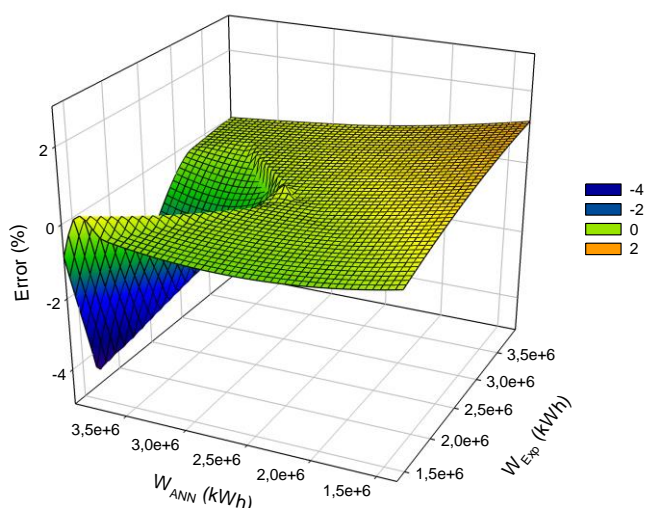


Figure 22. Deviation rates of experimental and ANN data

The ANN was designed using the 5-year (60 months) data of the cogeneration power plant. 42 (70%) data were used for training, 9 (15%) were used for validation, and 9 (15%) were used for testing. The obtained results showed that the R-value obtained for the ANN is 0.99073, The mean error square value is $4.734e-8$, and the ANN is modeled optimally. The ANN was able to estimate the electrical energy generation values of the cogeneration power plant in the range of -5.34% to 2.57% and with an average error margin of -0.61%. In the future, different estimation and optimization studies of cogeneration power plants can be made by using ANNs.

Acknowledgements

The author would like to thank the management of the BIRKO factory for their cooperation and supply of data during this study.

Conflict of interest statement

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity Rate: 19%.

Nomenclature

AI	Artificial Intelligence
ANN	Artificial Neural Network
b	Bias
BS&W	Basic Sediment and Water
BTU	British Thermal Unit
CHP	Combined Heat and Power
CT	Cooling Tower
f	Transfer Function
FF-BP	Feed Forward Back Propagation
h	Working hour (h)
H	Hydrogen
HE	Heat Exchanger
HT	High Temperature
HHV	Higher Heating Values
IEA	International Energy Agency
LT	Low Temperature
MLP	Multi-layer perception
MSE	Mean Square Error
S	Sulphite
t	Time period (month)
m	Fuel Consumption (kg)
w	weights
W	Power generation of power plant (kWh)
W_p	Internal power consumption (kWh)

References

- [1] International Energy Agency, World energy outlook. ISBN: 978-92-6420805-6. 2014.
- [2] S.D. Oh, H.S. Pang, S.M. Kim and H.Y. Kwak, Exergy analysis for a gas turbine cogeneration system. J Eng GasTurboPower, 118:78291, 1996. <https://doi.org/10.1115/1.2816994>
- [3] Nato, 3rd World Countries Cogeneration Case Studies, 2001.
- [4] Energy Nexus Group, Technology characterization: reciprocating engines, Environmental Protection Agency Climate Protection Partnership Division, Washington DC, 2002.
- [5] R. Benelmir and M. Feidt, Energy cogeneration systems and energy management strategy, Energy Conversion and Management 39, 1791–1802, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00055-7](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00055-7)
- [6] J.A. Orlando, Cogeneration design guide. USA: ASHRAE, Inc; 1996.
- [7] C.A. Frangopoulos, EDUCOGEN, The European educational tools on cogeneration. European Commission. December 2001.
- [8] Small-scale cogeneration, why? In which case? A guide for decision makers. European Commission, Directorate General for Energy DGXVII; July; 1999.
- [9] R. Benelmir and M. Feidt, Energy cogeneration systems and energy management strategy. Energy Convers Manage 39(16–18), 1791–802, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00055-7](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00055-7)
- [10] B.W. Wilkinson and R.W. Barnes, Cogeneration of electricity and useful heat. CRC Press Inc.; 1980.
- [11] G. Major, Small scale cogeneration. The Netherlands: Centre for the Analysis and Dissemination of

- Demonstrated Energy Technologies. CADDET Energy Efficiency Analysis Series 1. IEA/OECD; 1995.
- [12] M. Kanoglu and İ. Dincer, Performance assessment of cogeneration plants, *Energy Conversion and Management*, 50, 76-81, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.08.029>
- [13] J. Kartano, *Power plant business*. Wartsila NSD, Finland; 2002.
- [14] A. Abusoglu and M. Kanoglu, Exergetic and thermoeconomic analyses of diesel engine powered cogeneration: Part 2 – Application, *Applied Thermal Engineering* 29, 242–249, 2009.
- [15] M.A. Rosen, Energy- and exergy-based comparison of coal-fired and nuclear steam power plants. *Int J*;1(3),180–92, 2001. [https://doi.org/10.1016/S1164-0235\(01\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S1164-0235(01)00024-3)
- [16] M.A. Rosen, M.N. Le and İ. Dincer, Efficiency analysis of a cogeneration and district energy system. *Appl Thermal Eng*, 25, 147-59, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.05.008>
- [17] L. Ozgener, A. Hepbasli and İ. Dincer, Performance investigation of two geothermal district heating systems for building applications: energy analysis. *EnergyBuild*, 38(4), 286-92. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.021>
- [18] M.A. Rosen, Reductions in energy use and environmental emissions achievable with utility-based cogeneration: simplified illustrations for Ontario. *Appl Energy*;61:163–74, 1998.
- [19] C.D. Rakopoulos and E.G. Giakoumis, Simulation and exergy analysis of transient diesel engine operation. *Energy*, 22(9), 875-85, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(97\)00017-0](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(97)00017-0)
- [20] K. Nakonieczny, Entropy generation in a diesel engine turbocharging system. *Energy*, 27:1027–56, 2002.
- [21] C.Y. Lin, Reduction of particulate matter and gaseous emission from marine diesel engines using a catalyzed particulate filter. *Ocean Eng*, 29, 1327–41, 2002.
- [22] A. Parlak, H. Yasar and B. Sahin, Performance and exhaust emission characteristics of a lower compression ratio LHR diesel engine. *Energy Conversion Management* 44, 163-75. 2003. [https://doi.org/10.1016/S01968904\(01\)00201-1](https://doi.org/10.1016/S01968904(01)00201-1)
- [23] C.M. Nam and B.M. Gibbs, Application of the thermal DeNOx process to diesel engine DeNOx: An experimental and kinetic modeling study. *Fuel* 81, 1359–67, 2002.
- [24] Y. Ust, B. Sahin and T. Yilmaz, Optimization of a regenerative gas-turbine cogeneration system based on a new exergetic performance criterion:exergetic performance coefficient. *Proc Institut Mech Engineers A – J Power Energy*, 221(A4), 447–57, 2007. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE379>
- [25] I.S. Ertesva, Exergetic comparison of efficiency indicators for combined heat and power (CHP). *Energy*, 32, 2038–50, 2007.
- [26] A. Khaliq and T.A. Khan, Energetic and exergetic efficiency analysis of an indirect fired air-turbine combined heat and power system. *Int J Exergy*, 4(1), 38-53,2007.<https://doi.org/10.1504/IJEX.2007.011578>
- [27] G. Bidini, U. Desideri, S. Saetta and P.P. Bacchini, Internal combustion engine combined heat and power plants: Case study of the University of Perugia power plant. *Appl Thermal Eng*, 18, 401–12, 1998.
- [28] A. Castillo, Risk analysis and management in power outage and restoration: a literature survey. *Electr Power Syst.Res.*107:9-15, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.09.002>
- [29] J.H. Lee, T.S. Kim and E.H. Kim, Prediction of power generation capacity of a gas turbine combined cycle cogeneration plant, *Energy* 124, 187-197, 2017.
- [30] I.H. Witten and E. Frank, *Data mining : practical machine learning tools and techniques*. second ed. CA: MORGAN Kaufmann Publisher; p. 4-9, 2005.
- [31] Y. Song, C.W. Gu and X.X. Ji, Development and validation of a full-range performance analysis model for a three-spool gas turbine with turbine cooling. *Energy*, 89, 545-57, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.015>
- [32] J. Duan, L. Sun, G. Wang and F. Wu, Nonlinear modeling of regenerative cycle micro gas turbine. *Energy*, 91, 168-75, 2015.
- [33] Li YG. Gas turbine performance and health status estimation using adaptive gas path analysis. *J Eng Gas Turbines Power*, 041701, 132, 2010. <https://doi.org/10.1115/1.3159378>
- [34] J. Smrekar, D. Pandit, M. Fast, M. Assadi and S. De, Prediction of power output of a coal-fired power plant by artificial neural network. *Neural Comput Appl*, 19, 725-40, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00521-009-0331-6>
- [35] Y. Tunckaya and E. Koklukaya, Comparative prediction analysis of 600 MWe coal fired power plant production rate using statistical and neural-based models. *J Energy Inst*, 88, 11-8, 2015.
- [36] S.Z. Boksteen, J.P. Van Buijtenen, R. Pecnik and D. Van Der Vecht, Bayesian calibration of power plant models for accurate performance prediction. *Energy Convers. Manag.* , 83, 3, 14-24, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.073>
- [37] P. Tüfekci, Prediction of full load electrical power output of a base load operated combined cycle power plant using machine learning methods. *Int J Electr Power Energy Syst*, 60, 126-40, 2014.
- [38] F. Hajabdollahi, Z. Hajabdollahi, and H. Hajabdollahi, Soft computing based multi-objective optimization of steam cycle power plant using NSGA-II and ANN. *Applied Soft Computing*, 12, 3648–55, 2012.
- [39] O. Arslan, Power generation from medium temperature geothermal resources: ANN-based optimization of Kalina cycle system-34. *Energy*, 36, 2528–34, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.045>
- [40] M.V. J.J. Suresh, K.S. Reddy, and A.K. Kolar, ANN–GA based optimization of a high ash coal-fired supercritical power plant. *Applied Energy*, 88, 67–4873, 2011.

- [41] M.M. Rashidi, N. Galanis, F. Nazari, A. Basiri Parsa, and L. Shamekhi, Parametric analysis and optimization of regenerative Clausius and organic Rankine cycles with two feedwater heaters using artificial bees colony and artificial neural network. *Energy*, 36, 5728–40, 2011.
- [42] P. Olausson, D. Häggståhl, J. Arriagada, E. Dahlquist and M. Assadi, Hybrid model of an evaporative gas turbine power plant utilizing physical models and artificial neural network. *Proceedings of the ASME Turbo Expo. (2003) Atlanta, Georgia, USA., 2003.* <https://doi.org/10.1115/GT2003-38116>
- [43] S. De, M. Kaiadi, M. Fast and M. Assadi, Development of an artificial neural network model for the steam process of a coal biomass co-fired combined heat and power (CHP) plant in Sweden. *Energy*, 32, 2099–2109, 2007.
- [44] T. Bekat, M. Erdogan, F. Inal, and A. Genc, Prediction of the bottom ash formed in a coal-fired power plant using artificial neural networks. *Energy*, 45 882-7, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.075>
- [45] J. Ma, B.-S. Wang and Y.-G. Ma, ANN-based real-time parameter optimization via GA for superheater model in power plant simulator. *Proceedings of the 7th International Conference on Machine Learning and Cybernetics, ICMLC, 4, 2269–73, 2008.*
- [46] X. Du, L. Liu, X. Xi, L. Yang, Y. Yang, Z. Liu, Back pressure prediction of the direct air cooled power generating unit using the artificial neural network model. *Applied Thermal Engineering*, 31, 3009-14. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.05.034>
- [47] L. Pan, D. Flynn and M. Cregan, Statistical model for power plants performance monitoring and analysis. *Universities Power Engineering Conference, UPEC 2007, 121–126. 42nd International Conference. 2007.*
- [48] S. Lu and B.W. Hogg, Dynamic and nonlinear modelling of power plant by physical principles and neural networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 22, 67–78, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0142-0615\(99\)00036-8](https://doi.org/10.1016/S0142-0615(99)00036-8)
- [49] F. Fantozzi and U. Desideri, Simulation of power plant transients with artificial neural networks: application to an existing combined cycle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A*, 212, 299–313, 1998.
- [50] S. Tronci, R. Baratti and A. Servida, Monitoring pollutant emissions in a 4.8 MW power plant through neural network. *Neurocomputing*, 43, 3–15, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0925-2312\(01\)00617-8](https://doi.org/10.1016/S0925-2312(01)00617-8)
- [51] D. Flynn, J. Ritchie and M. Cregan, Data mining techniques applied to power plant performance monitoring. Paper presented at IFAC world congress, Prague, 2005.
- [52] C.E. Romero and J. Shan, Development of an artificial neural network-based software for prediction of power plant canal water discharge temperature. *Expert Systems with Applications*, 29, 831–838, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.06.009>
- [53] C.-T. Hsu, H.-J. Chuang and C.-S. Chen, Adaptive load shedding for an industrial petroleum cogeneration system. *Expert Systems with Applications*, 38 13967-974, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.204>
- [54] M. Moghavvemi, S.S. Yang and M.A. Kashem, A practical neural network approach for power generation automation. *Proceedings of Energy Management and Power Delivery. 1998 International Conference*, 1, 305–310, 1998.
- [55] A.B. Çolak, O. Yıldız, M. Bayrak and B.S. Tezekici, Experimental study for predicting the specific heat of water based Cu-Al₂O₃ hybrid nanofluid using artificial neural network and proposing new correlation, *International Journal of Energy Research*, 1-18, 2020. <https://doi.org/10.1002/er.5417>
- [56] MAN, 32/40 Project Guide – Stationary Four-stroke diesel engines, version 1.5, 2013.
- [57] M. Bayrak and A. Gungor, Fossil fuel sustainability: Exergy assessment of a cogeneration system, *Int. J. Energy Res*, 35, 162-68, 2011. <https://doi.org/10.1002/er.1759>
- [58] M.H. Esfe, M. Reiszadeh, S. Esfandeh and M. Afrand, Optimization of MWCNTs (10%) – Al₂O₃ (90%)/5W50 nanofluid viscosity using experimental data and artificial neural network, *Physica A* 512, 731–744, 2018.
- [59] A.B. Çolak, An experimental study on the comparative analysis of the effect of the number of data on the error rates of artificial neural networks, *International Journal of Energy Research*, 2020. <https://doi.org/10.1002/er.5680>
- [60] H. Khodadadi, D. Toghraie and A. Karimipour, Effects of nanoparticles to present a statistical model for the viscosity of MgO-Water nanofluid, *Powder Technology*, 342, 166-180, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.076>
- [61] M. Bayrak and A. Gungor, Efficiency assessment of a cogeneration system, *International Journal of the Physical Sciences* 6(28), 6439-49, 2011. <https://doi.org/10.5897/IJPS10.418>





The influence of perturbation motion over a slender delta wing under sideslip angle

Salınım hareketinin sapma açısı altındaki bir delta kanada etkileri

Mehmet Oğuz Taşcı¹ , Sergen Tümse¹ , Beşir Şahin^{1,*} , İlyas Karasu² , Hüseyin Akıllı¹ 

¹ Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Adana

² Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Adana

Abstract

In this study, the main objective is to reveal the change of the vortical flow characteristics on a slender delta wing with a sweep angle of $A=70^\circ$ under the alteration of three different sideslip angles of $\beta=0^\circ$, 4° , and 8° at three different main angles of attack of $\alpha_m=25^\circ$, 30° and 35° experimentally. Dye visualization experiments were conducted at a Reynolds number of $Re=2 \times 10^4$ to analyze qualitatively. The perturbation motion which has amplitudes of $\alpha_0=\pm 0.5^\circ$ and $\pm 1^\circ$ was applied continuously under the periods of time of $T_c=0.5s$, $1s$, and $2s$. However, the effects of the low-frequency perturbations to which the aircraft is exposed during the maneuver were examined. It is observed that Kelvin-Helmholtz in the case of the perturbed motion vortices is more prominent than static case results of the slender delta wing. The vortex breakdown location on the perturbed delta wing has been changed in a wider range than the static case of the delta wing at zero sideslip angle, β .

Anahtar kelimeler: Angle of attack, Delta wing, Dye visualization, Perturbation motion, Sideslip angle

1 Introduction

Due to high lift and maneuver capacity, delta wings are usually employed on Unmanned Combat Aerial Vehicles (UCAVs), Unmanned Air Vehicles (UAVs), and Micro Air Vehicles and fighter jets. Munro et al. [1] expressed that delta wings are categorized as slender and non-slender depending on the sweep angle, A . They stated that if A is higher than or equal to 65° , it is named as slender otherwise, it is categorized as a non-slender delta wing. The vortex breakdown is one of the key parameters which is very influential on the aerodynamic performance and the structure of leading-edge vortices around the delta wing. Because the breakdown of the leading-edge vortices and unsteady flow structure disrupt the performance of the aircraft, so that reason the control of vortex breakdown is vital. Cui et al. [2] stated that the vortex breakdown has a profound impact on the aerodynamic forces of an aircraft. At the same time, the vortex breakdown causes the drag coefficient, C_D , to increase as it decreases lift coefficient, C_L . Vortex bursting can be identified as a quick dilatation of the structure of vortical flow and profound alteration of its velocity field and the existence of great-scale fluctuations as stated by Delery [3] and Payne et al. [4]. The phenomenon of vortex breakdown can be observed in three different types, namely bubble, spiral, and double helix type vortex breakdown. Figure 1 shows the various types of vortex breakdown. In the

Özet

Bu çalışmada, süpürme açısı $A=70^\circ$ olan narin (slender) delta kanadın girdaplı akış yapısındaki değişimi, sapma açısı $\beta=0^\circ$, 4° ve 8° karşısındaki değişimi, üç farklı ortalama hücum açısında $\alpha_m=25^\circ$, 30° ve 35° boya deneyi incelemesi amaçlanmıştır. Boya ile nitel görselleştirme deneyleri, $Re=2 \times 10^4$ gerçekleştirilmiştir. Kanat modeli istenilen açıda sabitlenerek ve elde edilen deney sonuçları dikkate alınarak, $\alpha_0=\pm 0.5^\circ$ ve $\pm 1^\circ$ genişliğinde ve $T_c=0.5s$, $1s$ ve $2s$ periyotlarında kanata sürekli salınım hareketi verilerek girdap çökmesinin belirli ölçüde kontrolü sağlanmaya çalışılmıştır. Ancak, uçağın manevra sırasında maruz kaldığı düşük frekanslı bozulmaların etkileri incelenmiştir. Kelvin-Helmholtz girdaplarının narin delta kanadın daimi salınım hareketi verilen durumunda statik vaka sonuçlarından daha belirgin olduğu gözlenmektedir. Narin delta kanatlarının sıfır sapma açısı, β salınımı hareketi anında; girdap çökme konumu statik durumdan daha geniş bir aralıkta ileri ve geri hareket etmektedir.

Keywords: Boya ile görselleştirme, Delta kanat, Hücum açısı, Salınım hareketi, Sapma açısı.

investigation of Gursul et al. [5], it was expressed that the structure of the vortical flow of a delta wing is made up of two counter-rotating leading-edge vortices. Moreover, they resulted that separated flow from leading edge forms a curved free shear layer rolling up into a core. Vortex meandering can be attributed to the non-linear interaction of small-scale vortices produced by Kelvin-Helmholtz instability and neighboring large-scale vortices (primary vortex). Jaquin et al. [6] offered different physical reasons for vortex meandering; nonstable leading-edge vortices caused by unsteadiness of test facility, the turbulence in the neighboring shear layer; non-linear interactions of various instability mechanisms; and progression of unsteadiness from the test model. Beresh et al. [7] stated that the turbulence arising at the test facility wall contributes to the vortex meandering by energizing the incoming boundary layer. For further information about vortex meandering, refer to [8-10]. The vortex breakdown and its effect on the performance of aerodynamic systems and flow characteristics on the wing were studied by several authors [11-17]. The flow over a slender delta wing demonstrates a profound viscous effect at low Reynolds numbers, $Re=10^3$ - 10^4 . Further increase of Reynolds number more than $Re=10^4$, the impact of viscosity is decreased and at the Reynolds number, $Re=2 \times 10^4$, the profound viscous effect is attenuated, and the flow reaches the asymptotic state. Further increase of the Reynolds number induces just small variations on the

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: bsahin@cu.edu.tr (B. Şahin)

Geliş / Received: 15.08.2020 Kabul / Accepted: 22.12.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.780989

flow structure of the delta wing. Erickson [18] expressed that the flow characteristics on a slender delta wing is not dependent on the Reynolds number for $Re > 10^4$ at high angles of attack. Gursul [19] revealed that high-velocity fluctuations in the vortex core are not dependent on the Reynolds number and model geometry.

The breakdown of leading-edge vortices and transient flow structure can be suppressed by different flow control methods. Gursul et al. [20] revealed that different flow control techniques could be employed to the delta wings to postpone the breakdown of leading-edge vortices and reattach the separated flow to the delta wing surface. In the study of Shen et al. [21], the asymmetrical aerodynamic structure of a 75° swept delta wing was tried to control by the plasma method at the Reynolds number, $Re = 5 \times 10^4$. They stated that an earlier vortex breakdown happened in the region where the plasma control technique was applied while the breakdown of leading-edge vortices was suppressed in the zone free from the method of plasma control. In the study of Hadidoolabi and Ansarian [22], the flow structure around 60° swept delta wing having sharp leading edges exposed to pitching maneuver at a variety of starting and final angles was computationally investigated from subsonic to supersonic flow regimes. They found that the chordwise location of leading-edge vortex bursting moved upstream and following the termination of maneuver. The impact of the rotating propeller on the vortical flow structure of the delta-winged unmanned aerial vehicle with sharp leading edges was studied by Zain et al. [23]. The results demonstrated that a rotating propeller on the model augments the aerodynamic efficiency of the delta-winged

unmanned aerial vehicle. The other result that can be inferred from this study is that the rotating propeller retards the vortex breakdown. It is vital in applications to have knowledge about the aerodynamic properties of the delta wing in unstable motion. The nature of the breakdown structure and the advance of the separated flow region on the surface of the slender delta wing having $\Lambda = 75^\circ$ at higher angles of attack such as $\alpha = 24^\circ, 30^\circ, 32^\circ$, and 35° were examined by Ozgoren et al. [24]. As a conclusion of their results, it is showed that the size of the downstream of the vortical flow over the slender delta wing increased to a higher level by the enhancement of the angle of attack, α . Also, the region of turbulent flow was widened, and turbulent fluctuation levels increased rapidly. Buzica et al. [25] experimentally worked on active flow control by using pulsed blowing on a slender delta wing having a sweep angle of $\Lambda = 65^\circ$ at high angles of attack such as $\alpha = 23^\circ, 35^\circ$ and 45° . The high aspect ratio slots were placed along the leading edges of the slender delta wing to blow percussively. In this study, the angles of attack, α are adjusted in three different zones: pre-stall zone, stall zone, and post-stall zone. The aerodynamic coefficients increase with the angle of attack, α up to the pre-stall zone. However, as the angle of attack, α increases further, the aerodynamic coefficients begin to decrease. Cetin et al. [26] expressed that the active flow control technique with periodic blowing along the leading edge of the wing is very effective in preventing the regional separation over the surface of the wing. The steady blowing through the leading edge of the wing changed the flow characteristics substantially and this blowing is very influential to diminish three-dimensional flow separation as indicated in the study of Zharfa et al [27].

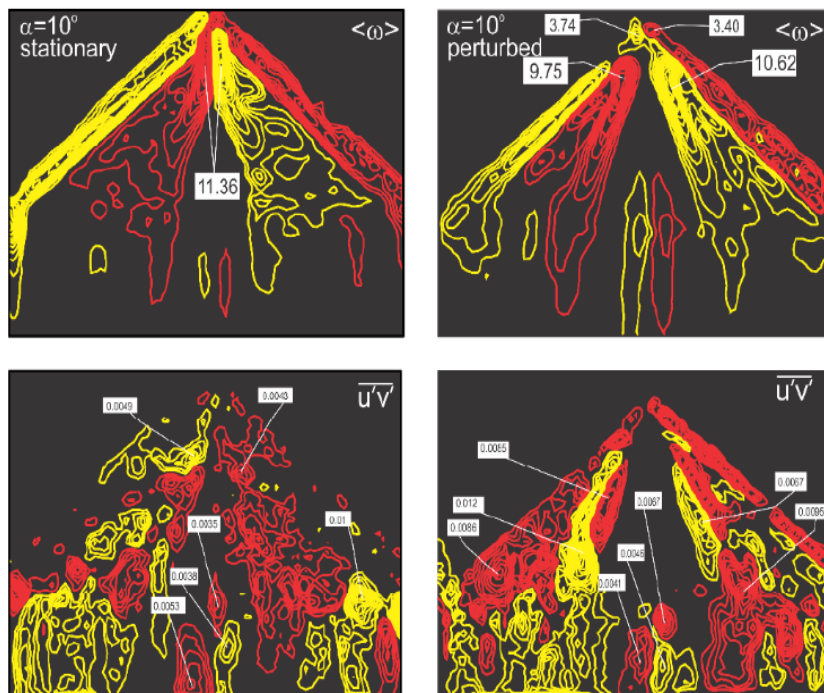


Figure 1. The patterns of time-averaged vorticity and transverse velocity components for the delta wing under perturbed and static conditions at a mean angle of attack, $\alpha_m = 10^\circ$ [28].

Canpolat et al. [28] studied the turbulence statistics experimentally, and the structure of leading-edge vortices over 40° swept diamond and delta wings. The wings were exposed to perturbation with the amplitude of $\alpha_0 = \pm 0.5^\circ$ and oscillation period of $T_e = 0.5s$. The dye visualization and quantitative observation using the stereo particle image velocimetry (SPIV) were conducted to inquire flow structure for α_m within the range of $7^\circ \leq \alpha_m \leq 17^\circ$. Fig. 1 demonstrates the structures of time-averaged vorticity and transverse velocity components for the delta wing under perturbed and static conditions at $\alpha_m = 10^\circ$.

In the investigation of Ozgoren [29], the change of the structure of leading-edge vortex and vortex breakdown on a delta wing under the sinusoidally pitching motion was investigated experimentally. He reported that the structure of the vortex core and the vortex breakdown region depends on the amplitude of the angle of attack, α . Also, the impact of reduced frequency, K and time lag on the structure of vortical flow was studied. Yanıktepe and Rockwell [30] revealed that when the wing is perturbed with a small amplitude, the magnitude and distributions of instantaneous and time-averaged flow structure alters significantly. The dynamic behavior of leading-edge vortices over a pitching delta wing which has a 70° sweep angle, Λ was researched by LeMay et al. [31]. They reported that when the delta wing is sinusoidally pitched, the hysteresis is observed. This hysteresis rises with increasing reduced frequency, K . A

delta wing with a sweep angle of $\Lambda = 30^\circ$ was perturbed at a constant pitch rate from 0° to 60° to investigate the impact of perturbed motion on the flow characteristics in the research of Gilliam et al. [32]. He found that the consistency and size of leading-edge vortices rise with increasing pitch rate. Moreover, it was noted that the location of the vortex breakdown does not change during the period of starting the pitching motion. In the work of Reynolds and Abtahi [33], a delta wing was pitched at a constant rate of $K = 0.06$ for angles of attack within the range of $30^\circ \leq \alpha \leq 51^\circ$ at Reynolds numbers, $Re = 19 \times 10^3$ and 65×10^3 . They stated that large time delays are detected related to the vortex breakdown position comparing to the static case, and hysteresis was observed in the response of the vortex flow between the pitching-up and pitching-down cases. Gursul and Wang [34] conducted an experimental work over a 75° swept delta wing to search the vortex breakdown core. It was reported that the root means square (RMS) values at the origin of the vortex breakdown decrease at the lower Reynolds number, Re . Because the shear layer does not exhibit the instability of Kelvin-Helmholtz (K-H), but it is observed that after a critical Reynolds number, Re , the shear layer is dominated by a vortical flow structure because of the instability of Kelvin-Helmholtz (K-H). LeMay et al. [35] examined the dynamic characteristics of the leading-edge vortices over a pitching delta wing which has a 70° sweep angle, Λ .

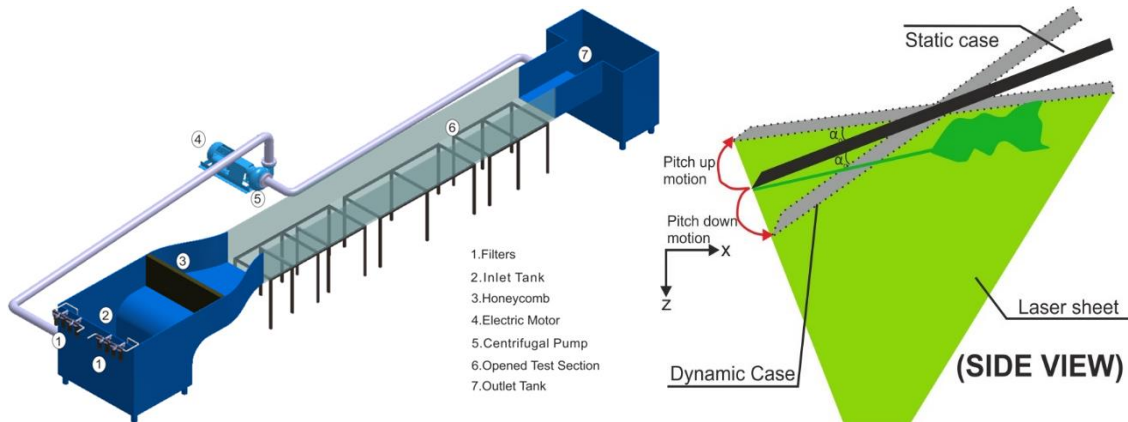


Figure 2. The schematic representation of the water channel and the perturbation motion of the delta wing.

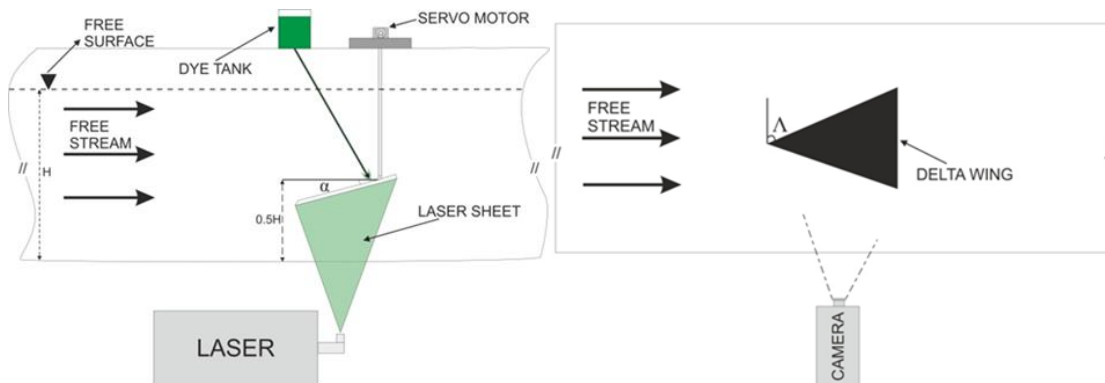


Figure 3. The schematic representation of the setup of the perturbation motion.

The reduced frequency, K is defined as $2\pi fC/U_{ref}$ where f is the oscillation frequency, C is the chord of the delta wing, U_{ref} is the free-stream velocity. When the delta wing was sinusoidally pitched, the hysteresis is observed [35]. This hysteresis increases with increasing the reduced frequency, K . Grismer and Nelson [36] investigated the impact of the oscillating motion on the aerodynamic behavior of double delta wing under the sideslip angle, β . They emphasized that the discrepancy of the vortex breakdown positions between upstroke and downstroke pitching motion of the delta wing can be altered further by increasing K . In the survey of Ozgoren and Sahin [37], the delta wing was pitched for three different value of angles of attack, $\alpha=20^\circ$, 24° , and 30° at an amplitude of perturbation $\alpha_0=10^\circ$ at a lower frequency. It was observed that the vortex breakdown, leading-edge vortices, and separation region substantially influenced during the pitching motion of the delta wing, and the structure of vortical flow alters as a function of oscillations.

The purpose of this investigation is to reveal the impact of perturbation of the delta wing on the vortex bursting location and vortical flow characteristics by employing dye visualization technique under sideslip angle, β . Also, the interaction between leading-edge vortices and delta wing surfaces after the vortex breakdown was studied. The studies from the literature that commonly expose the impact of the sideslip angle, β on the aerodynamics of the non-slender delta wings. The aim of the current study aims to provide comprehensive information about the physics of flow on the slender delta wing with the sweep angle of $\Lambda=70^\circ$ in the side-view plane. Particularly, considering the variations of sideslip angle, β and the perturbation motion, there is not enough research work providing information about the aerodynamics of slender delta wing with $\Lambda=70^\circ$ in the side-view plane under the variations of α , β and T_e using the dye

visualization technique. In this study, it is also aimed to examine how the low amplitude movement behaves along the delta wing surface and its effects on the leading-edge vortices and the interactions during the maneuver of the delta wing affected by the variations of α , β and T_e . The ability of the delta wing is impaired under the variation of α , β and T_e . The point that distinguishes this study from previous studies is to analyze the variation of the aerodynamic features on the slender delta wing with $\Lambda=70^\circ$ visualizing sets of instantaneous images to reveal the physics of flow in detail, qualitatively.

2 Material and method

Experiments were performed in a closed-loop free surface water tunnel with dimensions of 8 m length, 1 m width and 0.75 m height. The water channel consists of Plexiglas material having a thickness of 15 mm. There are two water tanks on this channel; one of them is positioned at the entrance, and the other one is placed at the outlet of the water tunnel. There is a contraction section of 2:1 ratio to ensure the passage between the water tank at the inlet and test section of the water channel. A honeycomb located before the contraction section of 2:1 ratio is used to regulate upstream flow and turbulence intensity. There are small cylindrical pipes in the honeycomb which prevent fluctuations in the water. The particular design of the water tunnel and the use of the flow regulator provide the turbulence intensity to be kept below 0.4 %. The speed and circulation of the water in the channel are adjusted by a centrifugal pump with a 15kW power capacity which can operate at different speeds with the help of a frequency control unit. The water tunnel is schematically displayed in Figure 2.

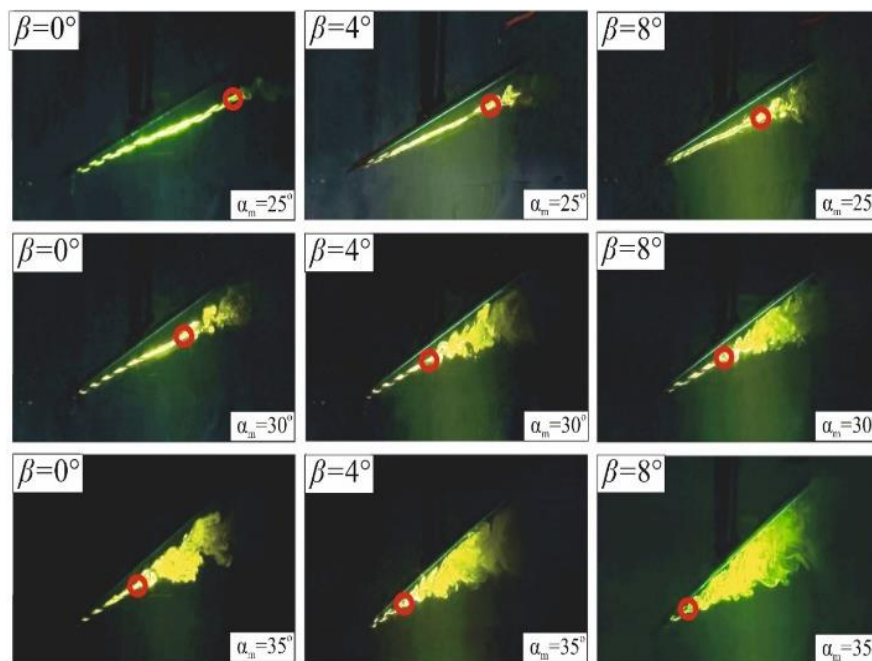


Figure 4. The representation of dye visualization experiments for the static case under the alteration of three different sideslip angles of $\beta=0^\circ$, 4° , and 8° at the main angle of attack of $\alpha_m=25^\circ$, 30° , and 35° .

The dye flow visualization technic is known as the way which presents prior or qualitative knowledge about the vortical flow structure formed on the delta wing. In dye flow visualization experiments, a Rhodamine 6G type fluorescent dye that shines under the laser light having 532 nm wavelengths was utilized to detect the leading-edge vortices around the delta wing. This fluorescent dye was mixed with water before the experiment. The dye was injected over the delta wing from the tank placed at a certain height with the help of a thin hose. The needle at the end of this hose was located in the channel formed through the central axis of the delta wing. The dye reached the tip of the delta wing by moving along this channel. A Sony HD-SR1 camera was employed to capture images acquired during the experiments. The experimental setup of the dye flow visualization is schematically demonstrated in Figure 3. In the present study, the 70° swept delta wing with a 25 cm chord length, C was used and located in the middle of the flow.

3 Results and discussion

The images of dye visualization experiments, having a low amplitude of $\alpha_0 = \pm 0.5^\circ$ and $\pm 1^\circ$ and perturbation periods of $T_e = 0.5s, 1s, \text{ and } 2s$ at a Reynolds number of $Re = 2 \times 10^4$, of a highly swept ($\Lambda = 70^\circ$) slender delta wing under the change of three different yaw angles of $\beta = 0^\circ, 4^\circ, \text{ and } 8^\circ$ at three different main angles of attack of $\alpha_m = 25^\circ, 30^\circ, \text{ and } 35^\circ$, are shown in Figure 5 to Figure 10. In the dye visualization experiments, it was attempted to investigate the effects of perturbation motion on the breakdown of the leading-edge vortices at low amplitude, α_0 and low perturbation periods, T_e . The dye visualization experiments were carefully watched and it was seen that the locations of the vortex breakdown of the leading-edge vortices sometimes moved

towards the tip of the delta wing and sometimes towards the trailing edge of the delta wing and this vortical flow motion has no periodic structure. A similar motion of the vortex breakdown was also detected in the static case of the delta wing. However, the breakdown position of the leading-edge vortex on the perturbed delta wing has been changed in a wider range than the static case of the delta wing at $\beta = 0^\circ$. After watching the dye video recordings carefully, it was observed that the vortex breakdown period was approximately 0.5s, and the period time of the perturbation motion was accordingly determined as $T_e = 0.5s, 1s, \text{ and } 2s$. In addition, perturbing the slender delta wing with the frequency which was taken more than an order of magnitude higher or lower than the inherent frequency of vortex breakdown in discrete mode was aimed to see the impact of perturbation motion. The dye video recordings are long enough to observe the development of the natural vortex structure, and they are in the range, approximately 5-10 minutes.

Considering the dye visualization results obtained by the given yaw angles, β and main angles of attack, α_m for the edge of the delta wing, exposed to the wind, having the amplitude of $\alpha_0 = \pm 0.5^\circ$ and $\pm 1^\circ$ and the perturbation periods of $T_e = 0.5s, 1s \text{ and } 2s$ or the frequency which was taken more than an order of magnitude higher or lower than the inherent frequency of vortex breakdown or equal to the inherent frequency, it was tried to see the possibility of controlling the location of the onset of the vortex breakdown of the slender delta wing. Low perturbation periods, T_e and perturbation amplitudes, α_0 were used to determine the vortex breakdown points of leading-edge vortices by dye visualization experiments and to compare with static case results as shown in Figure 4.

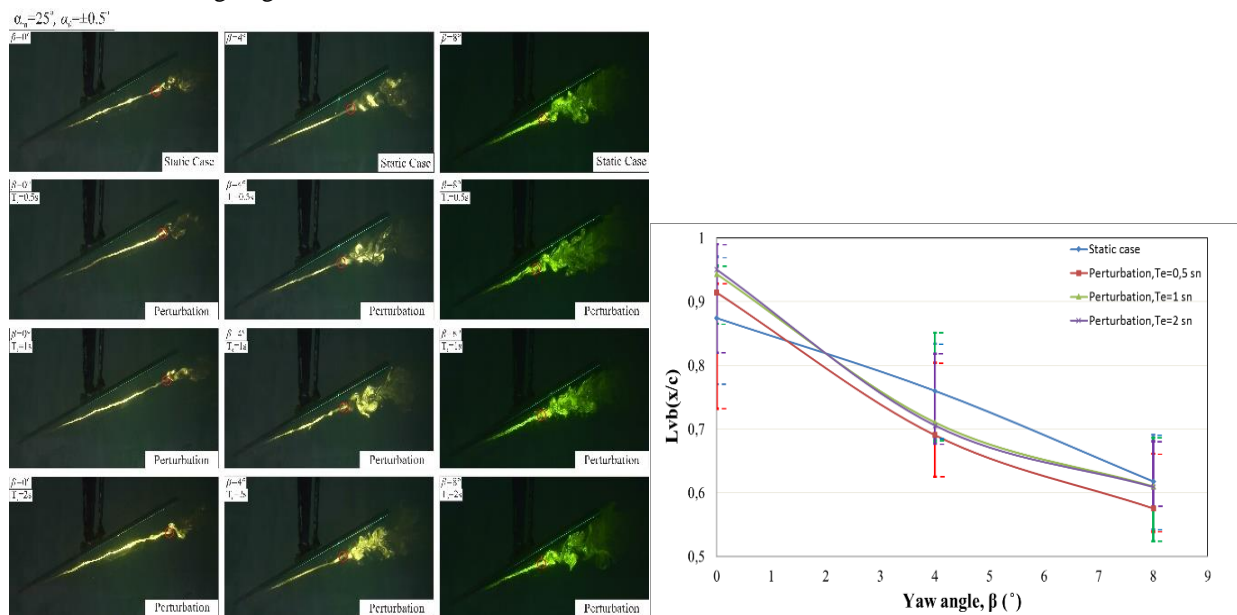


Figure 5. The presentation of dye visualization experiments, having low amplitude ($\alpha_0 = \pm 0.5^\circ$) and perturbation periods ($T_e = 0.5s, 1s, \text{ and } 2s$) under the alteration of three different yaw angles of $\beta = 0^\circ, 4^\circ, \text{ and } 8^\circ$ at three different main angles of attack of $\alpha_m = 25^\circ$ and the effect of low amplitude perturbation conditions on the mean vortex breakdown locations, x/C .

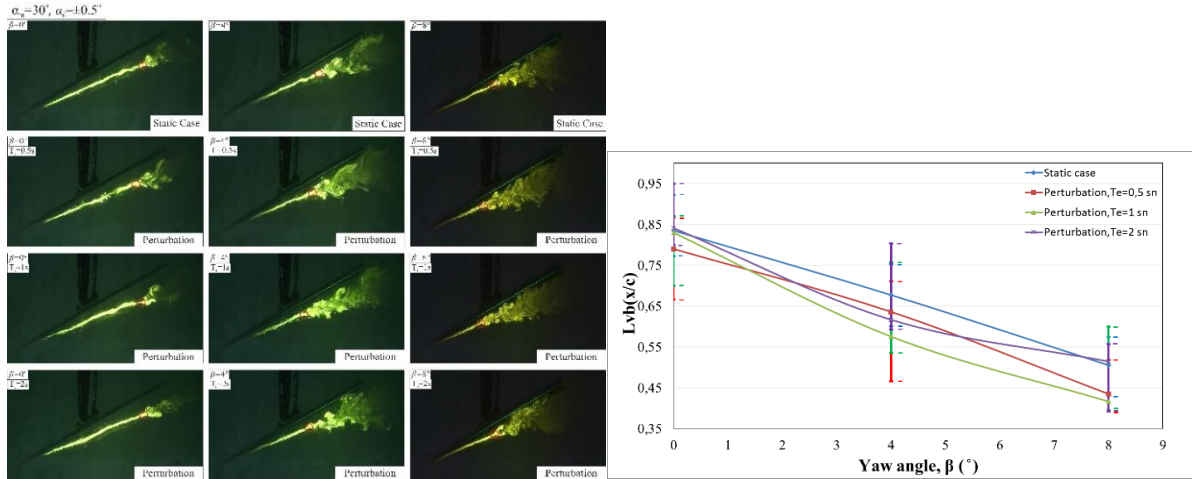


Figure 6. The presentation of dye visualization experiments, having low amplitude ($\alpha_0=\pm 0.5^\circ$) and perturbation periods ($T_e=0.5s, 1s,$ and $2s$) under the alteration of three different yaw angles of $\beta=0^\circ, 4^\circ,$ and 8° at three different main angles of attack of $\alpha_m=30^\circ$ and the effect of low amplitude perturbation conditions on the mean vortex breakdown locations, x/C .

The permanent sinusoidal perturbation motion given to the delta wing is defined by the expression of $\alpha(t)=\alpha_m+\alpha_0\sin\omega_e t$ where the angular velocity is $\omega_e=2\pi f_e$, α_m is the mean angle of attack, α_0 is the amplitude of the perturbation, and $t=T_e$ is the period of perturbation motion. The effect of low amplitude perturbation conditions on the average vortex breakdown locations was interpreted. The vortex breakdown location, x/C was numerically given in Figures 5-7. In the first line of dye visualization images, the delta wing was kept constant at different angles of attack, α_m . In the other three lines of the figures, the change of vortex breakdown location of the leading-edge vortices under perturbation motion was given. The circle indicated by the red color in the dye visualization images shows the vortex breakdown location of the leading-edge vortices. The graph

just below the images shows how the vortex breakdown point behaves against the perturbation motion according to the yaw angle, β for each case of the experiments.

As shown in Figure 5, the mean attack angle of the delta wing is taken as $\alpha_m=25^\circ$. And, the angular amplitude of the perturbation motion was taken as $\alpha_0=0.5^\circ$. The period of wing perturbation was applied as $T_e=0.5s, 1s,$ and $2s$. Low periods of perturbation time, T_e and amplitude of the perturbation motion, α_0 were used to determine the collapse points of wingtip vortices by dye experiments compared with static delta wing results. As shown in the figure, when the perturbation motion is given to the delta wing at zero yaw angle, β , the vortex breakdown location was moved from $x/C=0.87$ to $x/C=0.95$ in the periods of time of $T_e=1s$ and $2s$.

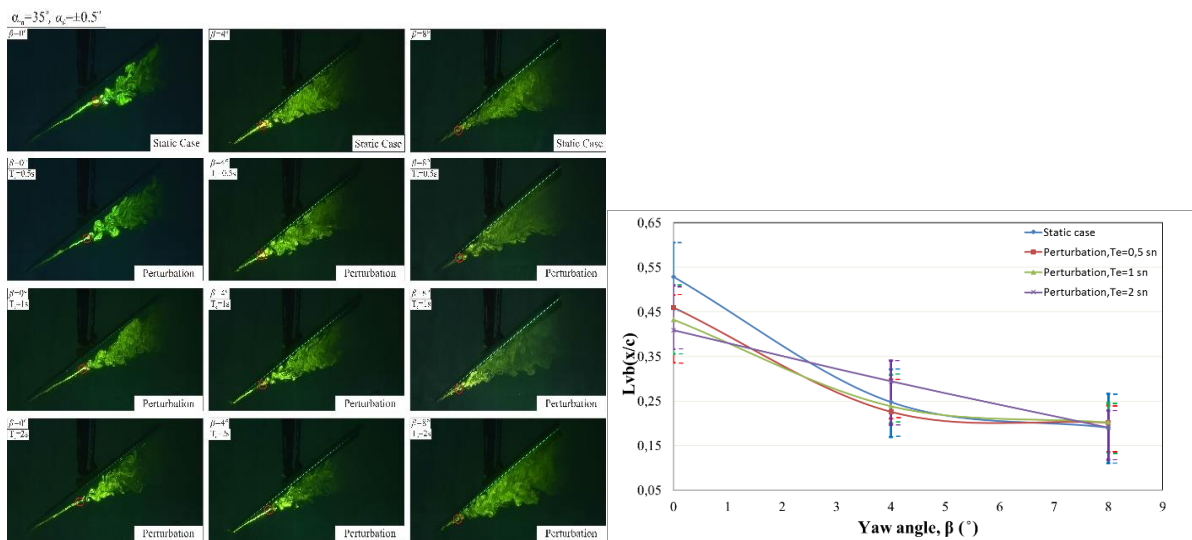


Figure 7. The presentation of dye visualization experiments, having low amplitude ($\alpha_0=\pm 0.5^\circ$) and perturbation periods ($T_e=0.5s, 1s,$ and $2s$) under the alteration of three different yaw angles of $\beta=0^\circ, 4^\circ,$ and 8° at three different main angles of attack of $\alpha_m=35^\circ$ and the effect of low amplitude perturbation conditions on the mean vortex breakdown locations, x/C .

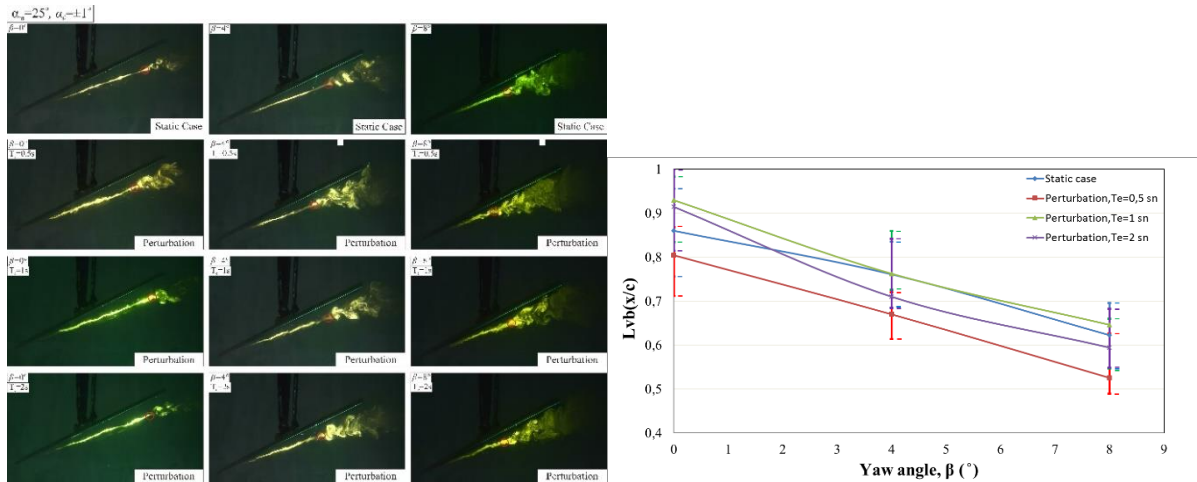


Figure 8. The representation of dye visualization experiments, having low amplitude ($\alpha_0=\pm 1^\circ$) and perturbation period ($T_e=0.5s, 1s,$ and $2s$) under the alteration of three different sideslip angles of $\beta=0^\circ, 4^\circ,$ and 8° at three different main angles of attack of $\alpha_m=25^\circ$ and the effect of low amplitude perturbation conditions on the mean vortex breakdown locations, x/C .

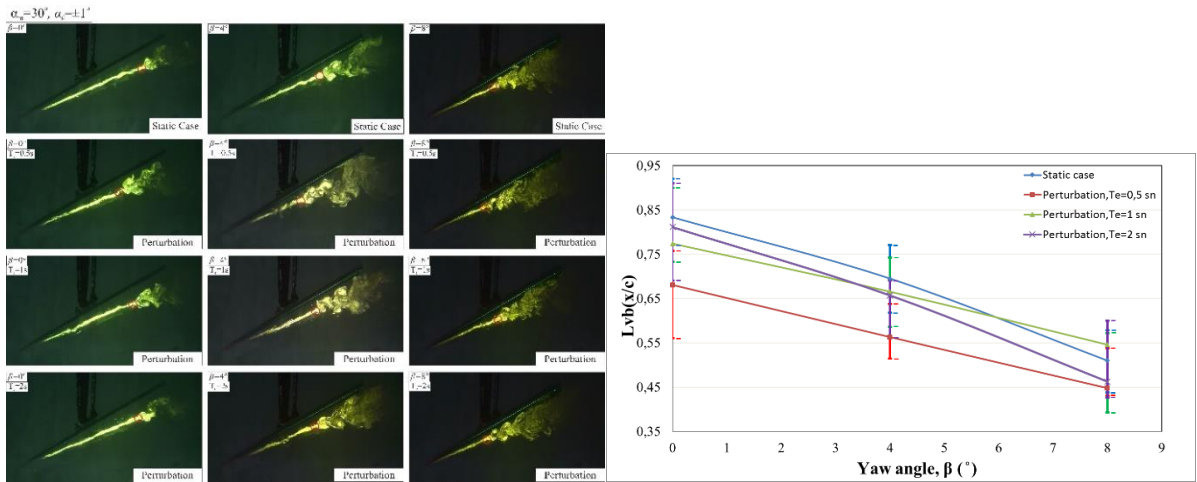


Figure 9. The representation of dye visualization experiments, having low amplitude ($\alpha_0=\pm 1^\circ$) and perturbation period ($T_e=0.5s, 1s,$ and $2s$) under the alteration of three different sideslip angles of $\beta=0^\circ, 4^\circ,$ and 8° at three different main angles of attack of $\alpha_m=30^\circ$ and the effect of low amplitude perturbation conditions on the mean vortex breakdown locations, x/C .

As known, water is an incompressible fluid. While the delta wing is in perturbation motion, the delta wing operates pushing the water in the direction of flow even though it is a very short distance. This movement gives the water some energy. In other words, there is an increase in the kinetic energy of water. On the other hand, there is a slight reduction in the kinetic energy of the leading-edge vortices, moving in the direction of free stream flow, creating a slight volumetric gap on the trailing edge of the delta wing. It is thought that this will not affect the vortex breakdown point in the opposite direction as the perturbation time, T_e is very short. However, when the β is set to 4° , the vortex breakdown position is moved from $x/C=0.76$ to 0.70 . When β is shifted to 8° , it is seen that the vortex breakdown point is moved forward compared to the static case of the delta wing.

As shown in Figure 6, the mean angle of attack, α , and amplitude of the perturbation motion were taken as $\alpha_m=30^\circ$ and $\alpha_0=\pm 0.5^\circ$, respectively. The period of wing perturbation was changed as $T_e=0.5s, 1s$ and $2s$. One of the important parameters in determining the perturbation periods, T_e is that the natural frequency of the vortices occurring at the vortex breakdown point of the leading-edge vortices is around $0.5s$ on average. Therefore, the determined period values of perturbation motion were multiples of the natural frequency of the vortices. In general, when the mean angle of attack of the delta wing, α_m is increased to 30° , the vortex breakdown point approaches the tip of the delta wing. As explained extensively in the previous dye experiments, the vortex breakdown locations, x/C approach tip of the delta wing at all three periodic values of perturbation motion.

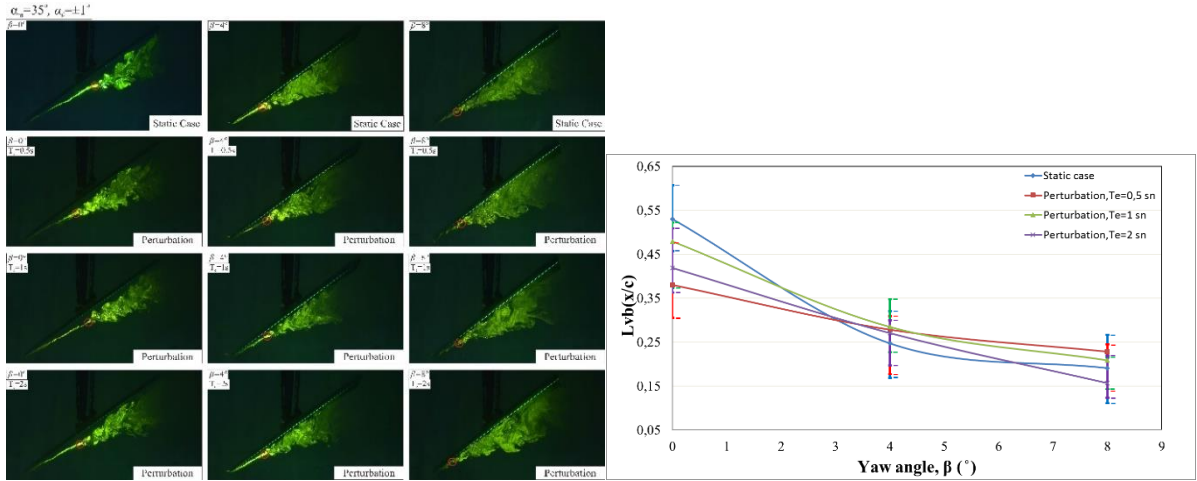


Figure 10. The representation of dye visualization experiments, having low amplitude ($\alpha_0=\pm 1^\circ$) and perturbation period ($T_e=0.5s, 1s,$ and $2s$) under the alteration of three different sideslip angles of $\beta=0^\circ, 4^\circ,$ and 8° at three different main angles of attack of $\alpha_m=35^\circ$ and the effect of low amplitude perturbation conditions on the mean vortex breakdown locations, x/C .

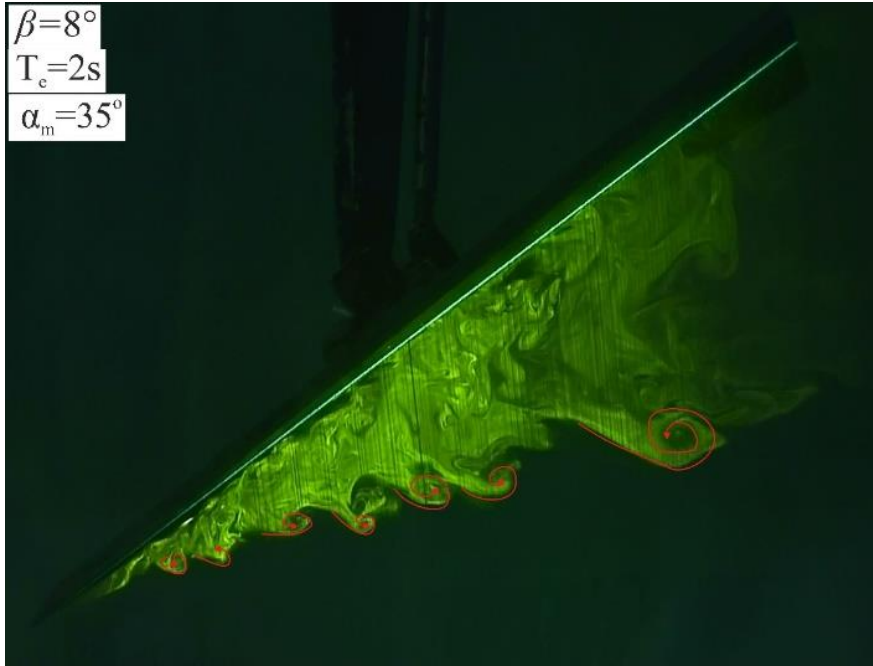


Figure 11. The presentation of the clear vision of the Kelvin-Helmholtz vortices over the delta wing.

As seen in Figure 7, the mean angle of attack, α , and amplitude of the perturbation motion were taken as $\alpha_m=35^\circ$ and $\alpha_0=\pm 0.5^\circ$, respectively. The period of delta wing perturbation was changed as $T_e=0.5s, 1s$ and $2s$. In the case of yaw angle of $\beta=4^\circ$ and perturbation period, $T_e = 2s$, the vortex breakdown location, x/C moves towards the trailing edge of the delta wing, and in the case of yaw angle of $\beta=0^\circ$, the perturbation movements involving all periods, T_e carried the vortex breakdown location, x/c to the tip of the delta wing. When the yaw angle, β is 8° , the perturbation effect is almost negligible compared to the static case.

As shown in Figure 8, the average angle of attack, α , and amplitude of the perturbation motion were taken as $\alpha_m=25^\circ$ and $\alpha_0=\pm 1^\circ$, respectively. The period of wing perturbation

was changed as $T_e=0.5s, 1s$ and $2s$. One of the critical parameters in determining the perturbation periods, T_e is that the natural frequency of the vortices occurring at the vortex breakdown point of the leading-edge vortices is around $0.5s$ on average. Therefore, the determined period values of perturbation motion were multiples of the natural frequency of the vortices.

Also, in Figure 9, when the perturbation motion is given to the delta wing at zero sideslip angle, β , the vortex breakdown point was moved from $x/C=0.86$ to 0.92 in $T_e=1s$ and $2s$ periods. However, the vortex breakdown point was partially moved towards the tip of the delta wing at the period of perturbation motion of $T_e=0.5s$.

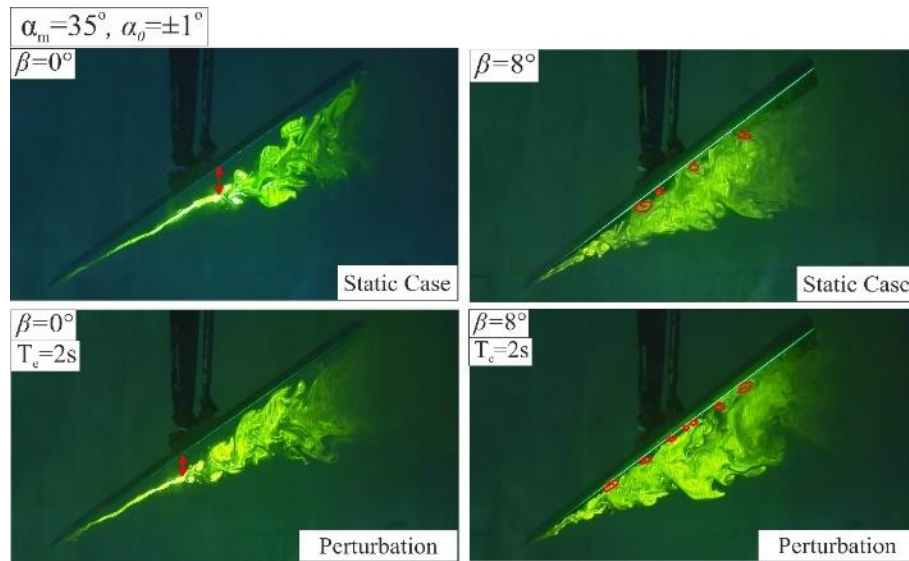


Figure 12. The presentation of the interaction between leading-edge vortices and delta wing surface.

It was seen that the experimental results give different results in the perturbation motions at different periods. In general, the vortex breakdown point is arbitrary in the direction of free flow or vice versa. In other cases (the perturbed delta wing) the vortex breakdown point also is not constant.

The average angle of attack, α and amplitude of the perturbation motion were taken as $\alpha_m=35^\circ$ and $\alpha_0=\pm 1^\circ$, respectively as shown in Figure 10. The period of wing perturbation was changed in the range of $T_e=0.5s$, $1s$, and $2s$, similarly. It was observed that the vortex breakdown point was moved further to the tip of the delta wing at the double value of the natural frequency of the perturbation motion. As shown in Figure 4, the average angle of attack, α , and amplitude of the perturbation motion were taken as $\alpha_m=35^\circ$ and $\alpha_0=\pm 1^\circ$, respectively. The period of wing perturbation was changed in the range of $T_e=0.5s$, $1s$, and $2s$, similarly. The difference between the experiments of static and perturbation motion decreases as the sideslip angle, β increases.

As shown in Figure 11, Kelvin-Helmholtz vortices become more pronounced with the increment of the sideslip angle, β . The perturbation motion also plays an important role in the clarification of these vortices. As a result of the low amplitude perturbation motion, the delta wing is exposed to unsteady loading. When the unsteady loading exceeds a certain value, the buffeting occurs. The perturbation motion, which causes vibration, also allows the Kelvin-Helmholtz vortices to be seen more clearly from the side-view plane of the delta wing.

The interaction between leading-edge vortices and delta wing surfaces after the vortex breakdown was also observed. Before referring to the control of the vortex flow with perturbation motion, it is evidence that the increase in sideslip angle, β causes the leading-edge vortices to approach the surface of the delta wing as shown in Figure 12. In addition, the interaction between the surface of the delta wing and the flow structure increases when the perturbation motion under the sideslip angle, β increases. The vibration

movement having a small amplitude, α_0 applied to the delta wing causes the increase of the unsteady loads. Since the buffeting occurs according to the high intensity of the vibrations, the maneuverability is reduced.

4 Conclusion

The images of dye visualization experiments of a $A=70^\circ$ swept delta wing under the alteration of three different sideslip angles of $\beta=0^\circ$, 4° , and 8° at three different main angles of attack of $\alpha_m=25^\circ$, 30° , and 35° were performed at a Reynolds number of $Re=2 \times 10^4$ to analyze qualitatively. The perturbation motion which has amplitudes of $\alpha_0=\pm 0.5^\circ$ and $\pm 1^\circ$ was applied continuously under the periods of time of $T_e=0.5s$, $1s$, and $2s$ or the frequency which was taken more

than an order of magnitude higher or lower than the inherent frequency of vortex breakdown or equal to the inherent frequency in order to see the possibility of controlling the location of the onset of the vortex breakdown of the slender delta wing. In addition, perturbing the slender delta wing with the frequency which was taken more than an order of magnitude higher or lower than the inherent frequency of vortex breakdown in discrete mode was aimed to see the impact of perturbation motion. In this research, it is seen that the low perturbation period, T_e and small amplitude, α_0 values did not cause significantly large differences compared to the static case. It is estimated that the numerical values of the leading-edge vortices generated by perturbation motion may be greater. It is observed that Kelvin-Helmholtz vortices are more prominent than the static case results of the slender delta wing. The breakdown position of the leading-edge vortex, x/C on the perturbed delta wing, has been changed in a wider range than the static case of the delta wing at zero sideslip angle, $\beta=0^\circ$. It was also observed that the locations of the vortex breakdown of the leading-edge vortices, x/C sometimes moved towards the tip of the delta wing and sometimes towards the trailing edge of the delta wing, and this vortical flow motion has no periodic structure. A similar vortex breakdown motion was observed in the static case of the delta wing. In addition, the interaction

between leading-edge vortices and delta wing surfaces after the vortex breakdown was also observed. The interaction between the surface of the delta wing and the flow structure increases when the perturbation motion under the sideslip angle, β increases. Since the buffeting occurs according to the high intensity of the perturbation motion, the maneuverability of the delta wing is restricted.

Acknowledgement

The research described in this paper was financially supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey under contract no: 114M497. Additional financial support was also received from the Scientific Research Project Office of Çukurova University under contract no: FDK-2019-11368.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %14

References

- [1] C. Munro, P. Krus, and C. Jouannet, Implications of scale effect for the prediction of high angle of attack aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 41 (3-4), 301–22, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2005.05.001>
- [2] Y. D. Cui, T. T. Lim, and H. M. Tsai, Control of Vortex Breakdown over a Delta Wing Using Forebody Spanwise Slot Blowing. *AIAA Journal*, 45 (1), 110–117, 2007. <https://doi.org/10.2514/1.22575>
- [3] J. M. Delery, Aspects of vortex breakdown. *Progress in Aerospace Sciences*, 30 (1), 1–59, 1994. [https://doi.org/10.1016/0376-0421\(94\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0376-0421(94)90002-7)
- [4] F. M. Payne, and R.C. Nelson, An experimental investigation of vortex breakdown on a delta wing. NASA Technical Report, N86-27196, 1986.
- [5] I. Gursul, Z. Wang, and E. Vardaki, Review of flow control mechanisms of leading-edge vortices. *Progress in Aerospace Sciences*, 43 (7-8), 246–70, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2007.08.001>
- [6] Jaquin, J., Fabre, D., Geffroy, P., and Coustols, E., The Properties of a Transport Aircraft Wake in Extended Near Field: An Experimental Study. 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA Paper 2001-1038, USA 2001. <https://doi.org/10.2514/6.2001-1038>
- [7] S. J. Beresh, J. H. Henfling, and R. W. Spillers, Meander of a fin trailing vortex and the origin of its turbulence. *Experiments in Fluids*, 49 (3), 599–611, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00348-010-0825-0>
- [8] G. V. Iungo, Wandering of a wing-tip vortex: rapid scanning and correction of fixed-point measurements. *Journal of Aircraft*, 54, 1-12, 2017. <https://doi.org/10.2514/1.C034120>
- [9] I. Gursul, and W. S. Xie, Origin of vortex wandering over delta wings. *Journal of Aircraft*, 37 (2), 348–50, 2000. <https://doi.org/10.2514/2.2603>
- [10] A. L. Heyes, R. F. Jones, and D. A. Smith, Wandering of wing-tip vortices. *Proceedings of the 12th International Symposium of Applied Laser Technologies for Fluid Mechanics*, Lisbon, 2004.
- [11] I. Gursul, M. Allan, and K. Badcock, Opportunities for the integrated use of measurements and computations for the understanding of delta wing aerodynamics. *Aerospace Science and Technology*, 9 (3), 181–189, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2004.08.007>
- [12] I. Heron and R. Myose, On the impingement of von karman vortex street on a delta wing. 22nd Applied Aerodynamics Conference and Exhibit, Rhode Island USA, 16-19 August 2004. <https://doi.org/10.2514/1.12808>
- [13] B. Sahin, H. Akilli, J.-C. Lin, and D. Rockwell, Vortex Breakdown-Edge interaction: Consequence of edge oscillations. *AIAA Journal*, 39, 865–76, 2001. <https://doi.org/10.2514/2.1390>
- [14] R. C. Nelson and A. Pelletier, The unsteady aerodynamics of slender wings and aircraft undergoing large amplitude maneuvers. *Progress in Aerospace Sciences*, 39 (2-3), 185–248, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(02\)00088-X](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(02)00088-X)
- [15] O. Lucca-Negro and T. O'doherty, Vortex breakdown: a review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 27 (4), 431–481, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(00\)00022-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(00)00022-8)
- [16] A. M. Mitchell and J. Détery, Research into vortex breakdown control. *Progress in Aerospace Sciences*, 37 (4), 385–418, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(01\)00010-0](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(01)00010-0)
- [17] Z.-Y. Lu and L.-G. Zhu, Study on forms of vortex breakdown over delta wing. *Chinese Journal of Aeronautics*, 17 (1), 13–16, 2004. [https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(11\)60196-9](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(11)60196-9)
- [18] G. E. Erickson, Water-tunnel studies of leading-edge vortices. *J. Aircr.* 19 (6): 442–448, 1982. <https://doi.org/10.2514/3.57414>
- [19] I. Gursul, Review of unsteady vortex flows over slender delta wings. *J. Aircr.* 42 (2): 299–319, 2005. <https://doi.org/10.2514/1.5269>
- [20] I. Gursul and Z. Wang, Flow control of tip/edge vortices. *AIAA Journal*, 56 (5), 1731-49, 2018. <https://doi.org/10.2514/1.J056586>
- [21] L. Shen, C.-Y. Wen, and H.-A. Chen, Asymmetric flow control on a delta wing with dielectric barrier discharge actuators. *AIAA Journal*, 54 (2), 652–8, 2016. <https://doi.org/10.2514/1.J054373>
- [22] M. Hadidoolabi and H. Ansarian, Computational investigation of vortex structure and breakdown over a delta wing at supersonic pitching maneuver. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(2), 78, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1021-z>
- [23] N. M. Zain, S. Mat, K. A. Kasim, M. Shuhaimi, Md. Nizam Dahlan, N. Othman, Wind tunnel experiments on a generic sharp-edge delta wing UAV Model. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Science*, 40 (1), 18-26, 2017.
- [24] M. Ozgoren, B. Sahin, and D. Rockwell, Vortex structure on a delta wing at high angle of attack. *AIAA*

- Journal, 40(2), 285-292, 2002. <https://doi.org/10.2514/2.1644>
- [25] A. Buzica, J. Bartasevicius, and C. Breitsamter, Experimental investigation of high-incidence delta-wing flow control. *Experiments in Fluids*, 58 (9), 131, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00348-017-2408-9>
- [26] C. Cetin, A. Celik, and M. M. Yavuz, Control of flow structure over a nonslender delta wing using periodic blowing. *AIAA Journal*, 56 (1), 90–9, 2017. <https://doi.org/10.2514/1.J056099>
- [27] M. Zharfa, I. Ozturk, and M. M. Yavuz, Flow structure on nonslender delta wing: reynolds number dependence and flow control. *AIAA Journal*, 54 (3), 880–97, 2016. <https://doi.org/10.2514/1.J054495>
- [28] C. Canpolat, B. Sahin, S. Yayla, and H. Akilli, Effects of perturbation on the flow over nonslender delta wings. 45th AIAA Fluid Dynamics Conference, 2015. <https://doi.org/10.2514/6.2015-2307>
- [29] M. Ozgoren, Impingement of vortex breakdown upon an edge: flow structure and origin of loading. Ph. D. Thesis, Çukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, Adana, 2000.
- [30] B. Yaniktepe and D. Rockwell, Flow structure on a delta wing of low sweep angle. *AIAA Journal*, 42 (3), 513–23, 2004. <https://doi.org/10.2514/1.1207>
- [31] S. P. Lemay, S. M. Batill, and R. C. Nelson, Vortex dynamics on a pitching delta wing. *Journal of Aircraft*, 27 (2), 131–38, 1990. <https://doi.org/10.2514/3.45908>
- [32] F. Gilliam, J. Wissler, J. Walker, and M. Robinson, Visualization of unsteady separated flow about a pitching delta wing. 25th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 1987. <https://doi.org/10.2514/6.1987-240>
- [33] G. Reynolds and A. Abtahi, Instabilities in leading-edge vortex development. 5th Applied Aerodynamics Conference, USA, 1987.
- [34] I. Gursul and W. Xie, Buffeting flows over delta wings. *AIAA Journal*, 37, 58–65, 1999. <https://doi.org/10.2514/2.664>
- [35] S. Lemay, S. Batill, and R. Nelson, Leading edge vortex dynamics on a pitching delta wing. 6th Applied Aerodynamics Conference, USA, 1988.
- [36] D. S. Grismer and R. C. Nelson, Double-delta-wing aerodynamics for pitching motions with and without sideslip. *Journal of Aircraft*, 32 (6), 1303–11, 1995. <https://doi.org/10.2514/3.46879>
- [37] M. Ozgoren and B. Sahin, Effect of pitching delta wing on vortex structures with and without impingement plate. *Turkish J. Eng. Env. Sci*, 26, 325-43, 2002.



Hidrojen neden potansiyel bir ulaşım yakıtı olarak seçilmelidir? Why to select hydrogen as a potential transportation fuel?

Ayfer Veziroğlu^{1,*} 

¹ International Association for Hydrogen Energy, 5794 SW 40th Street #303, Miami, FL 33155

Özet

Hidrojen, hidrojen bazlı enerji sistemine geçişte önemli bir rol oynayacak bir ulaşım yakıtıdır. Doğru enerji kaynağı ile birleştirildiğinde, hidrojen enerji sistemi, herhangi bir ulaşım sektörünün en yüksek potansiyel verimliliğine ve en düşük potansiyel emisyonuna sahiptir. Bu yazının amacı, son yirmi yıldaki bazı ulaşım teknolojisi araştırma ve geliştirme çalışmalarını vurgulamaktır. Bu mevcut çabalar çeşitli bölümlerin iyileştirilmesine ayrılmıştır: motivasyon faktörü, çok yönlülük, kullanım verimliliği, güvenlik ve kirlilik azaltma. Yakıt hücresi son kullanımı da dahil olmak üzere tüm hidrojen tedarik zincirinin çevresel ve ekonomik değerlendirmeleri dünyanın dört bir yanındaki araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmektedir. Analizler, hidrojen enerji sisteminin muhtemelen hem ekonomik olarak rekabetçi hem de çevre dostu olacağını gösteriyor. Nitekim, ulaşım sektörünün hidrojen yakıtı kullanımına geçişi, kirliliğin azaltılmasına yönelik en büyük adımlardan birini temsil edecektir.

Anahtar kelimeler: Hidrojen taşımacılığı, Ulaşım yakıtları, Hidrojen enerji sistemi, Hayat boyu değerlendirme

1 Giriş

Bir ulaşım yakıtı (veya basitçe hidrojen yakıtı) olarak hidrojen üzerine yapılan araştırmaların çoğu, hafif hizmet araçlarına odaklanmıştır [1–8]. Örneğin, yakın tarihli Temiz Enerji Geleceği araştırması, hafif hizmet araçları için bir düzineden fazla alternatif yakıt konfigürasyonunu içermekte, ancak nakliye araçları için bir konfigürasyon içermemektedir [9, 10]. Hafif hizmet araçları ulaşım yakıtı kullanımına hâkim olduğundan, bunlara yapılan vurgu, ulaşım politikası çalışmalarında anlaşılabilir bir durumdur, ancak hidrojen odaklı araştırmalar da bu vurguyu eleştirmeden benimsemektedir. Uçak uygulamalarının çeşitli analizleri [11–17], ağır araçların kısa ve sporadik ifadeleri [18, 19] ve hidrojen ekonomisinin en erken ayrıntılı çalışması gibi birkaç istisna mevcuttur [20].

Arabalarımızı kullanırken kirliliği azaltmanın en iyi yolu emisyonlu araçlar satın almaya başlamaktır. Mevcut arabalarımızı propan veya doğal gaz gibi alternatif karbon bazlı yakıtlarla çalıştırmamız gerektiği de savunulmaktadır. Bu yakıtlar benzin veya dizelden daha temiz olsa da [21], [22] kaçınılmaz olarak fosil yakıtlardır, tedarikleri sınırlıdır ve bunların sera gazı katkılarının petrol bazlı yakıtlar ile yaklaşık aynı olması beklenmektedir. Başka bir deyişle hâlâ kirlilicidirler. Gerçekte, her bir yakıtın yanması ile bir miktar emisyon üretilmektedir. Motordan gelen ısı azot oksitler üretirken, yanan yakıt ve karter yağı hidrokarbon üretir [23]. Bu kirlilikten tamamen kurtulmanın tek yolu elektrik motorları kullanmaktır [24]. Elektrik motoru

Abstract

Hydrogen is a transportation fuel that will play a major role in the transition toward a hydrogen-based energy system. When combined with the right source of energy, the hydrogen energy system has the highest potential efficiencies and lowest potential emissions of any transportation sector. The aim of this paper is to highlight some of the transportation technology research and development work from the past twenty years. These current efforts are divided into the improvement of several parts: motivity factor, versatility, utilization efficiency, safety and pollution reduction. Environmental and economic assessments of the entire hydrogen supply chain, including fuel cell end-use, are being carried out by researchers around the world. Analyses show that the hydrogen energy system will likely be both economically competitive and environmentally friendly. Indeed, the transition of the transportation sector to the use of hydrogen fuel will represent one of the biggest steps toward pollution reduction.

Keywords: Hydrogen transportation, Transportation fuels, Hydrogen energy system, Well to wheel analysis

kullanan araçlar tamamen emisyonludur ve genellikle elektrikli bataryalardan, güneşten veya hidrojen yakıt hücrelerinden alırlar.

Batarya ile çalışan elektrikli arabaların içten yanmalı motorlara göre emisyonlu olması, daha verimli olması ve kaçınılmaz olarak aşınan ve kırılan daha az hareketli parçaya sahip olması gibi birçok avantajı mevcuttur. Bununla birlikte, bataryalarda menzil, şarj süresi, boyut ve ağırlıkla ilgili sorunlar bulunmaktadır. Tipik olarak yaklaşık 100 mil olan kısa sürüş menzili, uzun mesafelerde sürüş için pratik değildir çünkü şarj edilmesi 8 saate kadar sürmektedir [22]. Ayrıca mevcut kurşun asitli bataryalar, benzin depolarına göre 17 kat daha fazla yere ve 45 kat daha fazla ağırlığa sahiptir (15 galon benzine eşdeğer bir sürüş menzili için 45 fit küp alan ve 6750 pound) [23]. Ford, General Motors ve Chrysler, bu sorunları çözmek için şu anda mevcut olanlardan daha iyi bataryalar üzerinde birlikte çalışmaktadırlar [25].

Temiz elektrik motorları hâlâ kullanırken bataryalara en iyi kirlilik içermeyen alternatif hidrojen yakıt hücresidir. Hidrojenle çalışan "yakıt hücreleri, gelecek nesil otomobiller için bir güç kaynağı olarak muazzam bir umut vaat ediyor" [26]. Ayrıca bataryaların sahip olduğu kısıtlamalara da sahip değildiler.

Hidrojen, bir yakıt hücresinde kirlilik içermeyen bir kimyasal reaksiyonla (yanma değil) tüketilir. Yakıt hücresi basitçe, elektrik, su ve atık ısı üretmek için hidrojen ve oksijeni kimyasal olarak birleştirir [22]. Hidrojen, elektroliz işlemi ile sudan elde edilebilir. Ancak elektrikli güç

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ayferveziroglu@iahe.org (A. Veziroğlu)
Geliş / Recieved: 31.10.2020 Kabul / Accepted: 04.01.2021 Yayınlanma / Published: 15.01.2021
doi: 10.28948/ngumuh.819048

santrallerinden almanın sebep olacağı dış etkiler unutulmamalıdır. Ülke genelinde bataryaları şarj etmek veya hidrojen üretmek için elektrik üreten birçok enerji santrali, kömür gibi karbon bazlı yakıtlarla çalışmakta ve dolayısıyla emisyon üretmektedir [22].

Farklı yakıt hücresi çeşitleri olmasına rağmen otomobiller için en uygun olanı Proton Değişim Membran (PEM) yakıt hücresidir. PEM yakıt hücrelerinin başlıca özellikleri, hızlı devreye alınabilme ve orta sıcaklıklarda (1900 °F yerine 150 °F) çalışabilme yeteneğidir. Bu durum, çalışması için çok fazla ısı gerektirmediği için avantajlıdır. PEM yakıt hücresi kompakt ve hafiftir. Ayrıca, maksimum verimliliği olan %60 (hidrojenden motora elektrik olarak verilen enerji), içten yanmalı motorların verimliliğinden yaklaşık 3 kat daha fazladır (çünkü yanmadan elde edilen enerjinin çoğu, pistonlar aşağı doğru itilmeden önce ısı ve sürtünme yoluyla kaybedilmektedir.) [23].

Toplumda hidrojenin güvenliği konusunda endişeler mevcuttur. Hidrojen bir yakıttır ve dolayısıyla yanıcıdır. Diğer yakıtlar gibi hidrojenin de yanma özellikleri incelenmelidir. Hidrojen, 1937 yılında New Jersey'de Hindenburg'un trajik bir şekilde alev alan ve yanan görüntüsü ile hatırlanmaktadır. Kazada 62 kişi kurtulmuş 35 kişi hayatını kaybetmiştir; ölümlerin 27'si zeplinden atlamaktan kaynaklanmıştır. Ölümlerin bir kısmı ise dizel yakıt yangınından kaynaklanan yanık ve yaralanmalara atfedilirken yanan hidrojenden kimse ölmemiştir [22, 27]. "Neyse ki, hidrojen özellikle tehlikeli bir yakıt değildir. Sızması veya dökülmesi durumunda hidrojen benzinden çok daha hızlı dağılır ve buharlaşır, bu da patlama tehlikesini en aza indirir" [22]. Hidrojen de benzin gibi diğer doğası gereği tehlikeli yakıtlar gibi dikkatli ve güvenli bir şekilde kullanılabilir. Hidrojen tankları, birçok zorlu güvenlik testinden geçmiştir. 1650 °F'ın üzerinde 70 dakikaya kadar tamamen alevler içinde tutulmuş, katı nesnelere (zırh delici mermiler gibi) delinmiş ve emniyet valfleri tamamen tıkanarak kırılıncaya kadar sıkıştırılmıştır. Bazen gaz dışarı sızmıştır, bazen yanmıştır ama asla patlamamıştır [28]. Gerçek hayattaki kullanım durumlarında, düşük sıcaklıktaki hidrojen gazı ve bu sıcaklıklarda düşük adyabatik genleşme enerjisi, tutuşma olmadığı sürece daha düşük patlama riski anlamına gelir. Kriyojenik sıcaklıklar, bu tür sıcaklıklarla çalışmak için derecelendirilmemiş basınç tahliye vanalarının arızalanmasına neden olabilir [29].

Birçok büyük ve tanınmış şirket, hidrojenin potansiyeline güvenip bu potansiyele sahip çıkmaktadır. Yollarda halihazırda hidrojen yakıtlı araçları bulunan bazı şirketler aşağıda verilmiştir [30]:

- BMW yakın zamanda Toyota ile iş birliği içinde "BMW i Hydrogen Next" konseptini tanıtmıştır. 2005 ile 2007 yılları arasında BMW, içten yanmalı motorunda hidrojen kullanan, dünyanın ilk üretime hazır hidrojen aracı Hydrogen 7 lüks otomobilini üretmiştir.

- Honda FCX (Fuel Cell eXperimental) ilk olarak 2002'de tanıtılmıştır. 2006 ve 2008'de iki yeni model piyasaya sürülmüştür. 2016'da "Honda Clarity Fuel Cell" olarak yeniden markalaştırılmıştır.

- Audi Q5 Hibrit Yakıt Hücresi (HFC) Mayıs 2011'de Almanya'nın Berlin kentinde, A7 Quattro h-tron ise 2016'da Detroit'te tanıtılmıştır.

- Hyundai Blue2 FCEV 2011'de piyasaya sürülmüştür ve şu anda Nexo SUV'u pazarlamaktadır.

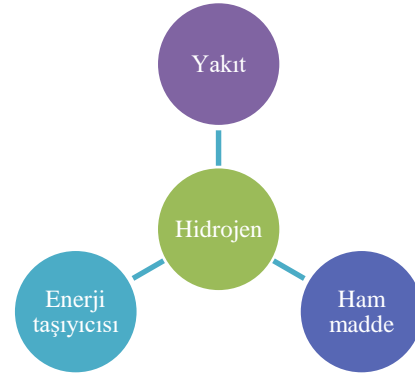
- Ballard Power Systems, yakıt hücreleri ile hidrojen yakıt hücreli otobüs ve kamyonlar geliştirmekte ve satmaktadır [22, 23]. Çeşitli bireyler ve üniversiteler de hidrojen araçlarını araştırmakta ve geliştirmektedir.

2 Değerlendirme kriterleri

Bu bölümde değerlendirme için gerekli bazı parametreler (çok yönlü kullanım imkânı, çevre dostu olması, sürdürülebilir olması, tahrik etme faktörü ve verim avantajı) ele alınıp değerlendirilecektir. Hidrojenin avantajlı olduğu alanlar göz önünde bulundurularak neden bir ulaşım yakıtı olarak seçilmesinin gerekliliği açıklanacaktır.

2.1 Çok yönlü kullanım imkânı

Hidrojenin Şekil 1'de gösterildiği gibi en önemli sayılabilecek üç ana işlevi bulunmaktadır. Bunlar enerji taşıyıcısı, yakıt ve diğer alternatif yakıtlar (metanol, etanol, dimetil eter ve amonyak) ve kimyasallar için hammadde olarak kullanılabilmesidir.



Şekil 1. Hidrojenin en önemli üç ana işlevi

Hidrojenin yakıt olarak en önemli avantajı çok yönlülüğüdür. Hidrojen çeşitli kaynaklardan türetilmektedir: doğal gaz, biyokütle ve kömür gibi hidrokarbonlardan ve yenilenebilir, nükleer veya fosil kaynaklardan üretilen elektrik kullanılarak suyun elektrolizinden. Ayrıca, yeni üretim yolları da mevcuttur: örneğin, hidrojen üreten bakteriler ve güneş veya nükleer enerjiden yüksek sıcaklıklar kullanarak suyu ayırmak uygun seçeneklerdir. Bu çok yönlülük, enerji sistemlerinin çeşitlendirilmesini ve güvenliğini artırabilir [31]. Ayrıca, rüzgâr ve biyokütle temelli enerji kaynakları hem uzun vadeli kullanılabilirlik hem de coğrafi dağılım açısından fosil yakıt bazlı enerji kaynaklarından daha güvenlidir. Hidrojen üretildikten sonra enerjiyi ihtiyaç duyulan yere taşımak için kullanılabilir ve daha sonra ulaşım, ısı veya faydalı güç gibi bir enerji hizmeti sağlamak için bir yakıt hücresinde veya bir motorda enerjiye dönüştürülebilir.

2.2 Çevre dostu olması

Hayat boyu değerlendirme analizi, farklı yakıtlar ve araç tahrik sistemleriyle ilişkili enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını değerlendirmeye yönelik bir sistem yaklaşımıdır. Bir hayat boyu değerlendirme analizi, yakıtın kuyuda üretildiği andan tekerleklerin hareket ettiği ana kadar sürecin her aşamasında enerji kullanımını ve emisyonları hesaba katar. Örneğin, bu tür bir analiz kullanılarak, dizel içten yanmalı motora sahip bir araç ile doğal gazdan elde edilen hidrojeni kullanan yakıt hücreli bir araç hem emisyon hem de enerji kullanımını açısından doğrudan karşılaştırılabilir. Hidrojen yakıt hücreli araçlar düşünüldüğünde bu özellikle önemlidir, çünkü hidrojen üretme yöntemlerinden bazıları temiz ve verimli iken bazıları kirletici ve enerji yoğunluğu yüksektir [32].

Biri Avrupa'da diğeri Kuzey Amerika'da olmak üzere aşağıdaki çalışmalar, çok çeşitli yakıtlar ve araç tahrik sistemleri için enerji kullanımının ve sera gazı emisyonlarının (CO₂) hayat boyu değerlendirme analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

- General Motors, Ludwig Bolkow Systemtechnik, BP, ExxonMobil ve Shell tarafından 2002 yılında "Gelişmiş Yakıt/Araç Sistemlerinin Enerji Kullanımı ve Sera Gazı Emisyonlarının Hayat Boyu Değerlendirme Analizi - Bir Avrupa Çalışması".

- TotalFinaElf, Mayıs 2002. General Motors, Argonne Ulusal Laboratuvarı, BO, ExxonMobil ve Shell tarafından "Gelişmiş Yakıt/Araç Sistemlerinin Hayat Boyu Değerlendirme Analizi ile Enerji Kullanımı ve Sera Gazı Emisyonları - Kuzey Amerika Analizi", Haziran 2001.

AB çalışması, yenilenebilir enerjiler haricinde, doğal gazdan üretilen sıkıştırılmış hidrojeni kullanan yakıt hücreli hibrit araçların (FCHV), hayat boyu değerlendirme analizlerine göre en düşük sera gazı (GHG) emisyonlarına sahip olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca, yenilenebilir rüzgâr enerjisi kaynaklı elektrolizden üretilen hidrojen FCHV'lerde kullanıldığında, hayat boyu değerlendirme analizlerine göre en az miktarda enerji tüketirler/gerektirirler. Burada rüzgâr enerjisi kaynaklı elektrolizden elde edilen hidrojenle ilişkili sera gazı emisyonları sıfırdır. Mevcut AB güç karışımı kaynaklı elektroliz yoluyla üretilen hidrojeni kullanan FCHV'ler, Şekil 2. (a) ve 2. (b)'de gösterildiği gibi elektriği üretmek için kömür ve diğer fosil yakıtların kullanılması nedeniyle hem enerjiyi yoğun olarak tüketir hem de yüksek sera gazı emisyonlarına sebep olmaktadır.

Kuzey Amerika çalışması da doğal gazdan dönüştürülmüş sıkıştırılmış hidrojen kullanan FCHV'lerin, konvansiyonel benzinli ve dizel araçlardan daha düşük enerji kullanımına (Btu/mil) sahip olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde sera gazı emisyonları da doğal gazdan dönüştürülmüş hidrojen kullanan FCHV'ler için hayat boyu değerlendirme analizlerine göre en düşük seviyededir. Elektrolizden üretilen hidrojeni ve mevcut ABD güç karışımını kullanan FCHV'lerin Şekil 3. (a) ve 3. (b)'de gösterildiği gibi ABD elektrik gücünün çoğunun kömürden ve diğer fosil kaynaklardan elde edilmesi nedeniyle enerji yoğunluğu ve sera gazı emisyonları yüksektir. Kuzey

Amerika çalışması, yenilenebilir enerjiden üretilen hidrojeni araştırmamıştır.

2.3 Sürdürülebilir olması

Enerji çözümlerinin ekonomiyi, çevreyi ve gelecek nesillerin kaynaklarını ve sürdürülebilirliği olumsuz etkilemeden küresel enerji sorunlarını ele alması beklenmektedir. Hidrojen, karbonsuz bir yakıt olarak yan etkisi en az olan enerji çözümlerinden biridir. Temiz enerji çözümleri, daha iyi sürdürülebilirlik için aşağıdaki hedeflere ulaşmayı amaçlamaktadır:

- daha iyi kaynak kullanımı,
- daha iyi verimlilik,
- daha iyi çevre,
- daha iyi maliyet etkinliği,
- daha iyi tasarım ve analiz ve
- daha iyi enerji güvenliği.

2.4 Tahrik etme faktörü

Su üstü araçları ve uçaklar, yakıt ikmali yapmadan önce yakıtlarını belli bir mesafe taşımalıdır. Uzay taşımacılığı durumunda da uzay araçları, planlanan menzilleri için gerekli olan oksidanın yanı sıra yakıtlarını da taşımalıdır. Bu nedenle, ulaşım yakıtının olabildiğince hafif olması ve mümkün olduğunca az yer kaplaması önemlidir. Bu gereksinimleri, tahrik etme faktörü olarak adlandırılan boyutsuz bir sayı altında birleştirebiliriz [33]:

$$\phi_M = \frac{\left(\frac{E}{M}\right)\left(\frac{E}{V}\right)^{\frac{2}{3}}}{\left(\frac{E_h}{M_h}\right)\left(\frac{E_h}{V_h}\right)^{\frac{2}{3}}} \quad (1)$$

burada E yakıt tarafından üretilen enerjidir, M yakıtın kütlesi, V yakıtın hacmi ve alt simge olarak h hidrojeni belirtmektedir. Tahrik etme faktörü ne kadar yüksekse, ulaşım için yakıt o kadar iyi olmaktadır. Tablo 1, bazı yakıtların ilgili özelliklerini ve Denklem (1) kullanılarak hesaplanan tahrik etme faktörlerini listelemektedir. Sıvı yakıtlar arasında LH₂ en iyi tahrik etme faktörüne sahipken, metanolün en düşük tahrik etme faktörüne sahip olduğu görülebilir. Gaz yakıtlar arasında GH₂ en iyi tahrik etme faktörüne sahiptir.

Hidrojenin kullanım verimliliği avantajı göz önüne alındığında, hidrojenin en iyi ulaşım yakıtı olma özelliğini daha da iyileştirir. Hidrojenin şu anda fosil yakıtlardan daha pahalı olmasına rağmen, dünyadaki uzay programları için tercih edilen yakıt olmasının nedenlerinden biri de budur [34].

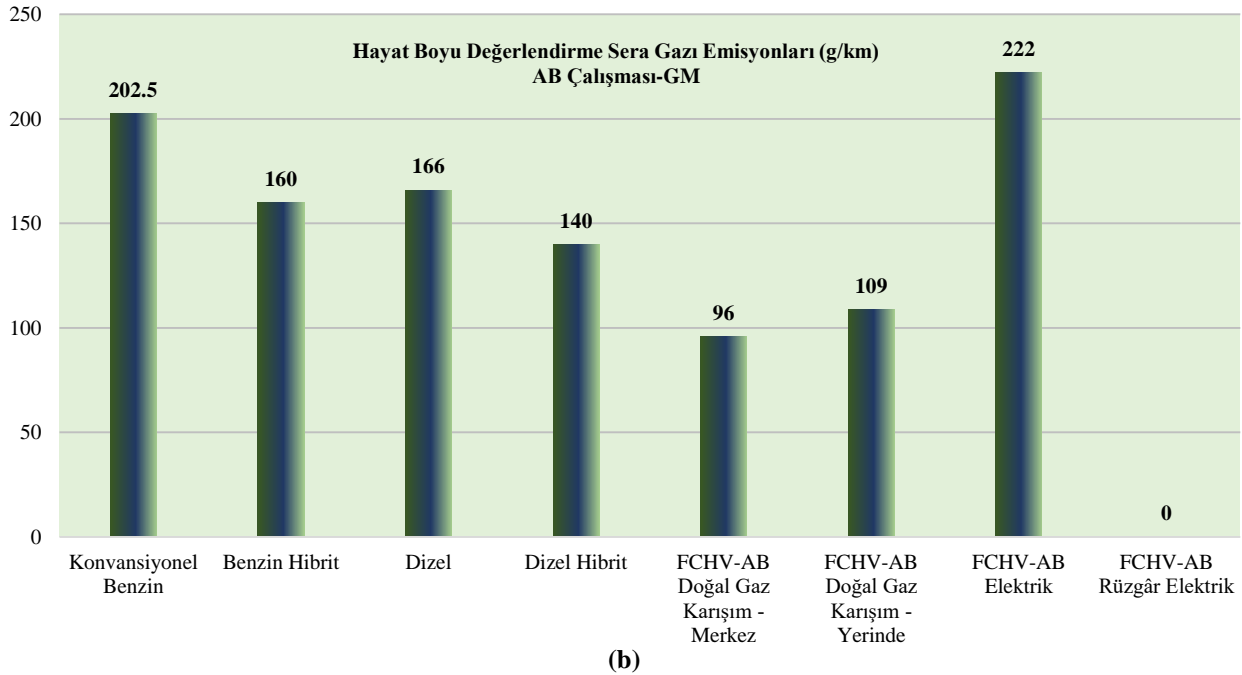
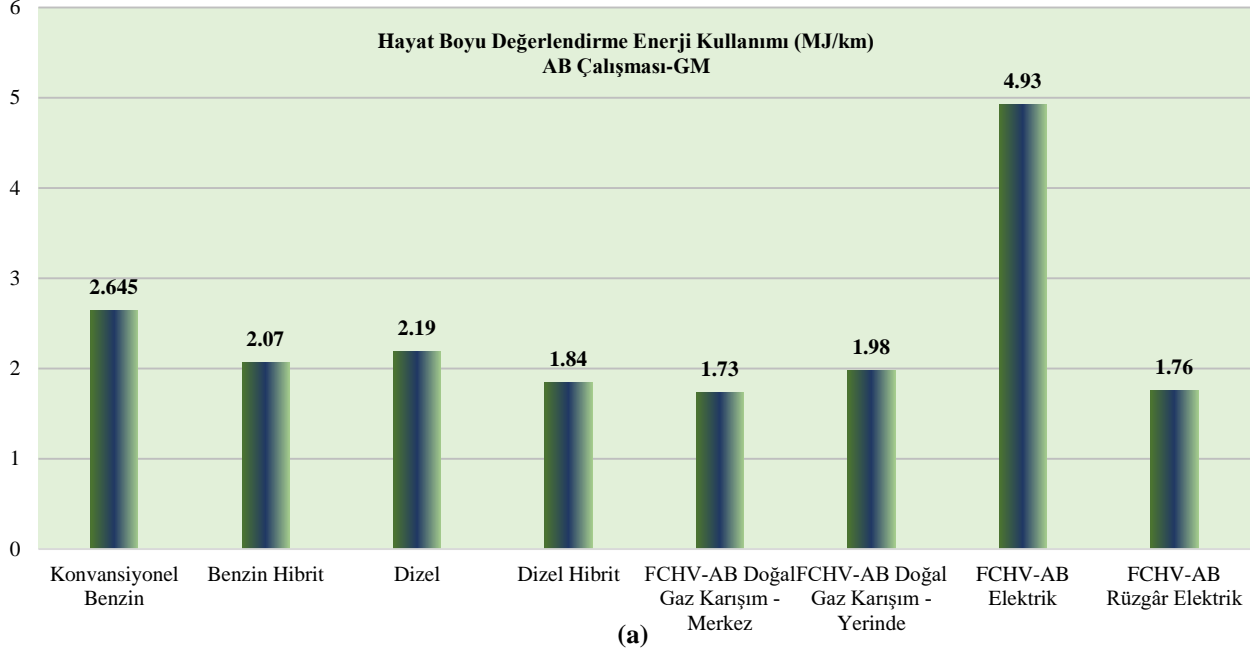
Hidrojen yakıt hücresi ile çalışan araçlar, aşağıdaki nedenlerle kirletici benzinle çalışan araçlara en iyi alternatiflerdir [35]:

- Yakıt hücreli araçlar tamamen emisyonuzdur.
- Yakıt hücrelerinin hareketli parçaları yoktur.
- Hidrojen yenilenebilirdir ve bol miktarda bulunur.
- Yakıt hücreli araçlar soğuk havayla uyumludur.

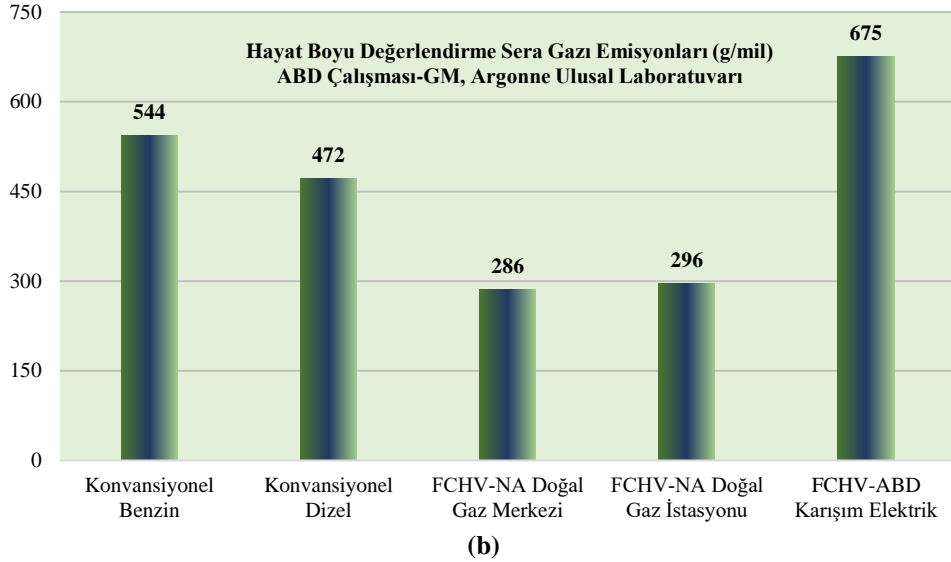
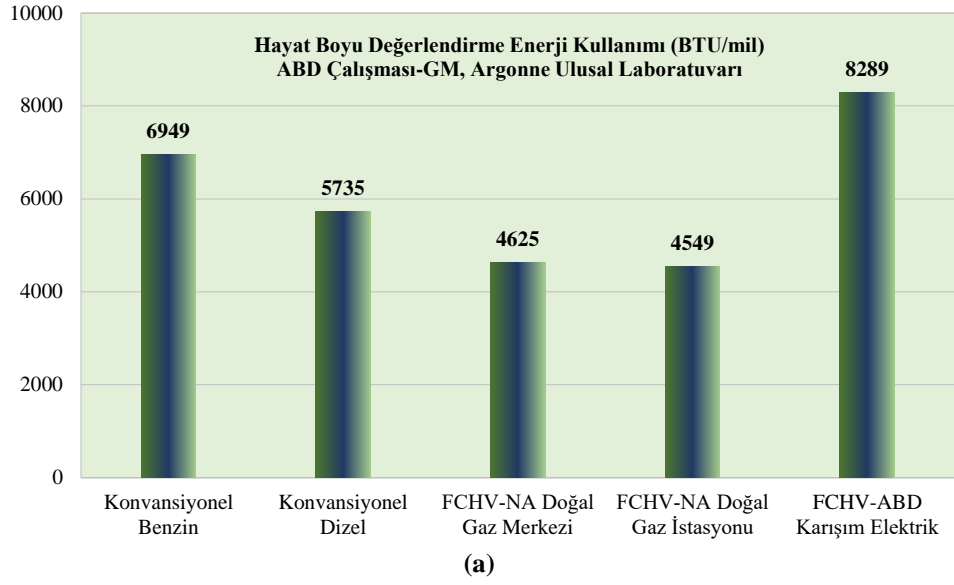
- Yakıt hücreleri kompakt ve hafiftir - aşırı hacimli veya ağır değildir.
- Yakıt hücreli araçlar benzinli araçlardan yaklaşık 3 kat daha verimlidir.
- Yakıt hücreli araçlar çok yüksek menzillere sahip olacaklar.
- Tanklar hızlı bir şekilde doldurulacak.
- Hidrojen güvenlidir, titizlikle test edilmektedir ve halihazırda birçok araçta kullanılmaktadır.

Bununla birlikte, hidrojenli araçların bazı dezavantajları da vardır:

- Yakıt pillerinin maliyeti hâlâ engelleyicidir [36].
- Yeni bir yakıt dağıtım altyapısı gerekmektedir.
- Dünya çapında ulaşım için gerekli olan büyük miktarda hidrojenin elde edilebileceğinin kanıtlanması gerekmektedir.



Şekil 2. (a) (b) Elektrik üretimi için kömür ve diğer fosil yakıtların kullanılması nedeniyle ortaya çıkan sera gazı emisyonları [37]



Şekil 3. (a) (b) ABD elektrik enerjisinin kömür ve diğer fosil kaynaklarından elde edilmesi nedeniyle ortaya çıkan sera gazı emisyonları [37]

Tablo 1. Sıvı ve gaz yakıtlar için enerji yoğunlukları (üst ısı değer, ÜİD) ve tahrik etme faktörleri

Yakıt	Kimyasal Formül	Birim kütle başına enerji $\left(\frac{E}{M}\right)$ J/kg	Birim kütle başına enerji $\left(\frac{E}{V}\right)$ J/m	Tahrik etme faktörü ϕ_M
Sıvı				
Fuel-oil	$C_{5-20}H_{42}$	45.5	38.65	0.78
Benzin	$C_{5-10}H_{12-22}$	47.4	34.85	0.76
Jet yakıtı	$C_{10-15}H_{22-32}$	46.5	35.30	0.75
LPG	$C_{3-4}H_{8-10}$	48.8	24.40	0.62
LNG	$\sim CH_4$	50	23.00	0.61
Metanol	CH_3OH	22.3	18.10	0.23
Etanol	C_2H_5OH	29.9	23.60	0.37
LH ₂	H_2	141.9	10.10	1.00
Gaz				
Doğal gaz	$\sim CH_4$	50	0.04	0.75
GH ₂	H_2	141.9	0.01	1.00

2.5 Verim avantajı

Yakıtları karşılaştırırken, kullanıcı tarafındaki kullanım verimliliklerini hesaba katmak önemlidir. Yakıtlar; termal, mekanik ve elektriksel son kullanım gibi çeşitli enerji formlarına dönüştürülebilir. Kullanım verimliliği açısından bakıldığında, hemen hemen her uygulamada hidrojenin diğer yakıtlara göre daha verimli bir şekilde istenen enerji formuna dönüştürülebileceği görülmektedir [38]. Tablo 2, çeşitli uygulamalar için fosil yakıt kullanım verimliliğinin hidrojen kullanım verimliliğine bölünmesi olarak tanımlanan kullanım verimliliği faktörlerini göstermektedir. Burada, hidrojenin en verimli yakıt olduğu görülmektedir. Bu, enerjinin korunmasına ek olarak kaynakların da korunmasını sağlamaktadır.

Tablo 2. Kullanım verimliliği faktörleri [33]

Uygulama	Kullanım Verimliliği Faktörü $\phi_M = \frac{\eta_F}{\eta_H}$
Isıl Enerji	
Alevli Yanma	1.00
Katalitik Yanma	0.80
Buhar Üretimi	0.80
Elektrik Gücü, Yakıt Hücreleri	0.54
Yüzey Taşımacılığı	
İçten Yanmalı Motorlar	0.82
Yakıt Hücreleri/Elektrik Motoru	0.40
Ses Altı Jet Taşımacılığı	0.84
Süpersonik Jet Taşımacılığı	0.72
Ağırlıklı Ortalama	0.72
Hidrojen Kullanım Verimliliği Faktörü	1.00
Fosil Yakıt Kullanım Verimliliği Faktörü	0.72

2.6 Karşılaştırmalı değerlendirme

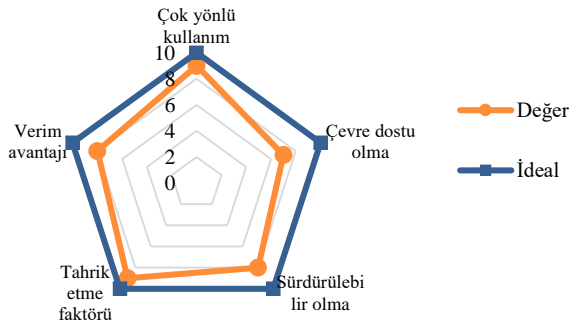
İncelenen parametrelerin etkili bir şekilde karşılaştırılması için bu parametrelerin etkileri Denklem (2) ile normalleştirile:

$$Mertebe_i = \frac{Maksimum - Metot_i}{Maksimum} \times 10 \quad (2)$$

Normalleştirilmiş değerler Tablo 3’de verilmiştir. Mertebe ifadesi 0 ile 10 arasında değişir, burada 0 en az etki eden parametreyi gösterirken 10 en etkili (ideal) parametreyi göstermektedir (Şekil 4).

Tablo 3. Normalleştirilmiş parametreler

Mertebe	Değer	İdeal
Çok yönlü kullanım	9	10
Çevre dostu olma	8	10
Sürdürülebilir olma	7	10
Tahrik etme faktörü	6	10
Verim avantajı	8	10



Şekil 4. Parametrelerin karşılaştırmalı değerlendirilmesi

3 Güvenlik boyutunun değerlendirilmesi

Güvenlik, gelecek vaat eden ulaşım yakıtlarının değerlendirilmesinde anahtar bir husustur. Hidrojen sözü konusu olduğunda, büyük ölçüde 1937'deki Hindenburg felaketini takip eden talihsiz bir tanıtıma maruz kalmıştır.

Hidrojen kolayca tutuşur ve geniş bir aralıkta yanıcılık limitlerine sahiptir. Bu nedenle, hidrojenin benzinden çok daha kolay tutuşabileceği düşünülebilir, ancak havadaki hidrojen yanıcılığının alt sınırı (hacimce %4, [39]) benzine karşılık gelen noktadan (%1.4, [39]) daha yüksektir. Dahası, hidrojenin yayılma gücü benzininkinden yedi kat fazladır ve bu daha fazla kaldırma kuvveti ile birlikte hidrojenin atmosfere hızlı bir şekilde dağılmasını sağlar [40]. Diğer taraftan benzin buharı ise, havadan daha ağır olduğu için tutuşabilir bir karışım oluşuncaya kadar o bölgede kalmaktadır. Bu nedenle, genel olarak bir hidrojen yakıt sistemindeki sızıntıdan kaynaklanan hasar riski, bir benzin sisteminden kaynaklanana göre çok daha az olmaktadır. Bununla birlikte, hidrojen sistemleri sızıntıya karşı daha savunmasız olabilir ve "sızdırmaz" doğalarının en üst düzeye çıkmak için özen gösterilmelidir - aslında, herhangi bir yüksek enerjili yakıt sisteminde de durum bu şekildedir.

Literatürde güvenlik açısından hidrojen gazının doğasını anlamak için bazı çalışmalar yapılmıştır. Borulardaki büyük çaplı bir kırılmadan sızan ve atmosfere yayılan yüksek basınçlı hidrojen gazının dağılması ve patlamasıyla ilgili varsayımsal senaryo üzerine deneysel bir araştırma yapılmıştır [40]. Bu deneyler, patlama gücünün yalnızca hidrojen/hava ön karışımının konsantrasyonuna ve hacmine değil, aynı zamanda ateşleme öncesi türbülans özelliklerine de bağlı olduğunu göstermiştir. Gelecekteki hidrojen ekonomisi altyapılarıyla ilgili bazı hidrojen yayılım senaryoları ve güvenlik hususları da incelenmiştir [41].

Sıvı hidrojenin dökülmesi de bir güvenlik sorunu olarak değerlendirilir. Sıvı dökülmesi durumunda, hidrojen pratikte benzin kadar güvenlidir [42]. Hidrojenin son derece düşük kaynama noktası (yaklaşık -424 °F veya -253 °C) ve yüksek kaldırma kuvveti, neredeyse anında buharlaşmayı ve dağılmayı sağlamaktadır. Gallego vd. [43] otomotiv senaryoları için hidrojen salınımı, dağılımı ve yanmasının hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modellemesini gerçekleştirmiş ve sıkıştırılmış gaz halindeki hidrojen sistemlerinden salınımların kentsel ve tünel ortamlarında ticari araçlar üzerindeki potansiyel etkilerinin analizini açıklamıştır. Sıkıştırılmış doğal gaz sistemlerinden karşılaştırmalı salınımlar da analize dahil edilmiştir. Hidrojen yakıtlı bir aracın temel güvenliğinin bir kanıtı da sıvı hidrojenli bir aracın planlanmamış bir "çarpışma testi" sonucunda elde edilmiştir [44]. Araç uzun mesafeli bir otomobil yarışı için hazırlanmıştı ve tankı sıvı hidrojenle doluydu. Çekicinin lastiği patladığında, araç karayolu üzerinde saatte 55 mil hızla bir römork üzerinde çekiliyordu. Römork ve hidrojenli araç, yolla ve bir veya iki tabelayla önemli etkileşimlerden sonra baş aşağı durabilmişti. Hidrojen sızıntısına rağmen yangın çıkmadı. Aslında, araç römorktan ayrıldı, dik konuma getirildi ve hidrojeni bitmeden önce mümkün olduğunca uzağa sürüldü.

4 Sonuç

Yakıt hücreli araçlar muhtemelen ulaştırma sektörünün hidrojen ekonomisine geçişinde son adım olacaktır. Hidrojenli enerji sistemleri ekonomik olarak daha uygun hale geldiğinde, farklı kaynakların üretim verimliliğini değerlendirmek için mevcut diğer enerji sistemleriyle de karşılaştırılmalıdır.

Hidrojen enerji sisteminin parlak yanı, sistemin mevcut fosil yakıt sistemine kıyasla emisyonları neredeyse kesin olarak azaltacağıdır. NO_x emisyonları daha az (sıfır olmasa da) olurken karbon emisyonları sıfıra düşecektir. Şangay ve Pekin gibi büyük şehirlerde, yerel hava kirliliğinin azaltılması vatandaşlar için yaşam kalitesini büyük ölçüde artıracak ve sonuçta sağlık hizmeti maliyetlerini azaltacaktır. Sistemin olumsuz tarafı ise henüz geleneksel fosil yakıt sistemine karşı ekonomik olarak rekabet edemeyecek durumda olmasıdır. Bununla birlikte üretim ile birlikte yakın zamanda rekabetçi maliyetlere ulaşılmış olunacaktır.

Hidrojenle çalışan yakıt hücreli araçlarla ilgili mevcut ilerleme, yaşam süremiz içerisinde ulaşım sektörünün çevre dostu bir dönüşüme uğrayacağını göstermektedir.

İlk ticari yakıt hücreli araçlar farklı firmalar tarafından üretildi ve bu araçların seri üretimini beklenmektedir. Ayrıca, yakıt hücresinin verimliliği arttığında, hidrojen sorunlarının yerleşik depolanması çözülecek ve FCV'lerin maliyeti daha rekabetçi bir hale gelecektir. Ekonomik ve çevresel analizler, hidrojen enerji sisteminin muhtemelen hem ekonomik açıdan rekabetçi hem de çevre dostu olacağını doğrulamaktadır. Bizler de hidrojen ekonomisine giden yolda ilerlerken ulaşım sektöründeki heyecanlandırıcı dönüşümün bir parçası olabiliriz.

Teşekkür

Çalışmaya destek ve katkılarından dolayı Prof. Dr. İbrahim Dinçer'e ve onun doktora talebesi Merve Öztürk'e teşekkürlerimi sunarım.

Çıkar çatışması

Bu makalede çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 10

Kaynaklar

- [1] M. W. Jensen and M. Ross, The ultimate challenge: developing an infrastructure for fuel cell vehicles. environment. Science and Policy for Sustainable Development, 42(7), 10–22, Sep. 2000. <https://doi.org/10.1080/00139150009605747>.
- [2] H. R. Linden, Alternative pathways to a carbon-emission-free energy system. Bridge-Washington-, 29, 17–24, 1999.
- [3] A. B. Lovins and B. D. Williams, From Fuel cells to a hydrogen-based economy. Public Utilities Fortnightly, 139(4), 12–22, 2001.
- [4] B. McNicol, Fuel cells for road transportation purposes — yes or no?. Journal of Power Sources, 100(1–2), 47–59, Nov. 2001, [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00882-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00882-5).
- [5] J. M. Ogden, M. M. Steinbugler, and T. G. Kreutz, A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as

- fuels for fuel cell vehicles: implications for vehicle design and infrastructure development. Journal of Power Sources, 79(2), 143–168, Jun. 1999. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00057-9).
- [6] C. Thomas, Fuel options for the fuel cell vehicle: hydrogen, methanol or gasoline?. International Journal of Hydrogen Energy, 25(6), 551–567, Jun. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(99\)00064-6](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(99)00064-6).
- [7] C. E. Thomas, Fuel cell and battery electric vehicles compared. International Journal of Hydrogen Energy, 34(15), 6005–6020, Aug. 2009, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.06.003>.
- [8] G. Morrison, J. Stevens, and F. Joseck, Relative economic competitiveness of light-duty battery electric and fuel cell electric vehicles. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 87, 183–196, Feb. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.01.005>.
- [9] D. L. Greene and S. E. Plotkin, Energy futures for the US transport sector. Energy Policy, 29(14), 1255–1270, Nov. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00071-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00071-4).
- [10] Interlaboratory Working Group, Scenarios for a clean energy future - efficient and clean energy technologies, 2000. <http://www.ornl.gov/sci/eere/cef/> Accessed: Oct. 27, 2020.
- [11] R. V. V. Petrescu, A. Machín, K. Fontánez, J. C. Arango, F. M. Márquez, and F. I. T. Petrescu, Hydrogen for aircraft power and propulsion. International Journal of Hydrogen Energy, 45(41), 20740–20764, Aug. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.253>.
- [12] Y. Bicer and I. Dincer, Life cycle evaluation of hydrogen and other potential fuels for aircrafts. International Journal of Hydrogen Energy, 42(16), 10722–10738, Apr. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.119>.
- [13] A. Baroutaji, T. Wilberforce, M. Ramadan, and A. G. Olabi, Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 106, 31–40, May 2019, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.022>.
- [14] F. W. Armstrong, J. E. Allen, and R. M. Denning, Fuel-related issues concerning the future of aviation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 211, 1, 1–11, 1997, <https://doi.org/10.1243/0954410971532451>.
- [15] A. Contreras, Hydrogen as aviation fuel: A comparison with hydrocarbon fuels. International Journal of Hydrogen Energy, 22(10–11), 1053–1060, Oct. 1997, [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(97\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(97)00008-6).
- [16] L. W. Jones, Liquid hydrogen as a fuel for the future, Science, 174(4007), 367–370, Oct. 1971, <https://doi.org/10.1126/science.174.4007.367>.
- [17] D. Victor, Liquid hydrogen aircraft and the greenhouse effect. International Journal of Hydrogen Energy, 15(5), 357–367, 1990, [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(90\)90186-3](https://doi.org/10.1016/0360-3199(90)90186-3).

- [18] D.-Y. Lee, A. Elgowainy, A. Kotz, R. Vijayagopal, and J. Marcinkoski, Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium- and heavy-duty trucks. *Journal of Power Sources*, 393, 217–229, Jul. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.05.012>.
- [19] G. D. Berry and A. D. Lamont, Carbonless transportation and energy storage in future energy systems, Innovative Strategies for CO2 Stabilization, Technical Report UCRL-ID-142084, 2001. <https://doi.org/10.2172/792733>
- [20] E. M. Dickson, J. W. Ryan, and M. H. Smulyan, Hydrogen economy. A preliminary technology assessment, Technical Report NP-20932, 1976.
- [21] M. I. Khan, T. Yasmin, and A. Shakoob, Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 785–797, Nov. 2015, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.053>.
- [22] S. J. Nadis, J. J. MacKenzie, and L. Ost, *Car trouble*. Boston: Beacon Press, Boston, 1993.
- [23] J. S. Cannon, *Harnessing hydrogen: The key to sustainable transportation*. Inform, 1995.
- [24] S. Begley and M. Hager, Running cars on plain H₂O., *Newsweek*, 124(26), 108–109, 1994.
- [25] M. J. Riezenman, Engineering the EV future. *IEEE Spectr.*, 35, 11, 18–20, Nov. 1998, <https://doi.org/10.1109/6.730515>.
- [26] Z. J. B. Plater, R. H. Abrams, R. L. Graham, L. Heinzerling, D. A. Wirth, and N. D. Hall, *Environmental law and policy: nature, law, and society*, Fifth edition. New York: Wolters Kluwer, New York, 2016.
- [27] A. Bain and W. D. Van Vorst, The Hindenburg tragedy revisited: The fatal flaw found. *International Journal of Hydrogen Energy*, 24(5), 399–403, 1999.
- [28] R. Edwards, A tank of the cold stuff, *New Scientist* (London), 152, 2057, 41–43, Nov. 1996.
- [29] R. Moradi and K. M. Groth, Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 12254–12269, May 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.041>.
- [30] Energy Sector Management Assistance Program, *Green Hydrogen in Developing Countries*. World Bank, 2020.
- [31] T. Nejat Veziroglu, Quarter century of hydrogen movement 1974–2000. *International Journal of Hydrogen Energy*, 25(12), 1143–1150, Dec. 2000, [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(00\)00038-0](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(00)00038-0).
- [32] Fast Facts, *Energy Independence Now*. <https://einow.org/talking-points> Accessed: Oct. 27, 2020.
- [33] T. N. Veziroglu, 21st Century's Energy: Hydrogen Energy System, in *Assessment of Hydrogen Energy for Sustainable Development*, J. W. Sheffield and Ç. Sheffield, Eds. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007, 9–31.
- [34] D. Cecere, E. Giacomazzi, and A. Ingenito, A review on hydrogen industrial aerospace applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(20), 10731–10747, Jul. 2014, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.126>.
- [35] J. Van Mierlo, G. Maggetto, and Ph. Lataire, Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles. *Energy Conversion and Management*, 47(17), 2748–2760, Oct. 2006, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.02.004>.
- [36] S. T. Thompson et al., Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: System and high-volume manufacturing description, validation, and outlook. *Journal of Power Sources*, 399, 304–313, Sep. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.100>.
- [37] R. Choudhury et al., GM Well-to-wheel analysis of energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel/vehicle systems-A European study, Ottobrunn, September, 2002.
- [38] T. N. Veziroglu, *Environmental Problems And Solutions*, CRC Press, Florida, USA, 1990.
- [39] H. F. Coward and G. W. Jones, Limits of flammability of gases and vapors. [Tables and graphs for organic and inorganic materials and mixtures; bibliography; indexes], 1952, <https://doi.org/10.2172/7355338>.
- [40] T. Tanaka, T. Azuma, J. Evans, P. Cronin, D. Johnson, and R. Cleaver, Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(13), 2162–2170, Sep. 2007, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.04.019>.
- [41] F. Markert, S. Nielsen, J. Paulsen, and V. Andersen, Safety aspects of future infrastructure scenarios with hydrogen refuelling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(13), 2227–2234, Sep. 2007, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.04.011>.
- [42] M. Hirayama, H. Shinozaki, N. Kasai, and T. Otaki, Comparative risk study of hydrogen and gasoline dispensers for vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(27), 12584–12594, Jul. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.003>.
- [43] E. Gallego et al., An intercomparison exercise on the capabilities of CFD models to predict distribution and mixing of H₂ in a closed vessel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(13), 2235–2245, Sep. 2007, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.04.009>.
- [44] J. Finegold and W. D. Van Vorst, Crash test of a liquid hydrogen automobile, Corpus ID: 109295284, 1976.





The impact of seawater aging on basalt/graphene nanoplatelet-epoxy composites: performance evaluating by Dynamic Mechanical Analysis (DMA) and short beam shear (sbs) tests

Deniz suyu yaşlandırmasının bazalt/grafen nanolevha-epoksi kompozitler üzerindeki etkisi: Dinamik Mekanik Analiz (DMA) ve kısa kiriş kayma testleri ile performans değerlendirmesi

Hasan Ulus^{1,*} 

¹ Selçuk University, Huğlu Vocational School, 42710, Konya, Turkey

Abstract

Seawater exposure has adverse effects on fiber-reinforced polymer (FRP) composites' mechanical performance and service life because polymer matrix degradation caused by absorbed water can initiate FRP composites' irreversible damage. So, composites' performance under service conditions must be comprehensively evaluated and improved for safe usage in marine structures. For this purpose, the addition of nanoparticles into the polymer matrix can be an effective strategy to reinforce the polymer matrix against the seawater environment's detrimental effects. This paper presents the impact of graphene nanoplatelet (GNP) on basalt/epoxy composites' mechanical performance under long-term seawater aging. Experimental results of short beam shear tests revealed that the addition of 0.5 wt% GNP enhanced interlaminar shear strength by approximately 24 and 14% compared with the neat basalt/epoxy composites for seawater aged and unaged specimens, respectively. The dynamic mechanical analysis has also deduced that the multi-scale composite's transition temperature increased up to 5.7% compared to the neat basalt/epoxy composites.

Keywords: Basalt fiber, Epoxy, Graphene nanoplate, Dynamic mechanical analysis, Short beam shear test

1 Introduction

Fiber-reinforced polymers (FRPs) are widely utilized in aviation, automotive, and naval application thanks to their favorable characteristics (including high performance, lightweight, and reduced lifecycle costs) for engineering [1-7]. FRPs may lose their performance during service due to the harsh environmental effects (temperature, humidity, water, etc.). Especially absorbed water by the composite structure during water exposure of FRPs diffuses through the matrix-fiber interfacial region. It deteriorates the interfacial bonding performance via pitting, hydroxylation hydrolysis, plasticization leaching [8-11]. So, providing the enhancement corrosion resistance is a crucial issue for the durability of FRPs in the seawater environment.

On the other hand, composite structures' corrosion resistance is mainly related to the matrix's water absorption resistance property that holds the primary load-bearing reinforcement fibers together. The corrosion effect on the composite structures is related to the corrosive medium's absorbability by the matrix. Although epoxy resins are

Özet

Deniz suyu maruziyeti, fiber takviyeli polimer (FTP) kompozitlerin mekanik performansı ve hizmet ömrü üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Absorbe edilen su polimer matris bozulmasına yol açarak FTP kompozitlerin geri dönüşümsüz hasarını başlatabilmektedir. Bu sebeple, FTP kompozitlerin deniz yapılarında güvenle kullanımı için, servis koşullarındaki performanslarının kapsamlı bir şekilde anlaşılması ve iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda, nanoparçacıkların polimer matris içerisine eklenmesi, deniz suyu ortamının zararlı etkilerine karşı polimer matrisini güçlendirmek için etkili bir stratejidir. Bu makale, grafen nanolevha (GNL) takviyesinin bazalt/epoksi kompozitlerin uzun süreli deniz suyu yaşlanması altında mekanik performansı üzerindeki etkisini sunmaktadır. Kısa kiriş kayma test sonuçları, deniz suyunda yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış numuneler için saf bazalt/epoksi kompozitlere kıyasla ağırlıkça %0.5 GNL eklenmesinin tabakalar-arası arası kayma mukavemetini sırasıyla yaklaşık %24 ve %14 artırdığını ortaya koymuştur. Dinamik mekanik analizlerde, çok-ölçekli kompozitlerin geçiş sıcaklığının, saf bazalt/epoksi kompozitlere kıyasla %5.7'ye kadar yükseldiğini ortaya çıkarmıştır.

Keywords: Bazalt fiber, Epoksi, Grafen nanolevha, Dinamik mekanik test, Kısa kiriş kayma testi

preferred in engineering applications with their relatively good corrosion resistance and high mechanical performance properties, epoxy's functional properties are intensely influenced by the humid environment in-service conditions. Further, the environmental effects cause the degradation of epoxy and consequent deterioration of its stability. This effect generates a substantial disadvantage in many engineering structures [12].

When the matrix or fiber-matrix interface is damaged by water aging, there is the possibility of decreasing ILSS and thermomechanical performances of the composites [13, 14]. The reason for this is that ILSS is the measure of fiber-matrix interface bonding strength. Similarly, the dynamic mechanical analysis (DMA) technique also enables us to evaluate the fiber-matrix interfacial adhesion or interfacial degradation [15].

Matrix modification with adding nanoparticles enables to enhance interface bond between polymer matrix and fibers. Additionally, adding nanoparticles in a polymer matrix provides another significant advantage: a substantial

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hasanulus@selcuk.edu.tr (H. Ulus)
 Geliş / Received: 06.09. 2020 Kabul / Accepted: 04.12.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021
 doi: 10.28948/ngumuh.791161

decrease of permeability due to nanoparticles' tortuous path with a high aspect ratio. On the other hand, matrix modification by adding rigid nanoparticles improves the stiffness and thermal glass transition temperature (T_g) of the composites [16]. Therefore, matrix modification is an effective method to ameliorate the mechanical, dynamic mechanical, and barrier performances of FRPs [17]. Graphene nanoplatelets (GNPs) have excellent potential performance/cost balance, and it attracts researchers' interest in creating enhanced hybrid composites due to their excellent mechanical properties [18, 19]. GNPs have a high aspect ratio and surface area, improving the load transfer capability [20].

Expanding awareness of eco-friendly materials has recently induced investigators to use an alternate natural fiber to replace inorganic fibers in recent years [19]. In this regard, basalt fibers (BFs) extruded from the basalt rock are preferred for engineering applications as natural mineral fiber. BFs have exceptional characteristic properties at least 16% higher elastic modulus, excellent alkaline durability, good chemical resistance, and low-cost relative to E-glass fiber [21].

Potential behaviors of basalt-FRPs in the marine application have previously been discussed in the open literature [22]. A few researchers have studied the endurance of basalt-FRPs under a seawater environment [23]. Additionally, there is still no research study evaluating the seawater-aging performance of basalt-FRPs after modifying the matrix with GNPs. However, the matrix modification's advantages to the composite structure are open to discussion. The investigation of the reliability and durability of GNP modified basalt-FRPs in a seawater environment is necessary. This study aims to evaluate the durability of seawater immersed basalt/GNP-epoxy multi-scale composites by SBS and DMA techniques. The current investigation reports the influence of GNP and seawater aging on the endurance of the basalt/epoxy multi-scale composites.

2 Materials and methods

2.1 Materials

The laminated multi-scale composites were prepared using basalt fiber woven fabric (Tila Kompozit Co., Turkey), MGS L160/H160 epoxy system (Dost Kimya Co., Turkey), and GNP nanoreinforcements (Nanografi Co. Ltd., Turkey). The technical specifications of the materials by the supplier company are as follows. The fabric has 300 g/m² areal density and 0.45 mm average thickness. GNPs have about 6 nm thickness, 5 μ m diameter, and 150 m²/g specific surface area.

2.2 Methods

To perform epoxy matrix modification, the 0.1, 0.3, 0.5, and 0.7 %wt GNPs were first dispersed via probe ultrasonicator in acetone (for 10 min at 20 kHz) and then added into the epoxy resin (for 10 min at 20 kHz). After evaporation of acetone in a vacuum oven, the curing agent was added (accordingly manufacturer's recommendations) and stirred (mechanically for 5 min). The basalt/epoxy

laminates were manufactured as two steps to minimize the filtering effect of nanoparticles. Firstly, prepared epoxy resin mixtures were applied on twelve pieces of basalt woven fabrics using a roller. These resin-impregnated layers were stacked and sealed with a vacuum bag to remove the excessive amount of resin. The pressure was maintained at 0.8 bar assisted with a vacuum pump. Finally, the composite laminates were cured at 60 °C for 1 h and then post-cured at 120 °C for 4 h. [24]. The seawater submersion of the test coupons was conducted at room temperature, which was included the 6 wt% sea salt (about twice the average concentration in an ocean) [11, 17, 22]. This artificial seawater mixture was stirred with a mixer cyclically to achieve uniform seawater. The samples were withdrawn from the seawater after 1-year of immersion time to evaluate the long-term seawater aging effect on ILSS and DMA properties.

SBS test method was preferred to determine the ILSS of multi-scale composites due to its simplicity and feasibility. In this method, the test specimen subjected to three-point bending loading undertakes tension, compression, and shear stress. However, a dominant shear failure occurs in the SBS test with the lessened span-to-thickness ratios. In this study, SBS tests were applied to prismatic samples with 65 × 11 × 4 mm³ following ASTM D2344 recommendations. The tests were conducted using a Shimadzu AGS-X10 at a 1 mm/min rate as five repetitive.

Dynamic mechanical analyses (DMA) were performed using a Perkin Elmer DMA 8000 analyzer to detect GNP's impact on dry and seawater-aged composites' dynamic mechanical performances. DMA tests have been performed following ASTM D 4065 standards. Specimens in 52 × 13 × 4 mm³ dimensions were used for DMA tests, and a span to thickness ratio was arranged 12:1. The laminates have been subjected to three-point bending loading at 1 Hz constant frequency (under sinusoidal loading condition). The analysis carried out ranges from 0-200 °C (heating rate: 5 °C/min).

Raman spectroscopy was recorded with the WITEC Alpha 300 Confocal Raman system (4 cm⁻¹ resolution at 3800-200 cm⁻¹ scanning range) with 532 nm laser irradiation to reveal seawater's effect aging on the composite structure.

3 Results and discussions

SBS tests were performed to evaluate the interfacial properties of epoxy/basalt composites. Figure 1 depicts the ILSS properties for the dry and seawater aged composites depending on GNPs content. Generally, the obtained shear stress of the seawater aged specimens is lower than the dry composites. Additionally, the strong influence of the GNPs modification on the ILSS of the composites is explicit.

The ILSS of the neat sample is about 36 MPa before seawater immersion [25]. With the 0.5 wt% GNPs incorporation in the epoxy matrix, the ILSS value reached 44.8 MPa, which is about 24% higher than that of neat composite samples. GNPs and the epoxide groups create a cross-linking reaction, which interlocks structure in the GNP-epoxy through the covalent bond, resulting in reduced polymer chain mobility [26]. This interaction may have enabled an effective stress transfer, resulting in increased

ILSS for GNP modified composites (up to 0.5 wt%). However, a slight decrease in ILSS was observed for 0.7 wt% GNP modified specimens. This drop might be attributed to the agglomeration formation for high ratio GNPs included composites, because agglomerates can play a role in stress forming and increase the free volume by creating voids in the epoxy [24, 27]. The blunt force drop noticed in the neat epoxy specimen is thought to develop due to severe delaminations caused by weak interface strength. However, after seawater aging, the ILSS values are calculated as 10.6 and 13.6 MPa for the neat and multi-scale composite samples, respectively. Compared to those of unaged composites, there is a drastic decrease in the ILSS of all seawater aged specimens reaching about 70%. However, the GNPs modification aid in increasing the ILSS performance of the basalt/epoxy composites. The small concentrated nanoparticles in the matrix may not behave as an active barrier against water diffusion during the long-term immersion period.

Additionally, it is seen that in literature, the mechanical performance of epoxy is enhanced by GNP introducing in

the range of 0-1 wt% [28-30], and also the rate of 2-5 wt% GNP preferred to provide effective barrier properties [31-33]. As a result, it is believed that the multi-scale composites modified with a low percentage of nanoparticles may absorb water molecules almost at the same rate after a long-term immersion period. Therefore, the same percentage of water absorption is seen as a possible result that deteriorates the structure to the same extent.

Figure 2 presents the different failure modes of the SBS fractured specimens. Before seawater aging, neat epoxy composites (Fig. 2(a)) compared with GNP modified epoxy composites (Fig. 2(b-e)), neat specimens failed with predominantly delamination failure modes. It is seen that the fiber breakage occurs more dominantly than delamination for the 0.5 wt% GNP modified samples. This situation can be attributed to the fact that nanoparticle modification enhances interlayer interactions and fiber-matrix interface interactions [10, 11].

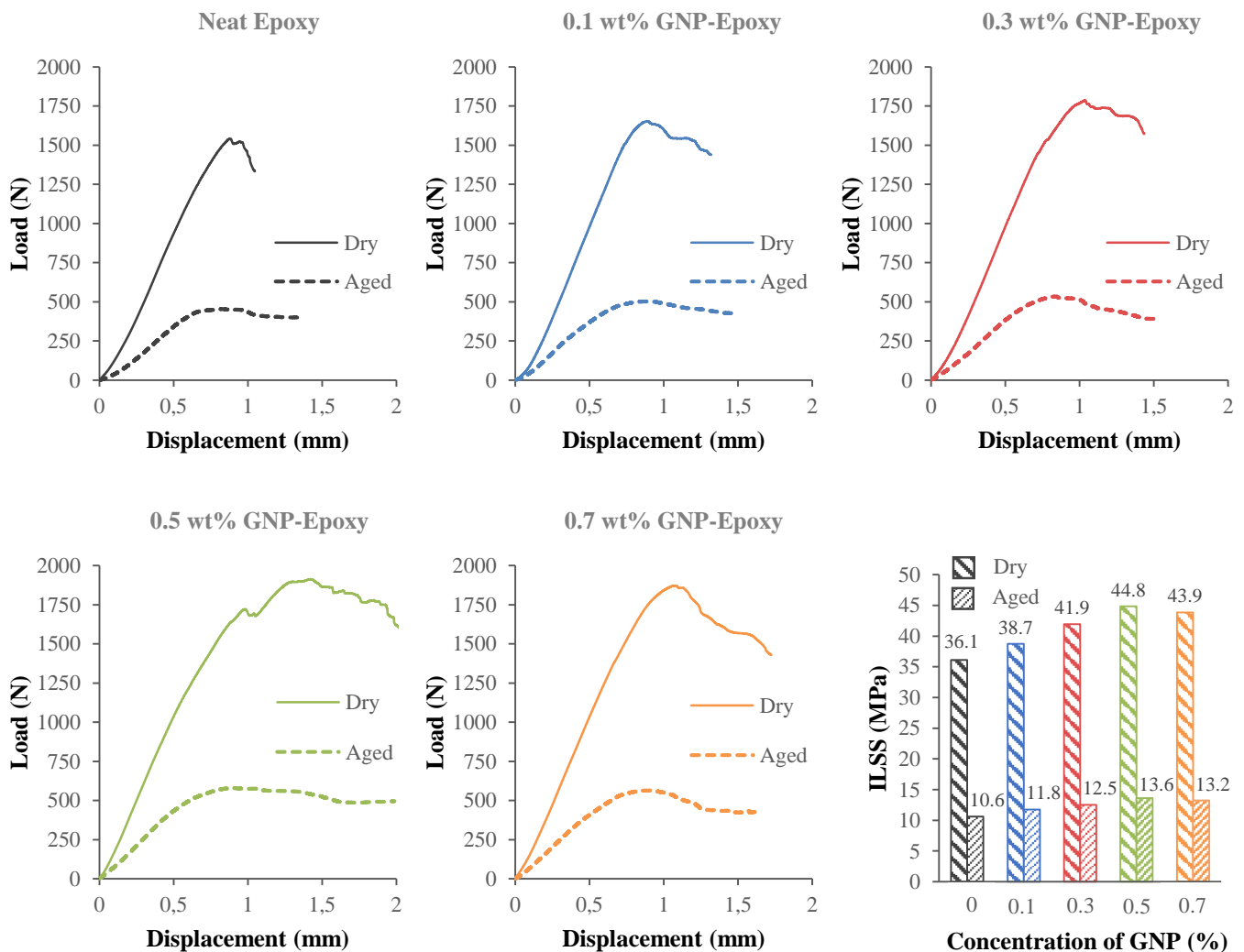


Figure 1. SBS test results of seawater aged and unaged samples containing different GNP ratio

The influence of aging on the damage behavior during the short beam shear tests are shown in Figure 2(g-j). After seawater aging, the composites' damage mode alters from a brittle to a more plastic failure mode. The reason for alter is thought as the water absorption increased the segmental chain mobility of epoxy and resulted in a plasticizing effect. This effect can be confirmed with all specimens' decreasing slope of the load-displacement curves after the seawater aging. Consequently, it is understood that the seawater acts as a plasticizer, the interfacial bonds were weakened, thus softening of the composite samples occurs

3.1 DMA tests

Figure 3 displays the experimental results of the dynamic mechanical analysis that depend on the GNP concentration and the effect of seawater aging. The DMA data are significantly influenced by GNPs concentration and seawater aging. The changing of storage modulus with temperature for various GNPs concentration is exhibited in Figure 3(a-b). It can be seen that specimens show higher storage modulus with increasing up to 0.5 wt% GNPs content for dry and aged samples. The increase is explicit in the glassy region below transition temperature (T_g), while there is not much influence in the rubbery plateau region. In the glassy state, composite structures' components are in a frozen situation (due to the close and tight packing), i.e., highly motionless. Therefore, since the samples are more rigid in the glassy area, it exhibits the highest modulus.

On the other hand, as the temperature rises, the components gain more mobility and lose their close-packing ordonnance. As a result, this rising temperature causes a decrease in the module. The modules drop to almost the same level at elevated temperatures, as the materials significantly lose their rigidity. Hence, there is no noteworthy difference

in the modulus due to high temperatures in the rubbery region (seen in Figure 3.a-b) [34].

The tan delta-temperature curves in Figure 3(c-d) shows the influence of GNP concentration on damping features of the aged and unaged composites. The peak of the curve is referred to as the T_g . The figure shows that the viscoelastic property is enhanced significantly by matrix modification, and it decreases by seawater immersion. The T_g increase noticed in the GNPs modified samples can be referred to as a chain-pinning mechanism encouraged by the GNP-epoxy interactive relation. Additionally, GNPs adding to the epoxy matrix could decrease and limit polymer chain mobility and thus improve the limitation on the rate of relaxation, leading to more superior T_g . Lower $\tan \delta$ (delta) observed in case of GNPs addition up to only 0.5 wt% can be attributed not only to the toughening impact and ameliorated interfacial bonding but also to well epoxy-GNP interactions, resulting in dynamic mechanical properties [35]. The observed higher dynamic mechanical performances due to matrix modification for seawater aged composites better describes polymer chain mobility restriction.

Overall, T_g changes as a function of GNPs concentration for dry and aged specimens are shown as a bar graph in Figure 3(e-f). For GNPs modified and neat epoxy composites, after 1-year of seawater aging, T_g in all conditions decreased. However, at a 0.5 wt% GNP configuration, T_g reduction was slightly lower than that of other GNP configurations. The T_g value of the neat epoxy composites exhibited a tan delta maxima peak at 106.3 and 103.5 °C for dry and seawater-aged composites. Similarly, the T_g values of the 0.5 wt% GNP modified composite were measured as 110.4 and 108.3 °C for dry and seawater aging, respectively.

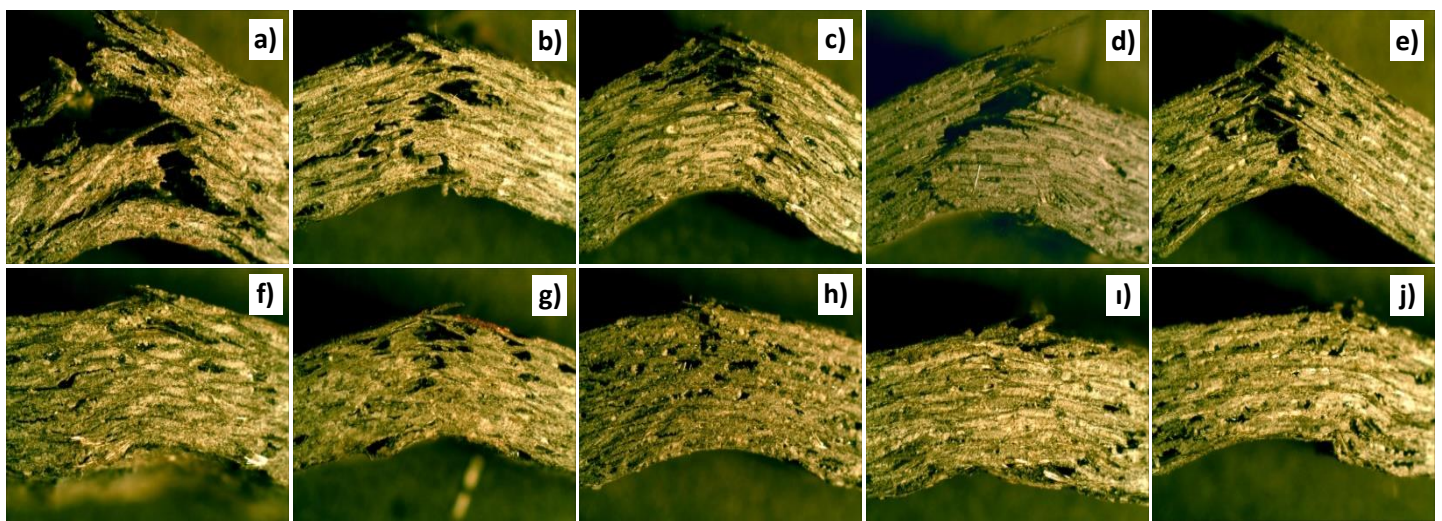


Figure 2. Optical microscope images of fracture surfaces after SBS tests for: (a-e) neat, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 wt% GNP modified unaged specimens, and (f-j) neat, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 wt% GNP modified seawater aged specimens, respectively.

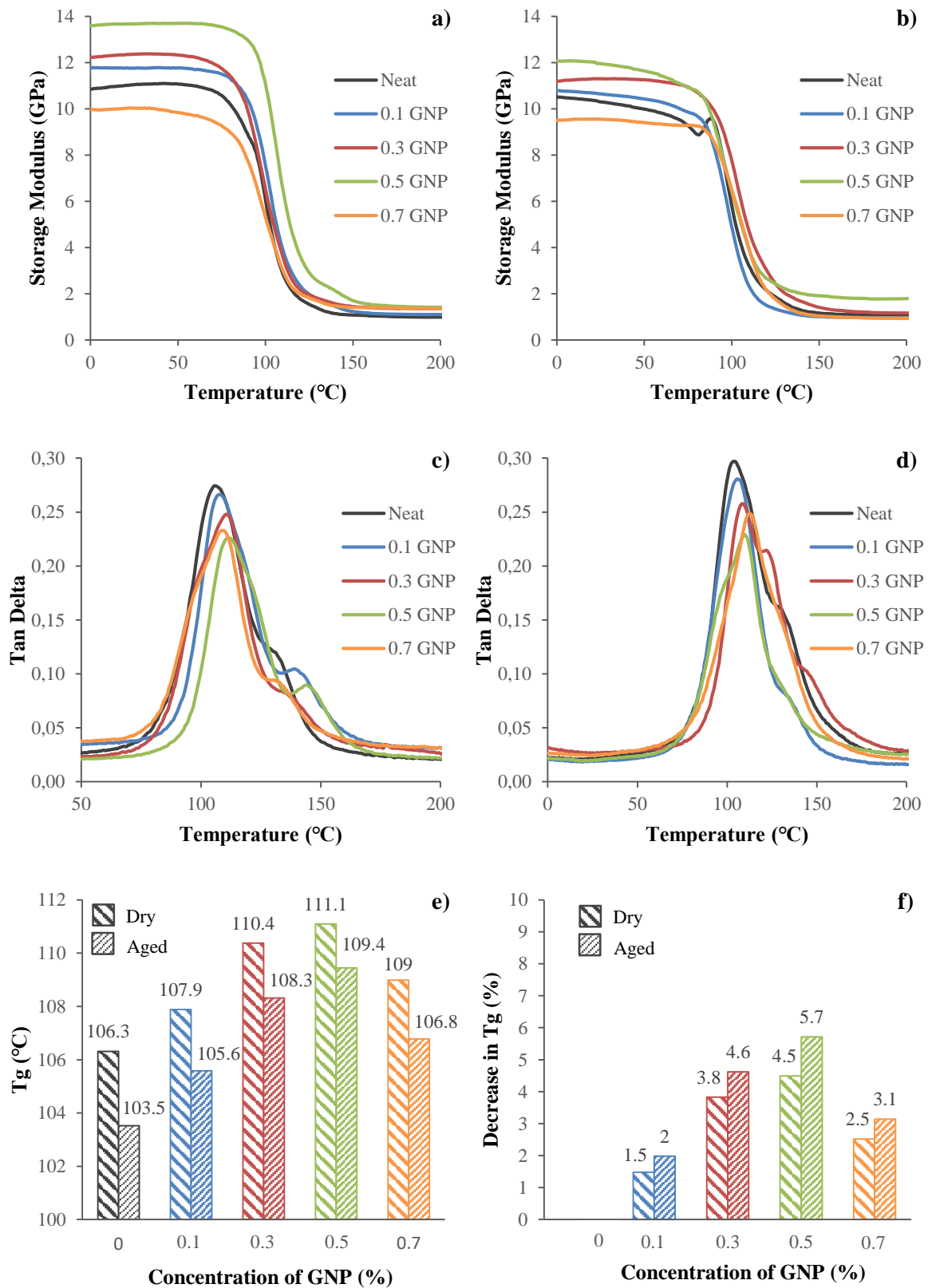


Figure 3. DMA properties of basalt/epoxy composites: (a) storage modulus as a function of temperature for dry samples, (b) storage modulus as a function of temperature for seawater-aged samples, (c) tan delta as a function of temperature for dry samples, (d) tan delta as a function of temperature for seawater-aged samples, (e) bar graph of Tg values as a function of GNP concentration, f) Decreasement of Tg values

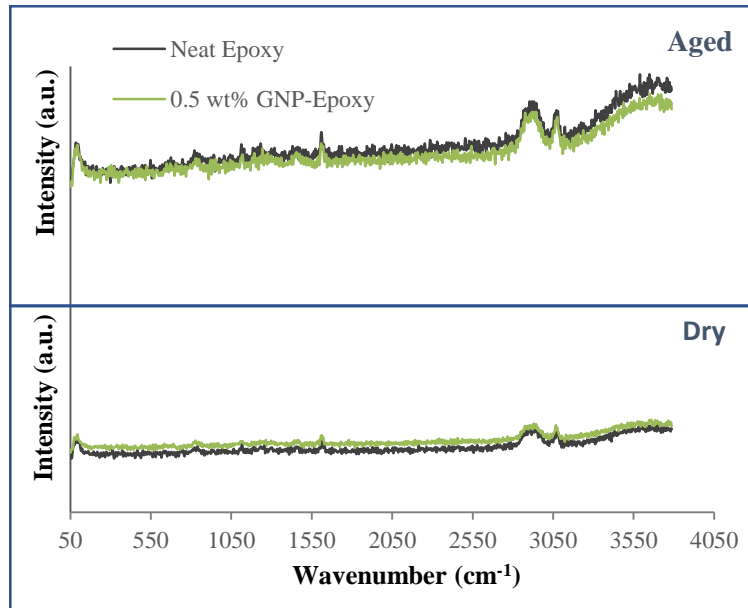


Figure 4. Raman spectra of dry and seawater aged basalt/epoxy composites

3.2 RAMAN analysis

Raman spectroscopy studies have been performed to confirm the impact of seawater aging on chemical interactions. It is seen in Figure 4 that the peak intensity of the hydroxyl groups (around 3000 cm^{-1}) of composites changed after seawater aging. This changing peak intensity is associated with water content in the composites [11, 36]. Here, the increase of hydroxyl peaks due to water absorption for both composites are seen. However, it can be said that the addition of 0.5 wt% GNP has led to a small amount of peak intensity change depends on the barrier properties of GNPs after 1-year aging. Although it is known that the mechanical performance of epoxy in room conditions is improved by adding GNP in the range of 0-1 wt% [28-30], the rate of 2-5 wt% GNP adding is noteworthy in the literature to provide effective barrier properties [31-33].

4 Conclusions

Present research systematically deals with evaluating long-term seawater durability of basalt/epoxy composite modified with different levels of GNPs adding. The DMA results are in agreement with the SBS test results. According to the results of this work, the following observations can be drawn.

1. The presence of GNPs in the basalt/epoxy composites notably strengthens the interlaminar shear properties and T_g , which is reflected in the decreased tan delta maxima peak of DMA curves.

2. SBS test results show that incorporating GNP ranges from 0.1-0.5 wt% enhanced the ILSS of composites. However, at 0.7 wt% of GNP, there was not more enhancement of ILSS. The optical microscope investigations demonstrated that performed matrix modification by adding GNPs improve fiber-matrix interfacial bonding properties.

3. For GNPs reinforced multi-scale composites; the 0.1-0.5 wt% GNP included samples had the highest storage modulus because of the interlocking effect. Compared with

the neat epoxy composite, the 0.5 wt% GNP included composites showed a much higher storage modulus because of enhanced fiber-matrix interface bonding.

4. It was observed that the intensity of the hydroxyl group peak of unaged composites relatively lower than the seawater-aged composites. On the other hand, the fact that the peak intensity was slightly lower in nanoparticle reinforced samples referred that GNPs addition relatively limited the amount of absorbed water.

In conclusion, this work has shown that 0.5 wt% GNP modified basalt/epoxy multi-scale composites exhibit significantly higher mechanical performance after long-term seawater immersion.

Acknowledgment

Thank the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) for their support under grant number MAG-120M369.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %7

References

- [1] Q. Liu, M. T. Shaw, R. S. Parnas, and A. M. McDonnell, Investigation of basalt fiber composite mechanical properties for applications in transportation, *Polymer Composites*, 27 (1), 41-8, 2006. <https://doi.org/10.1002/pc.20162>.
- [2] E. F. Şükür, Dry sliding friction and wear properties of CaCO_3 nanoparticle filled epoxy/carbon fiber composites, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 1108-17, 2020. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.725631>.
- [3] M. Bağcı, M. Demirci, E. F. Sukur, and H. B. Kaybal, The effect of nanoclay particles on the incubation period in solid particle erosion of glass fibre/epoxy

- nanocomposites, *Wear*, 444, 203159, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203159>.
- [4] H. Burak Kaybal, A. Unuvar, Y. Kaynak, and A. Avcı, Evaluation of boron nitride nanoparticles on delamination in drilling carbon fiber epoxy nanocomposite materials, *Journal of Composite Materials*, 54(2), 215-27, 2020. <https://doi.org/10.1177/0021998319860245>.
- [5] H. B. Kaybal, A. Ünüvar, M. Koyunbakan, and A. Avcı, A novelty optimization approach for drilling of CFRP nanocomposite laminates, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100 (9-12), 2995-3012, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2873-1>.
- [6] V. Eskizeybek, H. Ulus, H. B. Kaybal, Ö. S. Şahin, and A. Avcı, Static and dynamic mechanical responses of CaCO₃ nanoparticle modified epoxy/carbon fiber nanocomposites, *Composites Part B: Engineering*, 140, 223-31, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.013>.
- [7] H. B. Kaybal, H. Ulus, O. Demir, Ö. S. Şahin, and A. Avcı, Effects of alumina nanoparticles on dynamic impact responses of carbon fiber reinforced epoxy matrix nanocomposites, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21 (3), 399-407, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.03.011>.
- [8] M. T. Kim, K. Y. Rhee, I. Jung, S. J. Park, and D. Hui, Influence of seawater absorption on the vibration damping characteristics and fracture behaviors of basalt/CNT/epoxy multiscale composites, *Composites Part B: Engineering*, 63, 61-6, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.03.010>.
- [9] M. K. Hossain et al., Effect of low velocity impact responses on durability of conventional and nanophased CFRP composites exposed to seawater, *Polymer Degradation and Stability*, 99, 180-9, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2013.11.008>.
- [10] Hasan Ulus, Halil Burak Kaybal, Volkan Eskizeybek, and A. Avcı, Enhanced Salty Water Durability of Halloysite Nanotube Reinforced Epoxy/Basalt Fiber Hybrid Composites, *Fibers and Polymers*, 20 (10), 2184-99, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12221-019-9316-y>.
- [11] H. Ulus, H. B. Kaybal, V. Eskizeybek, and A. Avcı, Halloysite nanotube reinforcement endows ameliorated fracture resistance of seawater aged basalt/epoxy composites, *Journal of Composite Materials*, 54(20), 2761-79, 2020. <https://doi.org/10.1177/0021998320902821>.
- [12] V. Startsev, M. Lebedev, K. Khrulev, M. Molokov, A. Frolov, and T. Nizina, Effect of outdoor exposure on the moisture diffusion and mechanical properties of epoxy polymers, *Polymer Testing*, 65, 281-96, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.12.007>.
- [13] Z. Wang, X.-L. Zhao, G. Xian, G. Wu, R. S. Raman, and S. Al-Saadi, Durability study on interlaminar shear behaviour of basalt-, glass-and carbon-fibre reinforced polymer (B/G/CFRP) bars in seawater sea sand concrete environment, *Construction and Building Materials*, 156, 985-1004, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.045>.
- [14] E. Barjasteh, C. Sutanto, T. Reddy, and J. Vinh, A graphene/graphite-based conductive polyamide 12 interlayer for increasing the fracture toughness and conductivity of carbon-fiber composites, *Journal of Composite Materials*, 51 (20), 2879-87, 2017. <https://doi.org/10.1177/0021998317705707>.
- [15] K. A. Imran, M. K. Hossain, M. Hosur, and S. Jeelani, Assessment of moisture barrier, mechanical, and thermal property of base/nanophased carbon-epoxy composites in seawater, *Journal of Composite Materials*, 2020. <https://doi.org/10.1177/0021998320953480>.
- [16] S. Chandrasekaran, N. Sato, F. Tölle, R. Mülhaupt, B. Fiedler, and K. Schulte, Fracture toughness and failure mechanism of graphene based epoxy composites, *Composites Science and Technology*, 97, 90-9, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.03.014>.
- [17] H. Ulus, H. B. Kaybal, V. Eskizeybek, and A. Avcı, Enhanced salty water durability of halloysite nanotube reinforced epoxy/basalt fiber hybrid composites, *Fibers and Polymers*, 20 (10), 2184-99, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12221-019-9316-y>.
- [18] Y. Li, H. Zhang, Z. Huang, E. Bilotti, and T. Peijs, Graphite nanoplatelet modified epoxy resin for carbon fibre reinforced plastics with enhanced properties, *Journal of Nanomaterials*, 2017, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/5194872>.
- [19] J. Naveen, M. Jawaid, E. S. Zainudin, M. Thariq Hameed Sultan, and R. Yahaya, Improved mechanical and moisture-resistant properties of woven hybrid epoxy composites by graphene nanoplatelets (GNP), *Materials*, 12 (8), 1249, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12081249>.
- [20] C.-L. Chiang, H.-Y. Chou, and M.-Y. Shen, Effect of environmental aging on mechanical properties of graphene nanoplatelet/nanocarbon aerogel hybrid-reinforced epoxy/carbon fiber composite laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105718>.
- [21] H. Khosravi and R. Eslami-Farsani, Enhanced mechanical properties of unidirectional basalt fiber/epoxy composites using silane-modified Na⁺-montmorillonite nanoclay, *Polymer Testing*, 55, 135-142, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.08.011>.
- [22] B. Wei, H. Cao, and S. Song, Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater, *Corrosion Science*, 53 (1), 426-31, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.09.053>.
- [23] X. Wang, X. Zhao, and Z. Wu, Fatigue degradation and life prediction of basalt fiber-reinforced polymer composites after saltwater corrosion, *Materials & Design*, 163, 107529, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.12.001>.

- [24] E. F. Sukur and G. Onal, Graphene nanoplatelet modified basalt/epoxy multi-scale composites with improved tribological performance, *Wear*, 460, 203481, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203481>.
- [25] H. Ulus, H. B. Kaybal, V. Eskizeybek, and A. Avci, Halloysite Nanotube Reinforcement Endows Ameliorated Fracture Resistance of Seawater Aged Basalt/Epoxy Composites, *Journal of Composite Materials*, vol. Accepted paper, 2020. <https://doi.org/10.1177/0021998320902821>.
- [26] M. K. Hossain, M. M. R. Chowdhury, M. Hosur, S. Jeelani, and N. W. Bolden, Enhanced Properties of Epoxy Composite Reinforced With Amino-Functionalized Graphene Nanoplatelets, in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, 51483, 2015. <https://doi.org/10.1115/IMECE2015-51483>.
- [27] M. K. Hossain, M. M. R. Chowdhury, M. Hosur, S. Jeelani, and N. W. Bolden, Enhanced Properties of Epoxy Composite Reinforced With Amino-Functionalized Graphene Nanoplatelets, in *ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2015: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. <https://doi.org/10.1115/IMECE2015-51483>.
- [28] J. Naveen, M. Jawaid, E. Zainudin, M. T. Sultan, and R. Yahaya, Improved Interlaminar Shear Behaviour of a New Hybrid Kevlar/Cocos Nucifera Sheath Composites with Graphene Nanoplatelets Modified Epoxy Matrix, *Fibers and Polymers*, 20 (8), 1749-53, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12221-019-3127-z>.
- [29] U. R. Hashim and A. Jumahat, Improved tensile and fracture toughness properties of graphene nanoplatelets filled epoxy polymer via solvent compounding shear milling method, *Materials Research Express*, 6 (2), 025303, 2018. <https://doi.org/10.1088/20531591/aaef0>.
- [30] Z. Jia, X. Feng, and Y. Zou, An investigation on mode II fracture toughness enhancement of epoxy adhesive using graphene nanoplatelets, *Composites Part B: Engineering*, 155, 452-56, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.094>.
- [31] M. Bakir et al., Effects of environmental aging on physical properties of aromatic thermosetting copolyester matrix neat and nanocomposite foams, *Polymer Degradation and Stability*, 147, 49-56, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.11.009>.
- [32] X. F. Sánchez-Romate, P. Terán, S. González-Prolongo, M. Sánchez, and A. Ureña, Hydrothermal ageing on self-sensing bonded joints with novel carbon nanomaterial reinforced adhesive films, *Polymer Degradation and Stability*, 109170, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109170>.
- [33] S. Prolongo, R. Moriche, A. Jiménez-Suárez, M. Sánchez, and A. Ureña, Advantages and disadvantages of the addition of graphene nanoplatelets to epoxy resins, *European Polymer Journal*, 61, 206-14, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.09.022>.
- [34] M. Jacob, B. Francis, S. Thomas, and K. Varughese, Dynamical mechanical analysis of sisal/oil palm hybrid fiber-reinforced natural rubber composites, *Polymer Composites*, 27 (6), 671-80, 2006. <https://doi.org/10.1002/pc.20250>.
- [35] D. Pedrazzoli, A. Pegoretti, and K. Kalaitzidou, Synergistic effect of exfoliated graphite nanoplatelets and short glass fiber on the mechanical and interfacial properties of epoxy composites, *Composites Science and Technology*, 98, 15-21, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.04.019>.
- [36] H. Alamri and I. M. Low, Effect of water absorption on the mechanical properties of nano-filler reinforced epoxy nanocomposites, *Materials & Design*, 42, 214-22, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.060>.



Yüksek iletkenliğe sahip farklı üç boyutlu grafen hidrojenlerin hazırlanması

Preparation of high conductive different sizes of three dimensional graphene hydrogels

Ersan Harputlu^{1,*} 

¹Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, 33400 Tarsus/Mersin Türkiye

Özet

Grafen tabakalarının üretim yöntemlerine bakıldığında hem kalite ve yüksek yüzey alanına sahip grafenin sentezlenmesi açısından Kimyasal Buhar Depolama (Chemical Vapor Deposition, CVD) tekniği en sık kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Öte yandan, kimyasal yöntemler kullanılarak elde edilebilen grafen tabakalar büyük ölçeklerde ve düşük maliyetle hazırlanabilmektedir. Dolayısıyla grafit tabakalardan üç boyutlu grafen hidrojel yapılarını kimyasal olarak üretmek için tercih edilen ve günümüzde de hala oldukça yaygın bir şekilde kullanılan başlıca yöntem Hummer's metodu ile elde edilen grafen oksit (GO) katmanların hidrotermal içerisinde grafen-hidrojelere (GH-H) dönüştürülmesidir. Çalışmanın amacı, farklı üç boyutlu grafen hidrojel yapılarının hidrotermal yöntemle hazırlanması ve boyutsal özelliklerinin incelenmesini içermektedir. Elde edilen ürünlerin uygulanan yöntem aşamalarına göre karakterizasyonları Ultraviyole ve görünür ışık absorpsiyon spektroskopisi (UV-Vis), Atomik Kuvvet Mikroskopu (AFM), X-Işını Kırınım (XRD) yöntemi, Alan Yayımlı-Taramalı Elektron Mikroskopu (FE-SEM) ve Raman analizi kullanılarak yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Grafit, Grafen oksit, Grafen hidrojel

Abstract

The production of graphene layers, both quality and high production cost, is obtained from Chemical Vapor Deposition (CVD) technique. On the other hand, graphene layers can be prepared using wet chemical methods on a large scale and at low cost. Therefore, the main method preferred for the chemical production of three-dimensional graphene hydrogel structures from graphite plates and still widely used today is the conversion of graphene oxide (GO) layers obtained by the Hummer's method to graphene hydrogel (GH-H) in hydrothermal. The aim of the study includes preparation of different three dimensional graphene hydrogel structures by hydrothermal method. Characterization of the products was made with the applied method steps, respectively; Ultraviolet and visible light absorption spectroscopy (UV-Vis), Atomic Force Microscope (AFM), X-Ray Diffraction (XRD), Field Emission-Scanning Electron Microscope (FE-SEM) and Raman analysis.

Keywords: Graphite, Graphene oxide, Graphene hydrogel

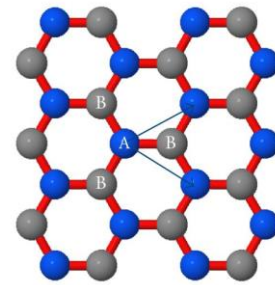
1 Giriş

Son yıllarda, çeşitli karbon nano-yapılı malzemeler farklı alanlardaki araştırmacılar arasında oldukça yoğun bir ilgi görmüştür. Grafen iki boyutlu (2B), tek katmanlı malzemeyi temsil eden bir malzeme olarak; yüksek termal iletkenlik, geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik nedeniyle sensörler, kataliz ve çevre alanlarındaki uygulamalar için bilim dünyasının dikkatini çekmiştir. Kendiliğinden bir araya (self-assembly) gelen grafen ve onun fonksiyonelleştirilmiş türevleri olan 2B grafen filmleri ve üç boyutlu (3B) grafen/polimer kompozitler gibi benzersiz yapıları nedeniyle fonksiyonel karbon bazlı malzemeler için olağanüstü yapı taşları olarak kullanılmaktadır [1-4].

Kimyasal modifikasyonlar veya kovalent olmayan fonksiyoneleştirmelerle çeşitli grafen bazlı kompozit malzemelerin üretimini; π - π^* bant yapısının grafen tabakaları arasındaki güçlü etkileşimi sayesinde onların hidrofobik olmasını ve bir araya getirmesini kolay hale getirmektedir [4].

Grafen, altıgen bir kafes içine yerleştirilmiş tek bir karbon atomu katmanından oluşan bir allotroptur. Değerlik ve iletim bantları (sıfır bant aralığı malzemesi) arasında küçük bir örtüşme yapmasından dolayı bir semi-metal olarak da adlandırılır [5, 6]. Grafen, kristal yapısı sayesinde dikkat çekici bir bant yapısına sahiptir. İki boyutlu bir düzlemde altıgen bir kafes oluşturan karbon atomlarının her biri, bir σ

bağını paylaştığı üç komşusundan yaklaşık $a=1.42 \text{ \AA}$ 'luk bir mesafededir. Dördüncü bağ z yönünde (düzlem dışı) yönlendirilmiş bir π bağıdır. Her atom bu π bağlarından birine sahiptir ve daha sonra π bant ve π^* bantları olarak adlandırılan yapıyı oluşturmak üzere birlikte hibritlenirler. Bu bantlar, grafenin kendine özgü elektronik özelliklerinin çoğundan sorumludur [6]. Şekil 1'de gösterildiği gibi grafenin altıgen kafesi, iki araya eklenmiş üçgen kafes gibi görülmektedir [7].

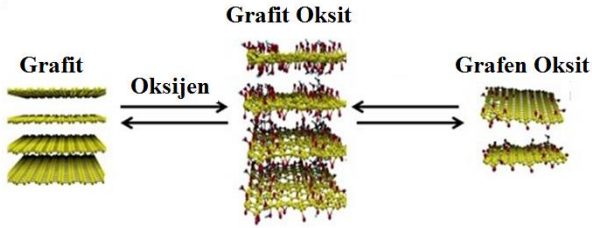


Şekil 1. Grafenin üçgen alt parçalarının şematik gösterimi. (A) Bir alt düzlemdeki her bir atomu, (B) alt düzlemdeki en az 3 komşu atomu nitelemektedir [8]

Bir atom kalınlığında grafit tabakası olan grafenin, düşük kütle yoğunluğu, mükemmel elektrik iletkenliği ve yüksek

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ersanharputlu@tarsus.edu.tr (E. Harputlu)
Geliş / Recieved: 26.05.2020 Kabul / Accepted: 10.09.2020 Yayımlanma / Published: 15.01.2021
doi: 10.28948/ngumuh.742883

spesifik yüzey alanı ($\sim 2630 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$) nedeniyle yüksek performanslı enerji depolama cihazlarının üretilmesinde umut verici malzeme olduğu yapılan araştırmalarda görülmektedir [9-14].



Şekil 2. Grafit oksit tabakalarının üretimini gösteren şematik yapı [17]

Üç (3) boyutlu Grafit hidrojel üretiminde ilk etapta Hummers metodu kullanılarak doğal grafit'in, kuvvetli oksitleyiciler olan bir sülfürik asit, sodyum nitrat ve potasyum permanganat karışımı ile işlenmesiyle grafit oksit tabakaları hazırlanır. Grafit oksit tabakalar ultrasonik banyoda bir süre bekletildikten sonra elde edilen yeni ürün hemen hemen tek katmanlı grafit oksit (GO) tabakalar haline gelmiş olur (Şekil 2) [15, 16].

GO katmanların sulu dispersiyonlarının hidrotermal içerisinde indirgenmesi ile GH-H meydana gelmektedir. Üç boyutlu GH-H ve indirgenmiş GO ince filmleri, elektronik ve biyolojik uygulamalara yönelik araştırmalarda yüksek performans göstermektedir [4, 5]. Dolayısıyla bilimsel anlamda uygulamaya yönelik yapılacak çalışmalarda kullanılacak istenilen ölçülerde 3 boyutlu GH-H yapılarının hazırlanması için mevcut bu çalışmada, hidrotermal yöntem kullanılarak farklı üç boyutlu GH-H yapılarının elde edilmesini içermektedir.

2 Bulgular ve tartışma

2.1 Kullanılan kimyasallar

GH-H yapılarının oluşturulmasında kullanılan kimyasallar, Grafit tozu ($<45 \mu\text{m}$, $\geq 99.99\%$), Sülfürik asit (H_2SO_4), potasyum permanganat (KMnO_4), hidrojen

perovskit (H_2O_2), nitrik asit (HNO_3) ve hidroklorik asit (HCl) ve askorbik asit Sigma Aldrich'ten firmasından temin edilmiştir.

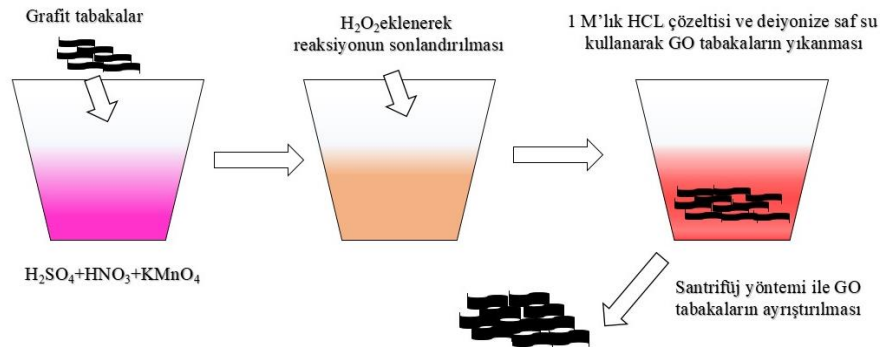
2.2 Grafit oksit tabakaların elde edilmesi

Grafit tozu (3 g) ile 230 ml H_2SO_4 (%95.5-96.5) çözeltisi 200 rpm de bir balon şişede 24 saat karıştırıldı. Daha sonra karışıma, 76 ml HNO_3 (%70) eklenerek oda sıcaklığında tutulmuş olup 24 saat karışmaya bırakıldı. 150 ml deiyonize su daha sonra yavaşça karışıma eklenerek 60 dk boyunca 400 rpm karışmaya devam edildi ve elde edilen ürün ortalama üç kez saf su kullanılarak yıkanarak 7000 rpm de santrifüj edildi.

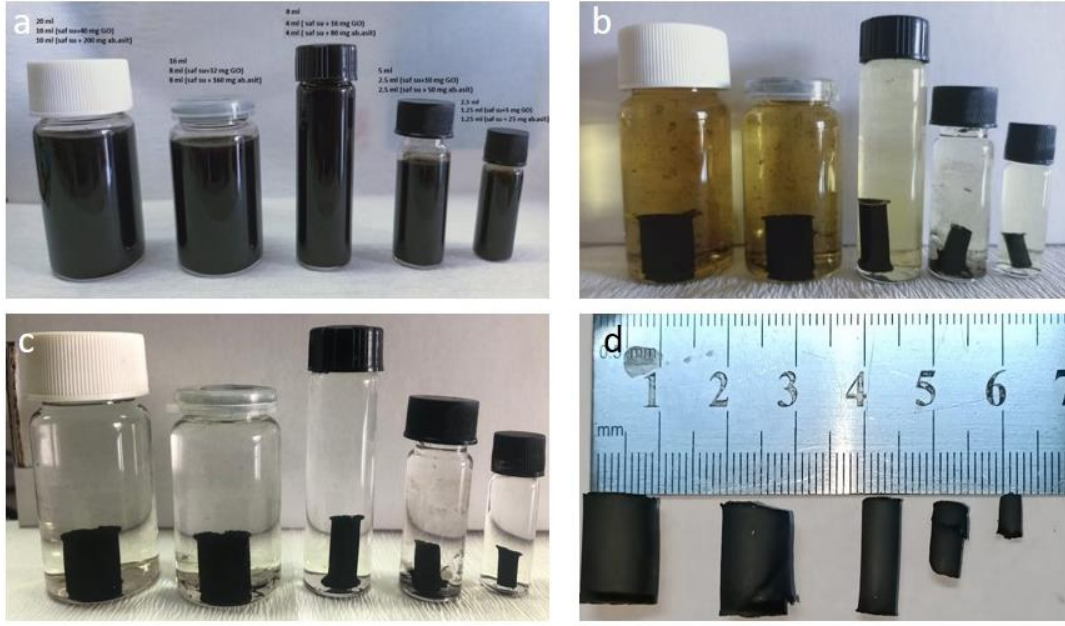
Her bir yıkamada grafit tozunun sulu dispersiyonlarının pH değerlerine bakılmış olup, çözelti ortamının pH değeri 6 olana kadar yıkama işlemi devam etmiştir. Çözelti ortamından uzaklaştırılan katı malzeme 60°C 'de 24 saat süreyle kurumaya bırakıldı. Tamamen yüksek miktarda oksitlenmiş grafit elde etmek dahası grafit tabakalarının yüzey genişliklerine herhangi bir zarar vermeden başlangıç yanal boyutlarını korumasını sağlamak ve elde edilecek neredeyse tek katman GO miktarının artışı sağlamak amacıyla grafit tabakaları 1050°C 'de 15 saniye boyunca ısıtılma maruz bırakıldı. Böylelikle tabaka kalınlıkları $\approx 5-100 \text{ nm}$ aralığında olan genişletilmiş grafit elde edildi [18]. 1 g genişletilmiş grafit ve 200 mL sülfürik asit 24 saat boyunca oda sıcaklığında karışmaya bırakıldı ve sonrasında, karışıma 10 g KMnO_4 ilave edildi. Karışım bir buz banyosuna aktarılarak içerisinde ilk etapta 200 mL deiyonize su sonra 50 mL H_2O_2 yavaş yavaş karışıma eklendi ve süspansiyonun açık kahverenginde bir renk olana kadar karıştırılmaya bırakıldı. 30 dakika daha karıştırıldıktan sonra GO parçacıkları saf su ve HCl çözeltisi (9: 1 su: hacimce HCl) ile yıkandı. Son olarak GO tabakaları santrifüj yöntemi ile çözelti ortamından uzaklaştırdı ve vakum ortamında kurumaya bırakıldı [19].

2.3 Grafit Hidrojel Üretimi

Hummer's metot ile elde edilen GO sulu dispersiyonlarına askorbik asit eklenerek çelik hidrotermal kaplar içerisinde 90°C 'de 12 saat süre ile indirgenmesi sonucunda ortaya çıkan yeni ürün grafit hidrojel (GH-H) formunu kazanmıştır. Yapılan işlemler aşağıdaki sıralama doğrultusunda gerçekleştirilmiştir;



Şekil 3. GO tabakalının sentezi için kullanılan Hummer's metot'un şematik gösterimi



Şekil 4. (a) Hidrotermal öncesinde farklı miktarlarla hazırlanan GO çözeltilerinin görünümü, (b) hidrotermal sonrası grafen hidrojellerin ilk görüntüsü, (c) Grafen hidrojellerin oksit çözelti ortamından uzaklaştırılmış durumu, (d) grafen hidrojellerin çözelti ortamından alınarak kurutulmuş halleri

• Mili litre başına 2 mg kullanılan GO ile homojen sulu dispersiyonu (20 ml, 16 ml, 8 ml, 5 ml, 2.5 ml) hazırlandı, daha sonra her bir GO sulu dispersiyonları içerisine askorbik asit (20 ml için 200 mg, 16 ml için 160 mg, 8 ml için 80 mg, 5 ml için 50 mg, 2.5 ml için 25 mg) eklendi (100 ml'lik bir teflon kaplı paslanmaz çelik hidrotermal otoklav reaktör içerisinde konarak 12 saat boyunca 90° C'lik ısıya maruz bırakıldı,

• Farklı boyutlarda GH-H üretilmesi için, GO sulu dispersiyonları farklı boyutlarda cam şişelerde hazırlandı ve uygun ebatlardaki teflon kaplara konuldu (Şekil 4a).

Böylece elde edilen üç boyutlu GH-H'lerin fiziksel boyutlarındaki değişim Şekil 4b'deki gibi rahatlıkla görülmektedir. Her bir GH-H boyutları buldukları kaplar ile uyumlu bir şekilde oluştuğu gözlemlendi. GH-H yapıları daha sonra defalarca saf su ile tekrar tekrar yıkanarak buldukları oksitli çözeltilerden uzaklaştırılmaları sağlandı (Şekil 4c). Grafen hidrojellerin yıkanma işlemi sonrasında, yapılar liyofilizasyon veya dondurarak kurutma olarak adlandırılan sistemde bir gece bekletilerek buldukları sulu ortamdan uzaklaştırılmış ve kuru olarak elde edilmiştir. Boyutlarındaki yapısal değişim, çap olarak 2 mm den 9 mm ye kadar değişirken, boyları ise 4 mm den 13 mm kadar değişim göstermiştir (Şekil 4d)

3 Bulgular ve Tartışma

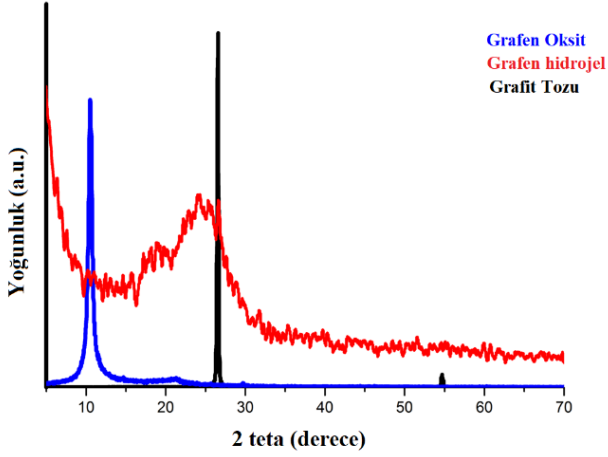
3.1 Grafit, GO ve GH-H üzerinde yapılan karakterizasyonlar

GO (Grafen Oksit), indirgenmiş grafen oksit hidrojel (GH-H) ve grafit tozunun kristalografik karakterizasyonu ile ara tabaka mesafesi X-Işını Kırınım yöntemi (XRD, Rigaku)

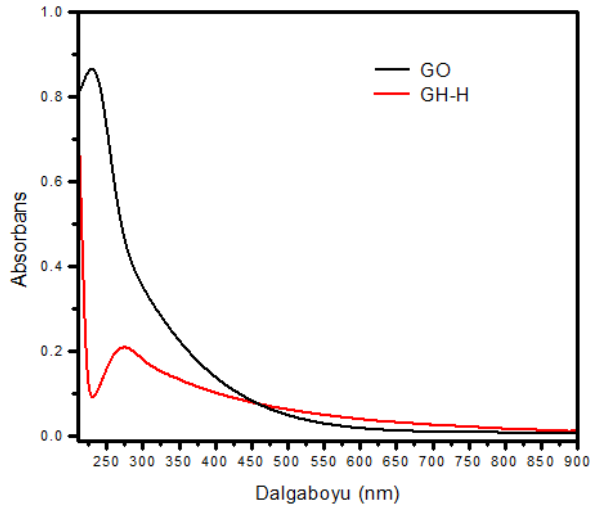
kullanılarak belirlenmiştir (Rigaku, $\text{CuK}\alpha \lambda = 1.5418 \text{ \AA}$). GO, rGO-H ve grafit tozunun XRD spektrumu Şekil 8'de gösterildiği gibi elde edildi. Grafit'in XRD spektrumuna bakıldığında, literatür verileri ile uyumlu olan d mesafesinin 3.34 Å aralığına karşılık gelen $2\theta = 26.60$ derece keskin bir tepe noktasının olduğu (002) rahatlıkla görülmektedir (JCPDS 75-2078, 3.347).

GO'nun XRD spektrumuna bakıldığında 2θ ya karşılık gelen açının 10.52 derecelere kadar kaydığı, bunun sebebinin ise grafen katmanlar arasında oksijen içeren fonksiyonel grupların oluşması ile d mesafesinin ($d = 8.5 \text{ \AA}$) artışı ile açıklanmaktadır. GO'nun indirgenmesi ile elde edilen GH-H'nin XRD spektrumuna bakıldığında, 2θ ya karşılık gelen açının 24.52 derecelere olduğu tespit edilmiş olup, GH-H tabakalardaki mesafenin tekrar 3.60 Å'na kadar azaldığı görülmüştür. Böylelikle, grafen oksit katmanlar arasında oksijen içeren fonksiyonel grupların indirgenmesinin başarıyla gerçekleştiği tespit edildi. GO'nun absorpsiyon piki 229 nm'deki gibi karakteristik bir tepe noktası olarak saptanırken ($\pi-\pi^*$ aromatik C=C bağlarının geçişi), GO'nun hidrotermalde askorbik asit ile 90 °C'de 12 saat süreyle indirgendikten sonra GH-H'nin absorpsiyon piki, GO tabaklarından oksijenli fonksiyonel gruplarının çıkarılması ve konjuge yapının restorasyonu nedeniyle 229 nm tepe noktasının 274 nm'ye kırmızı kaydığını göstermiştir [19].

GO'nun askorbik asit tarafından GH-H'ye başarıyla indirgendiği sonucuna varılır. Grafit, GO ve GH-H üzerinde yapılan diğer bir analiz, Raman Spektroskopisi (WITec alpha300 Series High-Resolution Optical and Scanning Probe Microscopy Systems) kullanılarak yapıldı. Bu teknik sayesinde malzemelerin kristal yapısındaki bozukluk ve kusurları incelemek için yararlı olduğundan, genellikle grafit ve türevlerini karakterize etmek için kullanılır.



Şekil 5. GO (Grafen Oksit), indirgenmiş grafen oksit hidrojel (GH-H) ve grafit tozuna ait XRD spektrumları.



Şekil 6. GO, GH-H ait UV-Vis absorpsiyon spektrumları.

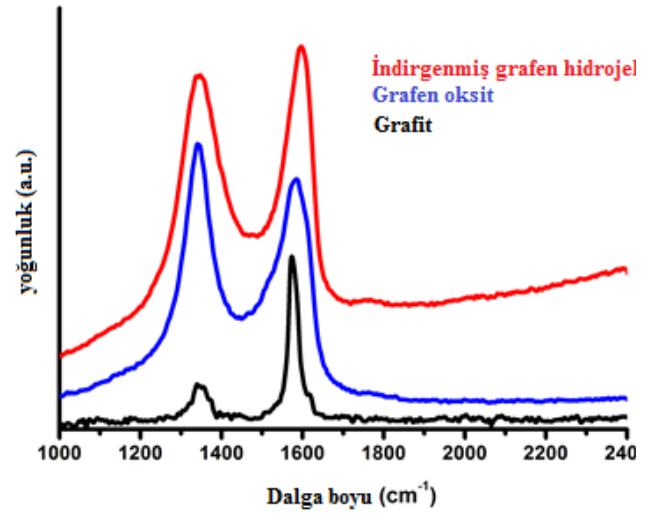
Kristal yapıdaki kusurlar, indüklenen D bandı ve G bandı arasındaki şiddet oranı ile belirlenir (ID/IG). GO, GH-H ve grafit tozunun Raman spektrumları Şekil 10'da gösterilmektedir. Grafit, GO ve GH-H için G bandı sırasıyla 1571 cm^{-1} , 1590 cm^{-1} ve 1595 cm^{-1} 'de iken D bandı; 1339 cm^{-1} , 1345 cm^{-1} ve 1350 cm^{-1} 'de tespit edildi (Şekil 7). G bandı tüm sp^2 karbon formları için ortaktır ve C-C bağ gerilmesinden kaynaklanır. Bu bant ilk sıra Raman saçılmasından oluşur.

GO'daki G bandı, grafitin oksijenlenmesi nedeniyle sp^3 karbon atomlarının oluşmasıyla sonuçlanan daha yüksek bir dalga boyuna kaymaktadır [20, 21]. GO'daki D bandı, sp^2 alanlarının boyutundaki azalma nedeniyle oksidasyon sırasında kusurlar ve boşluklar nedeniyle genişler. ID/IG oranının 0.81'den (Grafit) yaklaşık olarak 1.01'e (GO) yükselmesi, oksijen içeren fonksiyonel grupların grafit tabakaları arasında oluşması sağlanmıştı. GH-H durumunda,

artan sp^2 karbon atomu sayısı nedeniyle G bandı daha düşük bir dalga boyuna kaymasına neden olur. İndirgeme sırasında, D bandının yoğunluğu azalır, ancak grafitte olduğu kadar azalmaz.

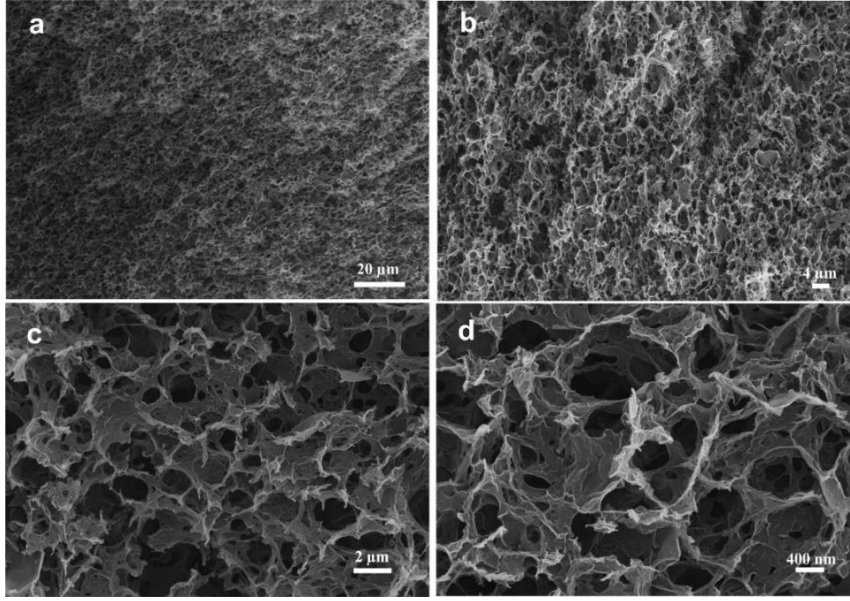
İndirgeme işleminden sonra oksijen içeren fonksiyonel grupların grafit yüzeyinde ayrılması ile ID/IG oranı yaklaşık olarak 0.87 (GH-H) oranına geri azaldığı tespit edildi.

Hidrotermal içerisinde GO'nun indirgeme sırasında GO levhaların konjuge yapısı, 3D grafen ağının güçlü çapraz bağlarını oluşturan π istifleme etkileşimleri yoluyla esnek grafen levhaların kısmen örtüşmesine veya birleşmesine neden olabilmektedir. Gözenek yapısı, grafen tabakalarının fiziksel çapraz bağlanması ile oluşturulmuştur. GH-H yapısındaki gözenek yapılarının görüntülenmesi Alan Yayımlı-Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM, Field Emission-Scanning Electron Microscopy, Zeiss Supra 55) kullanılarak ortaya çıkartıldı. GH-H deki gözenek boyutlarının SEM görüntülerinden de anlaşılacağı üzere 500 nm den 6 mikrona kadar değişiklik göstermektedir.

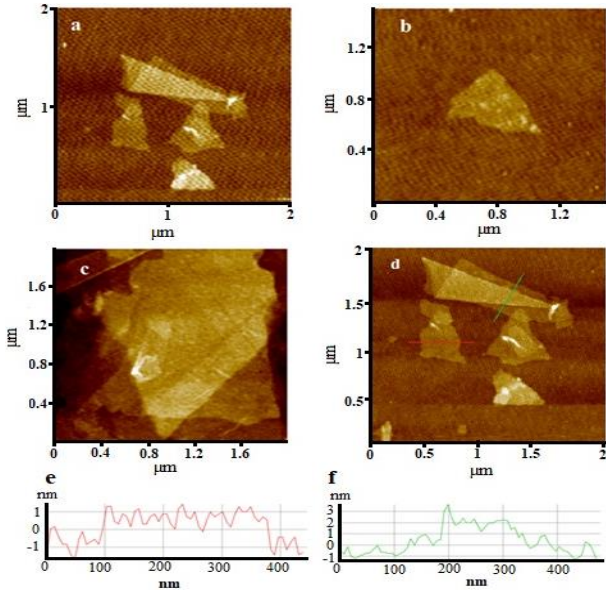


Şekil 7. GO, GH-H ve Grafit tozunun RAMAN spektrumları.

Çalışma sırasında elde edilen beş (5) farklı GH-H'in SEM görüntüleri incelendiğinde GH-H içerisindeki gözenek boyutları Şekil 8'deki gözenek boyutları ile benzer olduğu tespit edilmiştir. Tek katmanlı grafen oksit yapıların yüzey morfolojisi Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM, Park Systems XE 100E) kullanılarak tespit edildi. AFM görüntüsünün yükseklik profilinden ölçülen kalınlık, Şekil 12d, literatürde rapor edilen verilerle birebir benzerlik içermektedir. Tek katmanlı GO oluşumunu gösteren tabakanın yüksekliği yaklaşık 1.1 nm mertebesindedir, GO tabakaların bir birleri üstüne gelmesi ile oluşan katman yüksekliği yaklaşık olarak 2.4 nm mertebesine kadar yükselmiştir (Şekil 9 e, f).



Şekil 8. Elde edilen GH-H'lerin farklı büyütme ölçeklerinde alınmış SEM görüntüleri.



Şekil 9. Mika yüzeyindeki grafen oksit (GO) tabakalarının AFM görüntüsü (a, b, c, d). GO tabakaların AFM yükseklik profilleri (e, f).

4 Sonuçlar

Grafen yapıların CDV metodu ile üretim maliyetinin yüksek olması ve kompozit malzemelere uygulanabilirliğinin sınırlı sayıda olması bilimsel olarak çalışma yelpazesini kısıtlamaktadır. Diğer bir taraftan kimyasal yollar ile sentezlenen grafen hidrojel yapıların hem boyutsal (üç boyutlu olması) hem de yapısal özelliklerinden (gözenekli ve geniş mikroskobik yüzey alanına sahip olması) dolayı CVD metodu ile üretilen grafen'e göre bilimsel olarak çalışma alanı daha geniştir. Dahası, son derece birbirine bağlı üç boyutlu (3B) ağ yapısına sahip grafen hidrojellerin olağanüstü elektriksel iletkenliğe ve mekanik sağlamlığa sahip olmalarından dolayı enerji depolamak için kullanılan cihazlarda veya katı-hal süperkapasitörlerde kullanılan mükemmel bir malzeme olduğu bilinmekte ve araştırmalar

devam etmektedir. Çalışmanın amacı olan farklı üç boyutlu grafen hidrojel yapılarının hidrotermal yöntemle hazırlanması ve elde edilecek GH-H'lerin boyutsal özelliklerinin incelenmesi yapılarak, yapılan deneyler sonucunda her bir GH-H'in boyutları, buldukları kaplar ile uyumlu bir şekilde girdiği gözlenmiştir. GH-H'lerin SEM görüntülerinden de anlaşılacağı üzere yapıların içerisindeki gözenek çaplarında bir değişim gözlenmemiştir. Yapılan mevcut çalışma doğrultusunda boyutsal olarak yapılacak GH-H'lerin enerji depolama olsun enerji dönüşüm cihazları için uyumlu boyutlarda rahatlıkla hazırlanabileceği görülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar


- [1] H. Kuan-I, M. Boutchich, C.Y. Su, R. Moreddu, E.S.R. Marianathan, L. Montes and C.S. Lai, A self aligned high mobility graphene transistor: decoupling the channel with fluorographene to reduce scattering. *Advanced Materials*, 27, pp. 6519–25, 2015. <https://doi.org/10.1002/adma.201502544>
- [2] D.R. Cooper, B. D'Anjou, N. Ghattamaneni, B. Harack, M. Hilke, A. Horth, N. Majlis, M. Massicotte, L. Vandsburger, E. Whiteway and V. Yu, Experimental review of graphene. *ISRN Condensed Matter Physics. International Scholarly Research Network*, 1–56, 2012. <https://doi.org/10.5402/2012/501686>
- [3] P.R. Wallace, The band theory of graphite. *Physical Review*, 71, 622–34, 1947.
- [4] B. Seger and P.V. Kamat, Electrocatalytically active graphene-platinum nanocomposites. role of 2-d carbon support in PEM Fuel Cells. *J. Phys. Chem. C*, 113, 7990–7995, 2009. <https://doi.org/10.1021/jp900360k>
- [5] Y.J. Li, W. Gao, L.J. Ci, C.M. Wang and P.M. Ajayan, Catalytic performance of Pt nanoparticles on reduced

- graphene oxide for methanol electro-oxidation. *Carbon*, 48, 1124–1130, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.11.034>
- [6] J. Du, H.M. Cheng, The fabrication, properties, and uses of graphene. *Polymer Composites. Macromol. Chem. Phys.*, 213, 1060–1077, 2012. <https://doi.org/10.1002/macp.201200029>
- [7] Y.J. Kim, B.K. Kim, Synthesis and properties of silanized waterborne polyurethane/graphene nanocomposites. *Colloid Polym. Sci.*, 292, 51–58, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00396-013-3054-2>
- [8] Y.W. Zhu, S. Murali, W.W. Cai, X.S. Li, J.W. Suk, J.R. Potts and R.S. Ruoff, Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications. *Adv. Mater.*, vol. 22, 3906–24, 2010.
- [9] M.J. Allen, V.C. Tung and R.B. Kaner, Honeycomb carbon: a review of graphene. *chem. Rev.*, 110, 132–145, 2009.
- [10] Y. Sun, Q. Wu, G. Shi, Graphene based new energy materials. *Energy Environ. Sci.*, 4, 1113–32, 2011. <https://doi.org/10.1039/C0EE00683A>
- [11] C.N.R. Rao, A.K. Sood, K.S. Subrahmanyam, A. Govindaraj, Graphene: the new two-dimensional nanomaterial. *Angew. Chem., Int. Ed.*, vol. 48, pp. 7752–77, 2009.
- [12] P.J. Hall, M. Mirzaei, S.I. Fletcher, F.B. Sillars, A.J. R. Rennie, G.O. Shitta-Bey, G. Wilson, A. Cruden, and R. Carter, Energy storage in electrochemical capacitors: designing functional materials to improve performance. *Energy Environ. Sci.*, 3, 1238–1251, 2010. <https://doi.org/10.1039/C0EE00004C>
- [13] L.L. Zhang, R. Zhou and X.S. Zhao, Graphene-based materials as supercapacitor electrodes. *J. Mater. Chem.*, 20, 5983–92, 2010. <https://doi.org/10.1039/C000417K>
- [14] Y. Zhu, S. Murali, W. Cai, X. Li, J.W. Suk, J.R. Potts, and R.S. Ruoff, Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications. *Adv. Mater.*, 22, 3906–24, 2010. <https://doi.org/10.1002/adma.201001068>
- [15] L. Zhang, G. Shi, Preparation of Highly Conductive Graphene Hydrogels for Fabricating Supercapacitors with High Rate Capability. *J. Phys. Chem. C*, 115, 17206–212, 2011.
- [16] W.S. Hummers and R.E. Offeman, Preparation of graphitic oxide. *J. Am. Chem. Soc.*, 80, 1339, 1958. <https://doi.org/10.1021/ja01539a017>
- [17] J. Meihua, H.K. Tae, C.L. Seong, L.D. Dinh, J.S. Hyeon, W.J. Young, K.J. Hae, C. Jian, X. Sishen, H.L. Young, Facile Physical Route to Highly Crystalline Graphene. *Adv. Funct. Mater.*, 21, 3496–3501, 2011.
- [18] H.A. Seyed, M.G. Mohsen, B.Z. Qing, K. Jang-Kyo, Spontaneous Formation of Liquid Crystals in Ultralarge Graphene Oxide Dispersions. *Adv. Funct. Mater.* 2011, 21, 2978–88, 2011. <https://doi.org/10.1002/adfm.201100448>
- [19] S. Gurunathan, J.W. Han, V. Eppakayala, J.H. Kim, Microbial Reduction of Graphene Oxide by *Escherichia coli*: A Green Chemistry Approach. *Colloids Surf. B*, 102, 772–777, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.09.011>
- [20] K. Krishnamoorthy, M. Veerapandian, R. Mohan, S. Kim, Investigation of Raman and photoluminescence studies of reduced graphene oxide sheets. *Appl. Phys. A*, 106, 501–6, 2012.
- [21] M.S. Dresselhaus, A.J.H. Hofmann, G. Dresselhaus, R. Saito, Perspectives on carbon nanotubes and graphene raman spectroscopy. *Nano Lett.* 10, 751–58, 2010. <https://doi.org/10.1021/nl904286r>



1.4462 (AISI 2205) dubleks paslanmaz çelikte ısıtılma koşullarının faz değişimi, sertlik ve korozyon davranışı üzerine etkilerinin incelenmesi

Investigation of the effects of heat treatment conditions on phase change, hardness and corrosion behavior in the 1.4462 (AISI 2205) duplex stainless steel

Gökhan Özer^{1,*} 

¹Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezi (ALUTEAM), Haliç Yerleşkesi, 34445, Beyoğlu, İstanbul

Özet

Paslanmaz çelikler günümüzde son derece önemli bir yapı malzemesidir. İçerdiği çift faz ile dubleks paslanmaz çelikler son yıllarda oldukça öne çıkan bir malzeme türü olmuştur. 1.4462 paslanmaz çelikleri üstün korozyon ve mekanik özellikler göstermesine rağmen yüksek sıcaklık uygulamalarında mikroyapıdaki faz dönüşümleri kullanım alanlarını sınırlamaktadır. Bu çalışmada, 1.4462 dubleks paslanmaz çeliğine yüksek sıcaklık ısıtılma uygulanan mikroyapıdaki faz dönüşümlerinin sertlik ve korozyon özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla ısıtılma uygulanmış numunelere optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskopu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS), sertlik ve elektrokimyasal korozyon deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yüksek sıcaklıklarda oluşan ikincil fazların malzemenin mekanik ve korozyon özelliklerini etkilediği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Dubleks paslanmaz çelikler, 1.4462, Faz değişimi, Korozyon davranışı

Abstract

Stainless steels are significant building material today. With the double phase, it contains, duplex stainless steels (DSS) have become a very prominent material type in recent years. Although 1.4462 stainless steels show superior corrosion and mechanical properties, their usage areas are limited in high-temperature applications due to phase transformations in the microstructure. In this study, by applying high-temperature heat treatment to 1.4462 duplex stainless steel, the effects of phase transformations in the microstructure on hardness and corrosion properties were investigated. For this purpose, optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), hardness and electrochemical corrosion tests were performed on heat-treated samples. According to the results, it was determined that secondary phases formed at high temperatures affect the mechanical and corrosion properties of the material.

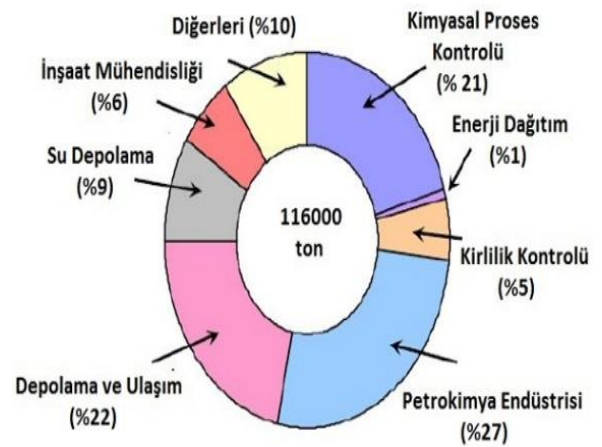
Keywords: Duplex stainless steel (DSS), 1.4462, Phase change, Corrosion behaviour

1 Giriş

Paslanmaz çelikler günümüzde oldukça tercih edilen bir yapı malzemesidir. Bunun başlıca sebebi paslanmaz çeliklerin sahip olduğu üstün korozyon dayanımı ve mekanik özellikleridir [1, 2]. Paslanmaz çelikler genelde 5 ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar; Östenitik, Martenzitik, Ferritik, Dubleks (çift fazlı) ve çökeltme sertleşmesi uygulanabilen çeliklerdir. Bunların arasında dubleks paslanmaz çelikler son yıllarda daha çok önem kazanmaktadır. Dubleks paslanmaz çeliklerin adı yapısında bulundurduğu iki fazdan (ferrit + östenit) dolayı Latince'deki "iki parçalı" anlamından gelmektedir. Bu çelikteki östenit fazı genel korozyon dayanımı ve süneklik sağlarken, ferrit fazı mekanik dayanımı ve kaynak kabiliyetini sağlamaktadır [3-5]. Dubleks paslanmaz çelikler sahip oldukları üstün özellikler nedeniyle günümüzde kimyasal, petrokimyasal, güç, iletişim, gaz ve petrol dağıtım boruları gibi pek çok uygulama alanında kullanılmaktadır (Şekil 1) [6, 7].

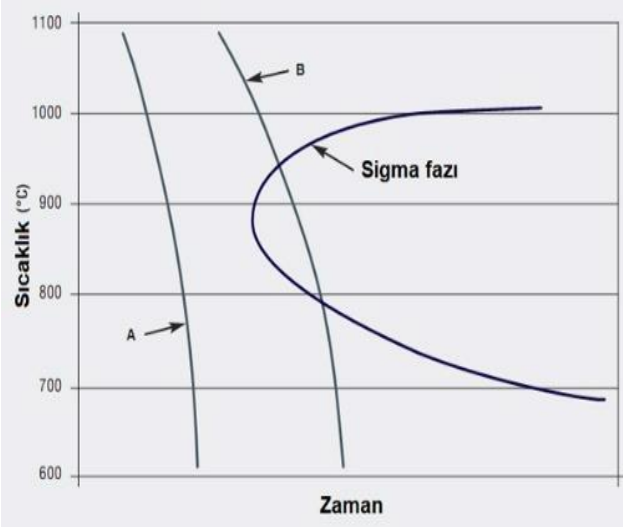
Dubleks paslanmaz çelikler ferrit fazındaki hızlı difüzyon oranı ve yüksek miktarda alaşım elementleri içermesinden dolayı intermetalik fazların çökmesine son derece uygun bir malzemedir. Bu çelikler 600-1000 °C arasında sıcaklık değişimine maruz kaldıklarında ikincil faz oluşumuna karşı hassas hale gelmektedir [8-10]. İkincil fazların oluşumu malzemede ferrit-östenit dengesini bozmakta ve bu da mekanik ve korozyon özelliklerini

olumsuz etkilemektedir [11]. Dubleks paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklık uygulamasını kısıtlayan en önemli faz sigma (σ) fazıdır. Bu faz, 600-950°C sıcaklıkları arasında oluşup 1000°C üzerinde tekrar çözülür. Sigma fazı Fe-Cr-Ni-Mo tetragonal yapısında bir intermetalik fazdır [12]. Yaklaşık 1000°C-500°C arasındaki sıcaklıklardaki soğuma yavaş yapılırsa sigma fazı oluşmaktadır (Şekil 2-B eğrisi). Bu fazdan korunmak için bu sıcaklık aralığı hızlı geçilmelidir (Şekil 2-A eğrisi) [13].



Şekil 1. Dubleks paslanmaz çelik kullanım alanları [6]

* Sorumlu yazar / Corresponding author, Tel.: +90 (212) 521 81 00, e-posta / e-mail: ozergokhan@gmail.com (G. Özer)
Geliş / Received: 06.10.2020 Kabul / Accepted: 01.12.2020 Yayımlanma / Published: 15.01.2021
doi: 10.28948/ngmuh.806495



Şekil 2. Soğuma hızına bağlı olarak oluşan sigma fazı [13]

Sigma fazı oluşumunu teşvik eden elementler Mo ve Cr'dur. Bu etki, daha yüksek alaşımlı serilerde (2205 DSS gibi) daha belirgindir. Sigma fazı tercihli olarak ferrit/östenit ara yüzeyinde oluşmaktadır [9, 14]. Sigma fazı özellikle malzemenin korozyon, tokluk ve süneklik değerlerini düşürmektedir [15].

2 Materyal ve metot

2.1 Kullanılan malzeme ve numune hazırlama

Çalışmada 1.4462 (AISI 2205) dubleks paslanmaz çelik kullanılmıştır. Kullanılan numunelerin kimyasal analizi Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. 1.4462 kimyasal analizi (% ağırlıkça)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	Ni	N	W	P	Fe
0.02	0.5	1.4	22.7	3.2	0.5	5.1	0.15	0.04	0.03	Kal.

Numuneler 20x20x10 mm boyutlarında kesilmişler ve Tablo 2' de verilen koşullarda ısıl işleme tabi tutulmuşlardır.

Tablo 2. Isıl işlem parametreleri

Numune	Isıl işlem durumu
İşlemsiz	Isıl işlemsiz
Suda soğutulmuş	1200°C/30 dak. + suda soğutma
Fırında soğutulmuş	1200°C/30 dak. + fırında soğutma

Bütün numuneler standart metalografik numune hazırlama prosedürüne göre hazırlanmıştır. Bunun için 60-1200 mesh SiC zımparalar kullanılmıştır. Zımparalanan numuneler sırasıyla önce 6 µm daha sonra 1 µm elmas pasta ile parlatılıp ayna yüzey olarak hazırlanmıştır. Parlatılan numuneler Struers LectroPol-5 elektrolitik parlatma ve dağlama cihazında %5 KOH solüsyonu ile 3.0 V/5 sn. dağlanmıştır.

2.2 Mikroyapı ve faz analizi

Dağlanan numunelerin optik mikroyapı görüntüleri Zeiss Axio Lab. A1 ters metal mikroskobu ile çekilmiştir. Numunelerin faz oranları mikroskobun image analysis yazılımı ile ölçülmüştür. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Hitachi SU3500 model elektron mikroskobu ile görüntülenmiştir. Enerji dağılımlı X- ışını spektroskopisi (EDS) analizleri Oxford XACT-EDS modülü ile nokta analizi yöntemiyle yapılmıştır.

2.3 Sertlik

Sertlikler Shimadzu G21D marka mikrovickers akredite sertlik cihazında "TS EN ISO 6507:2018 Metalik malzemeler-Vickers sertlik deneyi" standardına göre 300 gr. yük altında ve 10 saniye temas süresi uygulanarak her bir numunede 5 ölçüm olarak yapılmış ve ortalama değerleri verilmiştir. Dubleks paslanmaz çelikler sert bir malzeme olduğu ve mikroyapısında farklı fazların bulunmasından dolayı yük olarak yüksek ağırlık seçilmiştir (300 gr), böylece ölçümler bütün fazları kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

2.4 Korozyon deneyleri

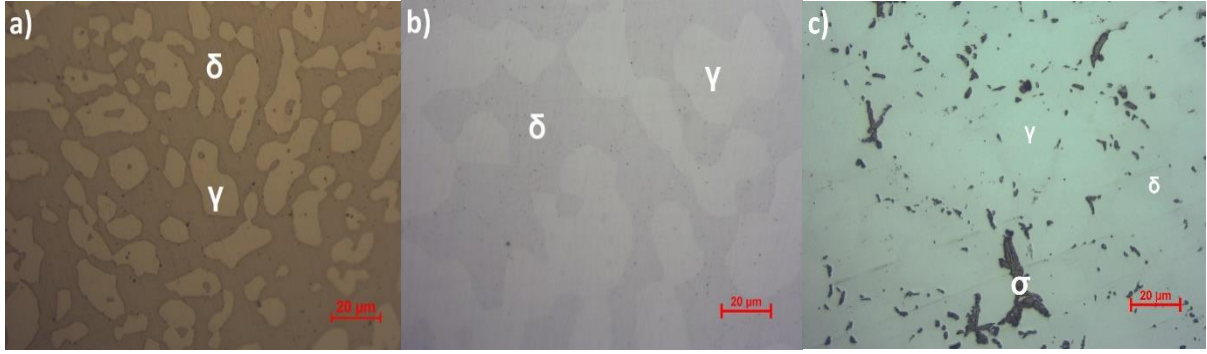
Korozyon deneyleri için IVIUM Vertex EIS 1A/10V potansiyostat/galvanostat cihazı kullanılmıştır. Numuneler 1cm² yüzey alanı ve ayna yüzey olarak hazırlanmıştır. Numuneler ilk olarak 30 dakika açık devre potansiyeline (OCP) tabi tutulduktan sonra deney başlatılmıştır. Korozyon çözeltisi olarak %3.5 NaCl solüsyonu kullanılmıştır. Korozyon hızları ve potansiyelleri Tafel eğrileri yardımıyla IviumSoft programı ile hesaplanmıştır. Korozyon deneyleri "ASTM G1-03 (2017) Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens" ve "ASTM G5-14e1 (2015) Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements" standartlarına göre gerçekleştirilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

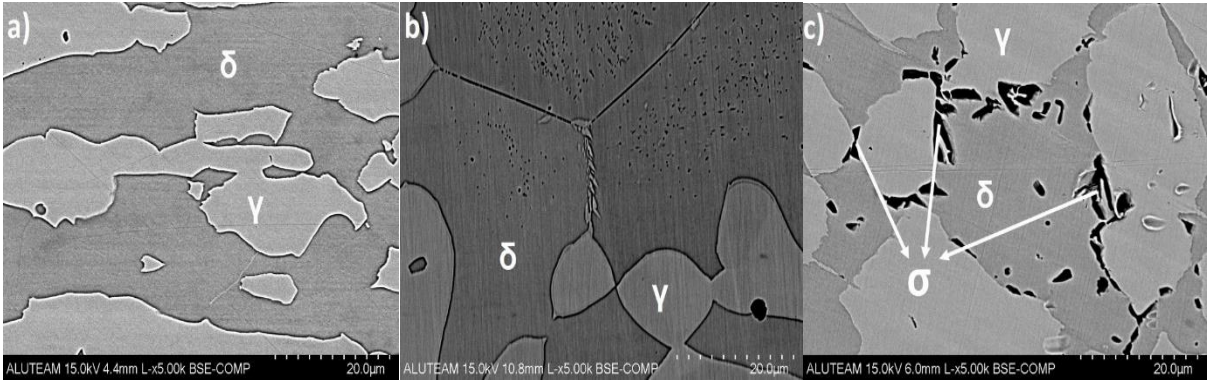
3.1 Mikroyapı ve faz analizi

Şekil 3'te optik mikroyapılar görülmektedir. Şekil 4' de SEM mikroyapıları verilmiştir. Şekil 3 ve 4' de, koyu gri bölgeler δ-ferriti, açık renkli bölgeler östeniti (γ) ve tane sınırlarında dağılmış siyah bölgeler ise (Şekil 3c) sigma (σ) fazını göstermektedir. Şekil 3 ve 4' de görüldüğü gibi işlem görmemiş ve suda soğutulmuş numunelerde (Şekil 3a ve 3b) mikroyapıda sigma fazı yoktur, oysa fırında soğutulmuş numunede sigma fazı oluşmaktadır. Sigma fazı tane sınırlarında oluşmuştur.

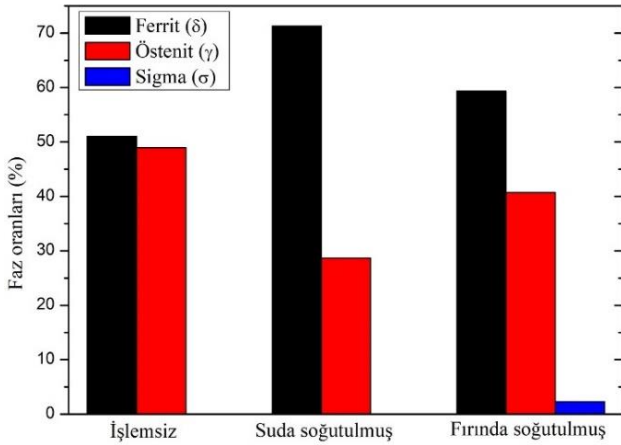
Şekil 5 numunelerin faz oranlarını göstermektedir. Faz oranları (Şekil 5) mikroyapı görüntülerini doğrulamaktadır. İşlem görmemiş ve suda soğutulmuş numunelerde sigma fazı oluşmazken, fırında soğutulmuş numunede %2.308 oranında sigma fazı oluşmaktadır. Fırında soğutulmuş numunede %59.308 ferrit, %38.384 östenit bulunurken, suda soğutulmuş numunede bu oran %71.306 ferrit, %28.694 östenit olarak ölçülmüştür. İşlemsiz numunedeki ferrit/östenit faz oranı hemen hemen yarı yarıyadır (%51.03/%48.96).



Şekil 3. Optik mikroyapı görüntüleri, a) işlemsiz, b) suda soğutulmuş, c) havada soğutulmuş numune



Şekil 4. SEM mikroyapı görüntüleri, a) işlemsiz, b) suda soğutulmuş, c) havada soğutulmuş numune



Şekil 5. Numunelerin faz oranları

Dubleks paslanmaz çelikler denge halinde yapılarında %50 ferrit, %50 östenit bulundurlar [16-18]. Dolayısıyla, bu durum dubleks paslanmaz çelik için beklenen bir özelliktir. Yüksek sıcaklıkta (>1000°C) ferrit/östenit faz dengesi ferrit lehine değişmektedir. Böylesi halinde yapılarında %50 ferrit, %50 östenit bulundurlar [16-18]. Dolayısıyla, bu durum dubleks paslanmaz çelik için beklenen bir özelliktir. Yüksek sıcaklıkta (>1000°C) ferrit/östenit faz dengesi ferrit lehine değişmektedir. Böylesi bir mikroyapı hızlı soğutulduğunda bu oran oda sıcaklığında da korunmuş olur. 1200°C sıcaklıktan suda soğutulmuş numunede ferrit fazının yüksek çıkmasının nedeni budur.

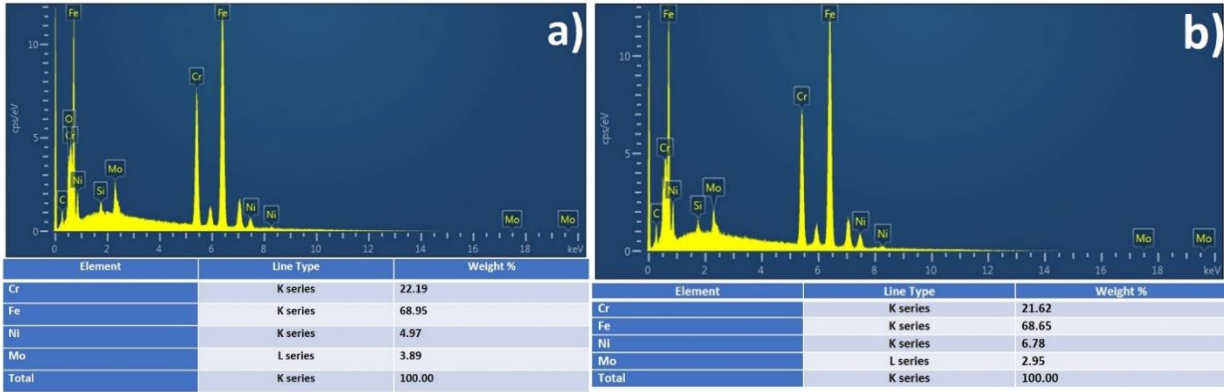
1200°C sıcaklıktan fırında soğutulmuş numunede ise ferrit fazı parçalanarak östenit ve sigma fazına dönüşür [19-21].

Şekil 6'da suda soğutulmuş numunede yapılan EDS sonuçları görülmektedir. Ferrit ve östenit fazlarında Cr, Ni ve Mo bulunmaktadır. Ferrit fazında (Şekil 6a) Cr ve Mo oranları daha yüksektir. Östenit fazında ise Ni daha yüksek orandadır (Şekil 6b).

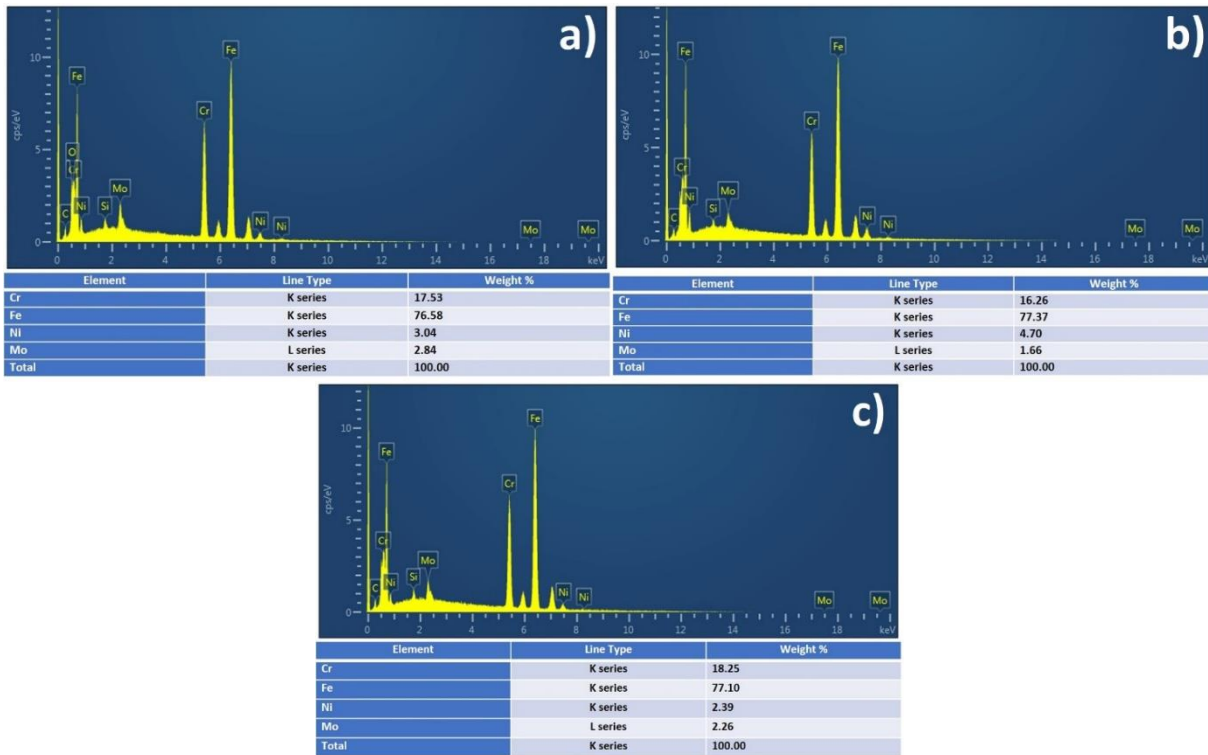
Şekil 7'de fırında soğutulmuş numunedeki faz oranlarının EDS sonuçları görülmektedir. Fırında soğutulmuş numunede ferritteki Cr miktarı (Şekil 7a) suda soğutulmuş numuneye göre (Şekil 6a) daha düşüktür. Bunun nedeni sigma fazının ferrite doğru büyüme eğilimidir. Yani, sigma fazı ferritteki Cr elementini kendine çekmekte, bu da ferritteki Cr oranını azaltırken sigma fazında Cr oranını artmaktadır (Şekil 7c).

3.2 Sertlik

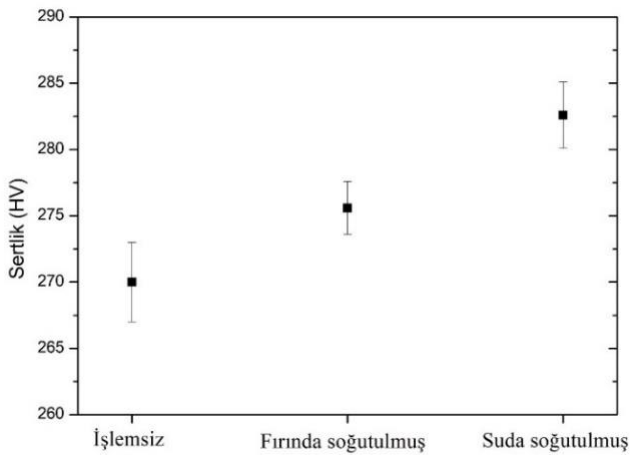
Şekil 8'de sertlik sonuçları görülmektedir. Sertlik sonuçları incelendiğinde su ve fırında soğutulmuş numunelerin değişik sonuçlar gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum mikroyapıdaki ferrit oranıyla alakalıdır. Dupleks paslanmaz çeliklerde sertliği artırıcı ana faz ferrittir. Suda soğutulmuş numunede ferrit oranı oldukça yüksektir ve bu da sertliğin yüksek çıkmasına neden olmaktadır (282.6 Hv). İşlemsiz numunede ferrit/östenit dengeli bir orandadır ve sertlik ısıtma işlem görmüş numunelerden düşük çıkmıştır (270 Hv). Suda soğutulmuş numunede sigma fazı olmasına rağmen bu oran çok düşük olduğundan sertliği çok artırıcı etkisi olmamıştır (275.6 Hv).



Şekil 6. Suda soğutulmuş numunede a) ferrit, b) östenit fazlarının EDS analiz sonucu



Şekil 7. Fırında soğutulmuş numunede a) ferrit, b) östenit, c) sigma fazlarının EDS analiz sonucu

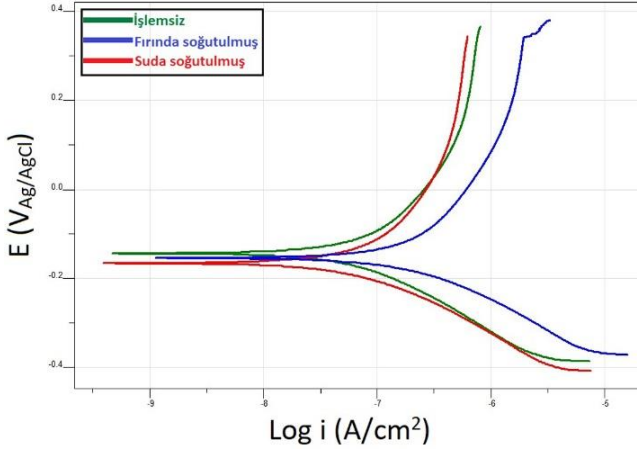


Şekil 8. Sertlik sonuçları

3.3 Korozyon analizi

Şekil 9 ve Tablo 3' de korozyon sonuçları verilmiştir. Şekil 9'daki Tafel eğrileri ve Tablo 3'deki potansiyodinamik polarizasyon sonuçlarında görüldüğü gibi, korozyon başlangıç potansiyelleri (E_{corr}) her üç numunede hemen hemen aynıdır. Fakat korozyon ilerleme hızlarında (akım yoğunluğu) fark ortaya çıkmaktadır. En düşük korozyon akımı işlemsiz numunede ortaya çıkmıştır (2.008 A/cm^2). Fırında soğutulmuş numunede ise akım yoğunluğu en yüksektir (5.935 A/cm^2), yani fırında soğutulmuş numune en hızlı korozyona uğrayan numunedir. Bunun nedeni dengeli soğutma sonucu tane sınırında oluşan sigma fazıdır. Polarizasyon dirençleri de (R_p) korozyon dayanımını göstermektedir. R_p değerinin yüksek olması malzemenin korozyona karşı dirençli olduğunu işaret etmektedir. En düşük R_p değeri fırında soğutulmuş numunede (2.366×10^5

ohm) ölçülmüştür. Sonuç olarak, sigma fazının oluşması sonucu malzemenin korozyon dayanımı azalmıştır.



Şekil 9. Numunelerin Tafel eğrileri

Tablo 3. Potansiyodinamik polarizasyon sonuçları

Numune	E_{corr} (V)	$I_{corr} \times 10^{-8}$ (A/cm ²)	$R_{px} 10^5$ (Ohm)	Korozyon hızı (mm/yıl)
İşlemsiz	-0.1424	2.008	6.614	0.0002252
Suda soğutulmuş	-0.1647	2.271	6.578	0.0002556
Fırında soğutulmuş	-0.1553	5.935	2.366	0.0006669

4 Sonuçlar

Çalışmada 1.4462 (AISI 2205) dubleks paslanmaz çelik numunelerine yüksek sıcaklıkta ısıl işlem uygulanmış ve soğuma koşullarına bağlı olarak oluşan fazlar ve bunların mikroyapı, sertlik ve korozyon dayanımına etkileri incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre;

- İşlem görmemiş numunede ferrit ve östenit fazları hemen hemen eşit miktarda bulunmaktadır. Genel olarak ısıl işlem görmemiş numunenin korozyon dayanımı yüksektir.
- 1200°C/30 dakika çözelti tavi uygulanmış malzeme suda (hızlı) soğutulduğunda mikroyapının ferrit (yüksek oranda) ve östenitten oluştuğu görülmüştür. Bu numunede ferrit fazının baskın olmasında ötürü sertlik yüksek çıkmaktadır.
- 1200°C/30 dakika çözelti tavi uygulanmış malzeme fırında (dengeli) soğutulduğunda ise ferrit fazı parçalanarak östenit ve tane sınırlarında ise ikincil fazlara (sigma) dönüşmektedir. Ferrit fazının azalması sonucu sertlik azalmıştır. Her ne kadar sigma fazı sert bir faz olsa da çok az miktarda oluştuğu için sertlik üzerine baskın bir etkisi olmamıştır. Fırında soğutulmuş numunede tane sınırlarında oluşan sigma fazı korozyon dayanımını azaltmıştır.
- Yüksek sıcaklıklardaki ısıl işlemlerinden sonra sigma fazının oluşumundan kaçınmak için malzeme hızlı (suda) soğutulmalıdır.
- Fırında soğutulan numunelerde tane sınırında sigma fazı oluşmuştur. Dubleks paslanmaz çeliklerde östenit fazı korozyon direnci sağlamaktadır, fakat bu durum

sigma fazının oluşmadığı durumlarda geçerlidir. Tane sınırlarına yerleşen intermetalik sigma fazı, fırında soğutulmuş numunede östenit fazı fazla olmasına rağmen, numunedeki çözünmeyi hızlandırmış ve daha düşük bir korozyon dayanımına neden olmuştur. Sigma fazı oluştuğu zaman östenit fazının sağladığı korozyon direnci etkisini baskılamakta ve malzemenin korozyon dayanımını düşürmektedir. Bu nedenle, DSS malzemelerde sigma fazının oluşumundan kaçınmak gereklidir.

Teşekkür

Yazar değerli katkılarından dolayı Doç. Dr. Alptekin Kısasöz ve Gülizar Songül Yalçınar e teşekkürlerini sunar.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 13

Kaynaklar

- [1] R. Yılmaz, and Z. Barlas, Paslanmaz çeliklerin gazaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde koruyucu gaz kompozisyonunun mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 11 (3), 391-400, 2005.
- [2] J. L. A. Arzola, M. A. G. Renteria, V. L. C. Hernandez, J. G. Guerra, V. H. M. Landeros, L. A. F. Franco, and F. F. C. Lopez, Study of the effect of sigma phase precipitation on the sliding wear and corrosion behaviour of duplex stainless steel AISI 2205. Wear, 400 (401), 43-45, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.019>.
- [3] L. Karlsson, Welding duplex stainless steels-A review of current recommendations. Weld World, 56, 65-76, 2012. <https://doi.org/10.1007/BF03321351>
- [4] A. Mavi, and G. Uzun, Dubleks 1.4462 paslanmaz çeliğin tornalanmasında kesme parametrelerinin işlenebilirlik üzerine etkisi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji, 5 (3), 177-184, 2017. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc/issue/31140/293145>
- [5] Welds in the duplex stainless steel. <https://imt.uoradea.ro/auo.fmte/files-2010-v1/TCM/Ciofu%20Florin%20L1.pdf>, Accessed: 29 November 2020.
- [6] A. Kısasöz, Dubleks paslanmaz çeliklerin kaynağında ısıl girdilerin modellenmesi ve deneysel verilerin eldesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi, Türkiye, 2015.
- [7] K. W. Chan, and S. C. Tjong, Effect of Secondary phase precipitation on the corrosion behaviour of duplex stainless steel. Materials, 7, 5268-5304, 2014. <https://doi.org/10.3390/ma7075268>
- [8] I. Calliari, K. Brunelli, M. Dabala, E. Ramous, Measuring secondary phases in duplex stainless steels. JOM, 61 (1), 80-83, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11837-009-0016-8>
- [9] A. B. Yiğit, ve Â Kurt, Dubleks paslanmaz çeliklerde sigma fazının korozyon dayanımına etkileri. International Journal of Engineering Research and

- Development, 7(4), 2-7, 2015. <https://doi.org/10.29137/umagd.379776>
- [10] A. Kısasöz, G. Özer, and A. Karaaslan, Effect of secondary phases on 475 degrees embrittlement of 1.4462 and 1.4501 duplex stainless steels at short-term heat treatment conditions. *Materials Research Express*, 6(11), 1-11, 2019. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab4b38>
- [11] G. Yalçın, G. Özer, A. Kısasöz, and A. Karaaslan, Influence of the phase balance and cooling conditions on the microstructure and corrosion behaviour of solution-treated 1.4462 duplex stainless steel. *Materials Research Express*, 6(12), 1-9, 2019. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6f3a>
- [12] S. N. Patankar, and M. J. Tan, Sigma phase precipitation during superplastic forming of duplex stainless steel. *Materials at High Temperature*, 18, 41-44, 2002. <https://doi.org/10.1179/mht.2002.19.1.006>
- [13] Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels. Accessed 30 November 2020.
- [14] R. Magnabosco, Kinetics of sigma phase formation in a duplex stainless steel. *Materials Research*, 12(3), 321-327, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392009000300012>.
- [15] U. Sönmez, N. Çavuşoğlu, ve V. Ceyhun, Orbital tig kaynak yöntemiyle kaynak edilmiş dubleks paslanmaz çeliklerin mekanik, metalürjik ve korozyon özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(1), 133-141, 2016.
- [16] H. E. Emre, R. Kaçar, A. Bülbül, ve B. Manisalı, AISI 316L-AISI 2205 farklı paslanmaz çelik çiftinin kaynak kabiliyeti. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 244-256, 2017. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.298178>
- [17] J. Nachazel, P. Martinek, P. Podany, and I. Polakova, Effect of heat treatment on the microstructure of duplex stainless steel. *Applied Mechanics and Materials*, 751, 9-14, 2015. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.751.9>
- [18] S. Toros, Effect of anisotropy determination methods on forming limit curve prediction of 304L stainless steel, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (2), 244-256, 2017. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.342073>
- [19] H. Sieurin and R. Sandström. Sigma phase precipitation in duplex stainless steel 2205. *Materials Science and Engineering A*, 444, 271-276, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.107>.
- [20] J. Y. Maetz, S. Cazottes, C. Verdu, X. Kleber, Precipitation and phase transformations in 2101 lean duplex stainless steel during isothermal aging. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47A, 239-253, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3215-7>.
- [21] I. Calliari, E. Ramous, P. Bassani, Phase transformation in duplex stainless steels after isothermal treatments continuous cooling and cold working. *Materials Science Forum*, 638 (642), 2986-2991, 2010. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.2986>





Effect of dispersion coefficient on polymer injection studied with random walk particle tracking method

Rastlantısal parçacık hareket yöntemiyle incelenen dağılım katsayısının polimer enjeksiyonu üzerine etkisi

Gökhan Mamak^{1,*} , İsmail Durgut¹ 

¹ Middle East Technical University, Department of Petroleum and Natural Gas Engineering, 06800, Ankara Turkey

Abstract

Polymer injection is a chemical EOR process, where the aim is to improve sweep efficiency of water flooding in an oil reservoir by increasing the water viscosity with the thickening effect of polymer injected with water. A random walk particle tracking model is developed to simulate the injection of polymer into an oil reservoir and it is integrated into an open source black-oil reservoir simulator (SINTEF's MATLAB Reservoir Simulation Toolbox, MRST). The black-oil simulator solves the set of partial differential equations describing multiphase fluid flow in the porous medium, whereas the transport of the injected polymer due to advection and dispersion processes is obtained from the applied random walk method. The finite difference/finite volume discretizations of the continuity equations applied in MRST does not involve the physical dispersion processes. The dispersion observed on the results are called the numerical dispersion and are due to the numerical discretization methods applied to solve the continuity equations. Since dispersion in porous media is a scale dependent process, it is hard to quantify its coefficient by experiments or empirical equations in general. The random walk method to model the transport of injected polymer in the reservoir is independent of discretization. Hence, it does not involve numerical dispersion. Instead, the physical dispersion due to, for instance, the tortuosity of flow path or the adsorption of polymer in porous media can be included into the model. Therefore, we used the method to analyze the effect of dispersion coefficient. Increased dispersion coefficient causes the results to converge to actual MRST solution with increased uncertainties of polymer concentration. The dispersivity of a reservoir in simple one-dimensional problems can be determined with the method.

Keywords: Enhanced oil recovery, Polymer injection, Particle tracking method, Dispersion

1 Introduction

Polymer injection is one of the chemical enhanced oil recovery (EOR) methods that is used as a mobility control tool in petroleum reservoirs. The aim is to increase displacing phase viscosity and displacement efficiency [1]. Swollen polymer molecules in a good solvent (i.e. injection water) causes the polymer solution to have a higher flow resistance than regular waterflooding. Viscosity increase effect is the result of higher polymer concentration in solution [2]. Permeability reduction occurs due to polymer molecules being entrapped in small pore spaces and polymer molecules being adsorbed on rock surfaces during the polymer flooding [3]. Sheng (2011) states that the shear stress and interfacial viscosity between oil phase and injected polymer are important factors in polymer flooding as well [1]. These help polymer solutions to have higher push-pull

Özet

Petrol rezervuarına su ile birlikte polimer enjeksiyonu, polimerin kalınlaştırıcı etkisi ile su viskozitesini yükselten ve rezervuardaki süpürme etkisini arttıran kimyasal geliştirilmiş petrol üretimi (EOR) yöntemidir. Polimer enjeksiyonunun modellenmesi için rastlantısal parçacık hareket izleme yöntemi ile bir model geliştirilmiş ve bu model bir açık kod üç fazlı rezervuar simülatörü (SINTEF'in MATLAB Reservoir Simulation Toolbox, MRST) ile entegre edilmiştir. Rezervuar simülatörü gözenekli ortamda üç fazlı akışı tanımlayan kısmi diferansiyel denklemleri çözerken, enjekte edilen polimerin gözenekli ortamdaki dağılım ve taşınımını tanımlayan denklemler rastlantısal hareket yöntemiyle çözülmüştür. MRST'de süreklilik denklemlerine uygulanan sonlu fark / sonlu hacim ayrıştırma teknikleri fiziksel dağılım süreçlerini içermez. Sonuçlarda gözlenen dağılım, sayısal dağılım olarak adlandırılır ve süreklilik denklemlerini çözmek için uygulanan sayısal ayrıştırma yöntemlerinden kaynaklanır. Gözenekli ortamdaki dağılım ölçek bağımlı bir parametre olduğundan, deneysel veya gözlemsel olarak ölçülmesi zordur. Enjekte edilen polimerin taşınımını modellemek için kullanılan rastgele yürüyüş yöntemi sayısal ayrıştırma içermediğinden sayısal dağılım problemi içermez. Akış yolunun kıvrımına veya gözenekli ortamlarda polimerin adsorpsiyonuna bağlı fiziksel dağılımı gibi olaylar bu modele dahil edilebilir. Bu nedenle dağılım katsayısının etkisini analiz etmek için rastlantısal parçacık hareket izleme yöntemi kullanılmıştır. Artan dağılım katsayısı, sonuçların artan belirsizlikle birlikte gerçek MRST çözümüne yaklaşmasına neden olmaktadır. Basit tek boyutlu problemlerde bir rezervuarın dispersiyonu, bu yöntemle belirlenebilir.

Anahtar Kelimeler: Geliştirilmiş petrol üretimi, Polimer enjeksiyonu, Parçacık izleme metodu, Dağılım

force on oil droplets and oil droplets to move from dead-ends of porous medium.

The set of partial differential equations (PDE) describing multiphase fluid flow in the porous medium are used to develop a reservoir model and solve to forecast reservoir performances under different applications. However, although this approach needs minimum amount of simplifying assumptions [4], numerical dispersion errors are involved while solving the continuity equations in these simulators [5].

Increasing the grid number in a simulation to an acceptable number can reduce the numerical dispersion effect. However, it also increases the memory requirement of the simulations [6]. Moreover, increasing the grid block number is sufficient to some level only. Effect of increased number of grids on numerical dispersion in regular

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gmamak@metu.edu.tr (G. Mamak)

Geliş / Received: 10.08.2020 Kabul / Accepted: 23.11.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.773703

waterflooding and polymer flooding examples shows that the error does not disappear with finer grids [7].

Changes in reservoir flow velocity in porous medium adds the effect of extra and uneven mixing of chemicals. This added effect of mixing besides molecular diffusion is called dispersion. In a highly convective flow environment, dispersion coefficient and velocity are proportional. If a porous medium is assumed to have constant inhomogeneity factor, average grain size and diffusion coefficients, the dispersivity parameter can be defined as the ratio of dispersion coefficient and velocity. The highly scale dependent parameter is defined by experiments or empirical equations [8].

The random-walk particle tracking method is used to simulate flow in different studies. The method solves the advection and diffusion/dispersion of chemicals without numerical solutions of PDE's, therefore is virtually free of numerical dispersion errors [9]. The method can be modified to inspect the effect of dispersivity in a reservoir since it does not involve the numerical dispersion problem. This study uses MATLAB Reservoir Simulation Toolbox (MRST), an open-source code developed by SINTEF Applied Mathematics in Oslo [10], to apply the random-walk particle tracking method. The method is applied in MRST's polymer injection module to analyze the effect of dispersivity on the performance of polymer flooding.

2 Methodology

MRST is a tool for fast prototyping and demonstrating new reservoir modeling methods and concepts working with MATLAB. MRST involves several basic reservoir characterization modules and flow functions, and several add-on modules that can be applied for more specific cases and models [10]. Random walk method is applied in MRST to solve for polymer transport equation in the study. This section involves basic information on MRST and its working principal, random walk method and its equations, and the application of method to MRST.

2.1 MRST model

MRST model reads the ECLIPSE, Schlumberger's industry-standard simulator data structures, and creates so called a simulation deck to define the model objects, which include the physical model, variables of the reservoir state, and simulation schedule of the problem at hand in the MATLAB environment. The grid system is generated using ECLIPSE's form of input data. The governing equations (the system of partial differential equations describing multiphase flow in the porous media and the equations for imposed conditions including the well control equations and specified flux or pressure values at the boundaries of the porous media) are discretized following multidimensional Taylor's series expansion scheme using Automatic Differentiation (AD) method. AD method linearizes the discretized equations with respect to unknown variables using the predefined analytical derivatives of the elementary arithmetic operations and the all the mathematical functions which appear in the discretized equations. The linearized system of equations is solved by Newton's iteration method to obtain the primary unknown variables (the grid cell

pressures and phase saturations, the well flow rates or pressures) [2].

2.2 Random walk particle tracking method

A statistical physics method can be used to find the solution to diffusion and dispersion problems that occur in porous medium, called random walk method [5]. The molecular diffusion of the molecules in a solution can be calculated with Equation (1) below, if the system is not injected with chemicals before $t = 0$, and the injected chemical amount is N at origin $x = 0$ in the system [1]:

$$C(x, t) = \frac{N}{\sqrt{4\pi D_0 t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_0 t}\right) \quad (1)$$

$C(x, t)$ is in mol/cm. D_0 is the diffusion coefficient in cm^2/s . Chemical concentration is equal to 0 except at the origin at the beginning of injection. At the origin $C \rightarrow \infty$. The equation of concentration distribution has similarities with Gaussian distribution function:

$$n(x) = \frac{N}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

With the similarities between Equations (1) and (2), diffusion coefficient and variance can be related as:

$$\sigma^2 = 2D_0 t \quad (3)$$

Mean diffusion length of a chemical can be estimated as statistics states. Under Gaussian distribution, 68% of the original mass travels the distance given in Equation (4) below [1].

$$\sigma = \sqrt{2D_0 t} \quad (4)$$

Probable distance travelled by a particle with respect to diffusion in random walk method in a time step can be calculated from Equation (5) below [11], where, $\mathcal{N}(\xi)$ is a sample from a normal distribution with zero mean and unit variance:

$$\Delta x_{spread} = \mathcal{N}(\xi) \sqrt{2D_0 \Delta t} \quad (5)$$

$$\mathcal{N}(\xi) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\xi^2}}{\sqrt{2\pi}} \quad (6)$$

Positions of the particles at each time step n is updated as:

$$x_i^{n+1} = x_i^n + v_w^n \Delta t + \Delta x_{spread} \quad (7)$$

where $v_w^n \Delta t$ is the advection term for the particle and v_w is the water phase velocity obtained from the simulator since the chemicals are assumed to be travelling only in water phase.

2.3 Application in MRST

In random walk particle tracking method particles are initialized and moved, then the concentration profile of polymer is calculated and its effects to the system are added. MRST normally solves all continuity and polymer equations by itself and give related information at each time step.

For initialization of the particles, total number of particles to be injected is decided and the mass of each polymer particle is calculated from the simulation time and to be injected polymer mass data. All particles are initialized at the injection location at $t = 0$ and a determined number of particles are released to the system at each time step.

Movement of particles consists of advection and dispersion. MRST gives phase fluxes at each time step during the simulation at cell centers as averages. Water phase velocity is calculated from this flux information and for particles' exact positions inside a grid, interpolated water phase velocity field is used. $u_w^n \Delta t$ term in Equation (7) introduces the advection of particles. Dispersion is introduced within Equation (5) by replacing the diffusion coefficient with dispersion coefficient, D_C . This value is obtained by multiplying the typical diffusion coefficient with the dispersivity of the porous medium. Dispersivity of the porous medium is a scale dependent parameter and calculated experimentally or empirically as stated before. [8] gives an empirical correlation in their study, which includes laboratory core floods and field data collected from different formation types. Equation (8) given below is used for the dispersivity in this study:

$$\alpha_L = 0.044L^{1.13} \quad (8)$$

The dispersion effect added calculations is the longitudinal dispersion, which occurs in the gross fluid flow direction. There is also the phenomena of transverse dispersion, however transverse dispersion and dispersivity are not studied much in the literature and the studies made show that their effects can be negligible compared to longitudinal dispersion and dispersivity [1].

Polymer effects are added by calculating the concentration profile in the system. The particles present in each grid are counted and the mobile mass is divided by water inside the grid to calculate polymer concentration. Concentration calculation equation is given below:

$$c = \frac{m_p}{V\Phi S_w} \quad (9)$$

where:

c = Concentration, kg/m^3

m_p = Mobile polymer mass in the cell, kg

V = Volume of the cell, m^3

Φ = Porosity

S_w = Water saturation

After the concentration is calculated, the amount of polymer that can be adsorbed by the rock surface is calculated at each time step. The input file includes the adsorption capacity of the rock for the porous medium as a

table. The adsorption effect is added by reducing an equal mass with respect to adsorbed polymer amount from each particle in the cell. Adsorption procedure is assumed irreversible in the model. Equations used for adsorption calculations are given below:

$$m_{ads}^n = M\rho_r V(1 - \Phi(1 - S_{dpv})) \quad (10)$$

$$m_{red} = \frac{m_{ads}^n - m_{ads}^{n-1}}{N} \quad (11)$$

where:

m_{ads}^n = Mass of polymer that can be adsorbed by the cell at the current time step, kg

M = Mass of polymer that can be adsorbed by unit mass of rock, kg

ρ_{rock} = Density of rock, kg/m^3

S_{dpv} = Dead pore volume

m_{red} = Particle mass to be reduced due to adsorption, kg

N = Number of particles in the cell

3 Description of test case

In our study, a three-dimensional MRST dataset obtained from MRST EOR module polymer examples is modified to have a one-dimensional problem. The first and last grid cells of the system has the injection well and the production well respectively in the scenario. Complete mixing of polymer with water is assumed. The model domain dimensions are 200 m in the x-direction, 20 m in the y-direction, and 4 m in the z-direction and has no flow boundary conditions. Reservoir porosity and permeability are taken constant and are 30% and 100 mD respectively. Dead pore volume and rock density are given as 5% and 2000 kg/m^3 . Residual resistance factor (RRF), which is a rock mineral and polymer chemistry dependent parameter, is the ratio between water relative permeability before, and after polymer flood, is taken 1.1. RRF is used in the calculations of permeability reduction effect. Water injection rate and the concentration of polymer injected with it are continuous during the simulation time and taken 10 m^3/day and 0.8 kg/m^3 respectively. Typical diffusion coefficient is taken as $4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ [1]. Total simulation duration is 500 days and each time step is taken 0.5 days.

Polymer viscosity multiplier and polymer adsorption curves are given as a table in the input file. Their plots are given in Figure 1 and 2 respectively.

Number of blocks can be increased in order to reduce the effect of numerical dispersion in reservoir simulations. After solving the problem described above with MRST model with different number of grids, the optimum number of grids is decided to be 400 for this case since the numerical dispersion does not disappear and the computation time increases if the grid number is increased further [7].

100 particles per time step is released to the system during the simulation time. Each particle released has the same polymer mass data, then their mass is reduced at each time step according to the adsorption capacity of the rock with respect to the grid they are present. Calculated polymer concentration profile is used at the next time step for polymer effect calculations.

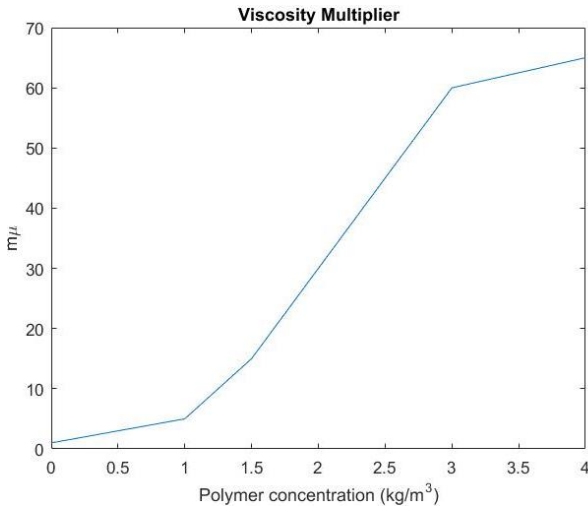


Figure 1. Viscosity multiplier

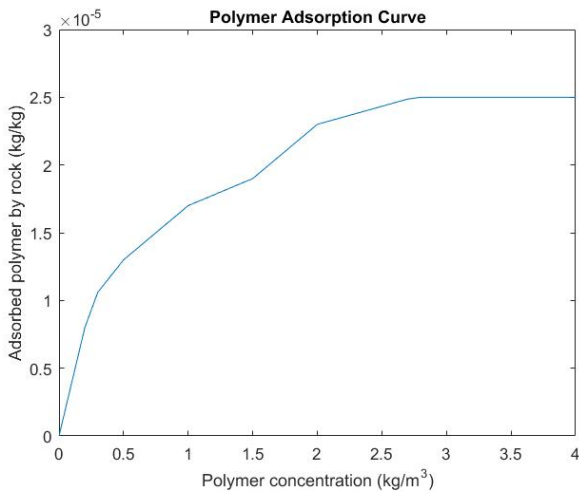


Figure 2. Polymer adsorption curve

4 Results and discussion

The problem described is solved with MRST and random walk particle tracking method, the results are compared for concentration and saturation profile movements, and production curves. Two saturation fronts are observed in the polymer injection scenarios, the first front is caused by the increased water saturation in the upstream with injection, which is denoted with green in the first saturation profile figure, and the second front following at the connection point of polymer water and connate water, which is denoted with orange in the same figure, as expected [12].

Figure 3.a and 3.b shows the concentration and saturation profile movements at different time steps during the simulation. Location of the particles are also scattered on the concentration profile graphs. However, only one fifth of total number of particles are plotted for easy visualization. Most of the particles lose all of their masses due to adsorption. Therefore, the particles ahead of the concentration front are not plotted.

The fluctuations seen on both profiles are caused by the random nature of the method. However, injection concentration of both MRST and random walk profiles agree

with each other. The concentration and saturation profiles of the MRST model moves faster with the effect of numerical dispersion than particle model. Numerical dispersion causes the MRST profile to have a curved nature and simulates polymer reaching earlier to the production well, while particle model has a steep front. When four different realizations are run and compared with the MRST production profile, all realizations give almost the same result as seen in Figure 3.

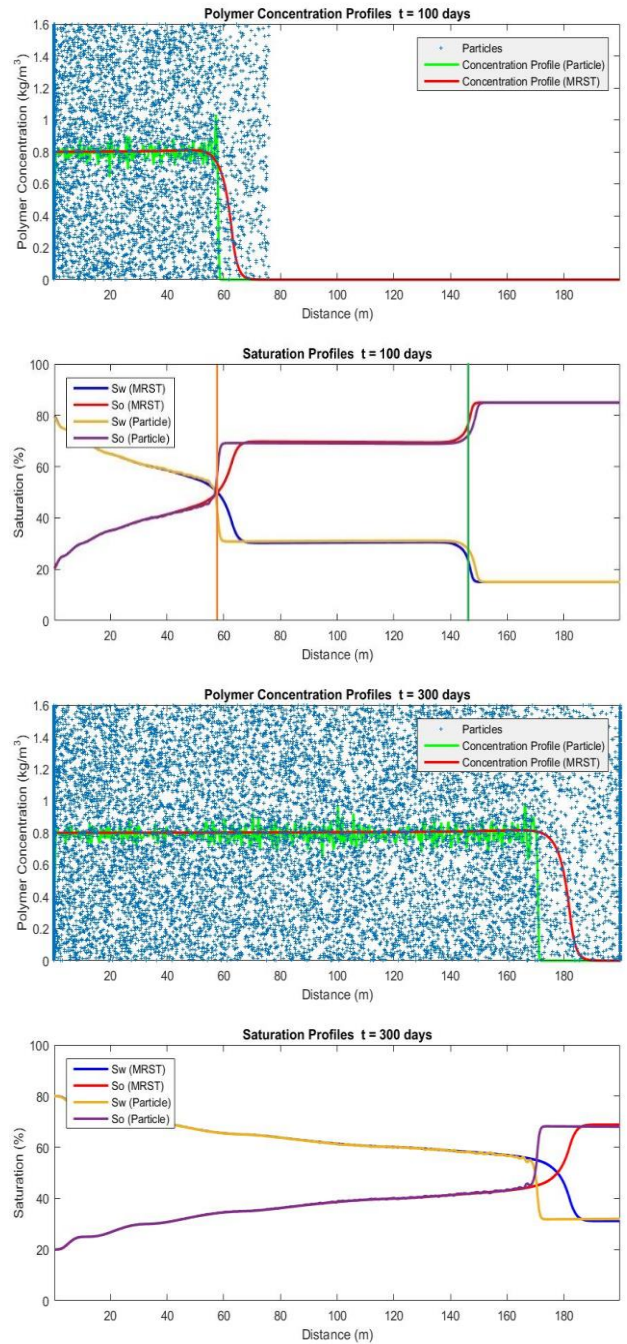


Figure 3.a. Polymer concentration and saturation profiles

The oscillations are the result of the random nature of the method. Since probable distance traveled by a particle with respect to diffusion in each time step involves a random

sample from a normal distribution with zero mean and unit variance, and polymer concentration is calculated from the mobile mass inside each grid, we do not see a smooth concentration profile throughout the system. Increasing the total number of particles injected to the system can reduce the oscillations but they do not disappear. Moreover, increasing the number of particles also result in a longer computational time. 20 particles in a cell is stated as the optimum number to calculate the profile properly by [5]. Using small number of particles increase the uncertainty since the masses of each particle is too much and there are not enough particles in the cells during the simulation. Figure 4.a and 4.b shows the effect of total number of particles to the system.

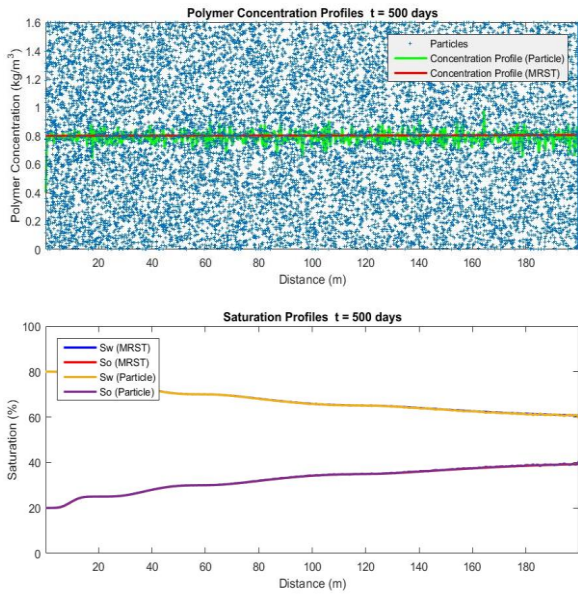


Figure 3.b. Polymer concentration and saturation profiles

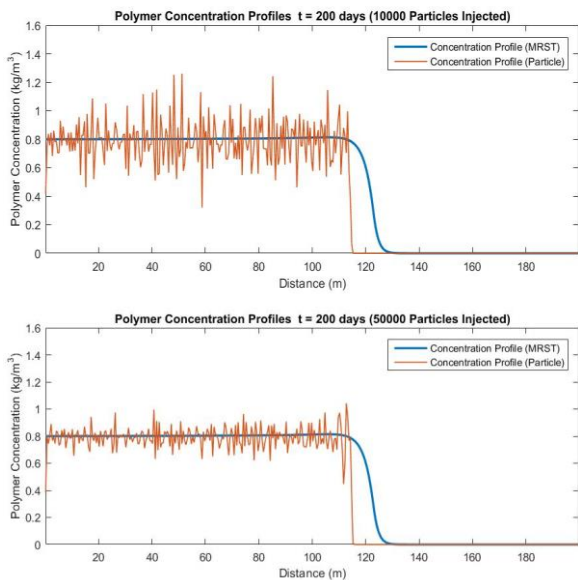


Figure 4.a. Polymer concentration profile with different number of particles

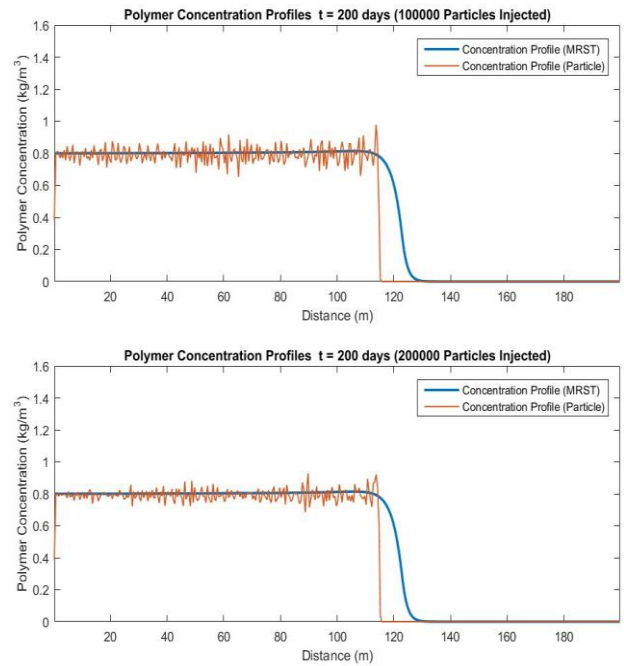


Figure 4.b. Polymer concentration profile with different number of particles

In an advection dominant flow, the movement of the flood front is expected to be piston like. However, if the heterogeneity of the porous medium is high, flow becomes dispersion dominant. Since dispersion phenomena is not solved in the MRST system and it only comes from numerical errors. In order to see the effects of higher dispersion coefficients, the default dispersion coefficient used in the particle model is modified and polymer concentration profiles are compared on 200th day of simulation in Figure 5:

The uncertainties of polymer concentration increase with increasing dispersion coefficient. We also see some particles moving too fast and creating a small polymer concentration ahead of the flood front. When the production curves are plotted, it is seen that with increasing dispersion coefficient, the profiles converge more to MRST profile. The fluctuations on the production curve before breakthrough also increases but the general profile is easily distinguishable.

5 Conclusions

Random walk particle tracking method is implemented in MRST model to simulate polymer injection and analyze the effect of dispersion coefficient in this study.

A three-dimensional polymer injection scenario dataset is modified to have a one-dimensional problem and both MRST and particle models are run on the same problem for comparison. Random walk particle tracking model solves the polymer advection and diffusion/dispersion equation to add the effect of polymer to the system, and removes the effect of numerical dispersion on polymer continuity equation.

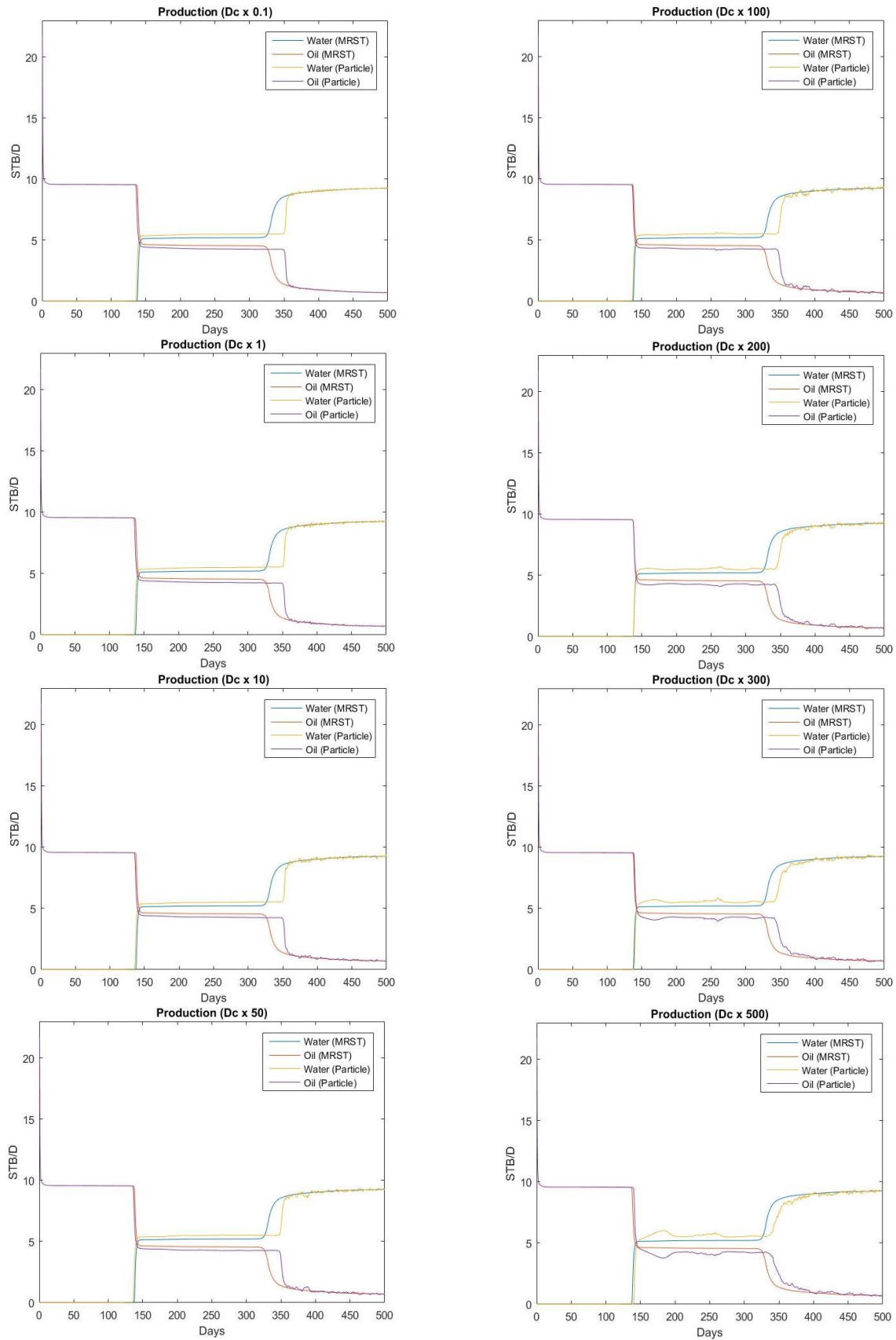


Figure 5. Effect of dispersivity coefficient

The conclusions drawn can be listed as:

1. Random walk particle tracking method allows user to see effects of dispersion in the porous medium. Increasing dispersivity of the porous medium increases the uncertainties of the results, however flow and production profiles agree with MRST model.
2. True dispersivity of a simple one-dimensional system can be decided through history matching using random walk particle tracking method.
3. The uncertainties caused by the random nature of the method can be lowered by increasing the number of particles injected, using finer grids, or using shorter time steps. However, each of these solutions does not improve the results much after some point, and computation time of the simulation increases. The oscillations can also be reduced by using smoothing methods. On the other hand, smoothing methods would add some degree of numerical errors.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (Turnitin): 14%

References

- [1] J. Sheng, Modern Chemical Enhanced Oil Recovery: Theory and Practice. Gulf Professional Pub, 2011.
- [2] K. Bao et al., Fully implicit simulation of polymer flooding with MRST. 15th Eur. Conf. Math. Oil Recover. ECMOR 2016, 42 (3), 545–63, 2016.
- [3] W. B. Gogarty, Mobility control with polymer solutions. SPE J., 7 (02), 161–73, 1967. <https://doi.org/10.2118/1566-B>.
- [4] T. Ertekin, J. H. Abou-Kassem, and G. R. King, Basic Applied Reservoir Simulation. SPE, Richardson, Texas, 2001.
- [5] W. Kinzelbach, Simulation of pollutant transport in groundwater with the random walk method. Dresden Symposium, pp. 265–79, 1990.
- [6] L. W. Lake, J. R. Johnston, and G. L. Stegemeier, Simulation and performance prediction of a large-scale surfactant/polymer project. Soc. Pet. Eng. J., 21 (06), 731–9, 1981. <https://doi.org/10.2118/7471-PA>.
- [7] G. Mamak, Random walk particle modelling of polymer injection using matlab reservoir simulation toolbox. M.Sc Thesis, Middle East Technical University, Turkey, 2017.
- [8] A. Arya, T. A. Hewett, R. G. Larson, and L. W. Lake, Dispersion and reservoir heterogeneity. SPE Reserv. Eng., 3 (01), 139–48, 1988.
- [9] B. C. Zheng and P. P. Wang, MT3DMS: A Modular Three - Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide. Tuscaloosa, Alabama, 1999.
- [10] Sintef, MRST - MATLAB Reservoir Simulation Toolbox, Accessed 13 July 2017. <http://www.sintef.no/projectweb/mrst/>
- [11] S. R. Cranmer, Monte Carlo Solutions to Diffusion-Like Equations: A Practical Application of the Ito Calculus. Harvard-Smithsonian Cent. Astrophys. Cambridge, 2003.
- [12] G. A. Pope, The application of fractional flow theory to enhanced oil recovery. Soc. Pet. Eng. J., 20 (03), 191–205, 1980. <https://doi.org/10.2118/7660-PA>.

