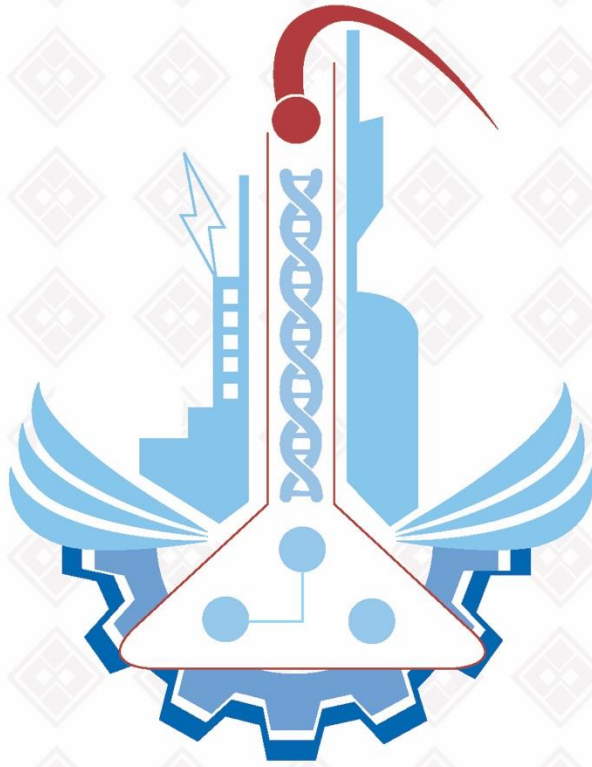


ISSN: 1308-9072

Cilt: 32 / Sayı: 2 / Yıl: 2020

FIRAT ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ



F ı r a t   n i v e r s i t e s i
Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)
Cilt:32, Sayı:2, Yıl: 2020
ISSN: 1308 - 9072

  l e t i   i m

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
23119, ELAZIĞ

Tel: 0 424 212 27 07
Faks: 0 424 236 99 55
e-posta: fenbilimdergi@firat.edu.tr

Baskı: Fırat Üniversitesi Matbaası

Bu dergi yılda 2 kez ve hakemli olarak yayımlanır.

Derginin Eski adı: Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Derginin Eski ISSN numarası: 1300-2708

<http://dergipark.gov.tr/fumbd>

Fırat Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)

Sahibi

Prof. Dr. Fahrettin GÖKTAŞ
Fırat Üniversitesi Rektörü

Genel Yayın Yönetmeni

Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Baş Editör

Doç. Dr. Fatih ÖZKAYNAK
Fırat Üniversitesi Enstitüsü Müdür Yrd.

Editör

Doç. Dr. Emrah YILMAZ
Fırat Üniversitesi Enstitüsü Müdür Yrd.

DANIŞMA KURULU

Umran S. İNAN	Stanford Ü. Elekt-Elktr. Müh.	Cumali KINACI	İ.T.Ü. Çevre Müh.
Serdar SALMAN	Marmara Ü. Metal. Müh.	Ülkü YETİŞ	O.D.T.Ü. Çevre Müh.
Z. Hakan AKPOLAT	F.S.M.Ü. Elekt-Elktr. Müh.	Eres SÖYLEMEZ	O.D.T.Ü. Makine Müh.
Serkan DAĞ	O.D.T.Ü. Makine Müh.	Ayşe DALOĞLU	K.T.Ü. İnşaat Müh.
Erkan ŞAHİNKAYA	İ.M.Ü. Biyomühendislik	Ali KARCI	İnönü Ü. Bil. Müh.
Temel SAVAŞKAN	K.T.Ü. Makine Müh.	Coskun BAYRAK	Little Rock Ü Bilg. Bil.
İlker B. TOPÇU	Osmangazi Ü. İnş. Müh.	Hükmü ORHAN	Selçuk Ü. Jeoloji. Müh.
Erkan TANYILDIZI	F.Ü. Yazılım Müh.	Mehmet CEBECİ	F.Ü. Elekt-Elktr. Müh.
Mehmet ÖZKUL	Pamukkale Ü. Jeoloji. Müh.	Ertan GOKALP	K.T.Ü. Harita. Müh.
Hasan EFEUGLU	A.Ü. Elekt-Elktr. Müh.	Erhan AKIN	F.Ü. Bil. Müh.
Ercan AKSOY	F.Ü. Jeoloji Müh.	Sezgin BAKIRDERE	Y.T.Ü Kimya
Mehmet YILMAZ	F.Ü. İnşaat Müh.	Yusuf CELAYİR	F.Ü. İnşaat Müh.
Nurhan ARSLAN	F.Ü. Kimya Müh.	Cafer BAL	F.Ü. Mekatronik Müh.
Hanifi GULDEMİR	F.Ü. Tek. Elekt-Elktr. Müh.	Nilgün GULEC	O.D.T.Ü. Jeoloji Müh.

Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)

32-2, 2020

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

1. Atıksu Arıtma Tesisinde Çözünmüş Organik Azotun Biyolojik Parçalanabilirliğinin İncelenmesi
The Investigation of Biodegradability of Dissolved Organic Nitrogen in Wastewater Treatment Plant
Sezen KÜÇÜKÇONGAR, Ayşe SEVİL..... 303-312
2. Boruların Çift Geçişli Paralel Tüp Kanal Açılmalık Presleme (DP- PTCAP) Yöntemi ile Aşırı Plastik Deformasyon Analizi
Severe Plastic Deformation Analysis of Tubular Parts via Double Pass Parallel Tubular Channel Angular Pressing (DP-PTCAP) Method
Vedat TAŞDEMİR..... 313-324
3. Deprem Bölgesi Haritasından Kontur İçeren Deprem Tehlike Haritasına Geçişin Çeşitli Yapılarda Tasarım ve Analiz Deprem Yüklü Taleplerine Etkisi
Transition from Seismic Zonation to Seismic Hazard Contour Map and Its Effects on the Variation of Earthquake Design and Analysis Load Demands for Various Type of Structures
Hümevra ŞAHİN, Ayşe Ruşen DURUCAN, Cengizhan DURUCAN..... 325-334
4. Dişlisiz Asansör Uygulamaları için Yüzey Montajlı Senkron Motorun Optimal Tasarımı
Optimal Design of Surface Mounted Synchronous Motors for Gearless Elevator Systems
Musab OKŞAR, Hicret YETİŞ, Taner GÖKTAŞ, Asım KAYGUSUZ, Erkan MEŞE..... 335-344
5. Elektrikli Araçlar İçin Eksenel Akıllı Çift Rotorlu Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Analizi
Design And Analysis Of Axial Flux Double Rotor Permanent Magnet Synchronous Motor For Electric Vehicles
Mehmet POLAT, Rüya AKINCI..... 345-358
6. Fraktal Eğimden Arındırılmış Dalgallılık Analizi ve Pencereleli Kare Ortalamasının Karekökü Tabanlı EMG Sınıflandırma
Fractal Detrended Fluctuation Analysis and Windowed Root Mean Square Based EMG Classification
Ömer Faruk ALÇİN..... 359-368
7. Güncel İkili Optimizasyon Algoritmalarının Kısıtsız Kıyaslama Fonksiyonlarındaki Performans Karşılaştırmaları
Performance Comparisons of Current Binary Optimization Algorithms in Unconstrained Benchmark Functions
Erkan TANYILDIZI, Abdullah ÇELİK..... 369-380
8. İnsan Hareketlerinin Tanınması için Parçacık Sürü Optimizasyonu Tabanlı Topluluk Sınıflandırıcı Yöntemi
Particle Swarm Optimization Based Ensemble Classifier Method for Recognizing Human Activities
İlhan AYDIN, Büşra AŞICI..... 381-390
9. Kaotik Haritalı Çok Amaçlı Altın Sinüs Algoritmasının Performans Analizi
Performance Analysis of Multiobjective Golden Sine Algorithm with Chaotic Map
Eyüp ERÖZ, Erkan TANYILDIZI 391-402
10. Kentiçi Otopark Analizi: Elazığ İli Örneği
Urban Parking Analysis, A Case Study: Elazığ Province
Yazar Ahmet ATALAY, Yazar Yunus İÇEN..... 403-413

11. Kimyasal Banyo Depolama Yöntemi ile Üretilen PbS İnce Filmleri Üzerine Tavlamanın Etkileri <i>The Effects of Annealing on PbS Thin Films Produced by Chemical Bath Deposition Method</i> Ayça Kıyak Yıldırım.....	415-423
12. Kitosan/κ-Karragenan/Kitosan Üç Tabakalı Mikrokürelerinden İndometazinin Kontrollü Salımı <i>Controlled Release of Indomethacin from Chitosan / κ-Carrageenan / Chitosan Three Layer Microspheres</i> Murat İNAL.....	425-433
13. V-REP Robotik Simülatör ile Robot Kol Simülasyonu <i>Robot Arm Simulation with V-REP Robotic Simulator</i> Emin AĞRALI, Mehmet ÇAVAŞ.....	435-444
14. Öngerilmeli T Kesitli Köprü Kirişlerinin Seçimi ve Doğrusal Programlama ile Optimizasyonu <i>Selection of Prestressed T Section Bridge Beams and Their Optimization with Linear Programming</i> Berrin Nevra KATİ EKER, Ömer KELEŞOĞLU, Sedat SAVAŞ.....	445-455
15. Sinirsel Bulanık Ağlarla Asenkron Motorların Algılayıcısız Denetimi <i>Speed Sensorless Control of Induction Motor Using Fuzzy-Neural Networks</i> Cafer BAL, Muammer GÖKBULUT, Fikret ATA.....	457-468
16. Sürtünmeli Delme İşleminde Geometrik Kovan Yüksekliği Denkleminin Deneysel Sonuçlar ile Doğrulanması <i>Confirmation of the Geometric Bushing Height Equation with Experimental Results in Friction Drilling</i> Muhammet BAL, Cebeli ÖZEK, Zülküf DEMİR.....	469-479
17. Tek Fazlı Matris Dönüştürücünün Frekans Değiştirici Olarak Çalışması <i>Single Phase Matrix Converter Operating as Frequency Changer</i> Neslihan PİRİNÇÇİ, Ahmet ORHAN	481-490
18. Transfer Öğrenme Ve Çekişmeli Üretici Ağ Yaklaşımlarını Kullanarak Cilt Lezyonu Sınıflandırma Doğruluğunun İyileştirilmesi <i>Improving Skin Lesion Classification Accuracy Using Transfer Learning And Generative Adversarial Network</i> Kazım FIRILDAK, Gaffari ÇELİK, M. Fatih TALU.....	491-498
19. Türkiye Yenilenebilir Enerji Kapasitesi Devreye Alma İşleminin Darboğaz Analizi <i>A Bottleneck Analysis of Turkish Renewable Energy Capacity Commissioning</i> Muhammed Mustafa İZGEÇ	499-508
20. Yüksek Fırın Cürufu ile Stabilize Edilmiş Killi Bir Zeminin Yol Esnek Üstyapı Tabaka Kalınlıklarına ve Maliyetine Etkileri <i>Effects of a Clay Soil Stabilized by Blast Furnace Slag on Road Flexible Pavement Layer Thickness and Cost</i> Tacettin GEÇKİL, Mehmet Mahmut TANYILDIZI, Ekrem Serdar YILDIRAN.....	509-520
21. Elektromanyetik Silah Matlab/Simulink Modeli <i>Electromagnetic Weapon Matlab/Simulink Model</i> Mehmet Fatih YASUL, Hasan GÜLER.....	521-529

22. Veri Seti - Sınıflandırma İlişkisinde Performansa Etki Eden Faktörlerin Değerlendirilmesi <i>Evaluation of the Factors Affecting Performance on the Data Set - Classification Relationship</i> Abdullah ALAN, Murat KARABATAK.....	531-540
23. Bitümlü Sıcak Karışımların Laboratuvar Ortamında Yaşlandırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması <i>Comparison of Laboratory Aging Methods of Asphalt-Aggregate Mixtures</i> Çağla DURMAZ, Burak ŞENGÖZ, Derya KAYA ÖZDEMİR, Ali TOPAL, Ali ALMUSAWI.....	541-548
24. Stiren-Butadiyen-Stiren İçeriğinin Bitümün Kırılmış Yüzey Morfolojisine Etkilerinin İncelenmesi <i>Investigation of the Effects of Styrene-Butadiene-Styrene Content on Bitumen Cracked Surface Morphology</i> Derya KAYA ÖZDEMİR.....	549-559
25. Derin Öğrenme ve Aşağı Örnekleme Yaklaşımları Kullanılarak Duygu Sınıflandırma Performansının İyileştirilmesi <i>Improving Sentiment Classification Performance Using Deep Learning and Undersampling Approaches</i> Yunus SANTUR.....	561-570
26. Yapay Zekâ ve İstatistiksel Yöntemler ile Küresel Ticarete Rekabet Ölçütü Olan Lojistik Performans İndeksine (LPI) Etkin Parametrelerin Ülke Bazlı İncelenmesi ve Tahmin Modellerinin Geliştirilmesi <i>Prediction of Logistics Performance Index by Analysis of Effective Parameters on LPI Based on Countries, Which is Competition Criterion in Global Trade by Using Artificial Intelligence and Statistical Methods</i> Ömer Faruk CANSIZ, Kevser ÜNSALAN.....	571-582
27. Güneş Enerjisi ile Reyhan Kurutma Sisteminin Tasarlanması, İmalatı, Deneysel İncelenmesi ve Alternatif Yöntemlerle Karşılaştırılması <i>Experimental Study, Design and Production of Purple Basil Drying System with Solar Power and Comparison with Alternative Methods</i> Tarkan KOCA, Merve Nur POLAT.....	583-592

Atıksu Arıtma Tesisinde Çözünmüş Organik Azotun Biyolojik Parçalanabilirliğinin İncelenmesi

Sezen KÜÇÜKÇONGAR^{1*}, Ayşe SEVİL¹

¹ Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye

*¹ skucukcongar@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 04/11/2019;

Kabul/Accepted: 29/05/2020)

Öz: Atıksu arıtma tesisleri (AAT) çıkışındaki çözünmüş azot, inorganik ve organik formları içermektedir. Nitrifikasyon/denitrifikasyon prosesleri ile donatılmış olan AAT’de yüksek çözünmüş inorganik azot (ÇİA) giderimi (%95’in üzerinde) gerçekleştirilebilmektedir. Son yapılan çalışmalar AAT çıkışlarında çözünmüş organik azotun (ÇOA), toplam çözünmüş azot (TÇA) içerisinde önemli bir kısmı oluşturduğunu ve genellikle bu aralığın çıkış TÇA’nın %25-80’i olduğunu göstermiştir. Kompleks oluşu nedeniyle, ÇOA verildiği sucul ortamlarda, azotlu dezenfeksiyon yan ürünleri için öncü bileşik olarak, bakteri, alg gelişiminde nutrient olarak davranabilir, çözünmüş oksijeni tüketebilir, membran bozulması, ötrofikasyon ve diğer nitrifikasyon konularında reaksiyonlara katılabilir. Bunların bir sonucu olarak, atıksu arıtımında ÇOA yönetimi önemli bir konudur. Biyolojik parçalanabilen ÇOA (BÇOA), ÇOA’un belirli karışık bakteri kültürü tarafından mineralize edilebilen kısmıdır. Bu çalışmada, ÇOA ve BÇOA’nın 4 bölmeli Bardenpho prosesi bulunan bir atıksu arıtma tesisinde arıtım hattı boyunca değişimi incelenmiştir. Arıtma tesisinde farklı noktalardan temin edilen atıksu örneklerinin biyolojik parçalanabilirliğinin belirlenebilmesi için 28 günlük inkübasyon prosedürünün öncesinde ve sonrasında çözünmüş azot türleri (Kjeldahl, amonyak, nitrit ve nitrat azotu) analiz edilmiştir. ÇOA değerleri ön arıtım çıkışında 1,9-56,76 mg/L ve AAT çıkışında 4,1-19,7 mg/L aralığında tespit edilmiştir. Karışık bakteri kültürü kullanılarak atıksu örneklerinde biyolojik parçalanabilirlik incelenmiş ve AAT arıtım hattında farklı örnekleme zamanlarında %26-98 aralığında belirlenmiştir. BÇOA/TÇA oranı %6-85 aralığında bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Çözünmüş organik azot (ÇOA), biyolojik parçalanabilen çözünmüş organik azot (BÇOA), atıksu arıtma tesisi (AAT).

The Investigation of Biodegradability of Dissolved Organic Nitrogen in Wastewater Treatment Plant

Abstract: Dissolved nitrogen in wastewater treatment plant (WWTPs) effluent includes inorganic and organic forms. High dissolved inorganic nitrogen (DIN) removal (more than 95%) was able to achieve in WWTPs equipped with nitrification/denitrification processes. Recent studies indicate that dissolved organic nitrogen (DON) represents a significant portion of the total dissolved nitrogen (TDN) in WWTPs’s effluent and generally ranging from 25% to 80% of the effluent TDN. Because of its complexity, DON may act as a nitrogenous disinfection by-product precursor, a nutrient for bacterial, algal growth, consume dissolved oxygen in the receiving waters; can participate in reactions that lead to membrane fouling, eutrophication and other nitrification issues. As a result of these concerns, management of DON is important issue for wastewater treatment. Biodegradable DON (BDON) is a portion of DON that can be mineralized by an acclimated mixed bacterial culture. In this study, the fate of DON and BDON along the treatment trains of wastewater treatment plant including 4-stage Bardenpho process was investigated. Dissolved nitrogen species (Kjeldahl, ammonia, nitrite and nitrate nitrogen) were analyzed before and after 28-day incubation procedure for to determine the biodegradability of wastewater samples obtained from different sampling points in WWTP. DON values were determined between 1,9-56,76 mg/L in effluent of primary treatment and 4,1-19,7 mg/L in effluent of WWTP. The biodegradability of wastewater samples were determined by using a mixed bacteria culture and identified between 26%-98% for different sampling time at WWTP treatment train. BDON/TDN ratio was found in 6%-85% ranges.

Key words: Dissolved organic nitrogen (DON), biodegradable dissolved organic nitrogen (BDON), wastewater treatment plant (WWTP).

1. Giriş

Nutrient giderimi ile ilgili son yıllarda yapılan çalışmalarda, nitrifikasyon-denitrifikasyon sistemleri ile donatılmış atıksu arıtma tesislerinde yüksek inorganik azot gideriminin sağlanabildiği, ancak bu tesislerin organik azot gideriminde daha düşük etkinliğinin olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle atıksu arıtma tesisi çıkışında

* Sorumlu yazar: skucukcongar@ktun.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-6444-4397, ² 0000-0003-3653-0874

toplam çözünmüş azotun büyük bir kısmını çözünmüş organik azot oluşturmaktadır. Klasik atıksu arıtma tesisleri çıkış sularında, çözünmüş azotun yaklaşık %65'lik kısmını çözünmüş organik azot oluşturmaktadır, nitrifikasyon-denitrifikasyon sistemlerinde bu oran daha da yüksek olabilmektedir [1-2]. Son yıllarda yapılan çalışmalar çözünmüş organik azotun içerisinde farklı formların bulunduğunu ve bunların bir kısmının ulaştıkları sucul ortamda bakteriler, doğal alg ve planktonların biyolojik olarak kullanımları için uygun olabileceğini göstermiştir [2, 3-5]. Bununla ilişkili olarak, çözünmüş organik azotun, verildiği sucul ortamlarda, ötrofikasyon, membranlarda bozulma ve dezenfektan maddeler ile birleşmesi halinde azotlu dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumuna katkı sağlama gibi pek çok olumsuz etkisi vardır. Çözünmüş organik azotun bir kısmı (amino asitler gibi) verildikleri ortamda doğrudan alglerin biyolojik olarak kullanımı için, bazı formları ise bakteriyel bozunmadan sonra kullanımı için uygun olacaktır. Biyolojik olarak parçalanabilen azotun, karışık bakteri kültürleri tarafından mineralize olabilen veya doğrudan/dolaylı olarak sucul bitki türleri tarafından azot kaynağı olarak kullanıma uygun olabilen fraksiyonları mevcuttur [2-6]. Literatürde bu fraksiyonların atıksu çıkışında ve sucul ortamlarda incelendiği çalışmalar bulunmakla birlikte, atıksu arıtma tesislerinin prosesleri içerisinde giderim verimlerinin incelendiği çok az çalışma mevcuttur [2, 4-5].

Sattayatewa ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [4] dört basamaklı bir Bardenpho prosesi hattı boyunca biyolojik olarak yararlanılabilen çözünmüş organik azot miktarları incelenmiş ve çıkış çözünmüş organik azotun %28-57'sinin biyolojik olarak kullanılabilir olduğu raporlanmıştır. Çözünmüş organik azotun biyolojik olarak algler ve bakteriler tarafından birlikte kullanılabilirliği ve sadece bakteriler tarafından parçalanabilirliği arasında çok önemli bir fark gözlenmemiş, ancak tüketim hızları sırasıyla 0,13 gün⁻¹ ve 0,04 gün⁻¹ olarak tespit edilmiştir. Böylece alg ve bakteri arasındaki ortak yaşam ilişkisi ve biyolojik olarak yararlanılabilen organik azot prosedüründeki inkübasyon süresinin kısaltılması da raporlanmıştır. Biyolojik olarak yararlanılabilen organik azot prosedüründeki alg ve bakteri arasındaki ortak yaşam ilişkisi ile ilgili başka çalışmalarda da aynı sonuçlar elde edilmiştir [3, 7]. Damlatmalı filtre bulunan atıksu arıtma tesisi çıkışında algler için çözünmüş organik azotun biyolojik olarak kullanılabilen kısmı %40 kadar olup, bakteri ve alg birlikteyken bu değer %60 kadardır [7].

Şimşek ve ark. [5] damlatmalı filtre bulunan bir tesiste inceleme yapmışlar ve biyolojik olarak parçalanılabilen çözünmüş organik azotun, ham atıksu numunesinde ve arıtma tesisinin çeşitli ünitelerinden alınan numunelerde %51 ile %69 arasında olduğunu bulmuşlardır. Şimşek ve ark. tarafından yapılan başka bir çalışmada [2], ön çökeltim sonrasında tesis çıkışına kadar, biyolojik olarak parçalanabilen çözünmüş organik azotun, aktif çamur tesisinde %68'i ve damlatmalı filtre tesislerinde %65'i giderilmiştir. Tesis çıkış suyunda bulunan çözünmüş organik azotun, aktif çamur tesisinde %26'sı, damlatmalı filtre tesisinde %62'si biyolojik olarak parçalanabilir formda olduğu belirlenmiştir.

Atıksu arıtma tesislerinin çıkış sularının verildikleri ortamlarda farklı su kalite parametreleri üzerinde olumsuz değişikliklere neden olabilme ihtimalleri bulunmaktadır. Azotun farklı formlarının belirli konsantrasyonların üzerinde olması suda yaşayan canlılar ve bitkilerin bozunuma katkılarıyla negatif sonuçlar oluşturabilecektir. Özellikle organik azotun sudaki farklı türler tarafından biyolojik parçalanabilirliği arıtma tesislerinde organik azotun takibini daha da önemli kılmaktadır. Bu çalışmada, organik ve inorganik azot türlerinin ve buna bağlı olarak çözünmüş organik azot (ÇOA) ve biyolojik parçalanabilen çözünmüş organik azot (BÇOA)'nın 4 bölmeli Bardenpho prosesi bulunan bir atıksu arıtma tesisinde arıtım hattı boyunca değişimi incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada kullanılan atıksu numuneleri, karbon ve azotun kısmi giderimine göre tasarlanmış olan ileri biyolojik arıtım metodunun uygulandığı Konya Atıksu Arıtma Tesisinden alınmıştır. 1.000.000 kişi eşdeğeri ve 200.000 m³/gün ortalama atıksu debi değerine göre dizayn edilen atıksu arıtma tesisi, kaba ve ince ızgaralar, havalandırmalı kum ve yağ tutucu, ön çökeltme havuzları, Bardenpho prosesi biyolojik arıtım ünitesi, son çökeltme havuzları, çamur yoğunlaştırma havuzları, anaerobik çamur çürütme tankları, çamur susuzlaştırma üniteleri (santrifüj dekantör) ve açık kanal UV dezenfeksiyon sisteminden oluşmaktadır. Tesiste biyolojik arıtım havuzları, biyolojik olarak karbon ve azotun kısmi giderimi esasına göre tasarlanmıştır.

Çalışma için gerekli numuneler atıksu arıtma tesisinden birer ay aralıklarla üç kez olmak üzere 3 farklı noktadan alınmıştır. Numune alım noktaları; ön çökeltme havuzu çıkışı (N1 örnekleme noktası), biyolojik arıtım ünitesi (ilk aerobik bölme çıkışı) (N2 örnekleme noktası) ve son çökeltme çıkışı (dezenfeksiyon öncesi) (N3 örnekleme noktası) olmak üzere tesisteki azot gideriminde önemli üç noktadır. Alınan atıksu örnekleri laboratuvara getirilerek 0.20 µ hidrofilik polietersülfon membran filtreden geçirilmiştir. Süzülen numunelerde çözünmüş formdaki toplam Kjeldahl azotu, amonyak, nitrit ve nitrat azotu analizleri yapılmıştır. Daha sonra biyolojik parçalanabilirliği belirleyebilmek amacıyla inkübasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki test

prosedürlerine uygun olarak 28 günlük inkübasyon işleminden sonra, atıksu örneklerinde aynı analizler tekrarlanmıştır.

Toplam Kjeldahl azotu (TKA) analizleri Standart Metot 4500 B Makro Kjeldahl metodu kullanılarak yapılmıştır. $\text{NH}_3\text{-N}$ analizleri Standart Metot 4500 $\text{NH}_3\text{ B-C}$; $\text{NO}_3\text{-N}$ ve $\text{NO}_2\text{-N}$ analizleri Standart Metot 4110 B kapsamında yapılmıştır [8]. Çözünmüş organik azot, Kjeldahl ve amonyak azotunun farkından hesaplanmıştır.

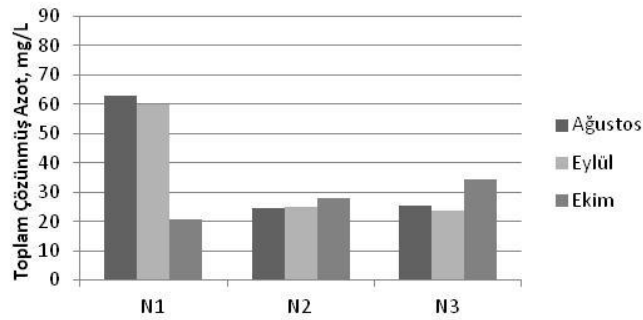
Alınan atıksu örnekleri, Khan ve ark. [6] tarafından geliştirilen ve Şimşek ve ark. [5] tarafından bazı modifikasyonları yapılan prosedüre göre inkübasyona tabi tutulmuştur. Bu yöntemde hacimde amber inkübasyon şişesine 200'er mL atıksu örnekleri eklenmiş ve 2 mL tesisten temin edilen karışık bakteri kültürü içeren ham atıksu ilave edilmiştir. Inkübasyon prosedürüne 20°C 'de 28 gün boyunca devam edilmiştir. Inkübatörde 80 rpm hızda karıştırma sağlanmış ve aerobik koşulların hâkim olması için her gün şişelerin kapakları açılarak havalandırması sağlanmıştır. Atıksu örneklerine uygulanan işlemlerin aynısı deiyonize suya da uygulanmış ve 28 gün boyunca bu kontrol örnekleri için de aynı prosedür uygulanmıştır. Inkübasyon sonrasında biyolojik olarak parçalanabilen çözünmüş organik azot (BÇOA), fraksiyonu Eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır.

$$\text{BÇOA} = (\text{ÇOA}_a - \text{ÇOA}_b) - (\text{ÇOA}_{ka} - \text{ÇOA}_{kb}) \quad (1)$$

ÇOA_a ve ÇOA_b sırasıyla inkübasyondan önce ve sonra atıksu örneklerinde analiz edilen ÇOA konsantrasyonudur. ÇOA_{ka} ve ÇOA_{kb} ise sırasıyla inkübasyon öncesi ve sonrasında kontrol örnekleri için analiz edilen ÇOA konsantrasyonudur.

3. Sonuçlar

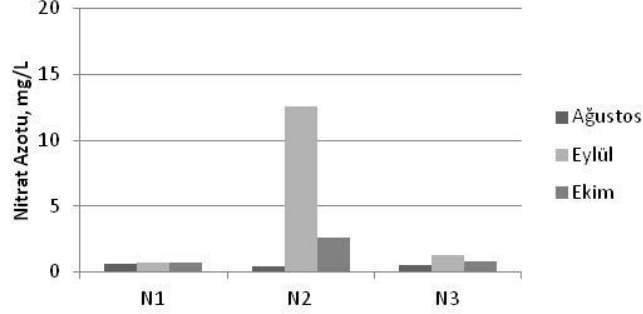
Atıksu arıtma tesisi N1, N2 ve N3 noktalarından Ağustos, Eylül ve Ekim aylarında alınan örneklerde yapılan analizler sonucu toplam çözünmüş azot konsantrasyonları Şekil 1'de verilmiştir. N1 noktasında 20,5-63 mg/L, N2 ve N3 noktalarında ise 23,8-34,4 mg/L aralığında değerler elde edilmiştir. Ağustos ve Eylül aylarında alınan örneklerde tesiste toplam çözünmüş azot parametresi için biyolojik arıtım ünitesinde %60 verim elde edildiği tespit edilmiş, ancak Ekim ayında biyolojik arıtım ünitesi giriş ve çıkışında kayda değer bir toplam çözünmüş azot değişimi gözlemlenmemiştir. Bu durumun atıksu arıtma tesisinin öncelikle karbon giderimi, azotun kısmi giderimi odaklı tasarımıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Literatüre göre ham evsel atıksularda toplam azot konsantrasyonu 20-85 mg/L, çözünmüş organik azot konsantrasyonu 8-35 mg/L, amonyak azotu konsantrasyonu 12-50 mg/L aralığında değişir; nitrit ve nitrat azotu konsantrasyonları ise oldukça düşüktür [9].



Şekil 1. N1, N2 ve N3 örnekleme noktalarında toplam çözünmüş azot konsantrasyonlarının değişimi.

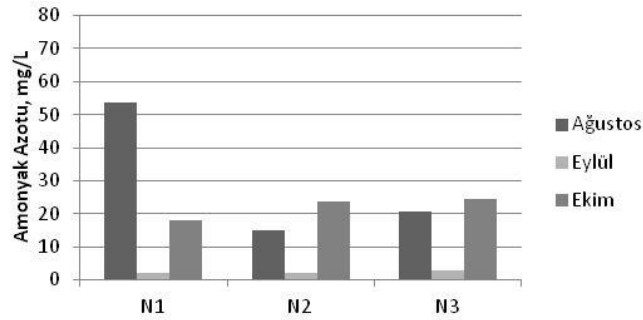
Şekil 2'de üç örnekleme noktası için, farklı aylarda alınan örneklerde analiz edilen nitrat konsantrasyonları verilmiştir. Bu kategoride alınan örneklerin tamamında nitrit konsantrasyonları tespit limitlerinin altında bulunmuştur. Ön arıtım çıkışında örnekleme yapılan tüm aylar için nitrat konsantrasyonu 0,65-0,74 mg/L aralığında tespit edilmiştir. Biyolojik arıtım ünitesinden Eylül ayında alınan örnekte nitrat konsantrasyonu 12,61 mg/L olarak belirlenmiş, ancak diğer aylarda bu değer çok daha düşük bulunmuştur. Eylül ayında arıtma tesisinde diğer aylara nispeten oldukça yüksek konsantrasyonda çözünmüş organik azot değeri (N1 noktasında 56.76 mg/L) gözlemlenmiştir ve buna bağlı olarak da, biyolojik arıtım ünitesinde girişte düşük amonyak azotu konsantrasyonuna rağmen, çözünmüş organik azotun amonifikasyonundan kaynaklı yüksek nitrat konsantrasyonunun olduğu düşünülmektedir. Ağustos ayı için N2 noktasında nitrat azotu konsantrasyonlarının

düşük olması biyolojik arıtım havuzunun ilk aerobik bölümünde başarılı bir nitrifikasyon olmadığını göstermektedir. Son çökeltme ünitesi çıkışında nitrat konsantrasyonları beklenildiği üzere 0,56-1,31 mg/L aralığında elde edilmiştir.



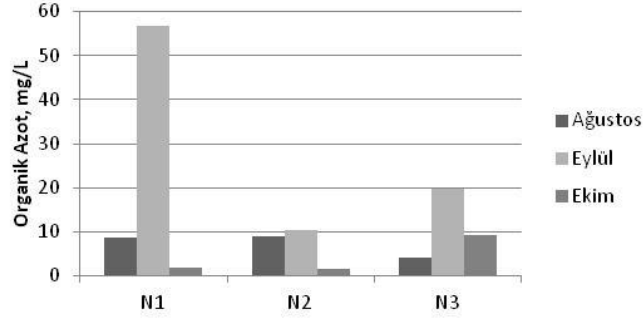
Şekil 2. N1, N2 ve N3 örnekleme noktalarında nitrat azotu konsantrasyonlarının değişimi.

Üç farklı örnekleme noktası için Ağustos, Eylül ve Ekim aylarında belirlenen amonyak azotu konsantrasyonları Şekil 3’de gösterilmiştir. N1 noktasında elde edilen amonyak azotu konsantrasyonları 2,24-53,7 mg/L aralığındadır ve bu parametre N2 ve N3 noktaları için sırasıyla 2,0-23,7 mg/L ve 2,8-24,5 mg/L aralığında tespit edilmiştir. Eylül ayında her üç noktadan alınan örneklerde, diğer iki örneğe göre çok düşük amonyak azotu konsantrasyonları tespit edilmiştir. Ağustos ayında alınan örneklerde ön çökeltme sonrası 53,7 mg/L düzeyinde olan amonyak azotu, biyolojik arıtım ünitesinde %61 oranında giderilmiştir ve bu durumda biyolojik arıtım ünitesinin ilk basamağında başarılı bir nitrifikasyon işleminin yapıldığı söylenebilir.



Şekil 3. N1, N2 ve N3 örnekleme noktalarında amonyak azotu konsantrasyonlarının değişimi.

Örnekleme noktalarında farklı aylarda tespit edilen çözünmüş organik azot konsantrasyonları Şekil 4’de gösterilmiştir. Ağustos ve Ekim aylarında çözünmüş organik azot değerleri 1,7-9,1 mg/L aralığında değişmekte ve toplam çözünmüş azot %6-36,7 aralığında iken, Eylül ayında alınan örneklerde oldukça yükselmiştir. Özellikle ön çökeltme tankı çıkışında çözünmüş organik azot konsantrasyonu 56,76 mg/L olarak tespit edilmiştir ve bu değer toplam çözünmüş azotun %95’ini oluşturmaktadır. Biyolojik arıtım ünitesinde Ağustos ve Eylül aylarında sırasıyla %52 ve %65 çözünmüş organik azot giderimi sağlanmış, Ekim ayında ise giderim gözlenmemiştir. Bardeonpho prosesi biyolojik arıtım ünitesi bulunan bir atıksu arıtma tesisinde yapılan bir çalışmada [4], ilk anoksik bölmede çözünmüş organik azot değerinde bir artış görülmüş ve daha sonraki ünitelerde bir giderim olmamıştır. Bu durumun anoksik biyolojik aktivite veya heterotofik denitrifikasyondan kaynaklanabileceği belirtilmiştir.



Şekil 4. N1, N2 ve N3 örnekleme noktalarında çözünmüş organik azot konsantrasyonlarının değişimi.

Ön arıtım çıkışında alınan örneklerde (N1) toplam çözünmüş azot içerisinde en baskın azot türü Ağustos ve Ekim aylarında sırasıyla %85,3 ve %87,2 ile amonyum azotu olarak tespit edilmiştir. Ancak Eylül ayında alınan örnekte en yüksek oran (%95) çözünmüş organik azot türüne aittir. N2 noktasından alınan örneklerde farklı zamanlarda alınan örneklerde farklı azot türlerinin daha baskın olduğu söylenebilir. Ağustos ayında toplam çözünmüş azotun %61,5'i amonyum azotu, %36,7'si çözünmüş organik azottan oluşmaktadır. Eylül ayı örneğinde toplam çözünmüş azot içerisinde %50,6 nitrat azotu ve %41,3 çözünmüş organik azot mevcuttur. Ekim ayı için ise toplam çözünmüş azotun %84,7'si amonyum azotundan oluşmaktadır. N3 örnekleme noktasında Ağustos ve Ekim aylarında toplam çözünmüş azotun sırasıyla %81,7 ve %71,2'si amonyum azotu ve sırasıyla %16,1 ve %26,4'ü çözünmüş organik azottan müteşekkildir. Ancak Eylül ayında alınan örnekte çözünmüş organik azot toplam çözünmüş azotun %82,7'sini oluşturmaktadır. Özetle ÇOA/TÇA değerleri N1 için %9,3-95, N2 için %6,1-41,3 ve N3 için %16,1-82,7 aralığında tespit edilmiştir.

Dört basamaklı Bardenpho prosesinde karbon oksidasyonu, nitrifikasyon ve denitrifikasyon işlemleri gerçekleştirilir ve denitrifikasyonun gerçekleşebilmesi için hem atıksudaki karbon, hem de içsel solunum hidrolizi sonucu oluşan karbon kullanılmaktadır. İlk anoksik ortamda atıksudaki karbon nitratin denitrifikasyonunda kullanılmakta ve atıksudaki amonyak azotu miktarında değişiklik olmamaktadır. İlk aerobik tankta nitrifikasyon gerçekleşmekte ve ikinci anoksik bölümde içsel solunum ile karbon sağlanarak, ilave denitrifikasyon gerçekleştirilmektedir. İkinci aerobik bölmede çökeltme işlemi öncesinde azot gazı sistemden uzaklaştırılmaktadır [10].

Bu çalışmada örneklerin alındığı atıksu arıtma tesisi karbon giderimi ve kısmi azot giderimini hedefleyen ileri biyolojik arıtımın yapıldığı bir tesistir. Tesisten Ağustos ayında tüm örnekleme noktalarından alınan örneklerde en baskın azot türü amonyak azotu olarak tespit edilmiştir. Çözünmüş organik azot parametresi ise biyolojik arıtım girişinde 8,6 mg/L iken son çökeltme çıkışında 4,1 mg/L olarak belirlenmiştir ve bu sonuçlar çözünmüş organik azotun %52 oranında giderildiğini göstermektedir. N2 noktasında alınan örnekte analiz edilen değerlerle kıyaslandığında, N3 noktasında çözünmüş organik azotta azalma ve amonyak azotunda bir miktar artma gözlemlenmiştir; bu durumun çözünmüş organik azotun parçalanması sonucu önce amonyağa dönüşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitrit azotu tespit limitlerinin altında ve nitrat azotu konsantrasyonu N1, N2 ve N3 noktalarında düşük konsantrasyonlardadır (0,46-0,65 mg/L aralığında). Biyolojik arıtım girişinde 53,7 mg/L konsantrasyonundaki amonyak azotu çıkışta 20,8 mg/L değerine düşmektedir. İlk anoksik ve aerobik bölmenin çıkışında amonyak azotu konsantrasyonunun azalması ve nitrit, nitrat azotlarının konsantrasyonlarının dikkate değer bir değişime uğramaması nedeniyle, nitrifikasyon-denitrifikasyon işlemlerinin burada tamamlandığı ve ikinci anoksik-aerobik bölmelerde çözünmüş organik azot gideriminin yapıldığı söylenebilir.

Eylül ayında alınan örneklerde atıksuyun amonyak azotu konsantrasyonu tüm örnekleme noktalarında 2,02-2,8 mg/L aralığındadır ve biyolojik arıtım girişinde çözünmüş organik azot konsantrasyonu 56,76 mg/L değerinde tespit edilmiştir. Bu durum Ağustos ayına göre bu örneklerde ham atıksuyun azot içeriğinin değiştiğini göstermektedir. Tesis evsel atıksuların yanı sıra endüstriyel atıksuların da arıtımını gerçekleştirmektedir ve bu örnekleme zamanında atıksu içeriğinde buna bağlı bir değişiklik olduğu düşünülmektedir. Son çökeltme çıkışında analiz edilen çözünmüş organik azot konsantrasyonu, tesiste biyolojik arıtımda %65 çözünmüş organik azot gideriminin sağlandığını ifade etmektedir. Bardenpho prosesi girişinde 0,72 mg/L olan nitrat azotu

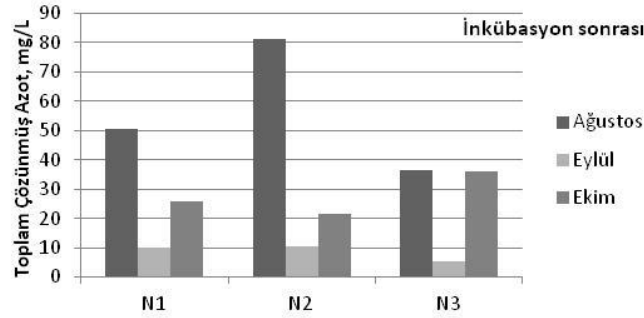
konsantrasyonunun ilk aerobik bölme çıkışında 12,61 mg/L'ye yükselmesi nitrifikasyon işleminin sonucudur. Biyolojik arıtım çıkışında bu değerin 1,31 mg/L'ye düşmesi denitrifikasyondan kaynaklanmaktadır.

Ekim ayında tesisten alınan örneklerde, Ağustos ayındaki örneklerle benzer şekilde baskın azot türü amonyak azotudur, ancak biyolojik arıtım girişinde konsantrasyon 17,9 mg/L'dir. Biyolojik arıtım sonrasında bu değer 24,5 mg/L'ye bir miktar yükselmiştir. N2 noktasında nitrat azotu konsantrasyonunun 2,57 mg/L'ye yükselmesi bir miktar nitrifikasyonun gerçekleştiğini göstermektedir. Ancak biyolojik arıtım ünitesinde çözünmüş organik azot miktarında bir artış olmuş ve amonyak miktarı önemli düzeyde bir değişiklik göstermemiştir.

Dört basamaklı bir Bardenpho prosesini bulunduğu bir atıksu arıtma tesisinde yapılan bir çalışmada [4], tesisin farklı noktalarından alınan örneklerde azot türlerinin dağılımı incelenmiş ve ilk aerobik bölmeye kadar en baskın tür amonyak azotu, daha sonraki bölmelerde ise nitrat azotu olarak belirlenmiştir. İlk anoksik bölmede bir önceki basamağa göre daha düşük nitrat azotu konsantrasyonu tespit edilmiş ve bunun denitrifikasyondan kaynaklandığı belirtilmiştir. Bu bölmede amonyak azotu konsantrasyonu stabildir. Son aerobik bölmede nitrifikasyondan dolayı amonyak azotu tespit edilmemiştir.

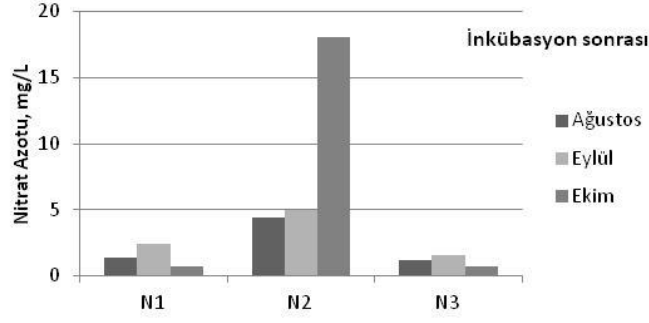
Nitrifikasyon işleminin karbon gideriminin de yapıldığı sistemlerde sağlanabilmesi için işletme koşullarının iyi dengelenmesi gerekmektedir. Katı alıkonma süresi, F/M oranı, sıcaklık, çözünmüş oksijen düzeyi, pH ve BOİ/Toplam Kjeldahl Azotu yükü gibi bazı parametreler nitrifikasyonun sürecini etkileyen parametrelerdir [9].

28 günlük inkübasyon işleminden sonra örneklerde analiz edilen toplam çözünmüş azot konsantrasyonları Şekil 5'te verilmiştir. Ağustos ayı için bu değer 36,27-81,12 mg/L, Eylül ayı için 5,27-10,45 mg/L ve Ekim ayı için 21,66-36,12 mg/L aralıklarında tespit edilmiştir.



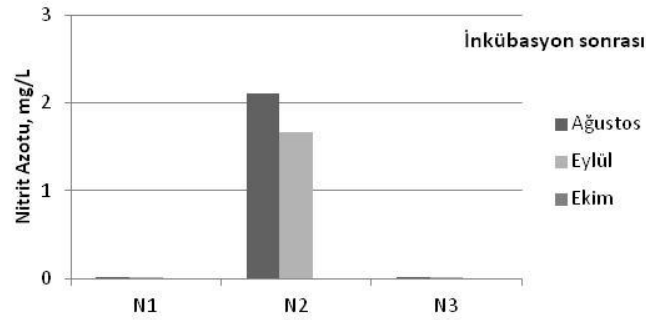
Şekil 5. İnkübasyon sonrası N1, N2 ve N3 örnekleme noktalarında toplam çözünmüş azot konsantrasyonlarının değişimi.

Şekil 6'da inkübasyon işlemi sonrası örneklerde analiz edilen nitrat azotu konsantrasyonları verilmiştir. N1 noktasında 0,65-0,74 mg/L aralığında olan nitrat azotu konsantrasyonu, inkübasyon sonrası 0,74-2,45 mg/L aralığına gelmiştir. N2 noktasından alınan örneklerde ise inkübasyon neticesinde Ağustos ayında 0,46 mg/L konsantrasyonundan 4,40 mg/L'ye, Ekim ayında ise 2,57 mg/L'den 18,1 mg/L'ye yükselmiştir. Eylül ayında ise inkübasyondan önce 12,61 mg/L olan nitrat azotu konsantrasyonu 5,02 mg/L değerine düşmüştür. N3 noktasından Ağustos, Eylül ve Ekim aylarında alınan örneklerde sırasıyla 0,56, 1,31 ve 0,82 mg/L olan nitrat azotu konsantrasyonları inkübasyon ile yine sırasıyla 1,17, 1,52 ve 0,72 mg/L konsantrasyonlarına gelmiştir. İnkübasyon sonrasında nitrat konsantrasyonlarındaki artış, örneklerdeki mevcut amonyağın ve/veya inkübasyon boyunca çözünmüş organik azotun amonifikasyonundan açığa çıkan amonyağın nitrifikasyonundan kaynaklanmaktadır [5].



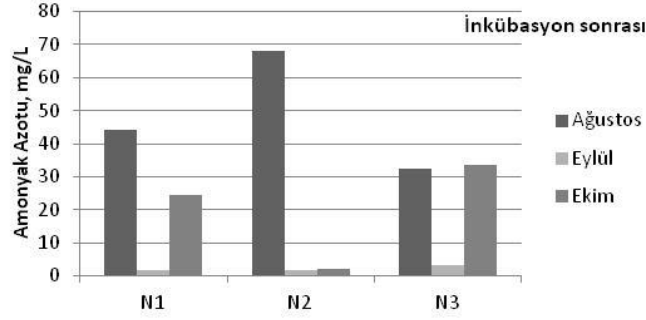
Şekil 6. İnkübasyon sonrası N1, N2 ve N3 örnekleme noktalarında nitrat azotu konsantrasyonlarının değişimi.

İnkübasyon öncesinde alınan örneklerin tamamında analiz edilen nitrit azotu konsantrasyonu tespit limitlerinin altındadır. Ancak inkübasyon sonrasında N2 örnekleme noktasına ait Ağustos ve Eylül aylarının örneklerinde sırasıyla 2,11 ve 1,67 mg/L nitrit azotu tespit edilmiştir (Şekil 7). 2102 yılında ABD’de iki basamaklı bir damlatmalı filtre ünitesinde yapılan çalışmada [5], başlangıçta 0,1 mg/L’den daha düşük konsantrasyonlarda olan nitrit konsantrasyonları inkübasyon sonrasında birincil çökeltme öncesi ve sonrasında 25,2 ve 22,9 mg/L düzeylerinde bulunmuştur. Nitrat konsantrasyonlarının aynı örneklerde 3 ve 4,6 mg/L olarak tespit edilmesi ortamda yeterli çözünmüş oksijenin bulunmaması ile ilişkilendirilmiştir. Ancak söz konusu tesiste başlangıçta 23,8 mg/L amonyak azotunun tamamı giderilebilmektedir.



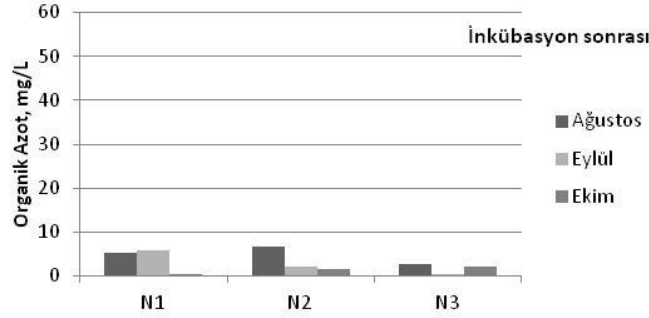
Şekil 7. İnkübasyon sonrası N1, N2 ve N3 örnekleme noktalarında nitrit azotu konsantrasyonlarının değişimi.

Şekil 8’de inkübasyon işlemi sonrası örneklerde tespit edilen amonyak azotu konsantrasyonları verilmiştir. İnkübasyon işlemi sonrasında amonyak azotu konsantrasyonlarında genellikle bir azalma gözlemlenmiş, ancak biyolojik arıtım giriş suyu 53,7 mg/L amonyak azotunun tespit edildiği Ağustos ayı örneklerinde, N2 ve N3 örnekleme noktalarına ait inkübasyon işlemlerinin sonunda amonyak azotu konsantrasyonlarında artış gözlemlenmiştir. Daha önce ABD’de yapılan bir çalışmada [5] inkübasyon sonrası amonyak azotunun birkaç örnek haricinde tamamında nitrifikasyona uğradığı tespit edilmiştir. 2013 yılında yapılan bir çalışmada [2], inkübasyon işlemi hem ayrı ayrı bakteri ve alg kültürü hem de bakteri kültürü ve alglerle birlikte gerçekleştirilmiş, sonuçta sadece alg kültürünün kullanıldığı inkübasyon işlemi sonrasında kalıntı amonyak tespit edilmiştir ve bunun sebebinin inkübasyon boyunca alg kültürünün faydalanamayacağı amonyaktan kaynaklandığı belirtilmiştir.



Şekil 8. İnkübasyon sonrası N1, N2 ve N3 örnekleme noktalarında amonyak azotu konsantrasyonlarının değişimi.

Şekil 9’da inkübasyon neticesinde çözünmüş organik azot konsantrasyonları aylara ve örnekleme noktalarına göre verilmiştir. Tüm örneklerde inkübasyon sonrası çözünmüş organik azot konsantrasyonlarında bir azalma tespit edilmiştir. İnkübasyon sonrası çözünmüş organik azot miktarındaki azalmanın fazla oluşu, çözünmüş organik azotun biyolojik olarak kullanılabilirliğinin yüksek oluşunu veya kolay parçalanamayan çözünmüş organik azot formunun daha az miktarda oluşunu göstermektedir [2].

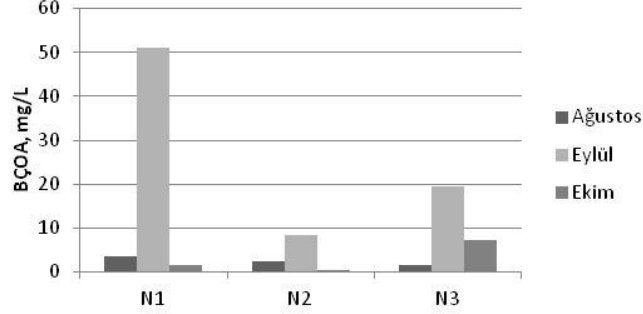


Şekil 9. İnkübasyon sonrası N1, N2 ve N3 örnekleme noktalarında çözünmüş organik azot konsantrasyonlarının değişimi.

N2 noktasındaki Ağustos ve Eylül ayı örnekleri dışında (sırasıyla 2,11 ve 1,67 mg/L) inkübasyon sonrasında nitrit konsantrasyonları tespit limitlerinin altında elde edilmiştir. N1 örnekleme noktasında inkübasyon sonrası en yüksek oranda Ağustos ve Ekim ayları için amonyak azotu konsantrasyonu, Eylül ayı için ise çözünmüş organik azot tespit edilmiştir. Eylül ayında biyolojik arıtım ünitesi girişindeki, diğer aylara göre çok yüksek konsantrasyondaki (56,76 mg/L) çözünmüş organik azotun bu sonuçta etkili olduğu düşünülmektedir. N2 örnekleme noktasında inkübasyon sonrası Eylül ve Ekim aylarındaki örneklerde en baskın tür nitrat azotudur, Ağustos ayında ise amonyak azotudur. Ağustos ayında alınan örnekte biyolojik arıtım girişinde yüksek amonyak azotu konsantrasyonu (53,7 mg/L) nitrifikasyon işlemine katkı sağlamıştır. N3 noktasında alınan örneklerde yapılan inkübasyon işlemi sonrasında tüm örneklerde en fazla görülen azot türü amonyak azotudur.

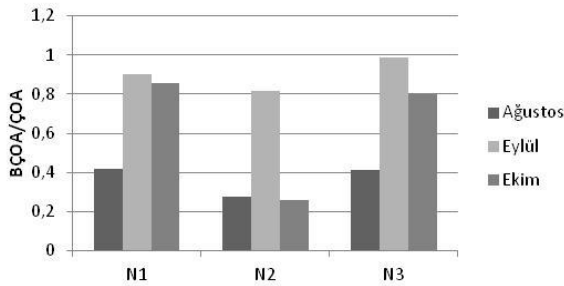
Şekil 10’da inkübasyon prosedürü ile belirlenen farklı örnekleme noktalarındaki BÇOA konsantrasyonları verilmiştir. Biyolojik arıtım girişinde 56,76 mg/L çözünmüş organik azotun tespit edildiği Eylül ayı örneği dışında diğer aylarda BÇOA konsantrasyonu 0,44-7,29 mg/L aralığında belirlenmiştir. Eylül ayına ait örneklerde ise N1 noktasında 51,08 mg/L, N2’de 8,4 mg/L ve N3’de 19,39 mg/L olarak belirlenmiştir. Tesiste biyolojik arıtım ünitesi girişinden son çökeltme tankı çıkışına kadar BÇOA parametresi giderim verimi Ağustos ve Eylül ayları için sırasıyla %53 ve %62 olarak elde edilmiş, Ekim ayında ise BÇOA’da ikinci anoksik ve aerobik bölgede artış olduğu gözlemlenmiştir. Simsek ve arkadaşları tarafından 2012 yılında iki kademeli bir damlatmalı filtre tesisinde yapılan çalışmada da [5], ham atıksuda ve tesis çıkışında sırasıyla 6,2 ve 1,8 mg/L BÇOA değerleri tespit edilmiştir. Söz konusu çalışmada BÇOA gideriminin BOİ damlatmalı filtrelerinde,

nitrifikasyon damlatmalı filtrelerinde ve klorlama ünitesinde olduğu belirtilmiştir. Yapılan bir çalışmada [2], saf oksijenli aktif çamur ve hareketli yatak biyofilm reaktör bulunan bir atıksu arıtma tesisinde BÇOA giderimi %68 olarak belirlenmiştir.

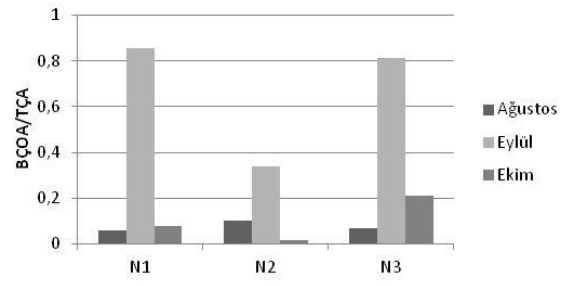


Şekil 10. N1, N2 ve N3 örnekleme noktalarında BÇOA konsantrasyonlarının değişimi.

N1, N2 ve N3 örnekleme noktaları için belirlenen BÇOA konsantrasyonlarının toplam çözünmüş organik azota oranları Şekil 11’de gösterilmiştir. Biyolojik arıtım girişinde yüksek çözünmüş organik azotun tespit edildiği Eylül ayında çözünmüş organik azotun biyolojik parçalanabilirliği N1, N2 ve N3 noktaları için sırasıyla %90, %82 ve %98 olarak belirlenmiştir. Ağustos ayında N1 ve N3 noktalarında sırasıyla %42 ve %41 çözünmüş organik azot biyolojik parçalanabilirliği tespit edilmiş ve N2 noktasında bu değer %28’e düşmüştür. Ekim ayında da Ağustos ayına benzer bir eğilim belirlenmiş ve N1 noktasında çözünmüş organik azotun biyolojik parçalanabilirliği %86 iken, N2’de %26 ve N3’de %80 bulunmuştur. Üç örnekleme ayında da ortak eğilim biyolojik parçalanabilirliğin biyolojik arıtım girişi ve çıkışı yüksek oluşu, ancak ilk anoksik ve aerobik bölmenin sonundan alınan örnekte bu değer düşük elde edilmesidir. Literatürde iki kademeli bir damlatmalı filtre tesisinde farklı arıtım basamaklarında BÇOA/ÇOA oranı %51-69 arasında tespit edilmiştir [5]. Tesis çıkış suyunda ise biyolojik parçalanabilirlik %52 [5] ve %45 [2] bulunmuştur. Literatürde biyolojik parçalanabilirliğin arıtım hattı boyunca dereceli olarak azaldığı belirlenmiştir [2, 5]. Şekil 12’de toplam çözünmüş azot içerisinde biyolojik parçalanabilme özelliğine sahip çözünmüş organik azot yüzdeliklerini göstermektedir. Yüksek çözünmüş organik azot girişinin olduğu Eylül ayında bu oran %86 değerine kadar yükselmiş iken, diğer aylarda %1,6 değerine kadar düşebilmektedir. BÇOA/TÇA oranlarında görülen eğilim, Şekil 19’da verilen BÇOA/ÇOA oranları ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 11. N1, N2 ve N3 örnekleme noktalarında BÇOA/ÇOA oranının değişimi.



Şekil 12. N1, N2 ve N3 örnekleme noktalarında BÇOA/TÇA oranının değişimi.

4. Tartışma

Bu çalışmada kısmi azot giderimi yapılan bir atıksu arıtma tesisindeki çözünmüş organik azotun biyolojik olarak parçalanabilirliğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Atıksu arıtma tesisi N1, N2 ve N3 noktalarından Ağustos, Eylül ve Ekim aylarında alınan örneklerde uygulanan inkübasyon işlemi sonrasında biyolojik arıtım

girişinde 56,76 mg/L çözünmüş organik azotun tespit edildiği Eylül ayı örneği dışında diğer aylarda BCOA konsantrasyonu 0,44-7,29 mg/L aralığında belirlenmiştir. Eylül ayına ait örneklerde ise N1 noktasında 51,08 mg/L, N2’de 8,4 mg/L ve N3’de 19,39 mg/L olarak belirlenmiştir. Tesiste biyolojik arıtım ünitesi girişinden son çökeltme tankı çıkışına kadar BCOA parametresi giderim verimi Ağustos ve Eylül ayları için sırasıyla %53 ve %62 olarak elde edilmiş, Ekim ayında ise BCOA’da ikinci anoksik ve aerobik bölmede artış olduğu gözlemlenmiştir. Biyolojik arıtım girişinde yüksek çözünmüş organik azotun tespit edildiği Eylül ayında çözünmüş organik azotun biyolojik parçalanabilirliği N1, N2 ve N3 noktaları için sırasıyla %90, %82 ve %98 olarak belirlenmiştir. Ağustos ayında N1 ve N3 noktalarında sırasıyla %42 ve %41 çözünmüş organik azot biyolojik parçalanabilirliği tespit edilmiş ve N2 noktasında bu değer %28’e düşmüştür. Ekim ayında da Ağustos ayına benzer bir eğilim belirlenmiş ve N1 noktasında çözünmüş organik azotun biyolojik parçalanabilirliği %86 iken, N2’de %26 ve N3’de %80 bulunmuştur. Üç örnekleme ayında da ortak eğilim biyolojik parçalanabilirliğin biyolojik arıtım giriş ve çıkışında yüksek oluşu, ancak ilk anoksik ve aerobik bölmenin sonundan alınan örnekte bu değer düşük elde edilmesidir.

Toplam çözünmüş azot içerisinde biyolojik parçalanabilme özelliğine sahip çözünmüş organik azot yüzdeleri yüksek çözünmüş organik azot girişinin olduğu Eylül ayında bu oran %86 değerine kadar yükselmiş iken, diğer aylarda %1,6 değerine kadar düşebilmektedir. BCOA/TÇA oranlarında görülen eğilim, BCOA/ÇOA oranları ile benzerlik göstermektedir.

Kullanılabilir su kaynaklarının her geçen gün azalması, mevcut su kaynaklarının korunmasının önemini arttırmaktadır. Mevcut su kaynaklarının korunması için azot ve fosfor kontrolü büyük önem taşımaktadır. İnorganik ve çözünmüş organik azot bileşiklerinin alıcı su ortamlarında meydana getirdiği kirlilik önemli boyutlara varabilmektedir. Türkiye’de yasal sınırlandırmalar, toplam azot, nitrit, nitrat ve amonyak azotu için, ayrıca toplam Kjeldahl azotu için bulunmaktadır. Ancak atıksu arıtma tesislerinde inorganik azot formları etkili bir şekilde giderilirken, çözünmüş organik azot türleri daha düşük etkinlikle giderilebilmekte, bu durum da tesis çıkış sularında toplam azot parametresinin büyük bir kısmını çözünmüş organik azotların oluşturmaya neden olmaktadır. Bu nedenle atıksu arıtma tesislerinin çıkış sularında çözünmüş organik azotun ve biyolojik olarak bozunabilirliğinin takip edilmesi ve tesiste üniteler bazında gideriminin incelenmesi, alıcı su ortamlarında istenmeyen çevresel problemlerin önüne geçilmesine katkı sağlayacaktır. Bu çalışmanın sonuçları, diğer atıksu arıtma tesislerindeki giderim verimliliğinin incelenmesi ve yeni yasal sınırlandırmaların getirilebilmesi konusuna ışık tutacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma Ayşe Sevil’in Yüksek lisans tezinden üretilmiştir ve Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından 15201092 no.lu proje ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Pehlivanoglu-Mantas E, Sedlak DL. Wastewater-Derived dissolved organic nitrogen: analytical methods, characterization and effect-A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 2006; 36: 261-285.
- [2] Simsek H, Kasi M, Ohm J-B, Blonigen M, Khan E. Bioavailable and biodegradable dissolved organic nitrogen in activated sludge and trickling filter wastewater treatment plants. *Water Res.* 2013; 47: 3201-3210.
- [3] Pehlivanoglu-Mantas E, Sedlak DL. Bioavailability of wastewater-derived organic nitrogen to alga *Selenastrum capricornutum*. *Water Res.* 2004; 38: 3189-3196.
- [4] Sattayatewa C, Pagilla K, Pitt P, Selock K, Bruton T. Organic nitrogen transformations in a 4-stage Bardenpho nitrogen removal plant and bioavailability/biodegradability of effluent DON. *Water Res.* 2009; 43: 4507-4516.
- [5] Simsek H, Kasi M, Wadhawan T, Bye C, Blonigen M, Khan E. Fate of dissolved organic nitrogen in two stage trickling filter process. *Water Res.* 2012; 46: 5115-5126.
- [6] Khan E, Awobamise M, Jones K, Murthy S. Method development for measuring biodegradable dissolved organic nitrogen in treated wastewater. *Water Environ. Res* 2009; 81: 779-787.
- [7] Urgan-Demirtas M, Sattayatewa C, Pagilla KR. Bioavailability of dissolved organic nitrogen in treated effluents. *Water Environ. Res.* 2008; 80: 397-406.
- [8] APHA/AWWA/WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21st ed. Washington DC, USA: American Public Health Association, 2005.
- [9] Toprak H. *Aktif Çamur Sürecinin İşletilmesi*. 2. Baskı. İzmir, Türkiye: Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları, 2000.
- [10] Metcalf and Eddy. *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. Fourth ed. USA: McGraw-Hill International Editions, 2003.

Boruların Çift Geçişli Paralel Tüp Kanal Açısız Presleme (DP- PTCAP) Yöntemi ile Aşırı Plastik Deformasyon Analizi

Vedat TAŞDEMİR*

Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Elbistan Meslek Yüksekokulu, Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi,
Kahramanmaraş, Türkiye
vedat.tasdemir@istiklal.edu.tr

(Geliş/Received: 11/11/2019;

Kabul/Accepted: 04/07/2020)

Öz: Aşırı plastik deformasyon (APD), nano yapılı ve ultra ince taneli malzemeler elde edilmesi amacı ile kullanılan bir yöntemdir. Tüp şeklindeki malzemelerin aşırı plastik deformasyonunda kullanılan birçok yöntem vardır. Bu yöntemlerden biri de paralel tüp kanal açısız presleme (PTCAP) yöntemidir. Bu çalışmada, boru şeklindeki parçaların deformasyonu çift geçişli paralel tüp kanal açısız presleme (DP-PTCAP) metodu kullanılarak araştırılmıştır. Analizlerde, 5 farklı kanal açısı, 4 farklı kesit genişleme oranı ve 4 farklı boyutsuz uzunluk kullanılmıştır. Bu parametrelerin elde edilen tüp (boru) şeklindeki parçaların gerilme, birim şekil değişimi ve şekillendirme kuvvetine etkileri sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Çalışmada AA6061 malzeme kullanılmıştır. Analizler sonucunda, kanal açısının artması ile efektif birim şekil değişimi, şekillendirme kuvveti ve malzemede oluşan gerilmenin azaldığı görülmüştür. Çift geçişli kalıplarla elde edilen malzemelerin birim şekil değişiminin tek geçişli kalıplara nazaran daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucu analizlerden elde edilen birim şekil değişimine bakarak çift geçişli kalıplar ile elde edilen malzemelerin tane yapısının tek geçişli kalıplara nazaran daha ince taneli olduğu söylenebilir.

Anahtar kelimeler: Aşırı plastik deformasyon, paralel tüp kanal açısız presleme, çift geçiş, sonlu elemanlar analizi, PTCAP

Severe Plastic Deformation Analysis of Tubular Parts via Double Pass Parallel Tubular Channel Angular Pressing (DP-PTCAP) Method

Abstract: Severe plastic deformation (SPD) is a method used to obtain nano-structured and ultra-fine-grained materials. There are many methods used for severe plastic deformation of tubular materials. One of these methods is parallel tubular channel angular pressing (PTCAP). In this study, deformation of tubular parts was investigated by using double pass parallel tubular channel angular pressing (DP-PTCAP) method. In the analysis, 5 different channel angles, 4 different cross section expansion rates and 4 different dimensionless lengths were used. The effects of these parameters on the stress, plastic strain and forming force of the tubular parts obtained were analyzed by finite element method. AA6061 material was used in the study. As a result of the analysis, effective strain, forming force and stress in material were decreased with increasing channel angle. It was determined that the plastic strain of the materials obtained with double pass dies was higher than single pass dies. As a result, it can be said that the grain structure of the materials obtained with double pass dies is finer grained than single pass dies.

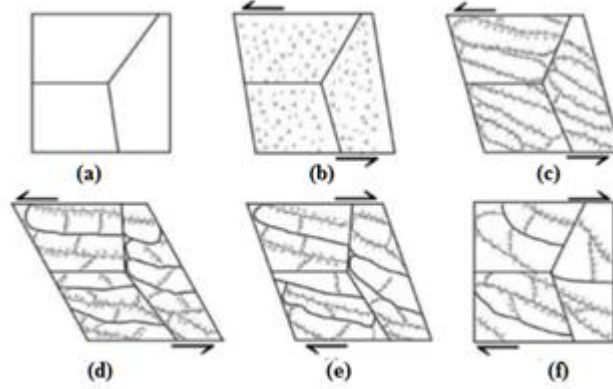
Key words: Severe plastic deformation, parallel tubular channel angular pressing, double pass, finite element analysis, PTCAP

1. Giriş

Aşırı plastik deformasyon (APD), malzemelerin çok büyük plastik deformasyona uğramasından dolayı ultra ince taneli ve nano yapılı metal şekillendirme yöntemi olarak tanımlanabilir [1–3]. Aşırı plastik deformasyon, malzemenin mukavemetinde artış sağlayacak şekilde malzeme tane boyutunu nano (100 nm'den daha küçük) ve ultra ince taneye (100 nm - 1 µm) düşürmektedir. Şekil 1'de APD esnasında mikroyapıdaki değişimlerin şematik görüntüsü verilmiştir. APD teknikleri ile ultra ince taneli malzemeler elde edilebildiği için bu durum elde edilen malzemelerin çok düşük sıcaklıklarda yüksek deformasyon oranlarına sahip süper plastik bir davranış sergilemesine yol açmaktadır [3–6]. Aşırı plastik deformasyon işleminde temel amaç, çevreyle uyumlu yüksek mukavemetli ve hafif malzemeler üretmektir. Dövme, haddeleme, ekstrüzyon gibi geleneksel metal şekillendirme işlemlerinde malzemenin maruz kaldığı plastik şekil değişimi genellikle 2 'den çok daha düşüktür. Daha yüksek plastik şekil değişimine ulaşmak için uygulanan çok adımlı (geçişli) haddeleme, çekme, ekstrüzyon vb. ile üretilen malzemelerde ise kalınlık ve çapta çok fazla inceltme olduğundan elde edilen malzemeleri kullanmak uygun değildir. Çok büyük şekil değişimine maruz bırakıldığında parça şeklinde hatalar olmadan,

*Sorumlu yazar: vedat.tasdemir@istiklal.edu.tr. Yazarın ORCID Numarası: 0000-0002-2375-9525

homojen yapıllı malzemeler üretmek için birçok APD yöntemi geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir [1, 2]. APD yöntemi ile üretilen ultra ince taneli malzemeler üstün mekanik özelliklere sahiptir. Günümüzde çok farklı ve yeni APD teknikleri üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. Bunlar içerisinde en popüler olanları; ECAP (Eş kanallı açılal presleme) [7, 8], HPT (Yüksek basınç burulması) [9], ARB (Biriktirmeli hadde yapıştırması) [10]. Boruların APD işleminde kullanılan teknikler ise şunlardır; TCP (Tüp kanal presleme) , TCAP (Tüp kanal açılal presleme) [11], HPTT (Yüksek basınçlı boru burma) [12], PTCAP (Paralel tüp kanal açılal presleme) [13], t-HPS (Tüp yüksek basınçlı kesme) [14], RTES (Tekrarlayan tüp genişleme ve daralma) [15], TCEC (Tüp tekrarlı ekstrüzyon-basma) [16], TCEE (Tüp tekrarlı ekstrüzyon- genişleme) [17], ASB (Biriktirmeli çevirme yapıştırma) [18].



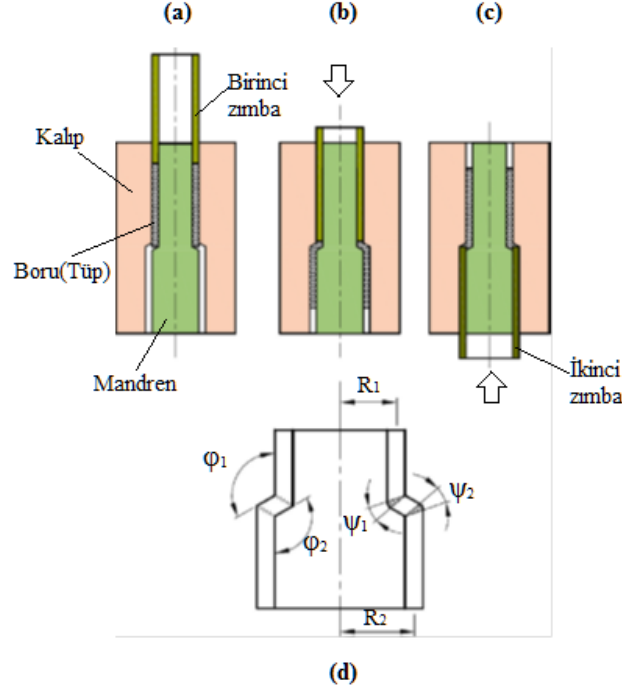
Şekil 1. Aşırı plastik deformasyonda tek geçiş esnasında ileri kayma(a-d) ve kayma şekil değişimini tersine çevirmesini(e-f) içeren mikroyapı değişiminin şematik gösterimi [19].

Faraji ve ark. [20], PTCAP yöntemini kullanarak bakır boruların dislokasyon yoğunluğunun belirlenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarını 120° sabit kanal açısında gerçekleştirmişlerdir. Dislokasyon yoğunluğunun birinci geçişten sonra $18.1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 'ye dördüncü geçişten sonra ise $2.48 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 'ye düştüğünü belirlemişlerdir. Yine elde edilen sertliğin 62 HV'den 142 HV'ye çıktığını belirtmişlerdir. Javidikia ve Hashemi [21] ise Al 5083 alaşımının paralel tüp kanal açılal presleme yöntemini kullanarak farklı deformasyon oranı, kanal açısı ve kavis açısının etkisini hem deneysel hem de analiz yöntemini kullanarak araştırmışlardır. Çalışmalarının neticesinde deneysel sonuçlarla sonlu elemanlar analiz sonuçlarının iyi bir uyum içinde olduklarını belirtmişlerdir. Afrasiab ve ark. [22], Cu-Zn alaşımlı boruların mekanik ve mikroyapı özellikleri üzerine çok geçişli paralel tüp kanal açılal presleme yönteminin etkisi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışma neticesinde çekme dayanımının %65, akma dayanımının ise %25 oranında arttığını, $70 \mu\text{m}$ olan ilk tane boyutunun çok önemli oranda düştüğünü ancak sünekliğin ise önemli oranda azaldığını belirtmişlerdir. Jafarlou ve ark. [23], eş kanallı açılal presleme (ECAP) yöntemi ile boru şeklindeki AA6061 malzemenin aşırı plastik deformasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında kanal açısı olarak 120° ve köşe yuvarlatma açısını da 22° sabit tutmuşlardır. Borunun içini hidrolik yağ ile doldurup her iki girişini de kapatmışlardır. Çalışmaları neticesinde tane boyutunun %60 oranında azaldığı, buna karşın mekanik özelliklerin önemli ölçüde arttığını belirtmişlerdir. Şahbaz ve ark. [24], yeni geliştirdikleri ince duvarlı açık kanal açılal presleme (TWO-CAP) tekniğini kullanarak U kesitli AZ31 magnezyum alaşımının plastik deformasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarının neticesinde büyük plastik deformasyondan dolayı mikroyapı ve tane incelmesindeki değişimlere bağlı olarak tokluk, sertlik ve mukavemette iyileşmenin gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Yine Şahbaz ve ark. [25], yaptıkları başka bir çalışmada TWO-CAP yönteminin AA 5083 malzemenin mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda geçiş sayısı arttıkça sertlik ve mukavemetin arttığını ve tane yapısının ise daha da incelendiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmanın amacı, çift geçişli paralel tüp kanal açılal presleme yöntemini kullanarak kanal açısı, kesit genişleme oranı ve boyutsuz uzunluk parametrelerinin tüp (boru) şeklindeki parçaların gerilme, birim şekil değişimi ve şekillendirme kuvvetine olan etkilerini sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmaktır. Bu çalışma, mevcut paralel tüp kanal açılal presleme (PTCAP) yöntemi ile ilgili yapılan çalışmalardan hem çift geçişli bir yapıya sahip olması hem de kesit genişleme oranı ve boyutsuz uzunluk gibi farklı parametrelerin kullanılması açısından yeni ve özgün bir çalışmadır.

2. Paralel Tüp(Boru) Kanal Açısıl Presleme (PTCAP) Yöntemi

Paralel tüp kanal açısıl presleme yöntemi, boru şeklindeki parçaların belirli oranda büyütülmüş çapa sahip kanaldan geçirilerek çok yüksek plastik şekil değişimine maruz bırakılarak yüksek mukavemetli parçalar elde edilmesi yöntemidir. Paralel tüp kanal açısıl presleme işlemi Faraji ve ark. [13] tarafından 2012 yılında geliştirilmiştir. Bu yöntem Şekil 2’de görüldüğü gibi iki yarım çevrimden oluşan bir yöntemdir. Şekil 2.a’da görüldüğü gibi boru kalıp içine yerleştirilir ve zımba ile itilerek Şekil 2.b’de görüldüğü gibi çapı genişler. Daha sonra Şekil 2.c’de görüldüğü gibi ikinci zımba ile ters yönde itilerek ilk çapına geri getirilir. Bu işlem defalarca tekrarlanarak devam ettirilir.

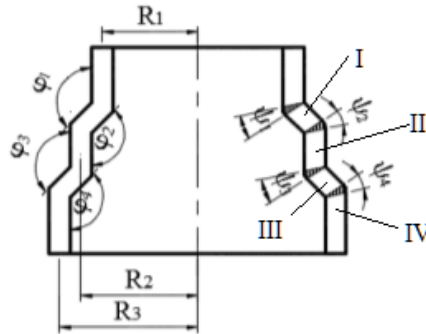


Şekil 2. PTCAP işleminin şematik görüntüsü [13].

Bu yöntem kullanılarak N çevrim sonunda oluşan eşdeğer plastik şekil değişimi Eş. 1’de verilen formülle hesaplanmaktadır.

$$\bar{\epsilon}_{TN} = 2N \left\{ \sum_{i=1}^2 \left[\frac{2 \cot\left(\frac{\phi_i + \psi_i}{2}\right) + \psi_i \operatorname{cosec}\left(\frac{\phi_i + \psi_i}{2}\right)}{\sqrt{3}} \right] + \frac{2}{\sqrt{3}} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right\} \quad (1)$$

Burada; ϕ_i kanal geçiş açısı, Ψ_i yuvarlatma açısı, R_1 ve R_2 sırası ile ilk ve son yarıçaptır.



Şekil 3. Analizlerde kullanılan DP-PTCAP işlemi.

Bu çalışmada, Şekil 3'de görülen çift kademeli (geçişli) kalıp kullanılmıştır. Bir yarım çevrim sonunda oluşan eşdeğer plastik şekil değişimi, Eş. 1 modifiye edilerek Eş. 2'de verilen formülle hesaplanabilir.

$$\bar{\epsilon}_h = \sum_{i=1}^4 \left[\frac{2 \cot\left(\frac{\varphi_i + \psi_i}{2}\right) + \psi_i \csc\left(\frac{\varphi_i + \psi_i}{2}\right)}{\sqrt{3}} \right] + \frac{2}{\sqrt{3}} \ln\left(\frac{R_3}{R_1}\right) \quad (2)$$

N çevrim sonunda oluşacak toplam eşdeğer plastik şekil değişimi ise Eş. 3'te verilen formülle hesaplanabilir.

$$\bar{\epsilon}_T = 2N \left\{ \sum_{i=1}^4 \left[\frac{2 \cot\left(\frac{\varphi_i + \psi_i}{2}\right) + \psi_i \csc\left(\frac{\varphi_i + \psi_i}{2}\right)}{\sqrt{3}} \right] + \frac{2}{\sqrt{3}} \ln\left(\frac{R_3}{R_1}\right) \right\} \quad (3)$$

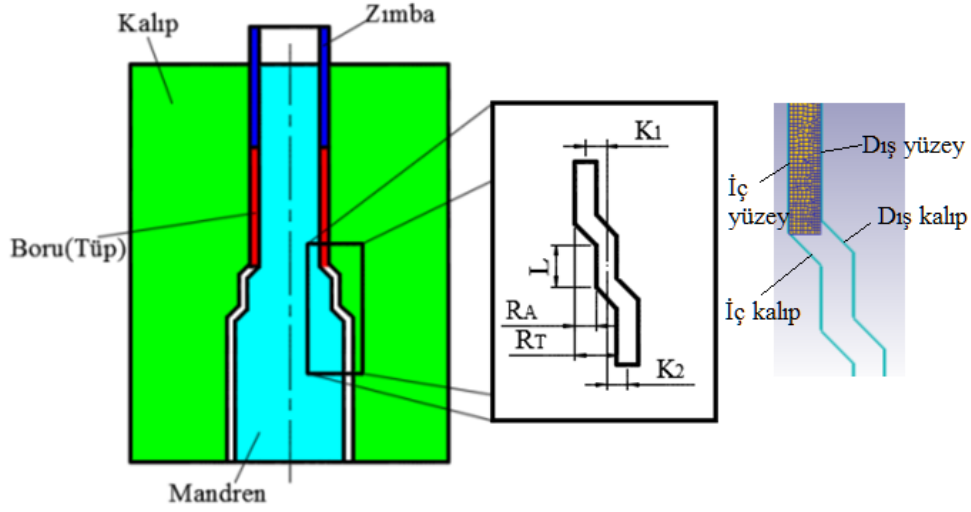
Burada; φ_i kanal geçiş açısı, Ψ_i yuvarlatma açısı, R_1 ve R_3 sırası ile ilk ve son yarıçaptır.

3. Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar yöntemi, deformasyon işlemleri esnasındaki deformasyon davranışlarını daha etkili açıklamak, üretim maliyetlerini azaltmak ve optimum parametreleri belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Çalışmada, sonlu elemanlar yazılımı olarak DEFORM-F2 programı kullanılmıştır. DEFORM-F2, Newton Raphson metodunu kullanarak çözüm yapan implisit bir nümerik koddur. Deneylerde dış çapı $d_d=20$ mm, iç çapı $d_i=16$ mm, et kalınlığı $t_o=2$ mm ve boyu ise 30 mm ölçülerinde AA6061 boru(tüp) malzeme kullanılmış ancak 28 mm'lik kısmı şekillendirilmiştir. Kullanılan malzemenin özellikleri programın malzeme kütüphanesinden alınmıştır. Analizler oda sıcaklığında ve 1 mm/s zımba hızında gerçekleştirilmiştir. Kalıp, zımba, boru ve mandren üç boyutlu olarak tasarlanmış ancak analizler, çözüm kolaylığı sağlamak adına eksenel simetrik olarak iki boyutlu yapılmıştır. Analizlerde sürtünme katsayısı $m=0.08$, yuvarlatma açıları $\Psi_i=0$ alınmıştır. Analizlerde kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiştir. DP-PTCAP işleminde kanal açısının (φ) etkisi belirlenirken R_A/R_T ve L/d_i sırası ile 0.5 ve 0.25; kesit genişleme oranının (R_A/R_T) etkisi analiz edilirken $\varphi=135^\circ$ ve $L/d_i=0.25$; ve boyutsuz uzunluk oranının (L/d_i) etkisi belirlenirken de kanal açısı $\varphi=135^\circ$ ve $R_A/R_T=0.5$ sabit alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan DP-PTCAP deney seti Şekil 4'te verilmiştir.

Tablo 1. Analiz parametreleri.

Parametre	Seviyeler	Diğer parametreler		
		φ (°)	R_A/R_T	L/d_i
Kanal açısı, φ (°)	165, 150, 135, 120, 105	-	0.5	0.25
Kesit genişlemesi oranı, R_A/R_T	0, 0.25, 0.5, 0.75	135	-	0.25
Boyutsuz uzunluk oranı, L/d_i	0, 0.125, 0.25, 0.5	135	0.5	-
Çift geçiş için deformasyon oranları, $K_1=K_2$	1. t_o	-	-	-
Tek geçiş için deformasyon oranları, $K(K_1+K_2)$	2. t_o	-	-	-
Kesit genişleme oranı, R_T	2. t_o	-	-	-

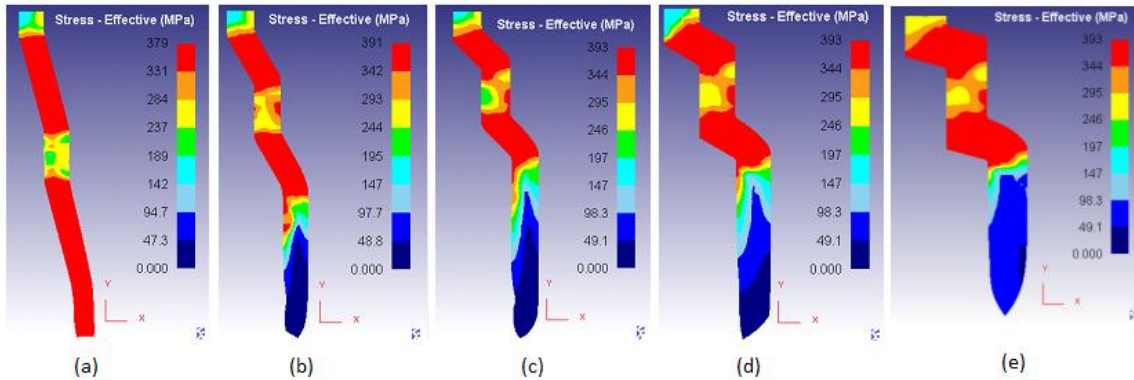


Şekil 4. Analizlerde kullanılan deney seti.

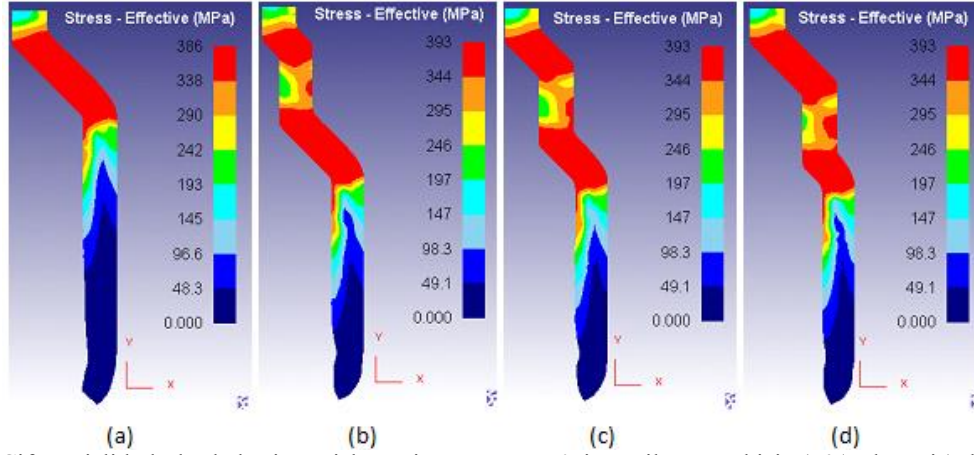
4. Bulgular ve Tartışmalar

4.1. Gerilme dağılımı

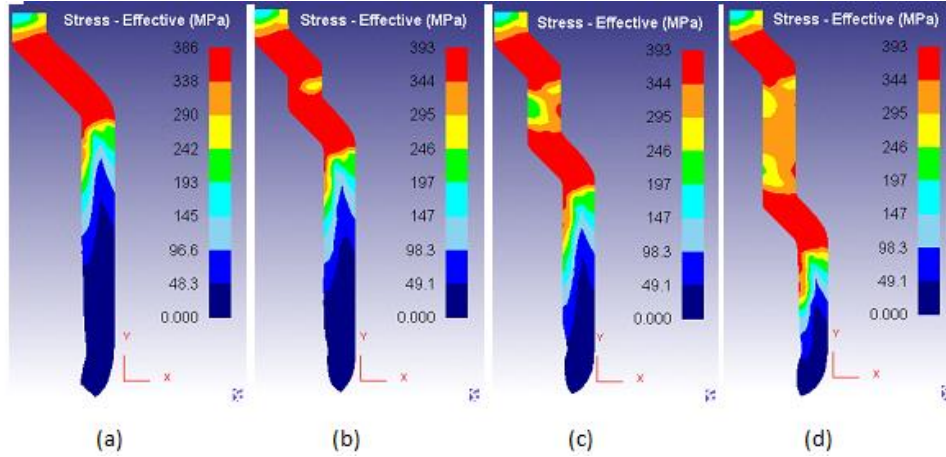
Çift geçişli kalıplar için yapılan analizler sonucu kanal açısı, kesit genişleme oranı ve boyutsuz uzunluğun parça üzerindeki gerilme dağılımına etkileri sırası ile Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7’de verilmiştir. Deformasyon bölgesindeki efektif gerilme bölgelerini iyi bir şekilde analiz etmek, kayma deformasyonu ve plastik bölgeler hakkında bazı bilgilerin elde edilmesini sağlar [26]. Şekiller birlikte incelendiğinde en büyük gerilmelerin geçiş bölgelerinde (I ve III) olduğu görülmektedir. Bu bölgelerdeki yoğun süreksiz kaymalar gerilme değerlerini büyütür [11]. Kanal açısının küçülmesi ile malzeme akışı zorlaşmakta, deformasyon oranı ise artmaktadır. Bu durum ise daha yüksek gerilme oluşumuna neden olmaktadır. Başka bir ifade ile kanal açısı büyüdükçe gerilme azalmaktadır. Ancak en kötü gerilme dağılımı $\phi=165^\circ$ kalıpta oluşmaktadır. Bu durum geçiş bölgesi mesafesi uzadıkça süreksiz kayma bölgesindeki artışla açıklanabilir. Ayrıca kanal açısındaki büyümeye atık (hurda) malzeme oranını da arttırmaktadır.



Şekil 5. Çift geçişli kalıplarda kanal açısının(ϕ) gerilmeye etkisi. a) $\phi=165^\circ$, b) $\phi=150^\circ$, c) $\phi=135^\circ$, d) $\phi=120^\circ$, e) $\phi=105^\circ$.



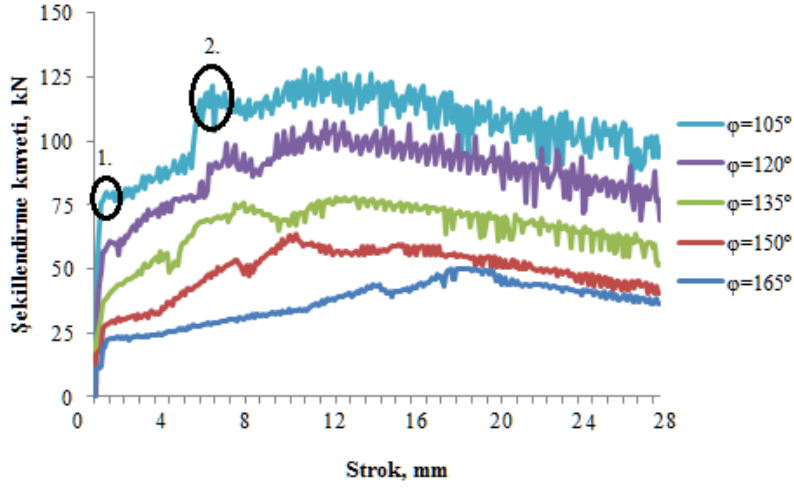
Şekil 6. Çift geçişli kalıplarda kesit genişlemesi oranı, R_A/R_T 'nin gerilmeye etkisi. a) 0(Tek geçiş), b) 0.25, c) 0.50, d) 0.75.



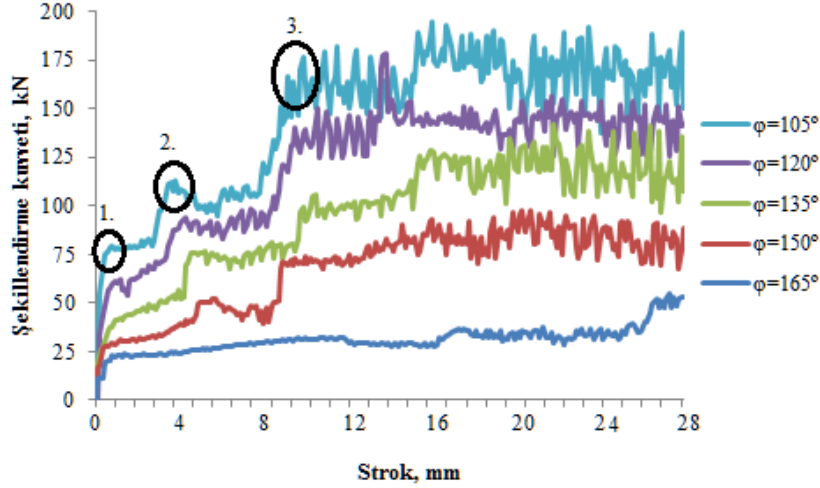
Şekil 7. Çift geçişli kalıplarda L/d_i 'nin gerilmeye etkisi. a) 0(Tek geçiş), b) 0.125, c) 0.25, d) 0.5.

4.2. Şekillendirme kuvveti

Yapılan analizler sonucu hem tek geçişli kalıplarda hem de çift geçişli kalıplarda kanal açısının şekillendirme kuvvetine olan etkileri Şekil 8 ve Şekil 9'da görülmektedir. Her iki şekilde de en düşük şekillendirme kuvveti $\phi=165^\circ$ açısına sahip kalıpta, en yüksek kuvvet ise $\phi=105^\circ$ elde edilmiştir. Kanal açısı ile şekillendirme kuvveti arasında ters bir ilişki vardır. Kanal açısı arttıkça şekillendirme kuvveti de düşmektedir. Kanal açısındaki düşüş malzeme akışını zorlaştırmakta ve daha yüksek şekillendirme kuvvetlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Çift geçişli kalıplarda şekillendirme kuvvetinde önemli bir dalgalanmanın olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bu da çift geçişli kalıplarda malzeme akışında zorlukların olduğunu göstermektedir. Tek geçişli kalıplarda en yüksek şekillendirme kuvveti $\phi=105^\circ$ 'de 126 kN iken en düşük şekillendirme kuvveti $\phi=165^\circ$ 'de 50.15 kN'dır. Çift geçişli kalıplarda ise en yüksek şekillendirme kuvveti $\phi=105^\circ$ 'de 194 kN iken en düşük şekillendirme kuvveti $\phi=165^\circ$ 'de 53.11 kN'dır. Yine tek geçişli kalıplarda iki pik bölgesi varken, çift geçişli kalıplarda üç pik bölgesi vardır.



Şekil 8. Tek geçişli kalıplarda kanal açısının(ϕ) şekillendirme kuvvetine etkisi.

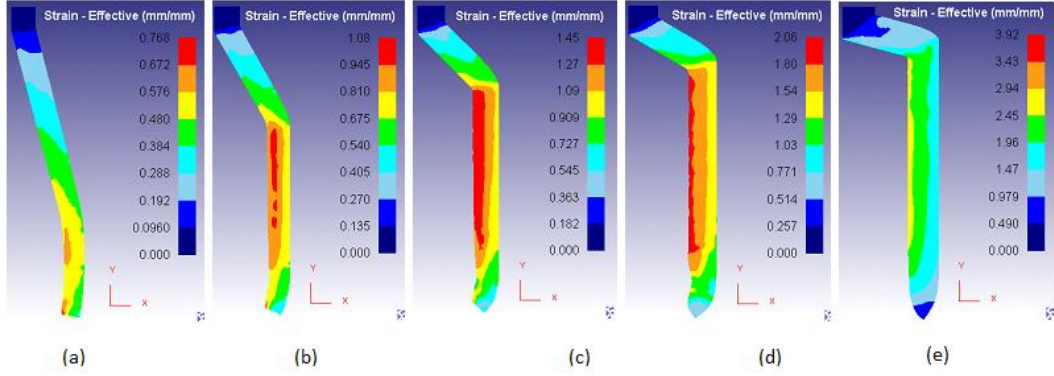


Şekil 9. Çift geçişli kalıplarda kanal açısının(ϕ) şekillendirme kuvvetine etkisi.

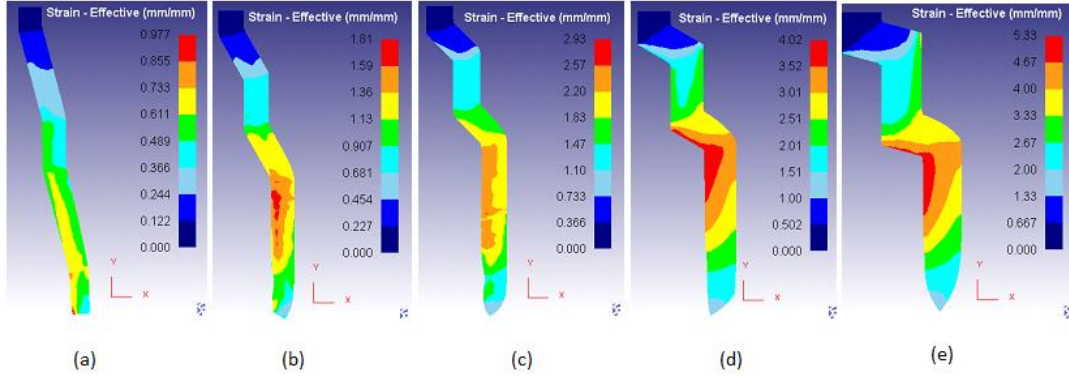
4.3. Efektif plastik şekil değişimi

Plastik şekil değişiminin hem sertlik dağılımı hem de iç mikroyapı homojenliği üzerine önemli bir etkisi vardır [11]. Plastik şekil değişimindeki artış daha ince taneli ve mukavemetli malzemeler elde edilmesini sağlamaktadır. Şekil 10'da tek geçişli kalıplar, Şekil 11'de ise çift geçişli kalıplarla yapılan analizler sonucu elde edilen efektif plastik şekil değişimleri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde kanal açısının artması ile deformasyon homojenliğinin arttığı görülmektedir [11, 27]. Ancak kanal açısındaki artışa bağlı olarak plastik şekil değişiminin düştüğü görülmektedir. Başka bir ifade ile kanal açısındaki düşüş malzeme akışını zorlaştırmakta bu da daha yüksek bir plastik şekil değişimi elde edilmesini sağlamaktadır. Tek geçişli kalıplar ile şekillendirme sırasında elde edilen en büyük efektif plastik şekil değişimi sırası ile $\phi=165^\circ$ 'de 0.768, $\phi=150^\circ$ 'de 1.08, $\phi=135^\circ$ 'de 1.45, $\phi=120^\circ$ 'de 2.06 ve $\phi=105^\circ$ 'de ise 3.92 iken çift geçişli kalıplar için ise sırası ile $\phi=165^\circ$ 'de 0.977, $\phi=150^\circ$ 'de 1.81, $\phi=135^\circ$ 'de 2.93, $\phi=120^\circ$ 'de 4.02 ve $\phi=105^\circ$ 'de ise 5.33'dür. Şekil 12 ve Şekil 13'de, tek ve çift geçişli kalıplarla şekillendirilen boruların efektif plastik şekil değişiminin teorik ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırması verilmiştir. Şekil 14'de ise çift geçişli kalıplarla şekillendirilen boruların efektif plastik şekil değişiminin bölgesel değişimi verilmiştir. Şekil 12 ve Şekil 13 incelendiğinde en yüksek şekil değişimlerinin boru iç yüzeyinde elde edildiği görülmektedir. Teorik hesaplamalar Eş. 2'deki denklem kullanılarak yapılmıştır. Teorik hesaplamalarda malzeme davranışı, sürtünme vb. etkenlerin hesaba katılmamasından dolayı tam bir uyumun olmadığı görülmektedir. Şekil 14 incelendiğinde tüm kanal açıları için

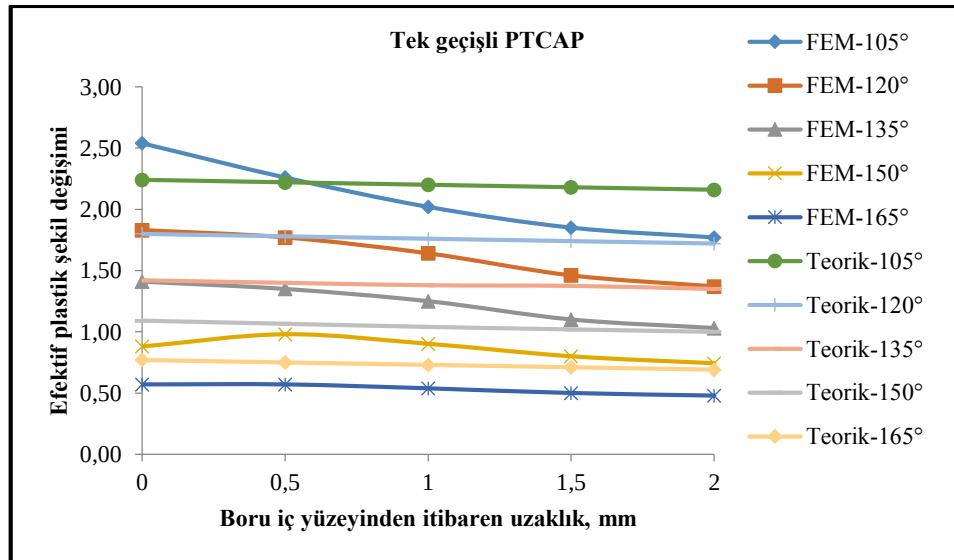
en düşük efektif şekil değışiminin I. bölgede ve en yüksek efektif şekil değışiminin ise IV. bölgede olduğu görölmektedir.



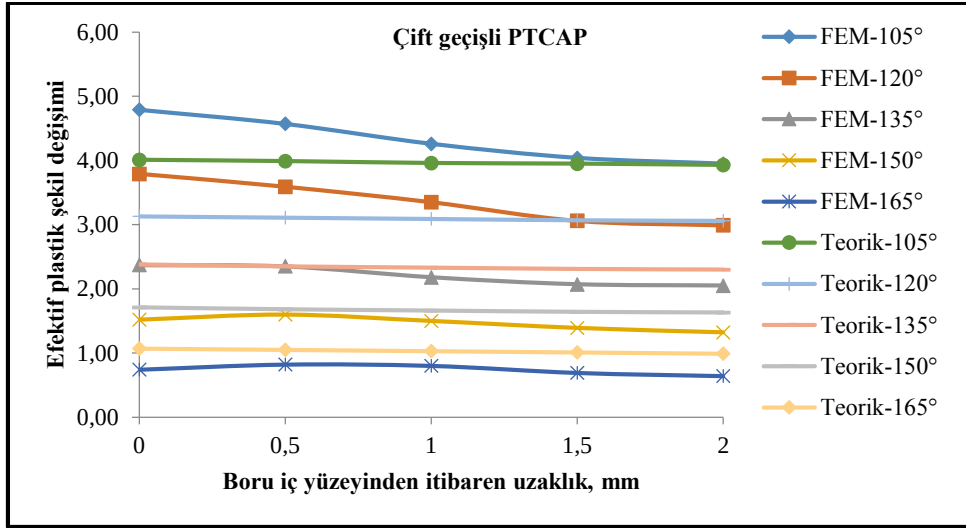
Şekil 10. Tek geçişli kalıplar için kanal açısının(ϕ) efektif şekil değışimine etkisi. a) $\phi=165^\circ$, b) $\phi=150^\circ$, c) $\phi=135^\circ$, d) $\phi=120^\circ$, e) $\phi=105^\circ$.



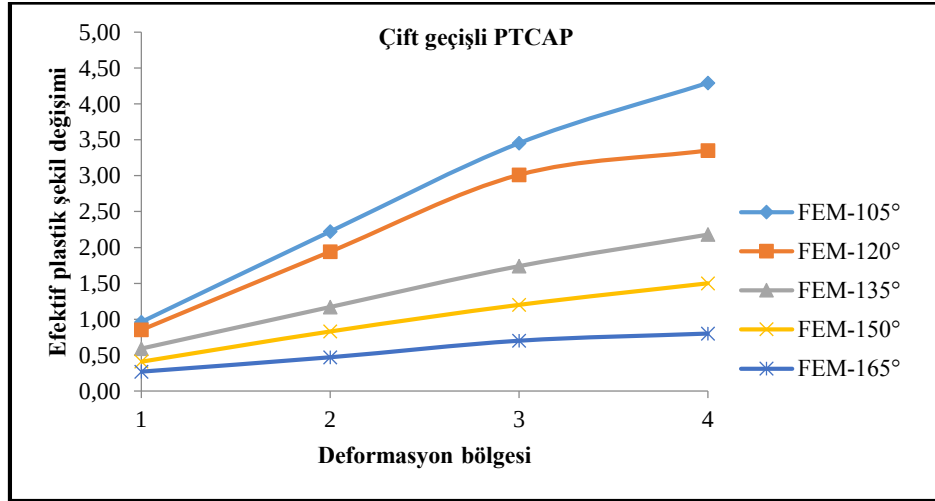
Şekil 11. Çift geçişli kalıplar için kanal açısının(ϕ) efektif şekil değışimine etkisi. a) $\phi=165^\circ$, b) $\phi=150^\circ$, c) $\phi=135^\circ$, d) $\phi=120^\circ$, e) $\phi=105^\circ$.



Şekil 12. Tek geçişli kalıplarla şekillendirilen boruların efektif plastik şekil değışiminin teorik ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılması.

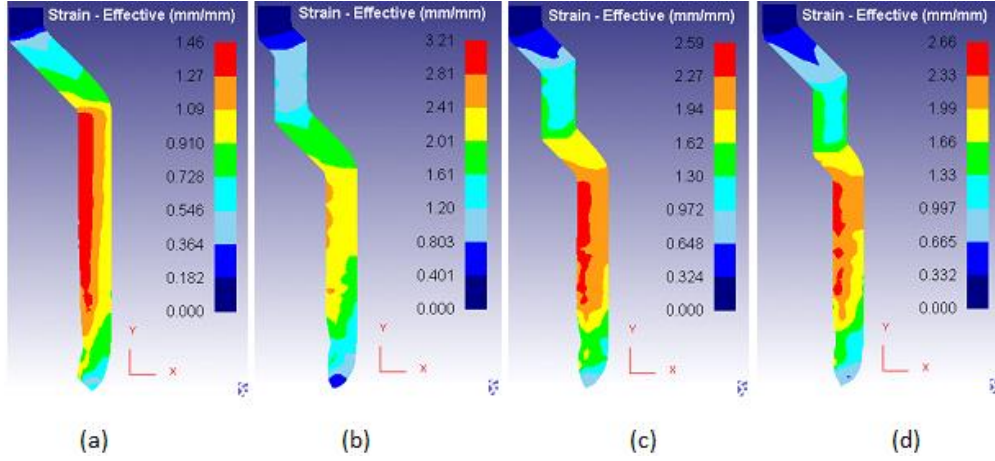


Şekil 13. Çift geçişli kalıplarla şekillendirilen boruların efektif plastik şekil değişiminin teorik ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılması.



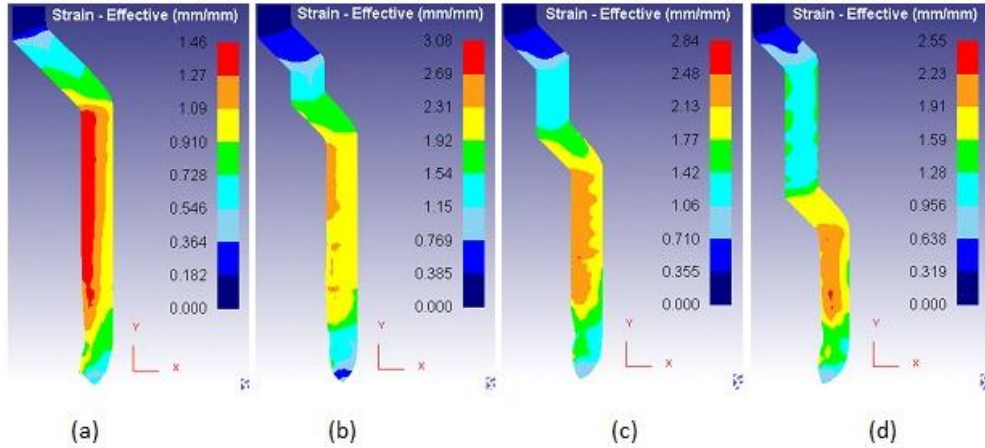
Şekil 14. Çift geçişli kalıplarla şekillendirilen boruların şekillendirme bölgelerindeki efektif plastik şekil değişimi.

Kesit genişlemesi oranı, R_A/R_T 'nin şekillendirme esnasında malzemede oluşan efektif birim şekil değişimine etkisi Şekil 15'de görülmektedir. $R_A/R_T=0$ iken tek kademeli bir geçiş olduğundan dolayı şekil değişimi en düşük çıkmıştır. Oran arttıkça birinci geçiş bölgesinin boyu artmakta ikinci geçiş bölgesinin boyu ise azalmaktadır. Birinci geçiş bölgesinin boyu arttıkça şekil değişimi düşmekte, ikinci geçiş bölgesinin boyu kısaldıkça da şekil değişimi artmaktadır.



Şekil 15. R_A/R_T 'nin efektif şekil değişimine etkisi a) 0(Tek geçiş), b) 0.25, c) 0.50, d) 0.75.

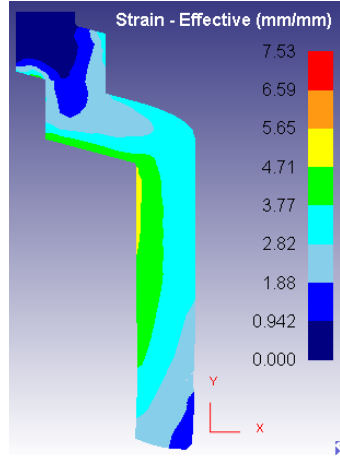
Şekil 16 incelendiğinde boyutsuz uzunluk oranı, $L/d_i=0$ iken tek bir geçiş bölgesi olduğu için malzeme akış esnasında bir engelle karşılaşmamakta bu da şekil değişiminin düşük çıkmasına neden olmaktadır. En büyük şekil değişimi $L/d_i=0.125$ 'de elde edilmiştir. Bu durum birinci geçiş bölgesinin ardından L mesafesinin kısa olması sonucu ikinci geçiş bölgesine girilmesi ile gerilme değerindeki artışa paralel olarak daha yüksek şekil değişiminin oluşmasına neden olmuştur. L mesafesi arttıkça bu bölgede oluşan deformasyon, süreksizliğin azalması ile düşmekte bu da birim şekil değişimini azaltmaktadır.



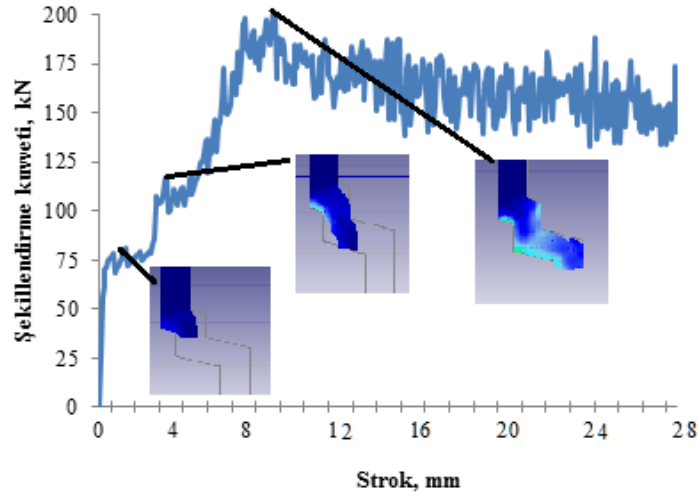
Şekil 16. L/d_i 'nin efektif şekil değişimine etkisi a) 0(Tek geçiş), b) 0.125, c) 0.25, d) 0.5.

4.4. Optimizasyon deneyi

En yüksek plastik deformasyon, Şekil 11'de $\phi = 105^\circ$, Şekil 15'de $R_A/R_T=0.25$, Şekil 16'da ise $L/d_i=0.125$ şartlarında elde edilmiştir. APD yönteminin amaçlarından biri de homojen ve hasarsız nano/ultra ince yapıllı malzemeler elde etmektir. Bu da ancak daha yüksek deformasyon ile başarılabilir. Bu durum yeniden optimize edilerek bir kalıp tasarlanmıştır. Tasarlanan bu kalıp ile yapılan analizler sonucunda elde edilen birim şekil değişimi Şekil 17'de, şekillendirme kuvveti ise Şekil 18'de verilmiştir. Görüleceği üzere şekillendirme esnasında oluşan en büyük efektif şekil değişimi 7.53 olarak elde edilmiştir. En yüksek şekillendirme kuvveti ise 195 kN olarak ölçülmüştür.



Şekil 17. Optimizasyon deneyi sonucu elde edilen birim şekil değişimi ($\phi=105^\circ$, $R_A/R_T=0.25$, $L/d_i=0.125$).



Şekil 18. Optimizasyon deneyi sonucu elde edilen şekillendirme kuvveti ($\phi=105^\circ$, $R_A/R_T=0.25$, $L/d_i=0.125$).

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, boruların aşırı plastik deformasyonunda kullanılan yöntemlerden biri olan paralel tüp kanal açılmal presleme (PTCAP) yönteminden farklı olarak çift geçişli paralel tüp kanal açılmal presleme (DP-PTCAP) yöntemi ile AA6061 malzemenin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Kanal açısı arttıkça hem şekillendirme kuvveti hem de gerilme azalmıştır.
2. Kanal açısı arttıkça birim şekil değişimi azalmıştır.
3. En büyük şekil değişimi değeri $\phi=105^\circ$ kanal açında elde edilmiştir.
4. L/d_i oranı arttıkça birim şekil değişimi düşmektedir.
5. R_A/R_T oranı hem birim şekil değişimini hem gerilmeyi hem de şekillendirme kuvvetini önemli derecede etkilemiştir.
6. DP-PTCAP (Çift geçiş) işlemi sonucunda PTCAP (Tek geçiş) işlemine göre daha yüksek birim şekil değişimi elde edilmektedir. Her iki yöntemde de en yüksek şekil değişimi $\phi=105^\circ$ açılı kalıpta elde edilmiştir. Ancak PTCAP işleminde 3.92 iken DP-PTCAP işleminde 5.33'dür. Artış %35.97'dir.
7. En büyük şekil değişimi ve gerilme değerleri şekillendirilen parçanın iç yüzeyinde oluşmuştur.
8. Optimizasyon deneyinde şekillendirme esnasında ulaşılan en yüksek plastik şekil değişimi 7.53 olarak ölçülmüştür.

Aşırı plastik deformasyon işleminde önemli olan şekillendirme sonrası malzemede oluşan gerilme, birim şekil değişimi ve iç mikro yapının homojen dağılım göstermesi ve en yüksek şekil değişimini sağlayacak

deformasyon şartlarını sağlamaktır. Şekil değişimindeki artış daha ince taneli ve daha yüksek mukavemetli malzeme elde edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

6. Kaynaklar

- [1] Nazari F, Honarposheh M. Analytical model to estimate force of constrained groove pressing process. *J Manuf Process* 2018; 32: 11–19.
- [2] Gluchowski W, Stobrawa J, Rdzawski Z, Malec W. Ultrafine grained copper alloys processed by continuous repetitive corrugation and straightening method. *Mater Sci Forum* 2011; 674: 177–188.
- [3] Solhjoei N, Varposhty AR, Mokhtarian H, Manian A. A Comparative Study To Evaluate the Efficiency of Rcs and Cgp Processes. *Indian JSciRes* 2014; 1: 563–572.
- [4] Shahmirzaloo A, Faraji G, Safari M, Mohammadinejad S. Interface sheet-constrained groove pressing as a modified severe plastic deformation process. *Mater Sci Technol (United Kingdom)* 2018; 34: 1669–1678.
- [5] Yadav PC, Sinhal A, Sahu S, et al. Microstructural Inhomogeneity in Constrained Groove Pressed Cu-Zn Alloy Sheet. *J Mater Eng Perform* 2016; 25: 2604–2614.
- [6] Valiev RZ, Estrin Y, Horita Z, et al. Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation: Ten Years Later. *Jom* 2016; 68: 1216–1226.
- [7] Afifi MA, Wang YC, Pereira PHR, et al. Mechanical properties of an Al-Zn-Mg alloy processed by ECAP and heat treatments. *J Alloys Compd* 2018; 769: 631–639.
- [8] Kaya H, Uçar M, Cengiz A, et al. Novel molding technique for ECAP process and effects on hardness of AA7075. *Mechanika* 2014; 20: 5–10.
- [9] Raj KH, Sharma RS, Singh P, Dayal A. Study of friction stir processing (FSP) and High Pressure Torsion (HPT) and their effect on mechanical properties. *Procedia Eng* 2011; 10: 2904–2910.
- [10] Saito Y, Tsuji N, Utsunomiya H, et al. Ultra-Fine Grained Bulk Aluminum Produced By Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process. *Acta Metall* 1998; 39: 1221–1227.
- [11] Faraji G, Mosavi Mashadi M, Abrinia K, Kim HS. Deformation behavior in the tubular channel angular pressing (TCAP) as a noble SPD method for cylindrical tubes. *Appl Phys A Mater Sci Process* 2012; 107: 819–827.
- [12] Toth LS, Chen C, Pougis A, et al. High pressure tube twisting for producing ultra fine grained materials: A review. *Mater Trans* 2019; 60: 1177–1191.
- [13] Faraji G, Babaei A, Mosavi Mashadi M, Abrinia K. Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a new severe plastic deformation method for cylindrical tubes. *Mater Lett* 2012; 77: 82–85.
- [14] Wang JT, Li Z, Weng J, Langdon TG. Principles of severe plastic deformation using tube high-pressure shearing. *Scr Mater* 2012; 67: 810–813.
- [15] Jafarzadeh H, Abrinia K. Fabrication of ultra-fine grained aluminium tubes by RTES technique. *Mater Charact* 2012; 102: 1–8.
- [16] Babaei A, Mosavi Mashadi M. Tubular pure copper grain refining by tube cyclic extrusion-compression (TCEC) as a severe plastic deformation technique. *Prog Nat Sci Mater Int* 2014; 24: 623–630.
- [17] Babaei A, Mosavi Mashadi M, Jafarzadeh H. Tube cyclic expansion-extrusion (TCEE) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes. *J Mater Sci* 2014; 49: 3158–3165.
- [18] Mohebbi MS, Akbarzadeh A. Accumulative spin-bonding (ASB) as a novel SPD process for fabrication of nanostructured tubes. *Mater Sci Eng A* 2010; 528: 180–188.
- [19] Bagherpour E, Qods F, Ebrahimi R, Miyamoto H. Microstructure evolution of pure copper during a single pass of simple shear extrusion (SSE): Role of shear reversal. *Mater Sci Eng A* 2016; 666: 324–338.
- [20] Faraji G, Mosavi Mashadi M, Bushroa AR, et al. TEM analysis and determination of dislocation densities in nanostructured copper tube produced via parallel tubular channel angular pressing process. *Mater Sci Eng A* 2013; 563: 193–198.
- [21] Javidikia M, Hashemi R. Analysis and Simulation of Parallel Tubular Channel Angular Pressing of Al 5083 Tube. *Trans Indian Inst Met* 2017; 70: 2547–2553.
- [22] Afrasiab M, Faraji G, Tavakkoli V, et al. The Effects of the Multi-pass Parallel Tubular Channel Angular Pressing on the Microstructure and Mechanical Properties of the Cu–Zn Tubes. *Trans Indian Inst Met* 2015; 68: 873–879.
- [23] Jafarlou DM, Zalnezhad E, Hassan MA, et al. Severe plastic deformation of tubular AA 6061 via equal channel angular pressing. *Mater Des* 2016; 90: 1124–1135.
- [24] Şahbaz M, Kaya H, Kentli A. A new severe plastic deformation method: thin-walled open channel angular pressing (TWO-CAP). *Int J Adv Manuf Technol* 2020; 106: 1487–1496.
- [25] Şahbaz M, Kentli A, Kaya H. Performance of Novel TWO-CAP (Thin-Walled Open Channel Angular Pressing) Method on AA5083. *Met Mater Int*. 2020.
- [26] Nagasekhar A V., Tick-Hon Y, Seow HP (2007) Deformation behavior and strain homogeneity in equal channel angular extrusion/pressing. *J Mater Process Technol* 2007; 192–193: 449–452.
- [27] Lu SK, Liu HY, Yu L, et al. 3D FEM simulations for the homogeneity of plastic deformation in aluminum alloy HS6061-T6 during ECAP. *Procedia Eng* 2011; 12: 35–40.

Deprem Bölgesi Haritasından Kontur İçeren Deprem Tehlike Haritasına Geçişin Çeşitli Yapılarda Tasarım ve Analiz Deprem Yüğü Taleplerine Etkisi

Hümeıra ŞAHİN¹, Ayşe Ruşen DURUCAN^{2*}, Cengizhan DURUCAN³,

¹ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

³ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ hshahin@firat.edu.tr, ² ardurucan@firat.edu.tr, ³ cdurucan@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 20/02/2020;

Kabul/Accepted: 06/07/2020)

Öz: Bu araştırma, deprem bölgesi harita konseptinden (TDY-2007) kontur içerikli deprem tehlike haritasına (TDY-2019) geçiş nedeniyle oluşan değişikliğin yapılar üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, ilk olarak Türkiye'nin depremselliği yüksek olan bir bölgesinden seçilen örnek noktaların koordinat bazlı elastik ve azaltılmış tasarım ivme spektrumları elde edilmiştir. Elastik tasarım ivme spektrumlarının karşılaştırmalı analizleri için 4 zemin sınıfı ve 3 performans seviyesi ana parametre olarak kabul edilmiştir. Azaltılmış tasarım ivme spektrumlarının karşılaştırılması için; (i) 4 zemin sınıfı, (ii) 3 performans seviyesi, (iii) 4 bina tipi ve (iv) 2 taşıyıcı sistem tipi ana parametre olarak seçilmiştir. Daha sonra yeni deprem yönetmeliğinden elde edilen bu spektrumlar, Türkiye'deki yapıların tasarımı için kullanılan önceki deprem yönetmeliğinin tasarım ivme spektrumları ile karşılaştırılmıştır. Tasarım ivme spektrumu, (i) spektral elastik değerler ve (ii) azaltılmış tasarım spektral ivme değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlar, temel olarak kısa periyot bölgesinde, güncel tasarım yaklaşımından elde edilen spektral ivme değerlerinin, önceki tasarım yaklaşımı kullanılarak elde edilen spektrumlardan önemli ölçüde daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, daha uzun periyot aralığı için, eski tasarım spektrumu kullanarak elde edilen spektral değerler, yeni tasarım spektrumları hesaplama prosedürü kullanılarak hesaplananlardan daha büyüktür.

Anahtar Kelimeler: Elastik tasarım ivme spektrumu, azaltılmış tasarım ivme spektrumu, TDY-2019, Doğu Anadolu fay zone.

Transition from Seismic Zonation to Seismic Hazard Contour Map and Its Effects on the Variation of Earthquake Design and Analysis Load Demands for Various Type of Structures

Abstract: This research study is aimed at evaluating the effects of the variations in the level of earthquake demands on the structures due to the transition from earthquake zone map concept (TEC-2007) to the seismic contour hazard map (TEC-2019). In the study, coordinate based elastic and reduced design acceleration spectrum of sample points selected for one of the high seismicity regions of Turkey are obtained. For the comparative analyses of elastic design acceleration spectrum, 4 site classes and 3 performance levels are considered as main parameters. For the comparison of reduced response spectrum, (i) 4 site classes, (ii) 3 performance levels, (iii) 4 building types and (iv) 2 structural framing systems were selected as main parameters. Then, these spectrums are compared with the design acceleration spectrum of preceding design approach used for the design and analyses of the structures in Turkey. The design acceleration spectrum is compared in terms of (i) spectral elastic values and (ii) design spectral accelerations. The comparative results mainly showed that in the short period range the spectral acceleration values obtained from the up to date design approach are significantly higher than their counterparts obtained by using the preceding design approach. However, for the longer period range the spectral values obtained using the old response spectrum were higher than those calculated using the new response spectra calculation procedure.

Keywords: elastic design acceleration spectra, reduced design acceleration spectra, TEC-2019, East Anatolian fault zone,

1. Giriş

Depremlerden kaynaklanan sosyal ve ekonomik kayıplar, genellikle tehlike bölgesindeki günlük yaşamı da uzun süre olumsuz yönde etkiler. Bir bölgenin depremselliğini değiştirmek mümkün olmadığı için yer hareketlerinin yıkıcı etkisini azaltmanın tek yolu, beklenen deprem yüklerine karşı koyabilecek yapılar inşa etmektir. Bu tip yapılar inşa etmek yapılar üzerinde beklenen deprem yüklerinin yüksek isabetle tahmin edilmesini gerektirmektedir. Beklenen deprem yüklemesi ise genellikle hesaba bağlı olarak tahmin edilen yer hareketi parametreleri ile karakterize edilen bir tasarım yer hareketi kullanılarak tanımlanır [1]. Bu

* Sorumlu yazar: ardurucan@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-9563-8450, ² 0000-0002-3271-2438, ³ 0000-0002-1933-8218

parametrelerin tahmini için geçmişten günümüze gelişerek gelen yöntemler kullanılmaktadır. Deprem mühendisliği ve sismoloji alanında yığılarak artan bilgiler, yeni bulgular, geliştirilen hassas cihazlar ile yeni yöntemler olası deprem yüklerinin tahmini için kullanılan tekniklerin gelişmesine yol açmaktadır. Yukarıda oldukça kısa şekilde açıklanmaya çalışılan deprem yükü talebinin tahmini ile ilgili perspektifin yanı sıra bir de tasarım kriterleri ile ilgili gelişmeler söz konusudur. Örneğin, performans dayalı tasarım ve analiz yöntemleri son on yıllarda popülerlik kazanmış ve birçok yeni tasarım kriterine yol açmıştır. İki yönlü (talep deprem yükü ve yapı davranışı ile ilgili kriterler) ilerleyen bu gelişimsel sürece bağlı olarak ülkeler, yapısal tasarım şartnamelerini sürekli yenilemektedir.

Deprem tasarım yüklerinin hesaplanmasında 1990'lı yılların sonlarına kadar deprem bölgeleri yaklaşımının dünya genelinde yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir [2]. Son zamanlarda bu yaklaşımın aksayan bazı yönlerinin olduğu görülmektedir. Bu yönlerden bir tanesi ise gerçekte fay bölgesinden uzaklığa göre değişim gösteren sismik tasarım parametrelerinin bu yaklaşımda bir bölge boyunca sabit olduğunun kabul ediliyor olması durumudur. Bu yaklaşım bazen güvenlik bazen de ekonomik açıdan olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir. Bu gibi eksik yönleri gidererek daha isabetli deprem tasarım yükleri elde edebilmek için deprem tasarım parametrelerinin, sahanın faya olan konumuna göre sürekli değişimini yansıtabilen kontur içeren deprem tehlike haritaları geliştirilmiştir.

Deprem yüklerinin tahmin edilmesi için deprem bölgeleri haritasından, kontur içeren deprem tehlike haritası konseptine yakın zamanda geçmiş olan Türkiye ise bu konuda güncel bir örnek oluşturmaktadır. Bu çalışmada deprem bölgesi haritasından, kontur içeren deprem tehlike haritasına geçişin yapılar üzerindeki etkileri araştırılacaktır. Ancak öncelikle Türkiye'de depreme karşı dayanıklı yapı tasarımı için kullanılan yöntemlerin ve deprem tehlike haritalarının değişimi hakkında kısaca bilgi verilecektir.

Yapılara gelen deprem yüklerinin belirlenmesinde, tasarım ivme spektrumu yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yaklaşım ilk defa Türk Deprem Yönetmeliği (TDY-1998) [3] ile kullanılmaya başlanmış, TDY-2007'de [4] ise değişiklik yapılmadan aynı tasarım yaklaşımı benimsenmiştir. Ancak, 2018 yılında deprem yönetmeliği ve deprem tehlike haritası ile ilgili yapılan çalışmalar neticesinde tasarım ivme spektrumu hesaplarında kapsamlı değişiklikler yapılmış ve bu değişiklikler TDY-2019 [5] ile yürürlüğe girmiştir.

Türkiye'de resmi olarak kullanılan ilk deprem tehlike haritası, 1945 yılında yayınlanmıştır. 1945'ten itibaren, meydana gelen depremler ve deprem sismolojisindeki gelişmelere paralel olarak deprem tehlike haritası birçok kez güncellenmiştir [6]. 1996 yılında yürürlüğe giren ve uzun yıllar kullanılan deprem tehlike haritası ise olasılık yaklaşımı kullanılarak, 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan maksimum yer ivmeleri (Peak Ground Acceleration) esas alınarak oluşturulmuştur. Bu haritada deprem riski, deprem bölgeleri yaklaşımı esas alınarak tanımlanmıştır. Harita 2018 yılında değiştirilerek coğrafi koordinatlara dayanan kontur içeren deprem tehlike haritası yayınlanmıştır. Yeni deprem tehlike haritasında ise deprem riski, spektral ivme (S_a) ve spektral hız (S_v) cinsinden verilmektedir. Bu çalışmalar hakkında özet bilgi içeren ve ilgili çalışmaların tümüne atıf yapan Akkar vd. [2] konu ile ilgili ayrıntılı bilgi edinmek için incelenebilir.

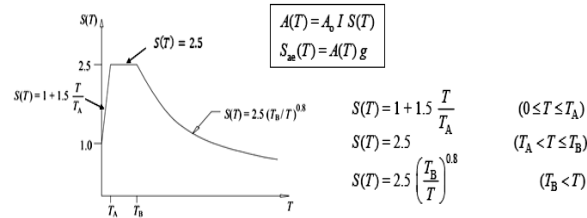
Son gelişmelere paralel olarak ülke genelinde TDY-2007 ve TDY-2019'dan elde edilen tasarım değerlerini inceleyen çalışmalar hızla devam etmektedir. Keskin ve Bozdoğan [8], Kırklareli Merkez bölgesinden aldıkları bir koordinat için tasarım ivme spektrumları elde etmişlerdir. Daha sonra tipik bir bina üzerinde doğrusal elastik analizler yaparak taban kesme kuvveti ve çatı deplasmanı gibi değerleri karşılaştırmışlardır. Çalışmadan elde edilen sonuç, doğal titreşim periyodu 0.5-0.6s arasında olan binanın, TDY-2019'a göre TDY-2007'den daha yüksek deprem talepleri ile zorlandığıdır. Öztürk [9] ise Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesindeki bazı şehir merkezlerinden seçtiği koordinatları kullanarak nispeten düşük deprensellik içeren bölgelerdeki elastik ve azaltılmış spektral ivme değerlerini karşılaştırmıştır. Başaran [10] ise Afyon Kocatepe'den seçtiği 59 koordinat için 5 ve 10 katlı iki adet tipik çerçeveye gelen eşdeğer deprem kuvvetlerini TDY-2007 ve TDY-2019'a göre hesaplamıştır. Çalışma sonuçlarına göre incelenen bölge için 5 ve 10 katlı çerçevelere gelen eşdeğer deprem yükleri TDY-2019'la birlikte azalma göstermiştir. Benzer çalışmalar Ege Bölgesi [11] ile Kocaeli, Kayseri, Eskişehir ve Konya illeri içinde yapılmıştır [12]. Akkar vd. [2] tarafından sunulan çalışmada ise TDY-2019'a göre elde edilen spektrumlar ve TDY-2017'den elde edilen spektrumlar karşılaştırmalı olarak PGA ve S_{ae} (elastik spektral ivme) değerleri için Türkiye genelinde sunulmuştur. Çalışmada PGA değerleri için karşılaştırma, 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem seviyesi dikkate alınarak yapılmıştır. S_{ae} değerleri cinsinden karşılaştırmada ise sonuçlar $T=0-0.2-1.0$ ve $2.0s$ değerleri için 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem seviyesine göre belirlenmiştir. Diğer performans seviyeleri için bilgi ise doğrudan verilmemiş, 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem seviyesine oranlanarak kontur cinsinden verilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre TDY-2019'a göre hesaplanan S_{ae} değerleri kısa periyotlar için yüksek değerler alırken, uzayan periyotlar için ise azalmaktadır.

Deprem bölgeleri haritasından kontur içeren deprem tehlike haritasına geçişin çok yeni olmasına bağlı olarak konu üzerinde yapılmış çalışma sayısı oldukça kısıtlıdır. Buna bağlı olarak bu çalışma kapsamında diğer çalışmalarda yapılanlara katkı sunacak şekilde Türkiye'nin en yüksek depremselliğe sahip bölgelerinden biri olan Elazığ İli ve çevresi çalışma alanı olarak seçilerek, literatürde daha önce kullanılmamış sayıda (bölge üzerinde toplam 216 adet) koordinat taranmıştır. Yapılara gelen deprem talep yüklerinin belirlenmesinde kullanılan tasarım ivme spektrumu, TDY-2007 ile TDY-2019 esas alınarak incelenmiştir. Böylelikle, tasarım yüklerinde deprem bölgesi haritası ile kontur içeren deprem tehlike haritası yaklaşımının farkları ortaya çıkarılmıştır. Elde edilen tasarım ivme spektrumları karşılaştırılarak Elazığ İli ve çevresi özelinde deprem talebinin değişimi TDY-2007'de 4 zemin sınıfı olduğundan 4 farklı zemin sınıfı ve 3 farklı performans seviyesi için elde edilmiştir. Bu yönüyle mevcut yapıların durumu hakkında bir ön bilgi sunulması amaçlanmıştır. Buna ek olarak azaltılmış tasarım ivme spektrumlarının ilgili yönetmeliklere göre değişimi de araştırılmıştır. Yeni binaların tasarımında kullanılan azaltılmış tasarım ivme spektrumları farklı bina ve taşıyıcı sistem türleri için incelenerek yüksek depremsellik barındıran bölgelerde TDY-2019'a geçişle birlikte ortaya çıkabilecek değişiklikler hakkında bir ön bilgi sunulmuştur.

2. TDY-2007 ve TDY-2019 Tasarım İvme Spektrumları

TDY-2007'de tasarım ivme spektrumlarının belirlenmesinde, riskin bölgesel olarak gösterildiği ve 1996 yılında yürürlüğe giren deprem tehlike haritası kullanılmıştır. Bu haritada deprem bölgeleri, olasılık yöntem kullanılarak, 50 yılda aşılma olasılığı %10 ve dönüş periyodu 475 yıl olan PGA esas alınarak belirlenmiştir [6]. Haritada Türkiye deprem riski açısından beş bölgeye ayrılmıştır.

TDY-2007'de tasarım ivme spektrumunun hesabında, spektrumunun ordinatı olan elastik spektral ivme, $S_{ae}(T)$; spektral ivme katsayısı, $A(T)$, ile yer çekimi ivmesinin, g , çarpımıyla elde edilmektedir [4]. $A(T)$ ise etkin yer ivme katsayısı, A_0 , bina önem katsayısı, I , ve spektrum katsayısının $S(T)$ bir fonksiyonudur (Şekil 1). A_0 , deprem ivmesinin büyüklüğünü gösteren bir katsayı olup deprem bölgeleri için Tablo 1'de verilmiştir. $S(T)$ ise bina doğal titreşim periyodu T ile Tablo 1'de verilen yerel zemin koşullarına bağlı spektrum karakteristik periyotları (T_A , T_B) kullanılarak, Şekil 1'de verilen bağlantılar yardımıyla hesaplanmaktadır.



Şekil 1. TDY 2007 için tasarım ivme spektrumu.

Tablo 1. Etkin yer ivmesi katsayısı A_0 ve spektrum karakteristik periyotları T_A ve T_B 'nin değişimi [4].

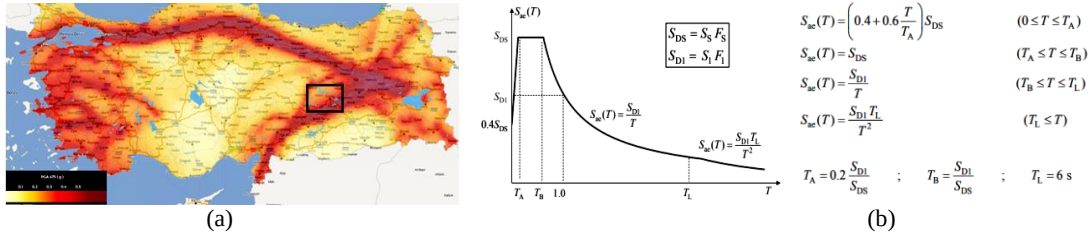
Deprem bölgesi	A_0	Zemin sınıfı	T_A	T_B
1	0.4	Z1	0.10	0.30
2	0.3	Z2	0.15	0.40
3	0.2	Z3	0.15	0.60
4	0.1	Z4	0.20	0.90

Taşıyıcı sistemin doğrusal elastik olmayan davranışını dikkate almak için TDY-2007'de, spektral ivme katsayısı esas alınarak bulunan elastik deprem yükü, deprem yükü azaltma katsayısına, $R_a(T)$, bölünerek azaltılmaktadır. $R_a(T)$ ise taşıyıcı sistem davranış katsayısı R 'ye ve T 'ye bağlı olarak Denklem 1 yardımıyla belirlenmektedir.

$$R_a(T) = 1.5 + (R - 1.5) \frac{T}{T_A} \quad 0 \leq T \leq T_A \quad 1(a)$$

$$R_a(T) = R \quad T_A < T \quad 1(b)$$

TDY-2019’da binaya gelen deprem yüklerinin belirlenmesinde etkili olan deprem tehlike haritası ve tasarım ivme spektrumu eğrisinin tasarımı önemli değişiklikler yapılmıştır. 2019 yılında yürürlüğe giren deprem tehlike haritası bölgesel bir harita olmayıp coğrafi koordinat esaslı bir kontur haritası özelliği taşımaktadır. Şekil 2a’da gösterilen haritada deprem riski spektral ivme (S_a) cinsinden verilmektedir. Koordinat bazlı spektral ivmeler, $T=0.2s$ ve $T=1.0s$ periyotları için zemin sınıfları ve farklı performans düzeylerini gösteren deprem yer hareket düzeyleri için olasılık deprem tehlikesi analiz yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Tasarım ivme spektrumunun hesabında kullanılacak harita spektral ivme katsayıları S_S ve S_1 , $T=0.2s$ ve $T=1.0s$ periyotlarda, referans zemin koşulları ve dikkate alınan deprem düzeyi için ilgili deprem tehlike haritasından elde edilmektedir [5]. Harita spektral ivme katsayıları S_S ve S_1 , zemin koşullarını gösteren zemin etki katsayıları F_S ve F_1 ile çarpılarak tasarım spektral ivme katsayıları S_{DS} ve S_{D1} hesaplanmaktadır (Şekil 2b). Neticede tasarım ivme spektrumu Şekil 3b’deki gibi elde edilmektedir. Spektrumun sabit ivme bölgelerinin sınırlarını gösteren köşe periyotları T_A ve T_B ise ilgili koordinatın tasarım spektral ivme katsayıları S_{DS} ve S_{D1} değerleri kullanarak Şekil 2b’de gösterilen şekilde hesaplanmaktadır. Ayrıca TDY-2019’da önceki yönetmelikte dört olan zemin sınıfı sayısı değiştirilerek altı adet zemin sınıfı belirlenmiştir [5]. TDY-2019 için zemin sınıfları Tablo 2’de sıralanmıştır.



Şekil 2. (a)TDY-2019’da kullanılan Türkiye deprem tehlike haritası [13] ve Elazığ’ın konumu, (b) TDY-2019 için tasarım ivme spektrumu.

Tablo 2. TDY-2019 zemin sınıfları

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin cinsi
ZA	Sağlam, sert kayalar
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakalar
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler

TDY-2019’da doğrusal elastik deprem yüklerinin azaltılmasında esas alınacak $R_a(T)$, T_B spektrum köşe periyodu sınır değeri alınarak, dayanım fazlalığı katsayısı D , bina önem katsayısı, I , ve taşıyıcı sistem davranış katsayısı, R' ’ye bağlı olarak Denklem 2 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$R_a(T) = D + \left(\frac{R}{I} - D \right) \frac{T}{T_B} \quad T \leq T_B \quad 2(a)$$

$$R_a(T) = \frac{R}{I} \quad T > T_B \quad 2(b)$$

Her iki yönetmelikteki binaya gelen deprem yüklerinin belirlenmesinde kullanılan tasarım esasları karşılaştırıldığında aşağıda özetlenen temel farklılıklar görülmektedir.

- TDY-2007’de bölgesel olan deprem risk haritasının yerini TDY-2019’da coğrafi koordinat esaslı kontur içeren deprem risk haritası almıştır.
- Eski haritada deprem riski PGA cinsinden ifade edilirken, yeni haritada spektral değerler cinsinden verilmektedir.
- Yeni haritada ivme spektrumu, taşıyıcı sistemlerin performans hedefleri için 50 yılda aşılma olasılıkları sırasıyla %2, %10, %50 ve %68 olan dört adet deprem yer hareketi düzeyi için belirlenmiştir.
- TDY-2019’da spektrum köşe periyotları T_A ve T_B ’nin belirlenmesinde yerel zemin etkisinin yanı sıra harita spektral ivme katsayıları S_{DS} ve S_{D1} ’de dikkate alınmaktadır.

- TDY-2019’da elastik spektral ivmenin, $S_{ae}(T)$, grafiksel değişimi verilirken, TDY-2007’de spektrum katsayısının, $S(T)$, grafiksel değişimi verilmektedir. TDY-2007’de elastik spektral ivme; spektrum katsayısının, etkin yer ivme katsayısı ve bina önem katsayısı ile artırılmasından elde edilmektedir.
- TDY-2007’de dört adet olan yerel zemin sınıfı sayısı, TDY-2019’da artırılarak altıya çıkarılmıştır. Bu çalışmada karşılaştırılabilirlik yapabilmek amacıyla zemin sınıfları TDY-2007 ve TDY-2019 yönetmelikler arasında Tablo 3’te verilen şekliyle eşleştirilmiştir.
- Deprem yükü azaltma katsayısında sınır değeri olarak TDY-2019’da T_B köşe periyodu dikkate alınırken TDY-2007’de ise T_A köşe periyodu dikkate alınmaktadır. Ayrıca TDY-2019’da deprem yükü azaltma katsayısının hesabında, kısa periyotlar için taşıyıcı sistem tipine göre değişen dayanım fazlalığı katsayısı ve bina önem katsayısı dikkate alınmaktadır. Ancak TDY-2007’de dayanım fazlalığı katsayısı sabit olarak 1.5 alınırken bina önem katsayısı ise spektral ivme katsayısının hesabında dikkate alınmaktadır

Tablo 3.TDY-2007 ve TDY-2019 zemin sınıflarının eşleştirilmesi

TDY-2007	TDY-2019	Çalışmada
Z1	ZA	ZA
Z2	ZB	ZB
Z3	ZC	ZC
Z4	ZD	ZD

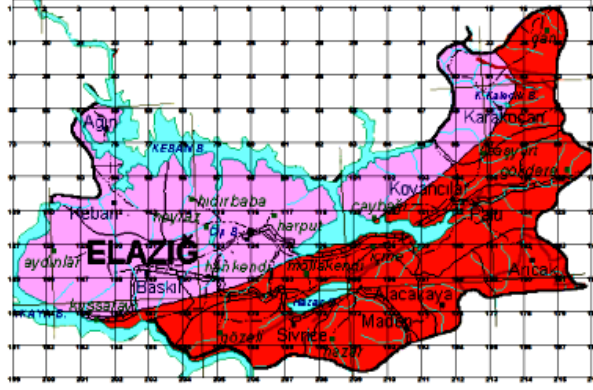
3. Çalışmanın Yapıldığı Bölgenin Depremselliği

TDY-2007 ve TDY-2019 tasarım ivme spektrumlarının karşılaştırıldığı bu çalışmada, çalışma alanı olarak seçilen Elazığ İli, yıkıcı depremler üreten Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) üzerinde bulunmaktadır [14,15]. Şekil 2a’da deprem risk haritasında konumu gösterilen Elazığ İli ve çevresinde aletsel dönemde meydana gelen ve Tablo 4’de sıralanan hasar yapıcı depremler bölgenin aktifliğini göstermesi bakımından önemlidir. Bu nedenle çalışma kapsamında dikkate alınan bölge Türkiye’nin özellikle Doğu Anadolu Bölgesi’nin deprem riskinin değişimini temsil etmektedir.

Tablo 4. Elazığ İli ve çevresinde meydana gelen hasar yapıcı depremler [16, 17, 18, 19, 20].

No	Tarih	Yer	Büyükölük	No	Tarih	Yer	Büyükölük
1	29.05.1789	Elazığ	7.0	19	22.05.1971	Bingöl	6.8 (7.1)
2	12.05.1866	Bingöl-Karlıova	7.2	20	06.09.1975	Lice	6.6
3	1866	Hazar Gölü Güneyi	5.5	21	1976	Çaldıran Muradiye	7.5
4	03.05.1874	Palu-Hazar Gölü	7.1	22	25.03.1977	Elazığ-Palu	5.1
5	1874	Maden-Diyarbakır	6.1	23	1983	Erzurum Kars	7.1
6	27.03.1875	Keban-Hazar-Sincik	6.7	24	05.05.1986	Doğanshehir	5.9
7	1875	Karlıova-Palu	6.1	25	06.06.1986	Doğanshehir	5.6
8	1889	Palu	4.3	26	13.03.1992	Erzincan	6.8
9	1893	Malatya		27	15.03.1992	Pülümür	5.8
10	02.03.1905	Hazar Gölü-Sincik	6.8	28	05.12.1995	Kığı	5.7
11	15.12.1934	Bingöl Çapakçur	5.8	29	13.04.1998	Karlıova	5.0
12	17.08.1949	Karlıova	6.7	30	27.01.2003	Tunceli-Pülümür	6.2
13	04.02.1950	Bingöl Kığı	5.5	31	01.05.2003	Bingöl	6.4
14	07.07.1957	Bingöl Kığı Büyüksu	5.1	32	14.08.2004	Elazığ	5.7
15	14.06.1964	Malatya	6.0	33	23.03.2005	Bingöl	5.7
16	19.08.1966	Varto	6.9	34	21.02.2007	Elazığ-Sivrice	5.9
17	26.07.1967	Pülümür	5.9	35	08.03.2010	Elazığ-Kovancılar	5.8-5.6
18	24.09.1968	Kığı Karakoçan	5.1	36	24.01.2020	Elazığ-Sivrice	6.5

Çalışma Elazığ İli ve çevresini içine alacak şekilde 18020 km² dikdörtgen alan dikkate alınarak planlanmış olup bu alan Türkiye’nin yaklaşık %2.3’üne karşı gelmektedir. Çalışma alanı Şekil 3’de gösterildiği gibi yatay ve düşeyde 10 km genişliğinde aralıklara bölünmüştür.



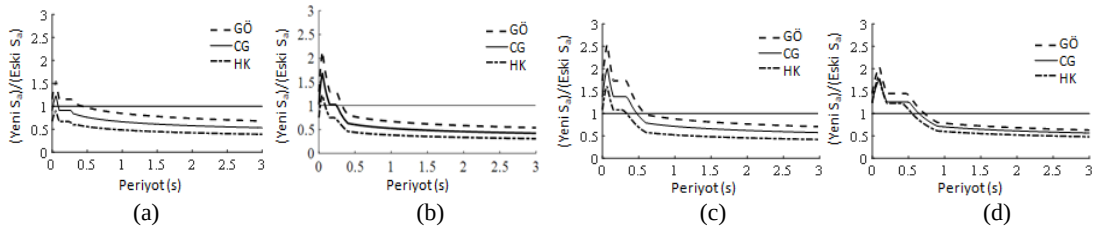
Şekil 3. Çalışma alanı üzerinde eski ve yeni spektrumları karşılaştırmak için seçilen noktalar

4. Hesaplanan Tasarım İvme Spektrumları

Çalışma kapsamında öncelikle mevcut yapılara gelen deprem yüklerindeki değişimin ortaya çıkartılabilmesi amacı ile tasarım ivme spektrumları azaltılmadan karşılaştırılmıştır. Çalışma bölgesindeki 216 noktanın koordinatları esas alınarak yeni deprem tehlike haritasına göre tasarım ivme spektrumları, 3 adet performans seviyesi (aşılma olasılığı 50 yılda %50, %10 ve %2) ve 4 farklı zemin tipi (ZA, ZB, ZC ve ZD) için elde edilmiştir. Çalışmada TDY-2019'a göre toplam 4 zemin x 3 deprem seviyesi x 216 nokta = 2592 adet tasarım ivme spektrumu hesaplanmıştır. Eski deprem tehlike haritasına göre Elazığ İli ve çevresi risk açısından birinci ve ikinci derece deprem bölgelerinde bulunmaktadır. Eski deprem tehlike haritası ve TDY-2007 tasarım bağıntıları kullanılarak, 4 farklı zemin tipi için aşılma olasılığı 50 yılda %10 olan tasarım ivme spektrumu 216 nokta için elde edilmiştir. Daha sonra bu tasarım ivme spektrumları 1.5 ile çarpılarak aşılma olasılığı 50 yılda %2 olan tasarım ivme spektrumları ve 0.5 ile çarpılarak aşılma olasılığı 50 yılda %50 olan tasarım ivme spektrumları elde edilmiştir. Her iki harita kullanılarak elde edilen tasarım ivme spektrumları 0'dan 6s periyot aralığına kadar 0.01s artışlarla hesaplanmıştır.

5. Tasarım İvme Spektrumlarının Karşılaştırılması

Çalışma alanında dikkate alınan 216 nokta için TDY-2019 esas alınarak elde edilen tasarım spektral ivme talepleri TDY-2007'den elde edilenlere oranlanarak grafiksel olarak verilmiştir (Şekil 4). Karşılaştırma her bir performans seviyesi (HK, hemen kullanım; CG, can güvenliği ve GÖ, göçme öncesi) ve Tablo 3'te verilen zemin sınıfları için yapılmıştır.



Şekil 4. Yeni tasarım ivme spektrumunun eskiye oranı; zemin sınıfları (a) ZA, (b) ZB, (c) ZC, (d) ZD

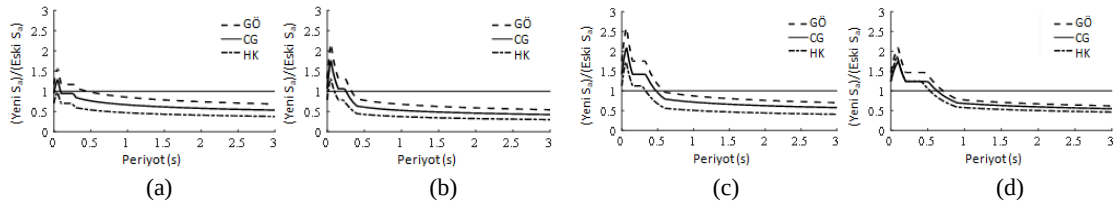
TDY-2019 tasarım ivme spektrumunun TDY-2007 tasarım ivme spektrumuna oranla sadece kısa periyotlarda (çoğunlukla 0.75s'den küçük periyotlarda) daha büyük değerler verdiği görülmektedir. Uzun periyotlarda ise çalışmada dikkate alınan tüm zemin tipleri ve performans seviyeleri için TDY-2019 tasarım ivme spektrumu daha küçük değerler vermektedir. Bu sonuçlar, doğal titreşim periyodu yaklaşık 0.75s'den büyük olan yapıların, TDY-2007 tasarım ivme spektrumuna göre TDY-2019'da daha düşük deprem yükü talepleri ile karşılaşılacağını göstermektedir. Şekil 4'ten elde edilen bir diğer sonuç ise her iki deprem yönetmeliğinin tasarım ivme spektrumları arasındaki en belirgin farkların, ZC zemin sınıfında ve GÖ performans

seviyesinde ortaya çıkmasıdır. ZA tipi zeminler üzerinde konumlanmış yapılarda CG ve GÖ performans seviyeleri için tasarım ivme değerlerinin 1-1.5 arasında artış gösterdiği görülmektedir. Ancak 1.5 kata varan bu artış sadece 0.1s civarındaki periyot bölgesinde oluşmaktadır. Daha büyük periyot değerleri için ise en büyük artış değerinin 1.2 civarında kaldığı görülmektedir. Benzer sonuçlar ZB tipi zeminler üzerinde inşa edilen yapılar içinde geçerlidir. ZC ve ZD tipi zeminler üzerindeki yapılar için ise çok küçük periyot değerlerine denk gelen artış miktarlarını göz ardı edersek, ivme değerlerindeki artışın sırasıyla 1.7 ve 1.3 kat ile sınırlı kaldığı görülmektedir. ZA, ZB ve ZC tipi zeminlerde, gözlenen artışlar yaklaşık 0.5s periyot bölgesine kadar sürerken, ZD tipi zeminlerde ise gözlenen artışın yaklaşık 0.75s civarına kadar sürdüğü görülmektedir.

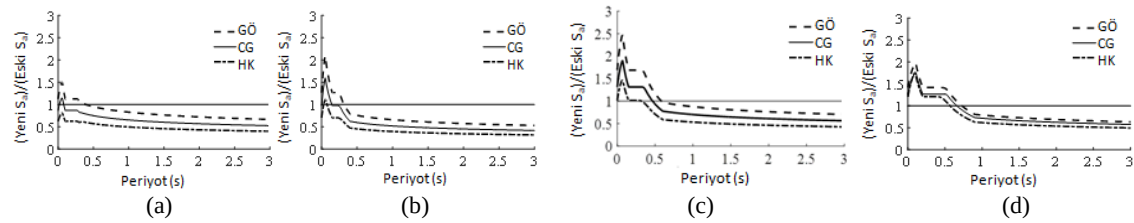
Bu sonuçlar değerlendirilirken Şekil 4'ün çalışmada dikkate alınan tüm koordinatların ortalama değerleri kullanılarak çizildiğini göz önünde bulundurmak gerekir. Bu nedenle sonuçlarda standart sapmaların ortalamalara oranları yüksektir. Standart sapma oranını düşürebilmek için, eski deprem tehlike haritasına göre birinci ve ikinci derece deprem bölgelerinde yer alan koordinatlar için ayrı ayrı spektrum karşılaştırmaları yapılarak, sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir.

Şekil 5'den TDY-2019 tasarım ivme spektrumunun TDY-2007 tasarım ivme spektrumuna göre maksimum 0.5s ve daha küçük periyotlar için daha büyük değerler verdiği görülmektedir. Ancak Şekil 6'da TDY-2019 tasarım spektrumu 0.75s periyoda kadar daha yüksek değerler vermektedir. Bu sonuç, eski deprem tehlike haritasına göre ikinci derece deprem bölgesinde bulunan alanlardaki yapıların, D tipi zemin sınıfı üzerinde bulunması halinde daha uzun periyot aralığında daha fazla deprem talebi ile zorlanacağını göstermektedir.

Tasarım ivme spektrumlarının karşılaştırılmasından elde edilen sonuçlar genel olarak kısa periyot bölgesinde kalan binaların ($T < 0.75s$) TDY-2019'un şartları açısından yeniden değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu periyot aralığında genelde az katlı binaların olduğu bilinmektedir. Şekil 4-6'da verilen grafikler incelendiği zaman elastik deprem yüklerinin çok kısa periyotlarda ($T < 0.2$) sert zeminlerde 2 kata kadar, yumuşak zeminlerde ise 2.5 kata kadar arttığı görülmektedir. Daha uzun periyot bölgelerinde ($0.2 < T < 0.75$) ise bu artış genelde 1-1.5 kat aralığında değişmektedir. Bu periyot bölgesinin dışında ise TDY-2019'dan elde edilen değerlerin TDY-2007'ye kıyasla daha düşük kaldığı görülmektedir.



Şekil 6. Birinci bölge için yeni tasarım ivme spektrumunun eskiye oranı; zemin sınıfları (a) ZA, (b) ZB, (c) ZC, (d) ZD



Şekil 6. İkinci bölge için yeni tasarım ivme spektrumunun eskiye oranı; zemin sınıfları (a) ZA, (b) ZB, (c) ZC, (d) ZD

6. Azaltılmış Tasarım İvme Spektrumlarının Hesaplanması

Yeni yapılacak binaların tasarımında kullanılacak azaltılmış tasarım ivme spektrumlarının karşılaştırılması yoluyla, tasarım yüklerinin TDY-2019'a göre değişiminin etkisi farklı tipte betonarme binaları kapsayacak şekilde incelenmiştir. Bunun için TDY-2007 ve TDY-2019 yönetmeliklerine göre tanımlanan azaltılmış tasarım ivme spektrumları, farklı tip binalar ve farklı tip betonarme taşıyıcı sistemler için karşılaştırılmıştır. Bu amaçla her bina kullanım sınıfından (BKS) seçilen bina tipleri (okul, hastane, alışveriş merkezi-AVM ve konut) için karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırmada binaların betonarme çerçeve ve betonarme çerçeve-perde taşıyıcı sistemlerine sahip oldukları kabul edilmiştir. Tablo 5 ve 6'da TDY-2019 ve TDY-2007'de spektrumların

azaltılmasında kullanılan katsayılara ait detaylar sırasıyla verilmiştir. Tasarım ivme spektrumların azaltılmasında TDY-2007 için Denklem 1a, 1b ve TDY-2019 için ise Denklem 2 kullanılmıştır.

Tablo 5. TDY-2019’da elastik tasarım ivme spektrumlarının azaltılmasında kullanılan katsayılar

Bina Tipi	Taşıyıcı Sistem Çerçeve			Taşıyıcı Sistem Çerçeve-Boşluksuz Perde		
	R	D	I	R	D	I
Okul	8	3	1.5	7	2.5	1.5
Hastane	8	3	1.5	7	2.5	1.5
Konut	8	3	1.2	7	2.5	1.2
AVM	8	3	1.0	7	2.5	1.0

Çalışma kapsamındaki her bir koordinat için (216 koordinat); (i) 4 bina tipi, (ii) 2 taşıyıcı sistem tipi, (iii) 3 performans seviyesi, (iv) 4 zemin tipine göre TDY-2019 için toplam $216 \times 4 \times 2 \times 3 \times 4 = 20736$ adet azaltılmış ivme spektrumu hesaplanmıştır. Bu ivme spektrumları TDY-2007’ye göre hesaplanan spektrumlar ile oranlanmıştır. Elde edilen sonuçların ortalaması alınarak azaltılmış tasarım ivme spektrum oranları elde edilmiştir.

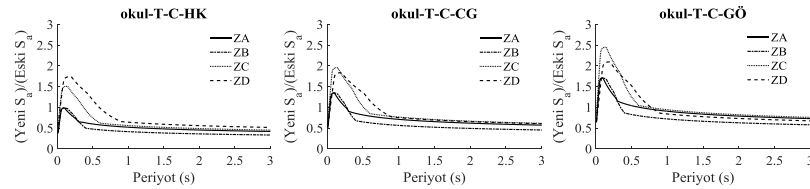
Tablo 6. TDY-2007’de elastik ivme spektrumlarının azaltılmasında kullanılan katsayılar

Bina Tipi	Çerçeve			Çerçeve + Boşluksuz Perde		
	R	D	I	R	D	I
Okul	8	1.5	1.4	7	1.5	1.4
Hastane	8	1.5	1.5	7	1.5	1.5
Konut	8	1.5	1.2	7	1.5	1.2
AVM	8	1.5	1.0	7	1.5	1.0

7. Azaltılmış Tasarım İvme Spektrumlarının Karşılaştırılması

Sonuçlar çalışmada dikkate alınan zemin sınıfları ve performans seviyeleri dikkate alınarak düzenlenmiştir. Okul tipi binalarda azaltılmış tasarım ivme spektrumları için karşılaştırma eski deprem tehlike haritasındaki bölgeler için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Deprem bölgeleri dikkate alınarak yapılan karşılaştırmaya ait grafikler sayfa sayısı ile ilgili kısıtlamalar sebebiyle sunulamamıştır. Ancak farklılık gözlenen durumlar metin içinde belirtilmiştir. Deprem bölgeleri dikkate alınarak yapılan karşılaştırmaların bina tipinden bağımsız olarak genelleştirilebileceği düşünülerek, anlaşılabilirlik adına diğer bina tipleri için bölge ayrımı yapılmadan tüm koordinatlar dikkate alınarak karşılaştırılma yapılmıştır.

TDY-2019’dan elde edilen azaltılmış tasarım ivme spektrumunun TDY-2007 azaltılmış tasarım ivme spektrumuna göre değişimi, $BKS=1$ ’de yer alan okul türü binalarda taşıyıcı sistemin çerçeve olması durumu için Şekil 7’de verilmiştir. Taşıyıcı sistemin perde-çerçeve olması durumunda elde edilen sonuçların çerçeve taşıyıcı sistem için elde edilen sonuçlara çok benzer olduğu görüldüğünden sayfa sayısı limitine bağlı olarak sonuçlar burada ayrıca sunulmamıştır.

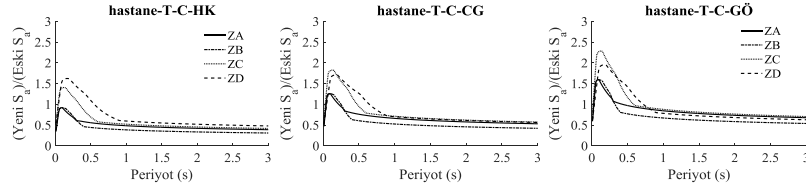


Şekil 7. Çerçeve taşıyıcı sisteme sahip okul binaları için azaltılmış tasarım ivme spektrum oranının değişimi

Okul tipi binaların azaltılmış tasarım ivme spektrumu eğrileri karşılaştırıldığında kısa periyot bölgelerinde ($T < 0.75s$) ve özellikle zayıf zeminlerde (ZC ve ZD zemin sınıfı), TDY-2019 kullanılarak elde edilen sonuçların daha büyük olduğu görülmektedir. Aradaki fark özellikle GÖ performans seviyesinde eski deprem tehlike haritasına göre ikinci derece deprem bölgesinde bulunan koordinatlarda en büyük değeri almaktadır. Uzun periyot bölgelerinde ise ivme spektrumları arasındaki oran 0.5 ile 1 arasındadır. Güçlü zeminlerde (ZA ve ZB

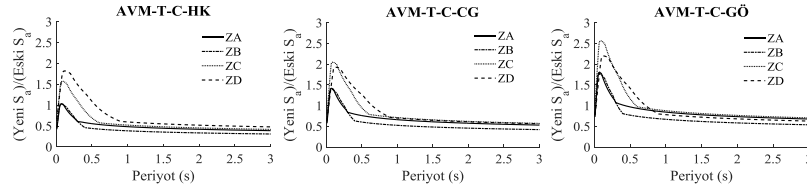
zemin sınıfı) ise zayıf zeminlere oranla daha kısa periyot ($T < 0.5s$) aralığında TDY- 2019 kullanılarak elde edilen değerler daha büyüktür. Okul tipi binalarda elde edilen farklar üzerinde, TDY 2007’de 1.4 olan bina önem katsayısının, TDY 2019’da 1.5 olarak değiştirilmesi de etkilidir. Okul tipi binalarda taşıyıcı sistem seçiminin (çerçeve, perde-çerçeve) spektrum değişimi üzerindeki etkisinin ise güçlü zeminlerde belirgin olmadığı, zayıf zeminlerde ise çok küçük düzeyde olduğu anlaşılmıştır. Sonuç olarak, TDY-2019 kullanıldığında özellikle az katlı ve zayıf zeminlerde bulunan okul türü binaların 2.5 kata varan daha yüksek deprem talepleri ile zorlanacağı görülmektedir.

Hastane, AVM ve konut türü binalarda taşıyıcı sistemin çerçeve veya perde-çerçeve olması durumu için TDY-2019 kullanılarak ortaya çıkan azaltılmış tasarım ivme spektrumunun değişimi hesaplanmıştır. Çerçeve ile perde-çerçeve sistem için elde edilen sonuçlar benzer olduğu için grafiklerde sadece çerçeve sisteme ait sonuçlar sırasıyla Şekil 8 -10’de verilmiştir.



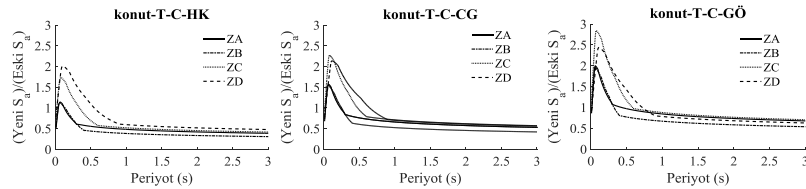
Şekil 8. Hastane tipi binalarda tüm koordinatlar için azaltılmış tasarım ivme spektrum oranının değişimi

Hastane ve AVM tipi binalarda TDY-2019 kullanılarak elde edilen değerlerin (Şekil 10) zayıf zeminlerde HK, CG ve GÖ performans seviyelerinde, kısa periyot değerleri ($T < 1s$) için sırasıyla 1.7-1.9 ve 2.4 kata varan artışlar elde edilmiştir. Güçlü zemin sınıfları için ise HK, CG ve GÖ performans seviyelerinde, daha kısa periyot değerleri ($T < 0.5s$) için sırasıyla 1.0-1.4 ve 1.7 kat ile sınırlı kalmıştır.



Şekil 9. Alışveriş merkezi (AVM) tipi binalarda tüm koordinatlar için azaltılmış tasarım ivme spektrum oranının değişimi

Konut tipi binalar için elde edilen sonuçlar zayıf zeminlerde HK, CG ve GÖ performans seviyelerinde, kısa periyot değerleri ($T < 1s$) için sırasıyla 2.0-2.3 ve 3.0 kata varan artışlar olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 10). Güçlü zemin sınıfları için ise HK, CG ve GÖ performans seviyelerinde bu artışlar $T < 0.5s$ değerleri için sırasıyla 1.2-1.6 ve 2.0 kat ile sınırlı kalmıştır. Bu sonuçlar, TDY-2019’da en büyük deprem yükü talep artışının konut türü binalarda olduğunu göstermektedir.



Şekil 10. Konut tipi binalarda tüm koordinatlar için azaltılmış tasarım ivme spektrum oranının değişimi

8. Sonuçlar

Çalışmada, TDY-2019 kullanılarak elde edilen tasarım ivme spektrumları, TDY-2007 kullanılarak elde edilen tasarım ivme spektrumları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılma zemin sınıfları ve performans seviyeleri parametreleri için yapılmıştır. Çalışmanın devamında farklı bina türleri ve taşıyıcı sistem tipleri için azaltılmış tasarım ivme spektrumları incelenerek, deprem talep değişimi için elde edilen veriler, tasarımcıyı yönlendirecek

anlamli sonuçlara dönüştürülmüştür. Çalışmada incelenen farklı bina türleri; (i) okul, (ii) hastane, (iii) konut ve (iv) AVM olarak seçilmiştir. Taşıyıcı sistem tipleri ise kullanım yaygınlığına bağılı olarak betonarme çerçeve ve çerçeve-perde olarak belirlenmiştir. Sayısal çalışmadan elde edilen veriler incelendiğinde aşağıda sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır.

- Kısa periyot bölgelerinde TDY-2019'da TDY-2007'ye oranla 2.5 kata varan talep artışları gözlenmiştir. Uzun periyot bölgelerinde ise TDY-2019'dan elde edilen deprem talebi azalarak TDY-2007'den elde edilen deprem talebinin yaklaşık yarısı kadar olmuştur.
- TDY-2019'dan elde edilen deprem talep artışları en yüksek değerine zayıf zeminlerde ve GÖ performans seviyesinde ulaşmıştır. Özellikle ZC tipi zeminlerde incelenen bütün durumlar için en büyük talep artışı elde edilmiştir. Artışların yaygın olduğu periyot aralığı ise ZD tipi zeminlerde daha geniş olarak gözlenmiştir.
- Okul tipi binalarda, kısa periyot bölgelerinde özellikle zayıf zeminlerde deprem taleplerinde artış gözlenmiştir. Ülkemizde çoğunlukla az katlı tasarlanan okul tipi binaların talep artışı gözlenen periyot aralığında olması yüksek olasılıklı bir durumdur. Bu nedenle okul tipi binaların talep artışları dikkate alınarak ayrıntılı sayısal çalışmalarla incelenmesinin uygun olacağı düşünülmektedir.
- Hastane ve AVM tipi binalarda da okul tipi binalar gibi kısa periyot bölgelerinde talep artışı gözlenmiştir.
- Konut tipi binalarda ise diğer bina tiplerine oranla en yüksek deprem talep artışları gözlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, spektrumlara uyumlu yer hareketi kayıtları seçilerek yapılacak doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizlerle desteklenirse, mevcut bina stokunun güncel deprem tehlikesine göre performans durumu daha ayrıntılı olarak ortaya çıkartılabilir.

Kaynaklar

- [1] Kramer SL. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall 1996, 653 pp.
- [2] Akkar S, Azak T, Çan T et al. Evolution of seismic hazard maps in Turkey. Bull Earthquake Eng, 2018; 16(3197).
- [3] TDY 1998. Afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmelik. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 1998.
- [4] TDY 2007 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2007.
- [5] TDY 2019. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğı. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2018.
- [6] Özmen B. Türkiye deprem bölgeleri haritalarının tarihsel gelişimi. Türkiye Jeoloji Bülteni, 2012; 55(1).
- [7] Wood HO, Neumann F. Modified Mercalli intensity scale of 1931. Bulletin of the Seismological Society of America, 1931; 21(4), 277-283.
- [8] Keskin&Bozdoğan. 2007 ve 2018 Deprem yönetmeliklerinin Kırklareli İli özelinde değerlendirilmesi. Kırklareli University Journal of Engineering and Science, 2018; 4(1), 74-90.
- [9] Öztürk M. 2018 Türkiye bina deprem yönetmeliğı ve Türkiye deprem tehlike haritası ile ilgili iç anadolu bölgesi bazında bir değerlendirme. Selçuk-Teknik Dergisi, 2018; 17(2).
- [10] Başaran V. Türkiye bina deprem yönetmeliğine (TBDY2019) göre Afyonkarahisar için deprem yüklerinin değerlendirilmesi. AKÜ FEMÜBİD, 2018; 18, 1028-1035.
- [11] Seyrek E. Yeni Türkiye sismik tehlike haritasının Ege Bölgesi için değerlendirilmesi. NÖHÜ Müh. Bilim. Derg., 2020; 9(1), 414-423.
- [12] Koçer M., Nakipoğlu A., Öztürk B., Al-Hagrı M.G., ArslanM.H. Deprem kuvvetine esas spektral ivme değerlerinin TBDY 2018 ve TDY 2007'ye göre karşılaştırılması. Selçuk-Teknik Dergisi, 2018; 17(2), 43-58.
- [13] Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı. Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması, <https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi>, 2019.
- [14] Arpat E, Şaroğlu F. Doğu Anadolu Fayı ile ilgili bazı gözlem ve düşünceler. MTA Dergisi, 1972; 78, 44-50.
- [15] Palutoğlu M, Tanyolu E, Elazığ İl Merkezi Yerleşim Alanının Depremselliğı. Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi, 2006; 18 (4), 535-546.
- [16] 8 Mart 2010 Elazığ Kovancılar Depremi Değerlendirme Raporu. Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı, Rapor No. 025.343/6056.1, Mayıs 2010, Ankara.
- [17] Kalafat D, Zülfikar C, Vuran E, Kamer Y. 08 Mart 2010 Başyurt-Karakoçan (Elazığ) depremi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Mart 2010, İstanbul.
- [18] Celep Z, Erken A, İlki A, Taşkın B.8 Mart 2010 Kovancılar- Elazığ Depremi ön mühendislik raporu. İTÜ Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, 2010, İstanbul.
- [19] Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Büyük depremler. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-bilgileri/buyuk-depremler/>, 2019.
- [20] 24 Ocak Sivrice-Elazığ Depremi Basın Bülteni, B.Ü. Kandilli Rasathanesi ve DAE. Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi.<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/24-ocak-sivrice-elazig-depremi-2/>, 2020.

Dişlisiz Asansör Uygulamaları için Yüzey Montajlı Senkron Motorun Optimal Tasarımı

Musab OKŞAR¹, Hicret YETİŞ², Taner GÖKTAS^{3*}, Asım KAYGUSUZ⁴, Erkan MEŞE⁵

^{1,2,3,4} Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

⁵ Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye

¹ musab.oksar@inonu.edu.tr, ²hicretyetis@gmail.com, ³taner.goktas@inonu.edu.tr, ⁴asim.kaygusuz@inonu.edu.tr,

⁵erkan.mese@ege.edu.tr

(Geliş/Received: 18/10/2019;

Kabul/Accepted: 26/04/2020)

Öz: Mıknatıslı Senkron Makineler tarafından sürülen dişlisiz asansör sistemleri, geleneksel asenkron motor uygulamalarına kıyasla yüksek verim, yüksek moment yoğunluğu, dişli kutusunun ortadan kalkması ile kayıpların azalması ve sistemin hacminin küçülmesi gibi birçok avantaja sahiptir. Bu çalışmada 800 kg / 10 kişilik taşıma kapasitesine sahip bir dişlisiz asansör sistemini sürmek için tasarlanan 27-oluklu 30-kutuplu Yüzey Montajlı Senkron Motorun (YMSM) tasarımı yapılmıştır. Tasarım süreci içerisinde kritik önem teşkil eden; hava aralığı, oluk açıklığı ve mıknatıs kalınlığı gibi geometrik boyutlar parametrik analiz ve çok amaçlı optimizasyon yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Optimizasyon süreci sonucunda elde edilen motor; verim, akı dağılımı, çıkış ve vuruş momentleri açısından analiz edilmiştir. Enerji verimliliği ve performans açısından optimal bir tasarım hedeflenmiştir. Yapılan tasarım ve analizler ANSYS@Maxwell simülasyon programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Çok amaçlı optimizasyon, Doğrudan sürürlü sistemler, Genetik algoritma, Parametrik analiz, Yüzey montajlı senkron motor.

Optimal Design of Surface Mounted Synchronous Motors for Gearless Elevator Systems

Abstract: Gearless elevator systems driven by Magnet Synchronous Machines have many advantages compared to conventional asynchronous motor applications such as high efficiency, high torque density, reduction of losses caused by gear box reduction and volume reduction of the system. In this study, the design stages of with 27-slot / 30-pole Surface Mounted Synchronous Motor (SPM) designed to drive a gearless elevator system with a carrying capacity of 800 kg / 10 people are described. Critical in the design process; geometric dimensions such as air gap, slot opening and magnet thickness were determined using parametric analysis and multi-objective optimization method. The motor obtained as a result of the optimization process; efficiency, flux distribution, output torque and cogging torque value were analyzed. An optimal design has been tried to be achieved in terms of energy efficiency and performance. Design and analysis were performed using ANSYS @ Maxwell simulation program.

Key words: Multi-objective optimization, Direct drive applications, Genetic algorithm, Parametric analysis, Surface mounted synchronous motors.

1. Giriş

Elektrik enerjisini verimli şekilde kullanabilmek için asansör sistemlerinde teknik olarak birçok iyileştirici çalışmalar yapılmıştır. Yüksek verimli elektrik motorlarının üretilmesi ile asansörler büyük ve kalabalık şehirlerde modern yaşamın vazgeçilmez parçası haline gelmişlerdir. YMSM'ler, asansör sistemleri gibi düşük hızlı uygulamalarda asenkron motorlara kıyasla daha iyi kontrol imkânı sağladıklarından oldukça iyi performans gösterirler [1-2]. Ayrıca rotorda meydana gelen bakır kayıpları ve dişli kutusunun sebep olduğu kayıplar ortadan kalktığı için enerji verimliliği açısından oldukça iyi motorlardır [3-4]. [5-7] numaralı çalışmalarda; YMSM'lerin, makine ve yük arasındaki dişli kutuları veya diğer mekanik aktarma bileşenlerini ortadan kaldıran doğrudan sürürlü asansör uygulamaları için oldukça tercih edildiği vurgulanmıştır. Doğrudan sürürlü uygulamaları ile asansör sistemlerinde son yıllarda oldukça büyük bir gelişme kaydedildiği belirtilmiştir. Geleneksel asansör sistemlerinin standart olarak; asansör shaftının üst kısmında ayrı bir odada bulunan bir asenkron motor, dişli kutusu, kasnak ve kablo kanalından oluştuğu ifade edilmiştir. 1990 yıllarının ortalarında asansör üreticilerinin ayrı bir makine dairesi ihtiyacını ortadan kaldıran YMSM'li sistemleri tanıtarak asansör sistemlerinde sessiz bir devrim yarattıkları belirtilmiştir. YMSM'ler makine dairesi ve dişli kutusu ihtiyacını ortadan kaldırılması, iyi sürüş konforu, yüksek verimlilik, zayıflatılmış mekanik gürültü ve doğrudan sürüş imkânı ile gibi üstün özelliklerinden dolayı asansör sistemleri için oldukça talep gören motorlar arasında yerini almışlardır [8-11].

* Sorumlu yazar: taner.goktas@inonu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹0000-0002-0680-2421, ²0000-0002-3173-5611, ³0000-0002-8218-3239, ⁴0000-0003-2905-1816, ⁵0000-0002-6305-1281

Tablo 1. YMSM'ye ait tasarım özellikleri

Tasarım Parametreleri	Değer (Birim)
Nominal güç	8.8 kW
Nominal hız	255 d/d
Çıkış momenti	330 Nm
Uygulanan gerilim	380 V
Oluk sayısı	27
Kutup sayısı	30
Aktif uzunluk	85 mm
Stator burulma faktörü (Skew width)	0.2
Sargı tipi	Konsantre
Stator oluklarındaki iletken sayısı	104
Armatür akım yoğunluğu	5.7 A/mm ²
PM materyali	NdFe35
Stator ve rotor çelik materyali	1008

Bu çalışmada 800 kg / 10 kişilik taşıma kapasitesine sahip dişlisiz asansör sistemi için 8.8 kW gücünde ve 330 Nm moment üreten bir YMSM tasarımı gerçekleştirilmiştir. Motorun ana geometrisi dişlisiz asansör uygulamaların da talep edilen boyutlara uygun olarak belirlenmiştir. Diğer geometrik boyutlar [10] numaralı çalışmada sunulan motor performansı üzerinde etkili olan kritik boyutların parametrik analiz ile belirlenmesi yönteminden yararlanılarak ANSYS@Maxwell programının RMXprt bölümünde bulunan parametrik analiz ve çok amaçlı optimizasyon yöntemleri kullanılarak tayin edilmiştir. Tasarım sürecinde parametrik analizler yapılarak hava aralığı, mıknatıs kalınlığı, mıknatıs doluluk oranı, oluk açıklığı ve oluk uzunluğu değerlerinin; verim, çıkış momenti, vuruşu momenti ve stator dişlerindeki akı yoğunluğu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çok amaçlı optimizasyon yöntemi kullanılarak belirtilen parametrelerin optimum olduğu noktalar, optimizasyon algoritması vasıtası ile seçilerek performans açısından iyi bir tasarım elde edilmiştir.

2. YMSM Tasarımı

“Asansör sistemlerinde Avrupa Standartlarına (Elevator EN Standards)” uygun olarak her kişi 75-80 kg olarak kabul edilirse 10 kişilik asansör sisteminin taşıma kapasitesi 800 kg olarak belirlenir [13]. Bu taşıma kapasitesine sahip dişlisiz asansör sistemi için tasarlanacak olan senkron motorun moment, hız ve güç parametreleri endüstride kullanılan asansör sistemlerine uygun olarak sırası ile; 330 Nm, 8.8 kW ve 255 d/d olarak belirlenmiştir. Motorun ana geometrisi; belirlenen hız ve moment değerine sahip motorlar için endüstriyel olarak asansör uygulamalarında 800 kg taşıma kapasiteli sistemler için talep edilen boyutlar doğrultusunda seçilmiştir. Tasarlanan YMSM'nin özellikleri Tablo 1'de özetlemiştir.

2.1 Parametrik analiz

Parametrik analiz, ANSYS@Maxwell programının RMXprt bölümünde bulunan, her bir giriş parametresinin belirli aralıkta ve belirli adım sayısında değiştirilerek analiz edilmek istenen çıkış değerleri üzerindeki etkisinin gözlemlendiği bir analiz tekniğidir. Bu yöntem ile performans açısından önem teşkil eden verim, moment ve akı yoğunluğu gibi çıkış değerlerini en optimum şekilde sağlayan giriş parametre değerleri belirlenir. YMSM için dört adet giriş parametresinin dört adet çıkış değeri üzerindeki etkisi incelendiği parametrik analiz adımları Şekil 1'de gösterilmektedir. Şekil 1'de;

$i=1,2,\dots,k$ tamsayı olmak üzere,

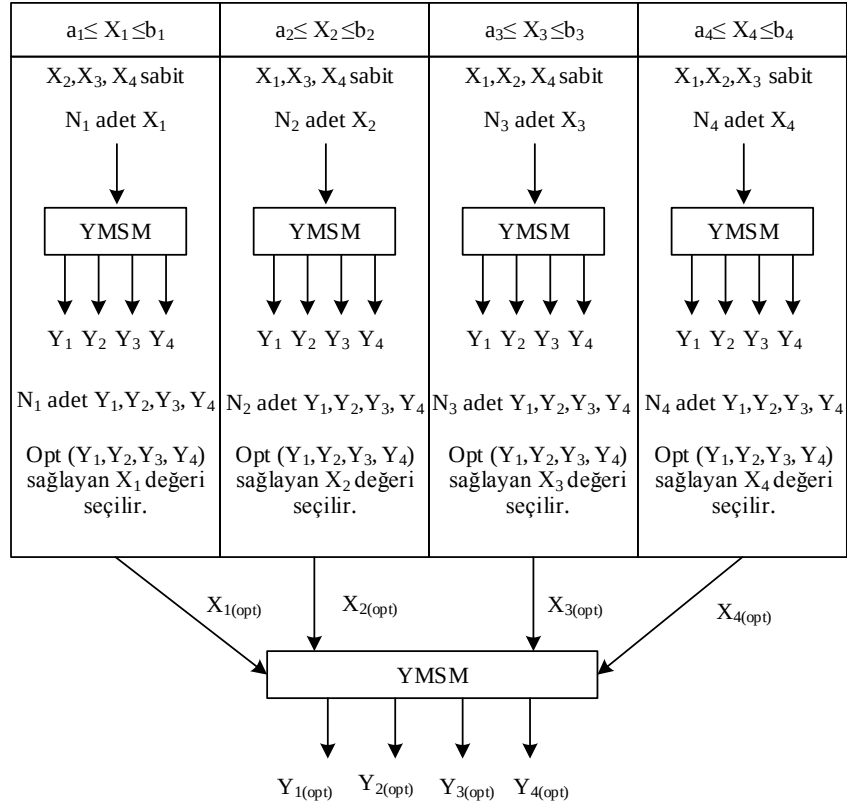
X_i : motor giriş parametreleri, (örn; hava aralığı, mıknatıs kalınlığı vs.)

Y_i : motor çıkış değerleri (örn; verim, moment vs.), $a_i - b_i$: değişkenlerin değer aralıkları,

ΔX_i : değişkenlerin parametrik analizdeki artış miktarları,

N_i : belirtilen aralık ve artış miktarına göre değişkenlerin adedi ($N_i = \frac{b_i - a_i}{\Delta X_i}$) (N= tamsayı) olarak ifade

edilmiştir.



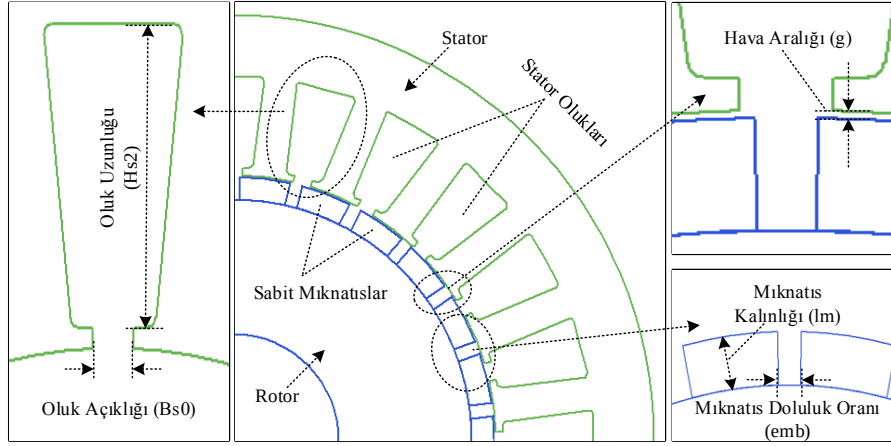
Şekil 1. Parametrik analiz adımları

YMSM tasarımında; hava aralığı, mıknatıs geometrisi ve stator oluk yapısı motor performansı için oldukça önemli olan parametrelerdir [10], [14-19]. Bu nedenle tasarlanan YMSM'nin hava aralığı, mıknatıs kalınlığı, mıknatıs doluluk oranı, oluk açıklığı ve oluk uzunluğu değerlerinin; verim, çıkış momenti, vuruğu momenti ve stator dişlerindeki akı yoğunluğu değerleri üzerindeki etkisi parametrik analizler yapılarak incelenmiştir. Parametrik analizler Tablo 2'de belirlenen değerler doğrultusunda yapılmıştır. Analiz edilen tasarım parametreleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Parametrik analiz sonuçları ise Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmiştir. Analiz sonuçları incelenerek aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

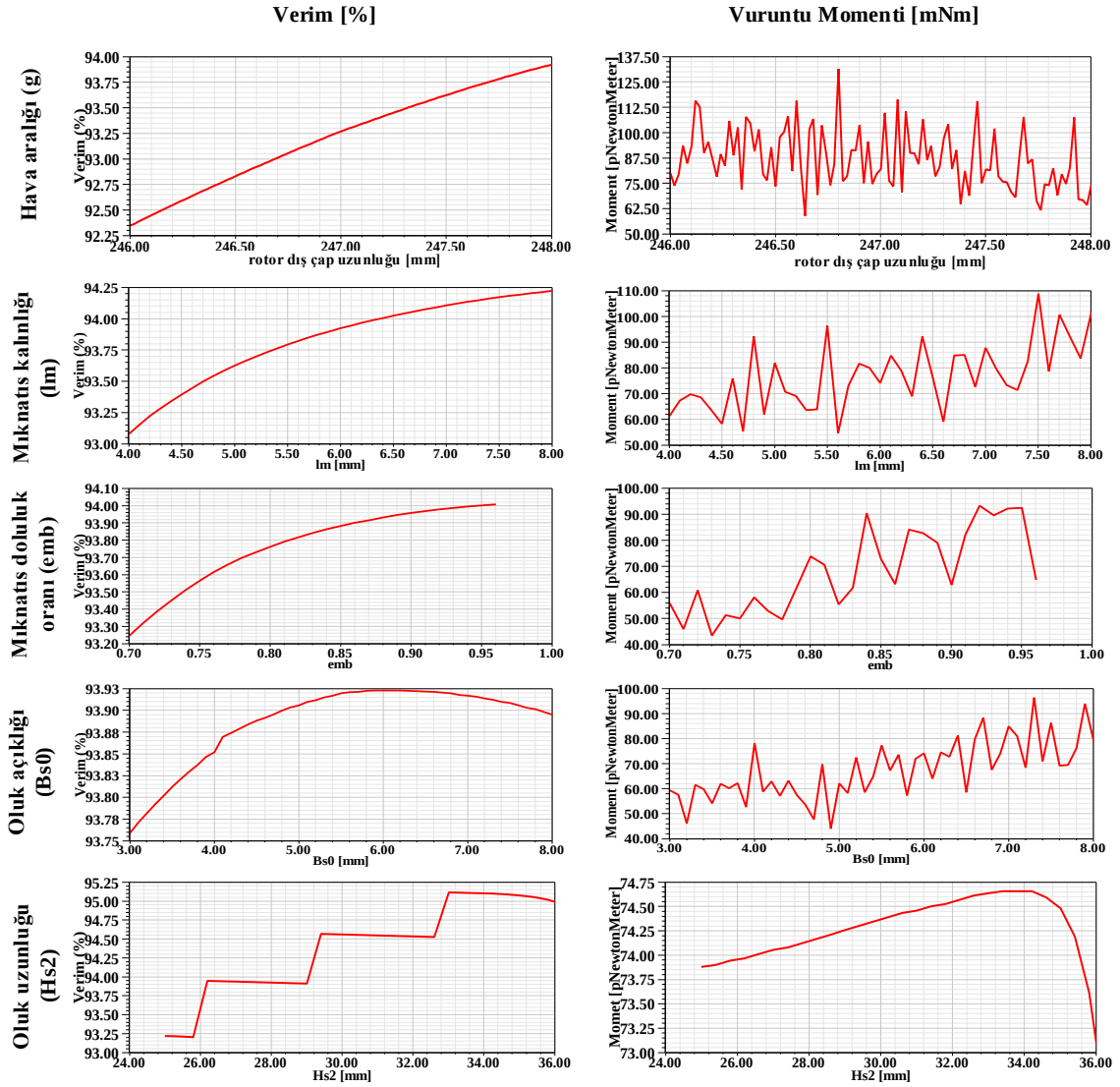
Hava aralığı (g) azaltıldığında; verim ve stator dişlerindeki akı yoğunluğunun arttığı, vuruğu momenti ve çıkış momentinin lineer olmayan bir değişim sergilediği gözlemlenmiştir. Mıknatıs kalınlığı (l_m) arttırıldığında; verim ve stator dişlerindeki akı yoğunluğunun arttığı, vuruğu ve çıkış momentinin lineer olmayan bir değişim sergilediği gözlemlenmiştir. Mıknatıs doluluk oranı (emb) arttırıldığında; verim ve stator dişlerindeki akı yoğunluğunun arttığı, vuruğu ve çıkış momentinin lineer olmayan bir değişim sergilediği gözlemlenmiştir. Oluk açıklığı ($Bs0$) arttırıldığında; verimin arttığı, stator dişlerindeki akı yoğunluğunun azaldığı, vuruğu ve çıkış momentinin lineer olmayan bir değişim sergilediği gözlemlenmiştir. Oluk uzunluğu ($Hs2$) arttırıldığında; verim ve vuruğu momentinin arttığı, stator dişlerindeki akı yoğunluğunun azaldığı, çıkış momentinin lineer olmayan bir değişim sergilediği gözlemlenmiştir.

Tablo 2. Parametrik analiz değişkenleri

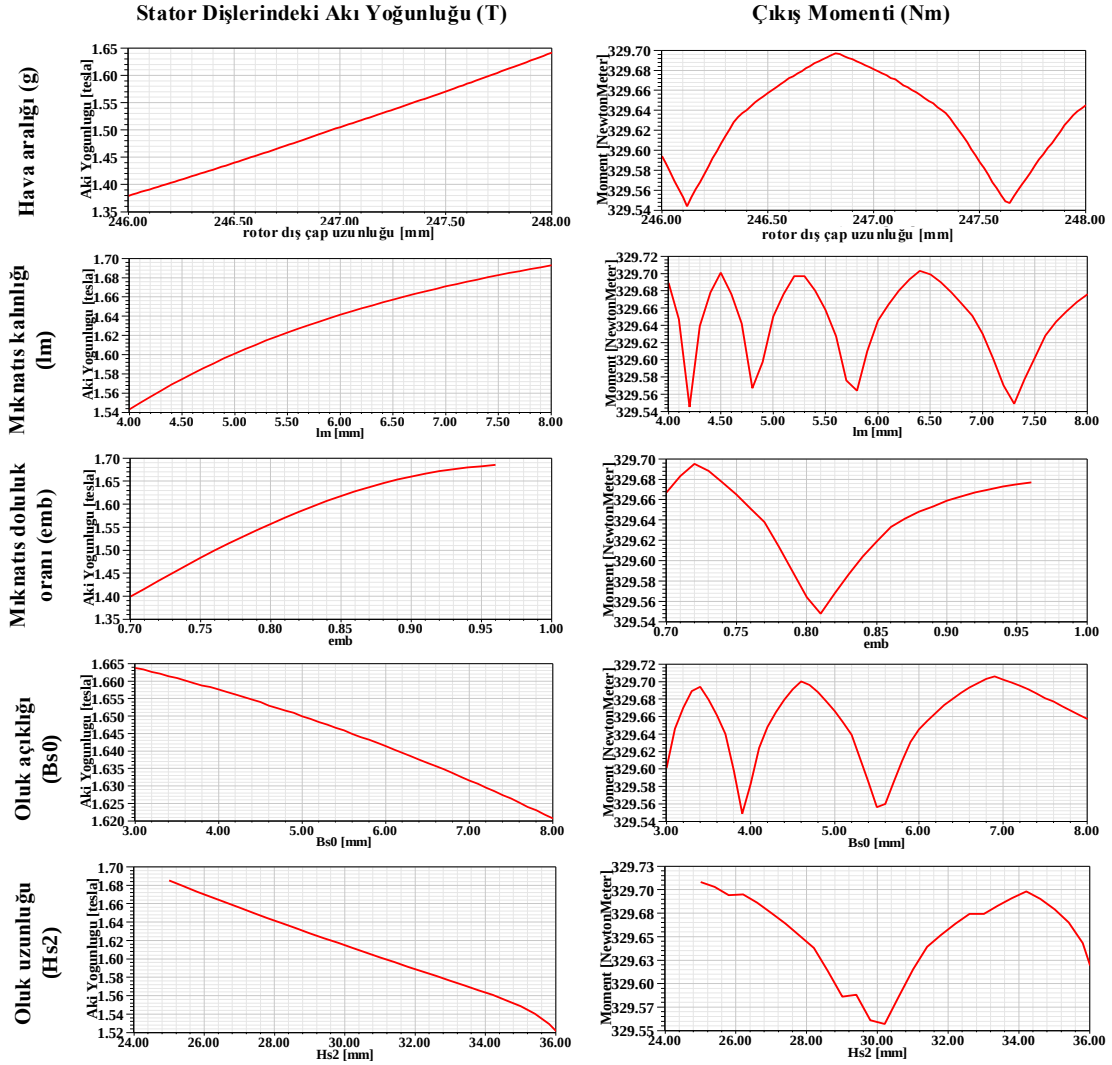
	Birim	Değer aralıkları	Artış (Δ)
Hava aralığı (g)	mm	$1 < g < 2$	$\Delta_g = 0.02$
Mıknatıs kalınlığı (l_m)	mm	$4 < l_m < 8$	$\Delta_{l_m} = 0.1$
Mıknatıs doluluk oranı (emb)	-	$0.7 < emb < 0.96$	$\Delta_{emb} = 0.01$
Oluk açıklığı ($Bs0$)	mm	$3 < Bs0 < 8$	$\Delta_{Bs0} = 0.1$
Oluk uzunluğu ($Hs2$)	mm	$25 < Hs2 < 36$	$\Delta_{Hs2} = 0.4$



Şekil 2. Analiz edilen tasarım parametreleri



Şekil 3. Parametrik analiz sonuçları (verim ve vuruğu momenti)



Şekil 4. Parametrik analiz sonuçları (stator dişlerindeki akı yoğunluğu ve çıkış momenti)

Asansör uygulamaları için tasarlanan elektrik motorları performans açısından değerlendirilirken öncelikli olarak önem verilen ölçütler; yüksek verim, düşük vuruş momenti, stator akı yoğunluğunun 1.8 *Tesla*'yı aşmaması ve lineer çıkış momenti (düşük moment dalgalılığı) olarak sıralanır [10], [20-21]. Bu bağlamda parametrik analiz sonuçları incelendiğinde; hava aralığı, mıknatıs geometrisi ve stator oluk yapısı parametrelerinin değişiminin performans açısından önemli ölçütler olan verim, vuruş momenti, akı yoğunluğu ve çıkış moment değerleri üzerinde farklı etkileri olduğu görülmektedir. Örneğin, Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilen; hava aralığı değerinin artırılması motorun performansını; verimi artırarak olumlu yönde etkilerken vuruş momenti ve stator dişlerindeki akı yoğunluğunu artırarak olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca parametrik analiz yöntemi ile motor giriş parametrelerinin çıkış değerleri üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi için; Şekil 1'de ifade edildiği gibi ayrı ayrı adımlarda analiz yapılması gerekmektedir. Bu da her bir analiz sonucunun ayrıca yorumlayıp giriş parametrelerinin optimum olduğu noktaların tasarımcı tarafından seçilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu durum tasarımcı açısından parametrelerin optimum olduğu değerlerin seçimini yapmayı güçleştirmektedir. Bu soruna çözüm olarak; çok amaçlı optimizasyon yöntemi kullanılarak belirtilen parametrelerin optimum olduğu noktaların, optimizasyon algoritması vasıtası ile seçilmesi önerilmiştir.

2.2. Çok amaçlı optimizasyon

Optimal YMSM tasarımı sürecinde faydalı olacak olan çok amaçlı optimizasyon; ANSYS@Maxwell programının RMXprt bölümünün "Optimetric Analysis" sekmesi altında bulunan "optimization" çözdürücüsü

kullanılarak yapılan bir analizdir. Çok amaçlı optimizasyon yöntemi yardımı ile YMSM tasarımı ve optimizasyonu [22-26] numaralı çalışmalarda detaylı olarak anlatılmıştır. Bu çalışmada parametrik analiz yöntemi ile birlikte çok amaçlı optimizasyon yöntemi kullanılarak; çıkış değerleri üzerinde etkisi olan giriş parametrelerinin optimum olduğu değerler optimizasyon algoritması tarafından seçilerek, performans açısından olabilecek en iyi tasarıma ulaşmak hedeflenmektedir. Optimal tasarımın için; hava aralığı, mıknatıs doluluk oranı, mıknatıs kalınlığı, stator oluk açıklığı ve stator oluk uzunluğu parametrelerinin değeri, genetik algoritma yöntemi kullanılarak çok amaçlı optimizasyon sonucunda belirlenmiştir.

Genetik algoritma, John H. Holand tarafından ortaya konmuş evrimsel bir optimizasyon yöntemidir [27]. Genetik algoritma ilhamını; doğal seçim ve genetik biliminden alan bir metasezgisel bir arama algoritmasıdır [28]. Genetik algoritma yöntemi; mühendislik uygulamalarında kullanılan gradyan tabanlı klasik optimizasyon yöntemlerine göre lokal optimum noktalarına takılmadan çözüm uzayını global olarak araştırması ve daha hızlı çözüm üretebilmesi gibi özelliklerinden dolayı optimizasyon problemleri için daha uygun bir yöntemdir [29-30]. Tablo 3'te optimum değerde olması amaçlanan çıkış değerleri ve değer aralıkları ile belirtilen giriş parametrelerinin değer aralıkları verilmiştir. Optimizasyon algoritması, istenilen sonuç için giriş değerlerini değiştirerek denerken bu değerleri Tablo 3'teki giriş parametreleri için belirlenen aralıklardan seçmektedir. Giriş parametrelerinin değer aralıkları Tablo 2'de verilen değer aralıkları ile aynı seçilmiştir. Çıkış değerlerinin değer aralıkları ise parametrik analiz yöntemi sonucunda elde edilen değişim grafiklerin değer aralıklarına göre belirlenmiştir.

Çok amaçlı optimizasyon yönteminde, optimizasyon işlemine başlanmadan önce belirlenmesi gereken birkaç parametre bulunmaktadır. Bunlar; ağırlık değerleri (W_i), amaç fonksiyonları (G_i) ve maksimum iterasyon sayısıdır. Maliyet fonksiyonları ($cost_i$) ve toplam maliyet fonksiyonu (total cost) ise algoritma tarafından hesaplanmaktadır. Ağırlık değerleri (W_i), tasarımcının çıkış değerine verdiği önem derecesini belirtmektedir. Çıkışlar arasından hangisinin optimum değerine daha yakın olması istenirse o çıkış değerinin ağırlık değeri daha yüksek seçilir. Örneğin; tasarlanacak motorun veriminin yüksek olması isteniyorsa ağırlık değeri diğer çıkış değerlerine oranla yüksek ağırlık değeri seçilir. Yapılan optimizasyonda, çıkış değerleri için verilen ağırlık değerleri Tablo 5'te gösterilmiştir. Ayrıca Çok amaçlı optimizasyon yapılırken her çıkış için birer amaç fonksiyonun yazılması gerekmektedir. Amaç fonksiyonun değeri, çıkış değişkeninin değer aralığına göre 1 ile 10 arasında olacak şekilde formülize edilmektedir. RMxprt programında bir çıkışa ait amaç fonksiyonu genel olarak aşağıdaki gibi yazılmaktadır [31]

Tablo 3. Giriş değişkenlerinin değer aralıkları

Giriş Parametreleri
$1 \leq g \leq 2$
$3 \leq bs0 \leq 8$
$25 \leq Hs2 \leq 36$
$0.4 \leq emb \leq 0.96$
$4 \leq lm \leq 8$

Tablo 4. Çıkış değişkenlerinin değer aralıkları

Çıkış Değerleri
$1.4 \leq \text{stator dışlarındaki akı yoğunluğu} \leq 1.7$
$90 \leq \text{verim} \leq 100$
$0 \leq \text{vuruntu momenti} \leq 1$
$329 \leq \text{çıkış momenti} \leq 331$

Tablo 5. Seçilen ağırlık değerleri

Çıkış Değeri	Ağırlık Değeri (Weight)
Stator dışlarındaki akı yoğunluğu (<i>Tesla</i>)	(W_1) = 1
Verim (%)	(W_2) = 5
Vuruntu momenti (<i>Nm</i>)	(W_3) = 1
Çıkış momenti (<i>Nm</i>)	(W_4) = 1

Tablo 6. Amaç fonksiyonları ve optimum amaç değerleri

Çıkış Değeri (Y_i)	Amaç Fonksiyonu (G_i)	Optimum Amaç Değeri ($G_{i(opt)}$)
Stator dışlarındaki akı yoğunluğu	$G_2 = 1 + (flx.den - 1.4) * 9/0.3$	$G_{1(opt)} = G_1 _{flx.den=1.4} = 1$
Verim	$G_2 = 1 + (eff - 90) * 9/10$	$G_{2(opt)} = G_1 _{eff=100} = 10$
Vuruntu momenti	$G_3 = 1 + (cogg) * 9$	$G_{3(opt)} = G_3 _{cogg=0} = 1$
Çıkış momenti	$G_4 = 1 + (torq - 329) * 9$	$G_{4(opt)} = G_4 _{torq=330} = 10$

Tablo 8. Parametrelerin algoritma tarafından seçilen değerleri ve analiz sonuçları

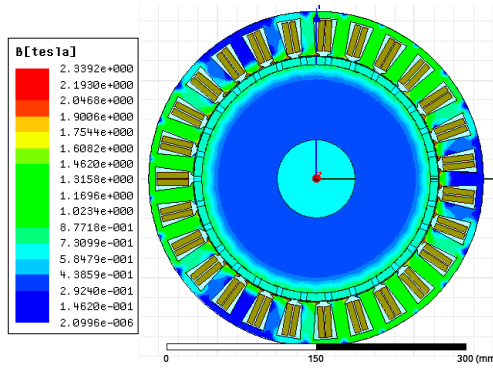
	Birim	Algoritma tarafından seçilen değer
Hava aralığı (g)	mm	1.0255
Mıknatıs kalınlığı (lm)	mm	7.967
Mıknatıs doluluk oranı (emb)	-	0.766
Oluk açıklığı (Bs0)	mm	7.514
Oluk uzunluğu (Hs2)	mm	34.584
	Birim	RMxpirt-Analiz Sonucu
Verim	(%)	95.08
Çıkış momenti	(Nm)	329.675
Vuruntu momenti	(Nm)	0.00055
Stator dişlerindeki akı yoğunluğu	(T)	1.57

Algoritma, belirlenen maksimum iterasyon sayısında çalışarak toplam maliyet fonksiyonun minimum olduğu iterasyondaki giriş parametrelerinin değerlerini optimum giriş değerleri olarak belirlemektedir. Beş girişli dört çıkışlı bir YMSM'nin Çok Amaçlı Optimizasyon analizi Şekil 5'te genel olarak ifade edilmiştir.

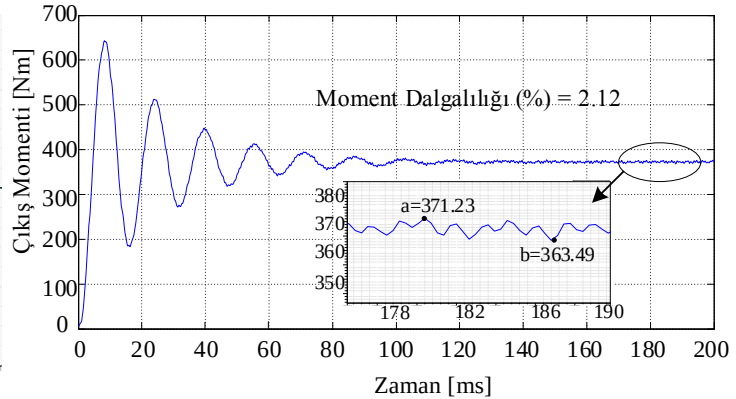
Şekil 5'teki, optimizasyon aracına; ağırlık değerleri (W_1, W_2, W_3, W_4), amaç fonksiyonları (G_1, G_2, G_3, G_4), optimum çıkış değerindeki amaç fonksiyonlarının değerleri ($G_{1(opt)}, G_{2(opt)}, G_{3(opt)}, G_{4(opt)}$) ve iterasyon sayıları girilir. Optimizasyon aracı, giriş parametrelerini iterasyon sayısı kadar Tablo 2'de belirtilen aralıklarda değiştirerek; maliyet fonksiyonları ($cost_i$) ve toplam maliyet fonksiyonunu (total cost) kendi içerisinde hesaplar. Maksimum iterasyon sayısına ulaşıldıktan sonra optimizasyon işlemini bitirir. Optimizasyon aracı her iterasyonda hesapladığı toplam maliyet fonksiyonu değerleri (total cost) içerisinde minimum toplam maliyet değerinin sağlandığı iterasyonu dikkate alarak; bu iterasyonda kullandığı giriş parametre değerlerini optimum giriş değerleri olarak seçmektedir. Analizde optimizasyon algoritması olarak Genetik Algoritma seçilmiştir. Analiz sonuçlarına göre optimizasyon algoritmasının belirlediği parametreler ve bu değerlere bağlı performans değerleri Tablo 8'de verilmiş ve elde edilen tasarıma ait stator ve rotor geometrisi Şekil 6'da gösterilmiştir.

3. Maxwell 2D Analiz Sonuçları

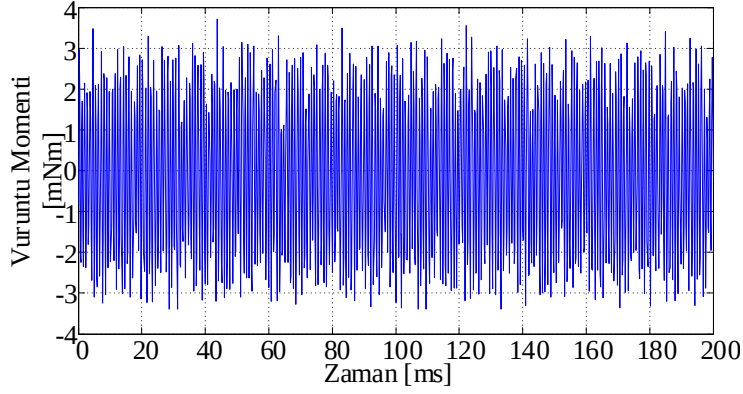
ANSYS@Maxwell programının RMxpirt bölümünde tasarlanan 27 oluklu-30 kutuplu YMSM programın 2D bölümünde; çıkış momenti, vuruntu momenti ve akı dağılımı açısından analiz edilmiş ve analiz sonuçları ilgili şekillerde gösterilmiştir. Asansör uygulamaları için tasarlanan elektrik motorları performans açısından değerlendirilirken öncelikli olarak önem verilen ölçütlerin; yüksek verim, düşük vuruntu momenti, stator akı yoğunluğunun 1.8 Tesla'yı aşmaması ve lineer çıkış momenti (düşük moment dalgalılığı) olarak sıralandığı belirtilmişti. Bu sebeple analiz sonuçlarının önemi belirtilen performans ölçütlerine göre değerlendirilmesi gerekmektedir. Şekil 7'de YMSM'ye ait alan dağılım haritası görülmektedir. Akı yoğunluğu dağılımı motor genelinde ortalama 1,65 Tesla civarındadır. Vuruntu momenti, çıkış momentinin dalgalılığını doğrudan etkilediği için olabildiğince düşük olması istenmektedir. Şekil 9 incelendiğinde vuruntu moment dalgalılığının düşük olduğu görülmektedir. Üretilen çıkış momentinin grafiği ise Şekil 8'de verilmiştir.



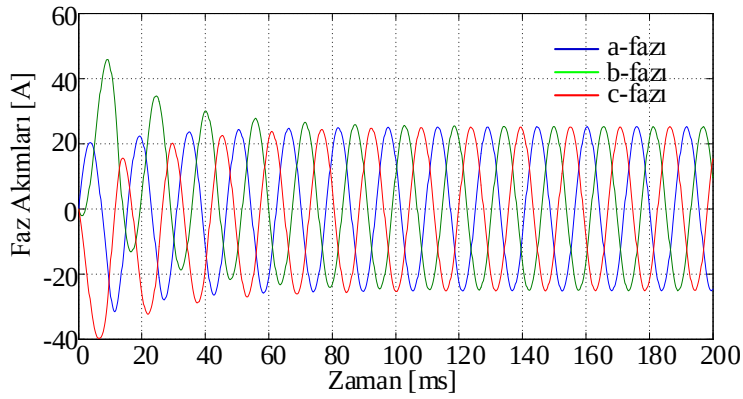
Şekil 7. Manyetik akı yoğunluğu dağılımı



Şekil 8. Çıkış momenti ve moment dalgalılığı analiz sonucu



Şekil 9. Vuruntu momenti analiz sonucu



Şekil 10. Faz akımları

Çıkış momentinin moment dalgalılığı 8 Nm civarında çok düşük bir değere sahiptir. Motorun tam yükte çektiği faz akımları Şekil 10'da gösterilmiştir. Tüm analiz sonuçları değerlendirdiğinde performans açısından başarılı bir tasarıma ulaşıldığı görülmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada enerji verimliliği bağlamında; asansör uygulamaları için verimliliği oldukça düşük geleneksel dişli kutulu asansör sistemlerine alternatif olarak YMS motor tarafından sürülen yüksek verime sahip dişlisiz asansör sistemi önerilmiştir. 800 kg / 10 kişilik taşıma kapasitesine sahip dişlisiz asansör uygulaması için 27 oluklu 30 kutuplu bir YMS motor tasarlanmıştır. Tasarım sürecinde, performans değerleri üzerinde etkisi önemli olan; hava aralığı, mıknatıs kalınlığı, mıknatıs doluluk oranı, oluk açıklığı ve oluk uzunluğu değişkenleri parametrik analiz ve çok amaçlı optimizasyon yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve tasarım bu değerler doğrultusunda optimize edilmiştir. Sonuç olarak % 95.08 oranında verimlilik ile performans açısından iyi bir tasarım elde edilmiştir.

Kaynaklar

- [1] Fichoux RL, Caricchi F, Crescimbeni F ve Honorati O. Axial-Flux Permanent-Magnet Motor for Direct-Drive Elevator Systems Without Machine Room. IEEE Transactions on Industry Applications; 2001; 37(6): 1693-1701.
- [2] Du ZS ve Lipo TA. High Torque Density and Low Torque Ripple Shaped-Magnet Machines Using Sinusoidal Plus Third Harmonic Shaped Magnets. IEEE Transactions on Industry Applications; May-June 2019; 55(3): 2601-2610.
- [3] Guo L, Xia C, Wang H, Wang Z ve Shi T. Improved equivalent magnetic network modeling for analyzing working points of PMs in interior permanent magnet machine, Journal of Magnetism and Magnetic Materials; 2018; 454: 39-50.
- [4] Wang JH, Tan FW ve Jin RL. Research on Low-speed Gearless Permanent Magnet Synchronous Motor for Elevator Drive. International Conference on Electrical Machines and Systems; 27-29 Sept. 2005; Nanjing, China. 454-459.
- [5] Jahns TM. The Expanding Role of PM Machines in Direct-Drive Applications. Wisconsin Electric Machines and Power Electronics Consortium; 23-25 Oct. 2007; Madison, Wisconsin, USA. 1-6.

- [6] Zhongshu L, Aijun Z, Lie M ve Siyang L. Design of Line-Start Low Speed and High Torque PMSM for Gearless Drive System. International Conference on Electrical Machines and Systems; 20-23 Augst. 2011; Beijing, China. 1-4.
- [7] Wang G, Zhang G, Yang D ve Xu D. Robust Low-Cost Control Scheme of Direct-Drive Gearless Traction Machine for Elevators Without a Weight Transducer. IEEE Transactions on Industry Applications; May/Jun. 2012; 48(3): 996-1005.
- [8] Wang G, Wang B, Li C ve Xu D. Weight-transducerless control strategy based on active disturbance rejection theory for gearless elevator drives. IET Electric Power Applications; 2017; 11(2): 289-299.
- [9] Cicel   S, Albin L, Parasiliti F ve Villani M. Design of a Permanent Magnet Synchronous Motor with Grain Oriented Electrical Steel for Direct-Drive Elevators. 20th International Conference on Electrical Machines; Sept. 2012; Sydney, Australia. 1256-1263.
- [10] Yetis H, Boztepel   H, Yasa Y ve Mese E. Comparative design of direct drive PM synchronous motors in gearless elevator systems. 3rd Int. Conf. on Electric Power and Energy Conversion Systems; Oct. 2013; Istanbul, Turkey. 1-5.
- [11] Wang G, Xu J, Li T, Zhang G, Zhan H, Ding L ve Xu D. Weight-Transducerless Starting Torque Compensation of Gearless Permanent-Magnet Traction Machine for Direct-Drive Elevators. IEEE Transactions on Industry Applications; Sept. 2014; 61(9): 4594-4604.
- [12] Bakhtiarzadeh H, Polat A ve Ergene L T. Design and Analysis of a Permanent Magnet Synchronous Motor for Elevator Applications. Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics Optimization of Electrical & Electronic Equipment Conference; May 2017; Brasov, Romania. 293-298.
- [13] EN81-1 European Elevator Standards. Brussel, Belgium: CEN, 1998.
- [14] Zheng P, Zhao J, Han J, Wang J, Yao Z, ve Liu R. Optimization of the Magnetic Pole Shape of a Permanent-Magnet Synchronous Motor. IEEE Transactions on Industry Applications; Jun. 2007; 43(6): 2531-2533.
- [15] Bayındır R, Ocak C ve Topaloğlu   . Investigation of the Effect of Magnet Thickness on Output Power and Torque of PM BLDC Machines Using Parametric Approach Method. International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives; May 2011; Torremolinos, Spain. 1-4.
- [16] Wang X, Wang Q, ve Wang Y. Analysis of the Magnetic Field of the Six-phase Disc PMSM and Effect of Permanent Magnet Thickness on the Air Gap Magnetic Field. 2008 World Automation Congress; 28 Sept.-2 Oct. 2008; Hawaii, HI, USA. 1-4.
- [17] Ma J, Wu L ve Zhu Z Q. Effect of Magnet Thickness on Electromagnetic Performance of High Speed Permanent Magnet Machines. IEEE International Electric Machines and Drives Conference; 21-24 May 2017; Miami, Florida, USA. 1-7.
- [18] Sharkhl S, M, Qazalbash A, Irenjil N T, ve Wills R G, Effect of Slot Configuration and Airgap and Magnet Thicknesses on Rotor Electromagnetic Loss in Surface PM Synchronous Machines. International Conference on Electrical Machines and Systems; 20-23Aug. 2011; Beijing, China. 1-6.
- [19] Ayaz M, Tezcan M, Mese E ve Yılmaz K. Parametric Optimization of Permanent Magnet Synchronous Machines. 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology; 25-27 Oct. 2018; Istanbul, Turkey. 1-6.
- [20] Yetis H, Mese E ve Biyikli M. Design and Comparison of Ferrite Based IPM and NdFeB Based SPM Synchronous Motors for Gearless Elevator Systems. International Conference on Electrical Machines; 3-6 Sep.2018; Alexandroupoli, Greece. 1-7.
- [21] Ilka R, Alinejad-Beromi Y ve Yaghoobi H. Cogging torque reduction of permanent magnet synchronous motor using multi-objective optimization, Mathematics and Computers in Simulation; 2018; 153: 83-95.
- [22] Sudhoff S D, Cale J, Cassimere B ve Swinney M. Genetic Algorithm Based Design of a Permanent Magnet Synchronous Machine. IEEE International Electric Machines and Drives Conference; 15-18 May 2005; San Antonio, TX, USA. 1011-1019.
- [23] Cvetkovski G, ve Petkovska L. Efficiency Maximisation in Structural Design Optimisation of Permanent Magnet Synchronous Motor. International Conference on Electrical Machines; Sep. 2008; Vilamoura, Portugal. 1-6.
- [24] Duan Y, Harley R G, ve Habetler T G. Multi-objective Design Optimization of Surface Mount Permanent Magnet Machine with Particle Swarm Intelligence. IEEE Swarm Intelligence Symposium; Sep. 21-23 2008; St. Louis MO USA. 1-5.
- [25] Sar   A, Dubas F, ve Espanet C. Multi-Objective Design Optimization of PMSM for PEM Fuel Cell Air-Circuit with PSO Algorithms. IEEE International Electric Machines and Drives Conference; 3-6 May 2009; Maimi, Florida, USA. 1360-1367.
- [26] Lopez C A, Strangas EG. Performance Optimization of PMSM with Torque Ripple Reduction. International Conference on Electrical Machines; Sep. 2018; Alexandroupoli, Greece. 1-7.
- [27] Holland J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Detroit, USA: University of Michigan Press, 1975.
- [28] Tufenkci S, Senol B ve Alagoz BB. Stabilization of Fractional Order PID Controllers for Time-Delay Fractional Order Plants by Using Genetic Algorithm. International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing; 28-30 Sept. 2018; Malatya, Turkey. 1-6.
- [29] Sooriyakumar G, Perryman R ve Dodds SJ. Design Optimisation For Permanent Magnet Synchronous Motors Using Genetic Algorithm. Universities Power Engineering Conference; 31 Aug.-3 Sept. 2010; Cardiff, Wales, UK. 1-6.
- [30] Gao J, Dai L ve Zhang W. Improved genetic optimization algorithm with subdomain model for multi-objective optimal design of SPMSM. CES Transactions on Electrical Machines and Systems; March 2018; 2(1): 160-165.
- [31] User's guide Maxwell 2D v15. ANSYS, 2016.

Elektrikli Araçlar İçin Eksenel Akılı Çift Rotorlu Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Analizi

Mehmet POLAT^{1*}, Rüya AKINCI²

¹ Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

^{1*} mpolat@firat.edu.tr, ² ruyyaakinci@gmail.com

(Geliş/Received: 23/10/2019;

Kabul/Accepted: 17/06/2020)

Öz: Son yıllarda elektrikli araçlara olan ilgi giderek artmaktadır. Bunun en önemli sebepleri; büyük yerleşim merkezlerinde araba yoğunluğu nedeniyle oluşan çevre kirliliği, fosil yakıtların tükenmesi, dünyanın enerji kaynağı sıkıntısına girmesi, verimli ve maliyet etkin elektrikli motor ve sürücü teknolojisindeki ilerlemeler, elektrik enerjisinin depolanmasını sağlayan bataryalardaki gelişmeler ve sürüş güvenliğinin ön plana çıkmasıdır. Elektrikli araçlarda enerji verimliliğini sağlayan en önemli etkenlerden biri motordur. Son yıllarda elektrik makineleri alanında baskın bir şekilde hâkim hale gelen sürekli mıknatıslı senkron motor sınıfından olan eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motor, diğer motor türlerine göre birçok avantaja sahiptir. Uyarma alanı olmadığından rotor kayıplarının ciddi oranda azaltılması sebebiyle verimi daha yüksektir. Ayrıca eksenel akının vermiş olduğu en büyük avantajlardan birisi yüksek güç yoğunluğudur. Kilogram başına düşen enerji (watt/kg) miktarı diğer motor türlerine kıyasla oldukça iyi seviyededir. Bu makalede öncelikle seçilen Eksenel Akılı Çift Rotorlu Sabit Mıknatıslı Senkron Motor (TORUS Tipi) hakkında literatür taraması yapılmıştır. Literatür taraması ışığında elde edilen bilgilerle TORUS motor için bir analitik model oluşturulmuştur ve bu model optimizasyon kodlarına dökülerek Genetik Algoritma yöntemi ile optimizasyonu yapılmıştır. Yapılan optimizasyon çalışmasının çıktıları Ansys Maxwell-3D programı yardımıyla analiz edilerek doğrulanmış ve yaklaşık %95'lik doğruluk oranı elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Eksenel Akılı Çift Rotorlu Sabit Mıknatıslı Senkron Motor (TORUS Tipi), Elektrikli Araç, Genetik Algoritma, Optimizasyon, Ansys-Maxwell 3D.

Design And Analysis Of Axial Flux Double Rotor Permanent Magnet Synchronous Motor For Electric Vehicles

Abstract: In recent years there has been increasing interest in electric vehicles. The most important reasons; due to the vehicle density in large settlements resulting environmental pollution, fossil depletion of fuel to enter the world's energy supply shortages, efficient and cost advances in efficient electric motors and drive technology, advances in battery enables the storage of electrical energy and the prominence of driving safety. One of the most important factors that provide energy efficiency in electric vehicles is the motor. The axial flux permanent magnet synchronous motor, which is the permanent magnet synchronous motor class that has dominated the field of electrical machines in recent years, has many advantages over other types of motors. Since there is no excitation field, its efficiency is higher due to the serious reduction of rotor losses. In this article, a literature review was made about the selected Axial Flux Double Rotor Permanent Magnet Synchronous Motor (TORUS Type). Analytical model to literature TORUS motor scan using information obtained in the light into this model are optimized code optimization genetic algorithm method. The output of the optimization study was verified by analyzing with the help of Ansys Maxwell-3D program and accuracy rate of approximately 95% was obtained.

Key words: Axial Flux Double Rotor Permanent Magnet Synchronous Motor (TORUS Type), Electric Vehicles, Genetic Algorithm, Optimization, Ansys-Maxwell 3D.

1. Giriş

Eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) makineler yapı itibari ile disk şeklindedir. Temelleri 1831 yılında Faraday tarafından tasarlanan makineye dayanmaktadır. 1837 yılında ise Davenport tarafından radyal akılı elektromanyetik motorun patenti alınmıştır. 1889 yılında ise Nicola Tesla ilk disk şeklindeki elektromanyetik motorun patentini almıştır. Fakat sabit mıknatıslı elektrik makinelerinin gelişimi mıknatıs teknolojisindeki gelişmelere paralel olmuştur. 1931 yılında Alnico'nun keşfedilmesi, 1950 yılında baryum ferritin ve 1980'lerde özellikle neodyum demir bor materyalinin keşfedilmesi sabit mıknatıslı motorların tekrar gündeme gelmesine neden olmuştur. Ayrıca 80'li yıllardan sonra neodyum mıknatıslarının gelişimi ve fiyatlarının uygun hale

gelmesiyle öncelikli olarak radyal akılı sabit mıknatıslı makineleri geliştirmiş ve son 10 yıldır ise EASM makineler önemli bir çalışma konusu haline gelmiştir [1].

Elektrikli araçlara olan ilginin artışı araştırmacıların elektrik makinelerinde yenilikçi araştırmalara yönelme noktasında motivasyonunu arttırmaktadır. İşte bu noktada son zamanlarda elektrik makineleri alanında ön plana çıkan sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM) sınıfından olan eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motor (EASMSM), diğer motor türlerine göre birçok avantaja sahiptir. En temel iki avantajı, verimlerinin daha yüksek olması ve yüksek güç yoğunluğudur. Bunların dışında kilogram başına düşen enerji (watt/kg) miktarı diğer motor türlerine kıyasla oldukça iyi seviyededir. Konvansiyonel radyal akılı motorlara göre daha az çekirdek malzemelerine ihtiyaç duymaktadırlar. Titreşim ve gürültü seviyesi bakımından da EASMSM motorların üstünlüğü bulunmaktadır. Dahası kolaylıkla ayarlanabilen hava aralığına sahiptirler. Doğrudan sisteme entegre olabilmesi de elektrikli araçlarda kullanım açısından önemli bir özelliktir. Özellikle teker içerisine yerleştirilmiş motor bulunan bir elektrikli araç tasarlayacak tasarımcılar için biçilmiş kaftandır denilebilir. Bir kaç Watt değerinden MW'lar seviyesine kadar EASMSM tasarımı yapılabilir. Bu motorların çıkış gücü arttıkça, rotor yüzey bağlantısı ile shaft arasındaki oran azalmaktadır. O nedenle daha yüksek güçlerin tasarımı da güçleşmektedir. Ancak bu da çoklu disk yapısı ile çözümlenmektedir.

Bu çalışmada, çift rotorlu EASMSM motor tasarlanmıştır bu motor literatürde TORUS motor olarak adlandırılmaktadır. Bu motorun en belirgin özelliği düşük hızlarda bile yüksek moment üretebilmesidir. Ayrıca verimleri de diğer motorlara göre daha yüksektir. Standart teker motor verimleri %92.5-%95 aralığında iken TORUS motorun verimi %95- %98 aralığında olabilmektedir ayrıca standart tip teker motorlara göre yaklaşık %50 oranında daha hafiftir [2]. Ülkemiz elektrikli araç üretimi girişiminde bulunmaktadır. Yapılacak elektrikli aracın bileşenlerinin yerli ürün olması gerekmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda günümüz zamanında en verimli motorların EASMSM olduğu görülmektedir.

2. Literatür Çalışması

Mohammad Ardebili ve Narges Taran' ın yaptığı çalışmada düşük güçte bir Eksenel Akı Sürekli Mıknatıslı (EASM) senkron jeneratörü çıkış gücü ve 1 kW ve 100 d / dak' lık nominal hız genliği ile verimlilik ve güç yoğunluğunun çok amaçlı optimizasyonunu ortaya koymaktadırlar. Öncelikle, farklı EASM makine topolojilerinin kısa bir incelemesi yapılmış ve mevcut uygulama için en uygun yapı olarak çift taraflı oluklu stator (TORUS-S) yapısı seçmişlerdir. Optimizasyon problemi genel boyutlandırma denklemleri kullanılarak formüle etmiş ve daha sonra genetik algoritma (GA) kullanmışlardır. Yenilikçi olarak, bu çalışma, objektif işlevlerin önceliğini belirlemek için bir araç sunan özgün katkı olarak yeni bir en iyileme işlevi sunmaktadır. Bu çalışma fonksiyonu, iki değişkeni içerir ve bunların her ikisinde de bir artış, objektif fonksiyonların birinde diğerinden daha fazla iyileşmeye yol açar. Bu yöntemin esası, özellikle rüzgâr türbinlerinde kullanılan jeneratörlerdeki objektif fonksiyonların önceliklendirilmesi gereken durumlarda özellikle hissedilir, bu da sadece yüksek bir verimlilik değil, aynı zamanda düşük bir ağırlık ve hacim de sahip olmalıdır. Son olarak, sonuçlar üç boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile doğrulanmışlardır [3].

Harold Saavedra ve ekibi ise beş fazlı EASMSM tasarlamış ve motorun geometrik, elektrik ve mekanik parametreleri EASMSM'a dayalı yineleme yöntemi uygulayarak hesaplayıp GA ile optimizasyon işlemi gerçekleştirmişlerdir. Bu optimizasyon işleminde güç yoğunluğu ve verim fonksiyonlarını dikkate alarak tasarım yapmışlardır [4].

Peter Virtic ve ekibi çekirdeksiz tek stator ve mıknatıslı dış çift rotorlu senkron makineyi tasarım optimizasyonu, evrimsel optimizasyon kullanılarak gerçekleştirmiştir. GA ve objektif analitik değerlendirme ile fonksiyonlar sekiz değişken geometri parametresi temelinde, beş maksimumu belirlemek için objektif fonksiyonlar optimize edilmiştir. Hacim, moment yoğunluğu, ağırlık, moment yoğunluğu, en küçük hacim ve Newton-metre başına kalıcı mıknatısların ağırlığı, newton-metre başına minimum makine fiyatına göre nominal moment için optimizasyon yapılmış ve bir prototip oluşturulmuştur [5].

Solmaz Kahourzade ve ekibi EASMSM'u GA tabanlı boyutlandırma denklemleri SEY ve sonlu hacim analizi ile iki rotorlu senkron motorun ön tasarımını optimize etmişlerdir. GA Maksimum güç yoğunluğu ve en iyi ısı iletimi sonuçlarının iyileştirmek için kullanmışlardır [6].

Naghi Rostami ve ekibi eksenel akılı senkron generatör (EASG) için minimum malzeme ve maliyet durumu için en uygun tasarımı GA yardımıyla yapmışlardır. Daha sonra tasarımı doğrulamak amacıyla generatörün 3 boyutlu eleman analizini gerçekleştirmişlerdir [7].

B. Yousefi ve ekibi yaptıkları çalışmada 1.5 Hp 50 V 'luk EASMSM'un tasarımını yapmışlardır. Bu tasarımı yaparken en iyi yapay zeka yöntemlerinden biri olan GA optimizasyon yöntemini kullanmışlardır. Bu

çalışma sonunda optimizasyon ve simülasyon sonucu karşılaştırılmış ve motorun güç yoğunluğunun m^3 başına 0.355 watt olduğu gösterilmiştir [8].

Chang-Chou Hwang ve ekibi SEY dayanan dahili çekirdeksiz bir stator ve harici çift rotorlu SM eksenel akıllı motoru tasarlamışlardır. Motoru maximum ortalama moment, minimum ortalama moment için optimum tasarımı oluşturmuşlardır. Tasarım kriterlerini en az moment dalgalılık oranına göre en iyi kombinasyonu belirleyerek tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra optimize edilen motorun parametreleri 3D SEY analizi ile elde edilen parametreleri karşılaştırmış ve iki tarafın parametrelerinin uygun olduğunu görmüşlerdir [9].

M. Ardebili ve ekibi çift hava aralığı konfigürasyonuna sahip EASMSM'u yüksek güç yoğunluğu elde etmek için tasarlamış ve üretmişlerdir. Bu motorun tasarım denklemlerini incelemişlerdir. Ardından güç yoğunluğunu arttırmak amacıyla GA dayalı optimum bir tasarım sunmuşlardır. Bu optimizasyonu göstermek için iki boyutlu SEY kullanılmış ve sonuçları yapılan çalışmada sunulmuştur. Optimizasyon tekniklerine dayanarak 1 kW, 48 V, 50 Hz, 4 kutup / 15 slotlu motoru tasarlayıp prototipini üretmişlerdir [10].

J.L. Hippolyte ve ekibi SMSM'u orjinal ve çok amaçlı bir optimizasyon tekniği kullanarak motor tasarımı yapmışlardır. Yapılan çalışma daha önceden geliştirilmiş algoritmaların daha da iyileştirilmiş halini kullanmışlardır. Bu algoritmaların verimi deterministik bir algoritma (SQP) ve bir referans çok amaçlı genetik algoritma (NSGA-II) ile karşılaştırılarak kanıtlamışlardır. Sunulan algoritma ilk olarak literatürden bir çalışma doğrultusunda doğrulanmıştır. İlk olarak slotsuz sürekli mıknatıs makinesinin boyutlandırılması. Daha sonra sürekli mıknatıslı bir motora uygulanan yöntemin deney sonuçları çok amaçlı bir bakış açısıyla vurgulanmıştır. Sürekli mıknatıslı motorlar problemi üzerine referans çoklu jenerasyon genetik algoritması NSGA-II' ye daha hızlı ve daha esnek bir alternatiftir. Bu çalışmanın ilk amacı mevcut mesafe tabanlı değerlendirme fonksiyonu ile karşılaştırmak için algoritma içinde çok amaçlı bir rekabet sürecini tasarlamaktır. İkinci amacı, algoritmanın eşzamanlı olmayan özelliklerinden yararlanarak eşler arası bir ağ üzerinde dağılımıdır [11].

Martin ve Richard çalışmalarında, bir dizi yöntemin doğrulanmasını, karşılaştırılmasını ve EASMSM'ların tasarımı ve analizi için teknikler açıklamıştır. Kompakt motor jeneratör setleri, VAWT' ler ve doğrudan sürücü uygulamaları için tekerlekli motorlar için elektromanyetik kullanımın özel bir odak noktası oluşturmuşlardır. Varsayımları değerlendirmek ve analitik yöntemlerin tahminlerini doğrulamak için SEY kullanmışlardır, dikkate alınan makinelerin elektromanyetik performansını tahmin ederek, deneysel testlerin sonuçları ve bu şekilde mevcut elektromanyetik alanları göstermektedirler. Bu çalışma, Spooner ve Chalmers'ın oluklu TORUS motorunun tasarımı ve analizi için bir dizi yöntem ve tekniğin türetilmesi, doğrulanması ve kıyaslanması ile başlamışlardır. Geliştirilen yöntemler ve teknikler daha sonra araştırmayla genişletilmiştir. Oluklu statora sahip EASMSM'ların tasarımı oluklu statorlu makineler için birleşik 2B analitik çözümden yararlanma prosedürü ile sarım geliştirilmiştir ve 40kW, 4500RPM jeneratör tasarımı için bu yaklaşım kullanılarak kompakt dizel motor jeneratör seti belirtmişlerdir. Yöntemler ve teknikler daha sonra daha da genişletilmiştir. Analitik, SEY ve deneysel yaklaşımların tüm yelpazesi gerçekleştirilerek bu yeni topoloji için kıyaslama yapılmıştır. Son olarak, farklı kutup şekilleri ve daha büyük spesifikasyonları da kapsayan VAWT jeneratörlerinin daha fazla araştırması yapmışlardır. Ayrıca, yeni EASMSM'lerin güneş enerjisiyle çalışan bir araba için bir tekerlek motoru olarak deneysel testi ve deneysel testi yapılmıştır. Bu çalışmada ele alınan EASMSM'ler sadelik, ekonomik ve montaj kolaylığı için tasarlanmıştır [12].

Christian DU-BAR yaptığı çalışmada, EASMSM'un analitik tasarımını ve SEY ile tasarımı birleştirmiştir. İlk etapta bu çalışmada iki farklı topolojinin dört farklı varyasyonu (iç rotor çift stator ve dahili statorlu çift rotor) gereksinimlere en uygun olanı ile karşılaştırılmış ve çok küçük yapısı nedeniyle stator çekirdeği oluklu olan çift rotorlu motor (YASA) seçilmiştir. Motor kutbu belirlenmiş elektromanyetik tasarım optimizasyonu oluşturulmuştur. Malzeme seçimi yapılmış SEY ile analizi gerçekleştirilmiştir. En son moment hız karakteristiğini incelemiş, tasarımı değerlendirmiş ve gelecekteki çalışmalar için önerilerde bulunmuştur [13].

Yee Pien Yang ve Guan Yu Shih dört tekerlekten çekişli bir elektrikli araç için bir EASM motorun en uygun tasarımı üzerinde çalışmalar yapmış ve önerilerde bulunmuşlardır. 3D manyetik devre modelini kullanarak motoru boyutlandırmak ve optimize etmek için kullanmışlardır. Ön tasarım için sistematik optimal tasarım süreci SEY ile doğrulandığı gibi çıkmıştır. Enerji verimliliği optimize edilerek %15 daha verimli hale getirilmiştir. Son olarak su soğutma kanalı operasyon sırasında suyun dağıtılmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, sıcaklık tepkisi ve kararlı durum sıcaklık dağılımları araştırılmış ve önerilen motorun sürekli bir sürüş modu için güvenli bir şekilde çalıştırılabileceğini kanıtlamışlardır [14].

Amin Mahmoudi ve ekibi çift rotorlu EASMSM'un iki farklı topoloji olan TORUS ve AFIR arasında bir karşılaştırma yapmışlardır. Slotlu ve slotsuz tipleri incelenmiştir. SEY kullanarak analiz yapılmıştır. Bu çalışmalarının sonucunda TORUS motor yüksek akım yoğunluğunda ve düşük elektrik yükünde yüksek güç yoğunluğunu göstermektedir. AFIR motor düşük akım yoğunluğunda ve düşük elektrik yükünde yüksek güç

yoğunluğunu göstermektedir. Slotsuz TORUS ve AFIR AFPM makineleri slotlu modellerine göre daha düşük moment ve daha düşük moment dalgalanmasına sahip olduğunu söylemişlerdir [15].

S. Huang ve ekibi radyal akılı motorlar (RAM), enine akılı motorlar (EAM) ve eksenel akılı motorlar (EAM) hakkında araştırma yapmışlar. Araştırmalar sonunda 200 HP, 6 kutuplu 1200 dev/dak hızındaki motorun güç / moment yoğunluğunu, verimini, ısı yayılımını, ağırlık ve kullanım faktörleri açısından analizlerini gerçekleştirerek EASM motor üretmişlerdir. Oluklu ve oluksuz TORUS topolojilerinin diğer radyal ve eksenel akı topolojilerinden daha yüksek güç veya moment yoğunluk oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir [16].

Khawaja M. Rahman ve ekibi elektrikli araçlar için özel olarak EASM motor tasarlamış aynı zamanda bu motorun termal performansını arttırmak amacıyla soğutucu sisteminde tasarlayarak patent almışlardır. Motor üretimini gerçekleştirerek motor test sürüşlerinde 1000 milden fazla sürülmüştür ve mükemmel bir performans göstermiştir. Bu makalede tartışılan tekerlek motoru tahrikinin ölçülen performansları, sistem gereksinimleri tarafından belirlenen tasarım şartlarını karşıladı, böylece EASM makinelerinin doğrudan tahrikli otomotiv uygulamaları için güçlü adaylar olarak görülmesi gerektiğini doğruladı [17].

M. Aydın ve ekibi EASMSM'lar üzerine çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. EASM motorların temel farklılıkları üzerinde durarak bu konuda ayrıntılı ve eksiksiz bir referans bölümü oluşturmuşlardır [18].

Mariusz Jagiela ve ekibi çalışmalarında, çıkıntılı kutuplu yeni bir disk tipi tek fazlı sabit mıknatıslı motor üzerine çalışmışlardır. Rotor diskindeki mıknatısların belirli bir konfigürasyonları nedeniyle, motor bir vuruş momentini geliştirmişlerdir. Aynı zamanda mevcut dalga biçimini değiştirerek sabit ve yumuşak bir moment üretilmişlerdir. Gerekli akım dalga biçimini belirlemek için 3 boyutlu SEY kullanmışlardır [19].

Metin Aydın ve ekibi oluklu ve oluksuz TORUS motor üzerine çalışmışlardır. TORUS motorun mıknatıslarını eğimli hale getirerek ve sargı yapısını değiştirerek makineleri moment kalitesi açısından karşılaştırmaları gerçekleştirmişlerdir SEY ve 3D Analizlerini gerçekleştirmişlerdir [20].

J.W.K.K. Jayasundara ve ekibi günümüzde elektrikli araç gereksinimini ve bu araçların motorundan beklenen kriterleri araştırmışlardır ve bu kriterlere en uygun motoru tasarlamışlardır [21].

DENG Qiu-ling ve ekibi elektrikli araç motorları üzerine araştırmalar yapmışlardır. Araçlar için en uygun motorun EASM motorlar olduğunu belirlemişlerdir. 6.8 KW'lık EASM motorun elektromanyetik tasarımı, analitik yöntem kullanılarak gerçekleştirmişler ve sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulamışlardır [22].

Amin Mahmoudi ve ekibi EASM senkron makinenin optimize edilmiş tasarımı, performans analizi ve motor yüklü durumdayken motorun ısı analizini gerçekleştirmişlerdir [23].

Florence Libert tez çalışmasında atık su arıtımı için kullanılan mikser için 4.4 kW ve 50 rpm hızında EASM tipi olan TORUS motorunun tasarımını yapmıştır. Motorun tasarımı SEY analizi ve simülasyon sonuçlarına bağlı kalınmıştır. EASM motorun sargıları üzerinde gerekli çalışmaları yaparak konsantre sargı kullanmıştır. Tasarladığı motor diğer muadillerine kıyasla yaklaşık %50 oranında daha hafif olmuştur [24].

Thales A. C. Maia ve ekibi yenilenebilir enerji kaynakları hakkında araştırma yapmışlardır. Bu araştırmalar sonucunda rüzgâr enerjisi üzerine yoğunlaşarak TORUS generatör tasarlanmıştır. Motor tasarım aşamalarında optimizasyon ve termal analiz yapmışlardır [25].

Neethu S. Ve ekibi kan pompası uygulaması için EASMSM'un optimal tasarımını ve tasarımın geliştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Motorun 3D SEY ile analizini gerçekleştirmişlerdir [26].

M. Fasil ve ekibi iki tekerlekli bir araç için çekiş motorunu tasarlamışlardır. Motor tipi olarak EASM'lı fırçasız dc motoru seçmişlerdir. Bu çalışmada daha önce yapılan çalışmaların sentezi yapılmış ve tasarlanacak motor için SEY analizi gerçekleştirilmiştir [27].

S. Asghar Gholamian ve EASMSM'lar için iki topoloji olduğundan bahsetmişlerdir. Bunlar oluklu ve oluksuz statorlu olan motor tipleridir motor boyutları denklemlerle belirlenmiş oluklu ve oluksuz olan motor tipleri karşılaştırılmıştır. Ve sonuç olarak yüksek güçlü oluksuz EASMSM anlatılmıştır [28-29].

David A. Howey yaptığı tez çalışmasında, EASMSM'un termal analizi üzerine çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Tez çalışmasında doğru termal analizi gerçekleştirmek için maksimum güç yoğunluğunu doğru tahmin etmenin önemli olduğuna değinmiştir. Stator konvektif ısı transferi en önemli ve en az araştırılan ısı transfer mekanizmalarından biri olduğunu ve bu nedenle mevcut çalışmanın odak noktası olduğunu anlatmıştır ve bu konu hakkında çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Çalışmalarını analizlerle desteklemiştir [30].

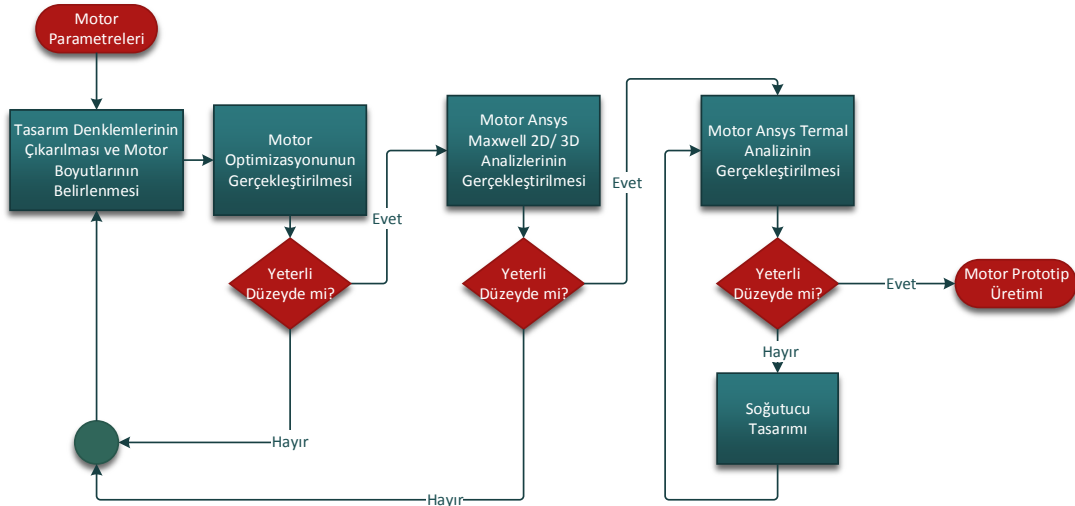
Rong-Jie Wang tez çalışmasında hava soğutmalı EASM jeneratörünün, demirsiz bir stator ile tasarım optimizasyonu üzerine gerçekleştirmiştir. Çok boyutlu bir optimizasyon prosedüründe SEY çözümünü doğrudan birleştiren bir tasarım yaklaşımı geliştirmiş ve 300 kW 'lık (birleşik güç faktörü) EASM jeneratörünün tasarım optimizasyonuna uygulamıştır. Makinenin genel tasarım optimizasyonunu sağlamak için, soğutma kapasitesi, mekanik mukavemet ve eddy kaybı gibi farklı tasarım özellikleri de bu araştırmada incelemiştir [31].

JACEK F.GIERAS ve ekibi EASM motorlar üzerine çalışma yapmışlardır. EASM motorların güç yoğunluğu diğer motorlara göre daha fazla olduğu konusuna değinmişlerdir. Bu motorların hangi alanlarda

kullanıldığı hakkında bilgi toplamış ve bunu paylaşmışlardır. 2.7 kW'lık EASM motor tasarlayarak üretimini gerçekleştirmişlerdir [32].

3. TORUS Motorun Genetik Algoritma ile Optimizasyonu ve Tasarımı

Eksenel akılı motor tasarımı süreci ile SM motorlar ile aynı aşamalarda gerçekleşmektedir. Diğer motor tiplerinde olduğu gibi manyetik devre analizi ile başlamaktadır. Tasarlanacak olan motorun çalışacağı kriterler doğrultusunda ön boyutlar belirlenir. Tasarım kriterleri arasında motor gücü, çalışacağı hızlar istenen verim ve maliyet gibi birçok parametrenin düşünülmesi gerekmektedir. SM motor tasarım süreçleri EA motorlar içinde tekrarlanması gerekmektedir. Şekil 1'de EA motor tasarım aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 1. Eksenel akılı motor tasarım aşamaları.

Gelen tasarım bilgileri doğrultusunda manyetik devre üzerinden bir model oluşturulur, oluşturulan model üzerinden kriterler ve kısıtlamalar üzerine bir optimizasyon yapıldıktan sonra ön tasarım çalışması ortaya çıkar. Bu ön tasarım çalışması SEY ile elektromanyetik problem çözümü yapabilen 2D veya 3D programları ile performans eğrileri çıkartılır. Analiz çıktıları istenilenleri karşılamıyorsa yeniden devre modeli ve optimizasyon adımları tekrar incelenmelidir. Elektromanyetik tasarım çalışmalarını geçen tasarım yapısal analiz adımına geçebilir. Genel kullanımları direk sürüş olan EA motorlar için yapısal analiz çalışmaları önem arz etmektedir. Yapısal analiz aşamasını geçen motor tasarımı termal analiz programları kullanılarak ısı analizleri yapılır. Bu adımı geçemeyen tasarım için tekrar elektromanyetik tasarım tekrarlanmalıdır. EA motor tasarım süreçlerinin tüm aşamaları bitirildiğinde nihai tasarım elde edilir. Uygulamaya göre motor topolojisi belirlendikten sonra motor tasarımı için denklemler oluşturulmalı ve motor boyutlandırma problemleri çözümlenmelidir.

3. 1. Tasarım Denklemlerinin Çıkarılması

Tasarımın birinci adımı olan tasarım denklemlerinin çıkartılması bölümü aşağıda ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Şekil 2'de tasarlanacak olan TORUS motorun genel hatlarını gösteren Solidworks çizimi yer almaktadır. Bu çizimdeki tanımlamalar yer alarak gerekli denklemler çıkarılmıştır.

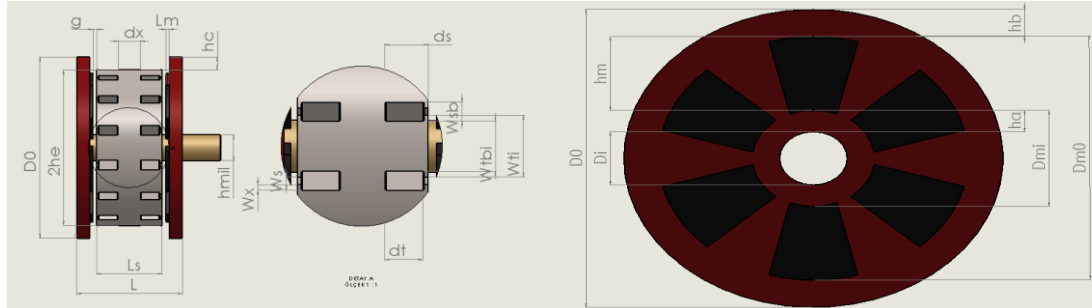
TORUS motorlarda motorun iç çapı ile dış çapı arasında belli bir oran vardır. Bu oran Denklem 1'de ile ifade edilmiştir. Bu denklemde Lamda değeri sabit ve $\frac{1}{\sqrt{3}}$ e eşittir.

$$D_i = \frac{D_o}{\text{Lamda}} \quad (1)$$

Şekil 2'de mıknatıs çapı D_{mo} ile isimlendirilmektedir. Ve mıknatıs çapının boyutunu belirleyen eşitlik Denklem 2'de verilmiştir.

$$D_{mo} = D_o - 2h_b$$

(2)



Şekil 2. Torus motor solidworks çizimi

A_g hava aralığı alanı Denklem 3 ile hesaplanmaktadır,

$$A_g = \frac{\pi(1+\alpha)}{2N_{pm}}(D_0^2 - D_i^2) \quad (3)$$

Denklem 4-7 sırasıyla, L_y statorun boyunduruk uzunluğunu, L_{cs} stator yüksekliğini, L_s toplam stator yüksekliğini ve L motorun paket boyunu vermektedir,

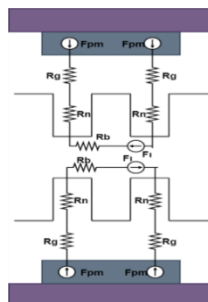
$$L_y = \frac{\tau_p B_{g0}}{2B_{max}} \quad (4)$$

$$L_{CS} = \frac{B_{g0} \pi D_0 (1 + \text{Lamda})}{B_{CS}^4 p} \quad (5)$$

$$L_s = L_{cs} + 1.6W_{cui} \quad (6)$$

$$L = 2L_r + 2g + 2L_m + L_s \quad (7)$$

Motorun manyetik devre denklemlerini çıkarmak için ise Şekil 3’de yer alan manyetik eşdeğer devre kullanılmıştır.



Şekil 3. Manyetik devre şeması.

Manyetik akı yoğunluğunu oluşturan manyetik alan şiddetidir. Manyetik akı yoğunluğu B (weber/m² veya Tesla) malzeme geçirgenliğine bağlıdır. Malzeme geçirgenliği μ_m ile ifade edilir ve birimi Henry/metre(H/m)'dir. Malzeme geçirgenliğinin havaya göre oranı bağlı geçirgenlik μ_r ile ifade edilir. Ortamın geçirgenliği $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m'dir. Bu parametrelerin eşitlikleri Denklem 8-9'da verilmiştir.

$$B = \mu_m \cdot H \quad (8)$$

$$\mu_r = \frac{\mu_m}{\mu_0} \quad (9)$$

Denklem 8 ve 9 dan Denklem 10 elde edilir.

$$B = \frac{\mu_m \cdot N \cdot i}{l_c} \quad (10)$$

Belirli bir alandaki manyetik akı yoğunluğu Φ (weber) Denklem 11'den hesaplanır.

$$\Phi = \int_A B \cdot dA = B \cdot A = \frac{\mu_m \cdot N \cdot i \cdot A}{l_c} \quad (11)$$

Şekil 3 'de verilen sabit mıknatısın ürettiği mmk Denklem 7-8-11'den elde edilerek Denklem 12' de verildiği gibidir. Denklem 12'de B_r , l_{PM} ve $\mu_{r,PM}$ sırasıyla sabit mıknatısın manyetik akı değeri, mıknatısın kalınlığı ve mıknatısın bağlı geçirgenliğidir.

$$F_{PM} = \frac{B_r \cdot l_{PM}}{\mu_{r,PM} \cdot \mu_0} \quad (12)$$

Denklem 13' de verilen F_l (amper sarım) sargının ürettiği mmk'dır.

$$F_l = N \cdot i \quad (13)$$

Denklem 14' de verilen formülde B_{g0} hava aralığı manyetik akı yoğunluğudur. Değeri 0.9-1 aralığında olmalıdır.

$$B_{g0} = \frac{B_r}{(1 + 2g \frac{\mu_r}{L_m})} \quad (14)$$

Denklem 15' de verilen formülde B_{g1peak} hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun maksimum değeridir.

$$B_{g1peak} = \frac{4}{(\pi B_{g0} \frac{\sin \alpha_{PM}}{2})} \quad (15)$$

Denklem 16'da verilen formülde B_m mıknatıs üzerindeki akı yoğunluğudur.

$$B_m = B_{g0} \frac{\tau_f}{L_m} \quad (16)$$

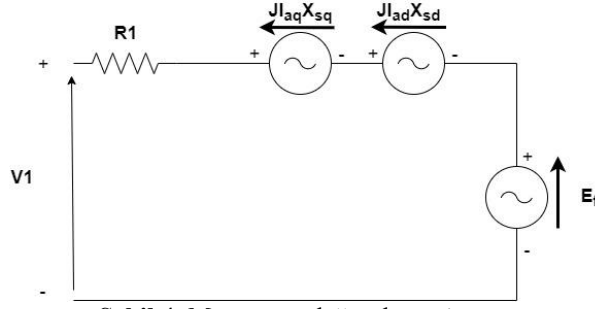
Motorun elektriksel devre denklemlerini çıkarmak için Şekil 4'de yer alan motorun eşdeğer devre şemasından faydalanılmıştır.

TORUS motor d eksenindeki reaktansı Denklem 17 ile ifade edilir. Denklem 17' de X_{sd} d eksen senkron reaktansıdır. X_{ad} endüvi sargısının oluşturduğu reaktans, X_1 ise kaçak reaktansı ifade eder.

$$X_{sd} = X_{ad} + X_1 \quad (17)$$

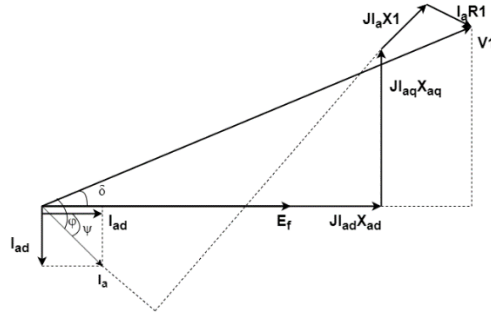
Denklem 17' yi referans alarak q eksen için de aynı eşitlikler Denklem 18'de gösterildiği gibi verilmiştir. Formül 18'de X_{sq} q eksen senkron reaktansıdır. X_{aq} endüvi sargısının oluşturduğu reaktans, X_1 ise kaçak reaktansı ifade eder.

$$X_{sq} = X_{aq} + X_1 \quad (18)$$



Şekil 4. Motorun eşdeğer devresi.

Denklem 17 ve 18' den yararlanılarak TORUS motorun bir faz vektör diyagramı Şekil 5 'deki gibi çıkartılır.



Şekil 5. TORUS motorun bir faz vektör diyagramı.

TORUS motorun bir fazı için verilen vektör diyagramından denklem 19' da verildiği gibi uygulanan gerilim eşitliği elde edilir.

$$V_1 = E_f + I_a R_1 + J I_{ad} X_{sd} + J I_{aq} X_{sq} \quad (19)$$

Denklem 19' da d eksenini endüvi akımı I_{ad} ve q eksenini endüvi akımı I_{aq} endüvi akımı I_a cinsinden Denklem 20 ve 21'de verildiği gibi ifade edilir.

$$I_{ad} = I_a \sin \varphi \quad (20)$$

$$I_{aq} = I_a \cos \varphi \quad (21)$$

TORUS motorda uygulanan uç geriliminin iki bileşeni Denklem 22 ve 23'de verildiği gibidir.

$$V_1 \sin \delta = I_{aq} X_{sq} - I_{ad} R_1 \quad (22)$$

$$V_1 \cos \delta = E_f + I_{ad} X_{sd} + I_{aq} R_1 \quad (23)$$

TORUS motor tasarımı yapılırken motorda histerisiz P_h , eddy akımı P_c , çekirdek P_e ve bakır kayıpları P_{cu} sırasıyla Denklem 24-27 'de verilmiştir.

$$P_h = K_h B_m^2 f \quad (24)$$

$$P_c = K_c B_m^2 f^2 \quad (25)$$

$$P_e = K_e B_m^{1.5} + f^{1.5} \quad (26)$$

$$P_{cu} = 3R_f I_{rms}^2 \quad (27)$$

Denklem 27'deki R_f bakır direnci, Denklem 28'deki gibi hesaplanır,

$$R_f = \frac{\rho_{cu} L_s N_{turn}}{\frac{\pi}{4D_0^2}} \quad (28)$$

Bu durumda toplam çekirdek kaybı P_{co} , Denklem 29'dan elde edilir,

$$P_{co} = P_h + P_c + P_e \quad (29)$$

P_{in} giriş gücü Denklem 30'da verilmiştir,

$$P_{in} = P_{out} + P_{cu} + P_{co} \quad (30)$$

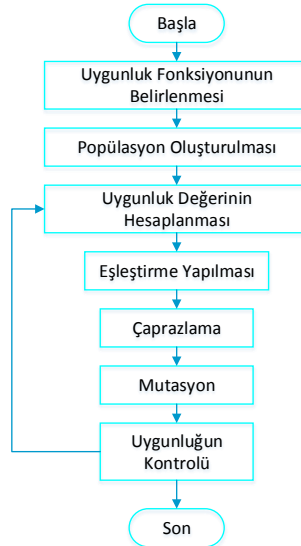
Son olarak motor verimi Denklem 31 ile hesaplanır

$$verim = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (31)$$

Böylece genel tasarım denklemleri tamamlanmış olup, optimizasyon aşamasına geçilir.

3.2 Genetik Algoritma ile Optimizasyonu

Birçok pratik optimizasyon tasarım problemleri sürekli ayrık değişkenler ya da süreksiz dış büyüklüklerle karakterize edilir. Bu tarz problemler için standart doğrusal olmayan programlama tekniklerinin kullanılması yetersiz ve maliyetli olmasına sebep olacaktır. GA bu tür problem çözümleri için uygundur ve yüksek uygunlukta küresel optimum çözüm bulunmasını sağlar [33]. GA 1970'lerde Michigan Üniversitesinde John Holland tarafından doğal sistemin adaptasyon sürecini anlamak ve doğal sistemin sağlamlığını sürdüren yapay sistem tasarlamak için geliştirilen bir algoritmadır. Günümüzde mühendislik, bilim ve işletme alanlarında yoğun olarak kullanılmaktadır. Algoritmanın temel çalışma prensibi aşağıdaki Şekil 6'da verildiği gibidir [34].



Şekil 6. Genetik algoritma akış diyagramı.

Bu çalışmada ilk olarak matlab programı üzerinde GA yöntemi kullanılarak optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmasında stator iç çapı, stator dış çapı, oluk genişliği, mıknatıs yüksekliği ve oluk ağız açıklığı belirli kısıtlamalara göre optimize edilmiştir. Optimizasyon çalışmasında fitness değeri %90 ve üzerindeki verime göre ayarlanmıştır. Belirlenen fitness değerlerine göre optimizasyon çalışması

gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki adımda optimizasyon sonucunda elde edilen çıktılar optimizasyonu teyit etmek amacıyla ANSYS- Maxwell 3D programına girdi olarak yazılmıştır. Son olarak motor verimini arttırmak ve daha iyi sonuç elde etmek için ANSYS-Maxwell 3D programı üzerinden bir optimizasyon çalışması daha gerçekleştirilmiştir. Bütün bu sonuçlar Tablo 1’de karşılaştırmalı olarak yer almaktadır. Matlab üzerinde yapılan optimizasyon çalışması, ANSYS-Maxwell 3D programı ile doğrulandığında iki çalışma arasında çıkan verim değerleri arasındaki hata payı %5.06 çıkmıştır.

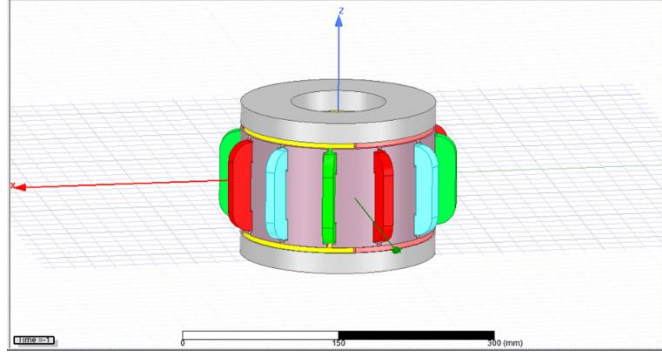
Tablo 1. Torus motor optimizasyon ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

Parametre Adı	Matlab Optimizasyon Sonuçları	Optimizasyon Sonuçlarının Ansys-Maxwell 3D Üzerindeki Doğrulama Sonuçları	Ansys-Maxwell 3D Üzerinde Yapılan Optimizasyon Sonuçları
Çıkış Gücü (W)	4000	4000	4001.39
Tork (Nm)	95.4930	95.5093	95.526
Hız (rpm)	400	400	400
Gerilim (V)	400	400	400
Faz Akımı (A)	14	18	16
Verim (%)	92.62	87.1495	93.0460
Stator Dış Çap (mm)	250	250	250.175
Rotor Dış Çap (mm)	250	250	250.175
Stator İç Çap (mm)	127	127	144.439
Rotor İç Çap (mm)	127	127	144.439
Stator Oluk Uzunluğu (mm)	25	25	27.322
Stator Oluk Ağız Genişliği (mm)	4	4	3.52962
Mıknatıs Kalınlığı (mm)	5	5	5.74743
Embrance (%)	0.99	0.99	0.781884
Sipir Sayısı	142	142	142
Tel Çapı (mm)	1	1	1
Mıknatıs Tipi	NdFe35	NdFe35	NdFe35
Sac Tipi	M470-50A	M470-50A	M470-50A
Stator Dişi Akı Yoğunluğu (T)	1.6	1.11889	1.37925
Stator Boyunduruk Akı Yoğunluğu (T)	1.6	1.82962	1.93646
Rotor Boyunduruk Akı Yoğunluğu (T)	1.6	2.00609	1.83109
Hava Aralığı Akı Yoğunluğu (T)	0.99	0.736554	0.851925
Sargı Akım Yoğunluğu (A/mm ²)	5	5.78885	4.77836

4. Torus Motorun Ansys-Maxwell 3D Analiz Sonuçları

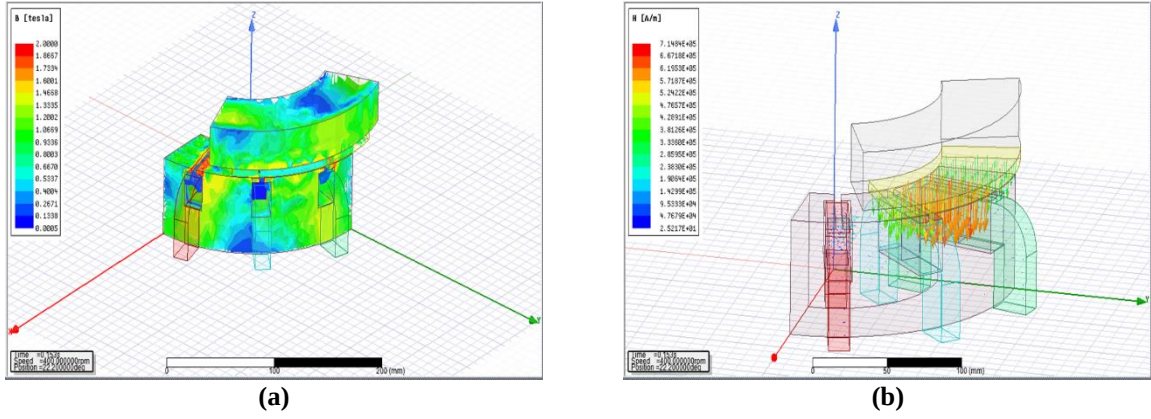
Eksenel akılı motorların yapısı gereği manyetik analizi sadece üç boyutlu olarak yapılabilir. Simetrik bir kesiti olmadığından iki boyutlu analiz için radyal akılı motorlardaki gibi kesit alınamamaktadır. Bu da hem tasarım hem de analiz sürecini uzatmaktadır. Yine de analiz süresini kısaltabilmek için motor üç boyutlu olarak simetrik parçalara ayrılmaktadır.

ANSYS Maxwell programının RMXprt modülünde gerçekleştirilen optimizasyon sonucu elde edilen model 3 boyuta aktarılarak çözümlene yapılmıştır. Motorun ANSYS-Maxwell 3D modülünde çizilmiş modeli Şekil 7’de gösterilmektedir.



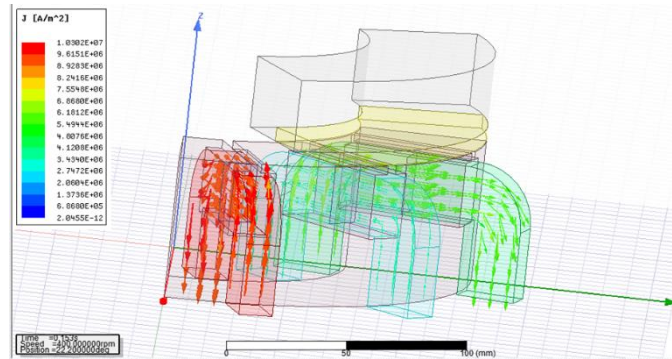
Şekil 7. Torus motor 3D çizimi.

ANSYS-Maxwell 3D analizinde tam motor analizi uzun zaman aldığından dolayı motorun sekizde biri üzerinde analiz gerçekleştirilmiştir. Motorun manyetik akı yoğunluğu Şekil 8a'da gösterilmiş ve motordan hedeflenen akı yoğunluğu değerlerinin elde edilmesiyle birlikte aşırı doyumlar mevcut değildir. Bununla birlikte motor modelindeki mıknatıs akı yönleri Şekil 8b' de verilmiştir.



Şekil 8. a) Torus motor manyetik akı yoğunluğu. b) Mıknatıs manyetik akı yönleri.

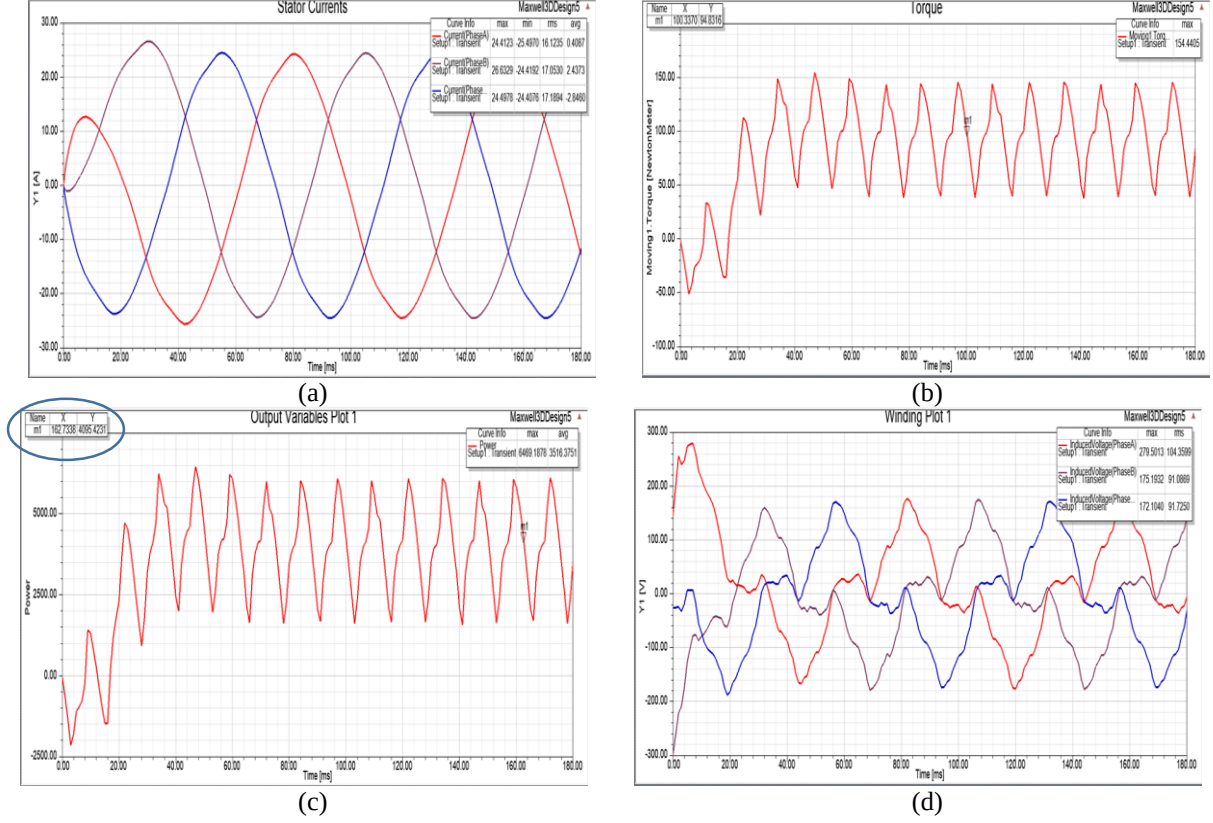
Motor modelindeki A,B,C fazlarındaki sargıların akım yönleri Şekil 9'da gösterilmektedir. A ve B fazlarındaki akımların yönü aynı, C fazındaki akım yönü ise A ve B fazındaki akım yönlerinin tam tersidir.



Şekil 9. Sargı akım yönleri.

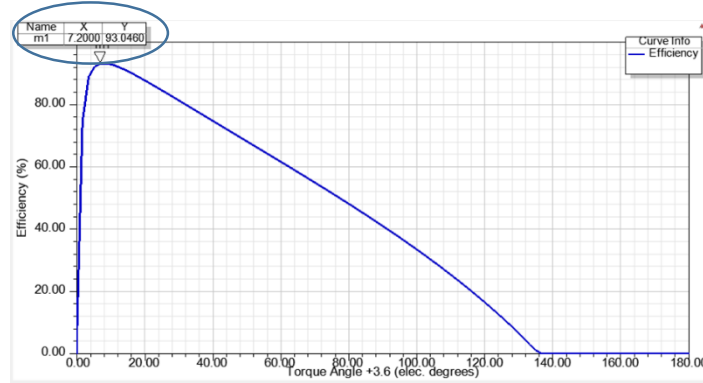
Motor analizi sonucu elde edilen akım grafiği Şekil 10a'da görüldüğü gibidir. Etkin akım değeri hedeflenen akım değerinde olmakla birlikte yaklaşık 16 – 17 A civarlarındadır. Motor analizi sonucu elde edilen moment değeri Şekil 10b'de m1 işaretlemesiyle gösterilmiş ve değer daire içine alınmıştır. Moment değeri 94.8316 elde

edilmiştir. Motor moment değeri hedeflendiği gibidir. Ancak moment grafiğinin dalgalılık oranı fazla çıkmıştır. Bunun sebebi motorun vuruntu momentinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Vuruntu momentini azaltma işlemi bu çalışmanın devamında yapılacaktır. Bu işlem rotorda mıknatısları belli bir açıda kaydırılarak gerçekleştirilecektir. Motor analizi sonucunda elde edilen çıkış gücü Şekil 10c’ de m1 işaretlemesiyle gösterilmiş ve daire içine alınmıştır. Motor çıkış gücü değeri 4095.4231 W çıkmıştır. Motor çıkış gücü grafiğinin de dalgalılık oranının fazla çıkmasının nedeni motorun vuruntu momentinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Son olarak faz gerilim grafiği de Şekil 10d ‘de verilmiştir.



Şekil 10. a) Motor 3 faz akımı. b) Motorun üretmiş olduğu moment zaman grafiği. c) Çıkış gücü zaman grafiği. d)Üç faz gerilim grafiği.

Verim grafiği Şekil 11’de m1 işaretlemesiyle gösterilmiş ve daire içerisine alınmıştır. Elde edilen motor verimi %93.0460’ ır.



Şekil 11. Torus motorun verim grafiği.

5. Sonuç

Bu çalışmada ilk etapta eksenel akıllı sabit mıknatıslı motor sınıfından olan TORUS motorun tasarım denklemleri çıkarılarak GA ile optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Motor tasarım denklemlerinde motor boyutları, motor doyum oranına göre belirlenerek kütle başına maksimum güç ve verim elde edilmiştir. Çalışmanın geliştirilmesi ve doğruluğu için elde edilen sonuçlara göre ANSYS-Maxwell 3D paket programında optimizasyon geliştirmesi ve doğrulaması yapılmıştır. Yapılan çalışmalar doğrultusunda belirlenen hedeflere uygun olarak %93.0460 verimli ve yaklaşık 4 kW gücünde motor elde edilmiştir. Bundan sonraki çalışmada da makalede de belirtildiği gibi moment dalgalılığının azaltılması yoluna gidilecektir.

Teşekkür

Bu çalışma 118E943 proje numarası ve “Elektrikli Araçlar için Eksenel Akıllı Çift Rotorlu Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Üretimi” ismiyle TÜBİTAK Hızlı Destek Projesi kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Hüner E. Toroidal Sargılı Açık Oluklu Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı NN Tip Motor Tasarımı ve Uygulaması. (Doktora tezi Marmara Üniveristesi), 2012.
- [2] Libert F. Design, optimization and comparison of permanent magnet motors for a low-speed direct-driven mixer. Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, TRITA-ETS-2004-12, ISSN-1650-674x, Stockholm.
- [3] Taran N, Ardebili M. A novel approach for efficiency and power density optimization of an axial flux permanent magnet generator through genetic algorithm and finite element analysis. 2014; IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (pp. 709-714). IEEE.
- [4] Saavedra Ordóñez, H., Riba Ruiz, J. R., & Romeral Martínez, J. L. Multi-objective optimal design of a five-phase fault-tolerant axial flux PM motor. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 2015; 15(1), 69-76.
- [5] Vrtič P, Vražić M, & Papa G. Design of an axial flux permanent magnet synchronous machine using analytical method and evolutionary optimization. 2015; IEEE Transactions on Energy Conversion, 31(1), 150-158.
- [6] Kahourzade S, Mahmoudi A, Gandomkar A, Rahim N. A, Ping H. W, Uddin M. N. Design optimization and analysis of AFPM synchronous machine incorporating power density, thermal analysis, and back-EMF THD. 2013; Progress In Electromagnetics Research, 136, 327-367.
- [7] Rostami N, Feyzi MR, Pyrhonen J, Parviainen A, Behjat V. Genetic algorithm approach for improved design of a variable speed axial-flux permanent-magnet synchronous generator. 2012; IEEE Transactions on Magnetics, 48(12), 4860-4865.
- [8] Yousefi B, Shirazi AN, Soleymani S, Gholamian SA. Genetic algorithm application for optimum design of three phases disk type PM motor. 2012; International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA), 2(6), 1-7.
- [9] Hwang CC, Li PL, Chuang FC, Liu CT, Huang KH. Optimization for reduction of torque ripple in an axial flux permanent magnet machine. 2009; IEEE Transactions on Magnetics, 45(3), 1760-1763.
- [10] Gholamian SA, Ardebili M, Abbaszadeh K, Gholamian SA. Optimum design of slotted axial flux internal stator motor using genetic algorithm for electric vehicle. 2011; International Journal of Software Engineering & Applications (IJSEA), 2(3), 87.
- [11] Hippolyte JL, Espanet C, Chamagne D, Bloch C, Chatonnay P. Permanent magnet motor multiobjective optimization using multiple runs of an evolutionary algorithm. 2008; IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 1-5). IEEE.
- [12] Richard M. Axial flux permanent magnet machines for direct drive applications. <http://theses.dur.ac.uk>. 2007.
- [13] Du-Bar C. Design of an axial flux machine for an in-wheel motor application. 2011; Chalmers Reproservice, Göteborg.
- [14] Yang Y, Shih G. Optimal design of an axial-flux permanent-magnet motor for an electric vehicle based on driving scenarios. 2016; Energies, 9(4), 285.
- [15] Mahmoudi A, Ping HW, Rahim NA. A comparison between the TORUS and AFIR axial-flux permanent-magnet machine using finite element analysis. 2011; IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC) (pp. 242-247). IEEE.
- [16] Huang S, Aydin M, Lipo TA. A direct approach to electrical machine performance evaluation: Torque density assessment and sizing optimization. 2002; In International Conference on Electrical Machines, volume Art (Vol. 235).
- [17] Rahman KM, Patel NR, Ward TG, Nagashima JM, Caricchi F, Crescimbeni F. Application of direct-drive wheel motor for fuel cell electric and hybrid electric vehicle propulsion system. 2006; IEEE Transactions on Industry Applications, 42(5), 1185-1192.
- [18] Aydin M, Huang S, Lipo TA. Axial flux permanent magnet disc machines: A review. 2004; In Conf. Record of SPEEDAM (pp. 61-71).
- [19] Jagiela M, Mendrela EA, Wrobel R. Current control for the smoothing of torque in a single-phase permanent-magnet disc motor using 3-D FEM. 2005; Electrical Engineering, 87(4), 191-196.

- [20] Aydın M, Huang S, Lipo TA. Design and 3D electromagnetic field analysis of non-slotted and slotted TORUS type axial flux surface mounted permanent magnet disc machines. In IEMDC 2001; IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Cat. No. 01EX485) (pp. 645-651). IEEE.
- [21] Jayasundara JWKK, Munindradasa DAI. Design of multi phase in-wheel axial flux permanent magnet motor for electric vehicles. 2006; In First International Conference on Industrial and Information Systems (pp. 510-512). IEEE.
- [22] Qiu-ling D, Feng X, Wen-tao H. Design of new-type axial flux permanent magnet in-wheel machine. 2010; International Conference on Electrical and Control Engineering (pp. 5831-5834). IEEE.
- [23] Mahmoudi A, Kahourzade S, Ping HW, Gandomkar A. Design optimization and analysis of AFPM synchronous motor considering electrical and thermal parameters. 2013; 1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEC) (pp. 562-567). IEEE.
- [24] Libert F. Design, optimization and comparison of permanent magnet motors for a low-speed direct-driven mixer. 2004; Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, TRITA-ETS-2004-12, ISSN-1650-674x, Stockholm.
- [25] Maia TA, Faria OA, Cardoso AA, Borges FS, Mendonça HG, Silva MA, Lopes BM. Electromechanical design for an optimized axial flux permanent magnet torus machine for 10kW wind turbine. 2011; International Conference on Electrical Machines and Systems (pp. 1-6). IEEE.
- [26] Neethu S, Shinoy KS, Shajilal AS. FEA-aided design, optimization and development of an axial flux motor for implantable ventricular assist device. 2011; World Academy of Science, Engineering and Technology, 73, 93-97.
- [27] Fasil M, Mijatovic N, Jensen BB, Holboll J. Finite-element model-based design synthesis of axial flux PMBLDC motors. 2016; IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 26(4), 1-5.
- [28] Gholamian SA, Yousefi A. Power density comparison for three phase non-slotted double-sided AFPM motors. 2010; Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 4(12), 5947-5955.
- [29] Gholamian SA, Ardebili M, Abbaszadeh K, Gholamian SA. Selecting of Slotted AFPM Motors with High Torque Density for Electric Vehicles. 2011; denT, 2, 4.
- [30] Howey DA. Thermal design of air-cooled axial flux permanent magnet machines. 2010.
- [31] Wang RJ. Design aspects and optimisation of an axial field permanent magnet machine with an ironless stator. (Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University). 2003.
- [32] Gieras JF, Wang RJ, Kamper MJ. Axial flux permanent magnet brushless machines. 2008; Springer Science & Business Media.
- [33] Rao SS. Engineering optimization: theory and practice. John Wiley & Sons. 2009.
- [34] Mutluer M. Asenkron motor elektriksel eşdeğer devre parametrelerinin hibrid genetik algoritma yöntemiyle belirlenmesi (Doctoral dissertation, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü). 2007.

Fraktal Eğimden Arındırılmış Dalgallık Analizi ve Pencereli Kare Ortalamanın Karekökü Tabanlı EMG Sınıflandırma

Ömer Faruk ALÇİN*

¹ Elektrik-Elektronik Müh. Böl., Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak., Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Malatya, Türkiye

*¹ omer.alcin@ozal.edu.tr

(Geliş/Received: 18/07/2020;

Kabul/Accepted: 08/08/2020)

Öz: Elektromiyografik (EMG) kas aktivitesini ölçmek için kullanılan faydalı bir tekniktir. EMG sinyalleri çoğunlukla protez, fiziksel rehabilitasyon, Nöromusküler bozuklukların teşhisi ve beyin-bilgisayar arayüzü gibi medikal uygulamalara yardımcı karar destek sistemlerinde kullanılır. Bu çalışmada EMG sinyallerini sınıflamak için kullanışlı bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yöntemde, özellik çıkarma yöntemi olarak Fraktal Eğimden Arındırılmış Dalgalanma Analizi (F-EADA) ve örtüşmeyen pencereli Kök Ortalama Karesi (p-KOK) kullanılmıştır. F-EADA yöntemi korelasyon ve istatistiksel benzerliği ölçmek için kullanılan bir yöntemdir. KOK istatistiksel bir ölçüdür ve EMG tanıma sistemlerinde ayırt edici bir parametre olabilmektedir. p-KOK yaklaşımı geleneksel KOK yönteminden daha yeteneklidir ve bu ayırt edici yetenek deneysel sonuçlarla gösterilmiştir. Çıkarılan EMG öznitelikleri, Destek Vektör Makinesi (DVM), k-En Yakın Komşu (kEYK), Karar Ağacı (KA) ve Doğrusal Diskriminant Analizi (DDA) yöntemleri ile sınıflandırılmıştır. DVM Sınıflandırıcı bu yöntemler arasında en iyi performansa sahiptir. Önerilen yöntem, altı farklı nesne tutma eylemini içeren EMG veri seti ile test edilmiştir. Deneysel çalışmalar, önerilen yöntemin %96.83 doğruluk ile EMG veri setini sınıflamak için uygun olduğunu göstermiştir. Ayrıca, önerilen yöntem aynı veri setini kullanan diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha iyi performansa sahiptir.

Anahtar kelimeler: EMG, fraktal eğimden arındırılmış dalgallık analizi, pencereli kare ortalamalarının karekökü, DVM.

Fractal Detrended Fluctuation Analysis and Windowed Root Mean Square Based EMG Classification

Abstract: Electromyographic (EMG) is useful technique to measure muscle activity. EMG signals mostly used in decision support system to help medical purposes such as prosthesis, physical rehabilitation, the diagnosis of neuromuscular disorders, and brain computer interface. This work proposes a useful approach to recognize EMG signals. Fractal Detrended Fluctuation Analysis (F-DFA) and non-overlap windowed Root Mean Square (w-RMS) are used as a feature extraction method. In the proposed method, F-DFA method has been exploited to determine correlation and statistical similarity. RMS is statistical measure and it can be as a distinctive parameter in EMG recognition systems. w-RMS approach is capable more than traditional RMS and this distinctive capable showed with experimental results. The features of EMG are classified common the four method such as Support Vector Machine (SVM), k-nearest Neighbor (kNN), Decision Tree (DT), and Linear Discriminant Analysis (LDA). The SVM Classifier has best performance in among these methods. The proposed method has been tested with the EMG dataset consisting of six different object holding actions. The experimental works have been demonstrated the convenient of the proposed method with %96.83 accuracy to classify the EMG dataset. Also, the proposed method has a better performance compared to other methods using the same dataset.

Key words: EMG, fractal detrended Fluctuation Analysis, windowed root mean square, SVM.

1. Giriş

Elektromiyografi (EMG) istemli veya istemsiz kas aktiviteleri sırasında kaslarda oluşan elektriksel aktiviteyi ölçmek ve kaydetmek için kullanılan bir yöntemdir. EMG, kas aktif olduğunda kas hücreleri tarafından üretilen elektriksel potansiyeldir. EMG sinyalleri sadece hastalık tespitinde değil teknolojinin gelişmesi ile robotik ve akıllı sistemlerde de sıkça çalışılan bir konu haline gelmiştir. Bu nedenle EMG sinyallerinin kullanımı günümüzde popüler hale gelmiştir. Literatürde EMG sınıflandırma yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. [1] nolu çalışmada üçlü desen ve Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) tabanlı öznitelik çıkarım yöntemi önerilmiştir. Ampüte kişilerden alınmış yüzey EMG sinyalleri 3 kuvvet seviyesine göre (düşük, orta, yüksek) sınıflandırılmıştır. Önerilen sistemin k-En Yakın Komşuluk (kEYK) sınıflandırıcı ile tüm güç seviyelerine göre %99.14 doğruluk oranı elde edilmiştir. Düşük, orta ve yüksek güç seviyelerinde ise sırasıyla %97.78, %93.33 ve %92.96 başarımla ulaşılmıştır. [2] nolu çalışmada EMG sinyallerinden Nöromusküler kas hastalık tespiti amaçlamışlardır. Bu amaçla öncelikli olarak

* Sorumlu yazar: omer.alcin@ozal.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-2917-3736

EMG sinyallerinden öznitelik çıkarmak amacıyla EMG sinyallerine ADD uygulamışlardır, daha sonra Dalgacık katsayılarının dağılımını göstermek için ADD'nin istatistiksel değerleri hesaplanmıştır. Nöromusküler hastalıkların tespiti amacıyla çıkarılan bu özellikler Torbalama Topluluk (TT) sınıflandırıcısına giriş verisi olarak verilmiştir. Deneysel sonuçlar neticesinde TT sınıflandırıcısı Destek Vektör Makinesi (DVM) ile beraber doğruluk oranının %99 olduğu gözlemlenmiştir. [3] nolu çalışmada miyopati, Amiyotrofik Lateral Skleroz (ALS) ve normal EMG sinyallerinin sınıflandırılması amaçlanmıştır. Öncelikle gürültü gidermek amacıyla Çok Ölçekli Temel Bileşen Analizi (ÇÖTBA) ve öznitelik çıkarımı için ADD kullanılmıştır. EMG sinyallerini sınıflandırmak amacıyla CART, C4.5 ve Rassal Orman (RO) Karar Ağaç (KA) algoritması kullanılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde en iyi sonucun %96.67 doğruluk oranına RO ile ulaşıldığı gösterilmiştir. [4] nolu çalışmada miyopati, ALS ve normal bireylere ait EMG sinyallerinin sınıflandırılması amaçlanmıştır. EMG sinyallerine öncelikle ADD ve güç spektral yoğunluğu yöntemleri uygulanarak sinyallere ait öznitelik çıkarılmıştır. Çıkarılan bu özniteliklerden en etkin öznitelikleri belirlemek için ReliefF algoritması kullanılmıştır. Elde edilen yeni öznitelikler RO ve KEYK sınıflandırıcılarına giriş verisi olarak verilmiştir. Yapılan çalışmalar sonrasında RO sınıflandırıcısının ReliefF ile %88.8 doğruluk oranı ile en iyi sonucu verdiği gözlemlenmiştir. [5] nolu çalışmada miyopati ve normal EMG sinyallerini sınıflandırma amaçlanmıştır. Bu amaçla EMG sinyallerinden Sürekli Dalgacık Dönüşü ile dört istatistiksel öznitelik çıkarılmıştır. Sinyallerin sınıflandırılması için k-en yakın komşuluk ve DVM sınıflandırıcısı kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda KEYK sınıflandırıcısı 9 en yakın komşuyu kullanarak %91.11 doğruluk oranı, DVM ise %91.01 doğruluk oranı ile sınıflandırma yaptığını göstermişlerdir. [6] nolu çalışmada gerçek zamanlı alınan EMG sinyallerinin sınıflandırılması amaçlanmıştır. 5 farklı hareket için öncelikle sinyaller Dalgacık dönüşümünü ile Dalgacık katsayıları çıkarılmıştır daha sonra çıkarılan bu katsayılar DVM'ye giriş verisi olarak verilmiştir. Yapılan çalışma sonrasında sistemin doğruluk oranı %83 olarak belirlenmiştir. [7] nolu çalışmada EMG sinyallerinde hareket tespiti amaçlanmıştır bu amaçla alınan 8 farklı harekete ait EMG sinyallerine ADD uygulanmıştır ve buradan gelen katsayılara bazı istatistiksel metotlar uygulanarak öznitelik çıkarılmıştır. Çıkarılan bu verilerin Yapay Sinir Ağı (YSA) ile sınıflandırılmıştır. Tüm sınıflandırma işlemleri sonucunda %77.50 doğruluk oranı tespit edilmiştir. [8] nolu çalışmada 3 farklı el hareketinin sınıflandırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla alınan EMG sinyallerine ADD uygulanarak katsayıları alınmış ve bu katsayılar YSA'ya giriş verisi olarak uygulanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda ortalama %93.25 doğruluk oranı bulunmuştur. [9] nolu çalışmada 6 farklı el hareketinin sınıflandırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla ADD ile özellik çıkarılmıştır daha sonra önerilen Dalgacık Sinir Ağı ile sınıflandırılma işlemi yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda sistemin doğruluk oranı %94.67 olarak bulunmuş ve önceki çalışmalarla kıyaslanmıştır. [10] nolu çalışmada EMG sinyallerinden normal, miyopati ve ALS hastalarının tespiti amaçlanmıştır. EMG sinyallerinin sınıflandırılması için ADD ile istatistiksel öznitelikler kullanılmıştır. Öznitelikler DVM ile sınıflandırılmış ve stokastik analiz ile %93.08 doğruluk oranı tespit edilmiştir. [11] nolu çalışmada 6 farklı nesne tutma eylemi için veri seti hazırlanmıştır. Bu veri seti %75.00 başarımla sınıflandırılmıştır. Daha sonra bu veri seti için Sapsanis ve diğerleri ayırık kip dönüşümü ve gerçek kip fonksiyon bileşenleri öznitelikleri ve doğrusal sınıflandırıcıya tabanlı yaklaşım ile %80.00 doğruluk elde edilmiştir [12]. [13] nolu çalışmada Sapsanis'in EMG seti [11] kısa zamanlı Fourier yöntemi ile zaman-frekans görüntüleri oluşturulmuştur. Yerel İkili Örüntü (YİÖ) ve gri seviye eş oluşum matrisi yöntemleri tabanlı öznitelikler YSA ile %92 doğruluk ile sınıflandırılmıştır. Arı ve diğerleri bir boyutlu (YİÖ), permütasyon entropi ve DVM sınıflandırıcısından oluşan yaklaşım önermişlerdir [14]. Önerilen yaklaşım ile 6 temel nesne tutma hareketi için yaklaşık %93.167 performans ile tanımlanmıştır.

Bu çalışmada EMG sinyallerin sınıflamak için Fraktal Eğimden Arındırılmış Dalgalılık Analizi (F-EADA) ve Karesel Ortalamanın Karekökü'un (KOK) iletirilmiş versiyonu olan pencereci KOK (p-KOK) yöntemleri öznitelik çıkarmak için kullanılmıştır. EADA yöntemi EMG sınıflama sistemlerinde kullanılmaktadır [15]. Bu çalışmada F-EADA yönteminin fraktal parametresinin belirlenmesinde sınıflama performansına bağlı kaba arama algoritması kullanılmıştır. Öznitelik çıkarma işleminde kullanılan p-KOK yöntemi EMG kayıt işleminde ön işlem olarak kullanılmaktadır [16]. Bu çalışmada ise p-KOK yöntemi öznitelik çıkarmak için kullanılmıştır. Geleneksel KOK yönteminde EMG sinyalinin tamamı için KOK değeri hesaplanır. Bu durum bölgesel değişikliklerin dikkate alınmamasına sebep olabilmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek için sinyal boyunca sabit genişlikli pencere örtüşmesiz kaydırılarak bu pencerede ki EMG sinyal parçasının KOK değeri hesaplanmıştır. Böylece bölgesel değişimler dikkate alınarak sınıflandırma performansında artışı gözlenmiştir. Önerilen yöntemde, yaygın kullanılan DVM, KEYK, KA ve DDA sınıflandırıcı yöntemlerinin uygunluğu araştırılmıştır. DVM yöntemi bu sınıflandırıcılar arasında en iyi performansa sahiptir.

Bu çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir. Veri seti, öznitelik çıkarma yöntemleri ve DVM sınıflandırıcısı ikinci bölümde tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde deneysel çalışma ve sonuçlar detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar son bölümde tartışılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu başlıkta çalışmada kullanılan yöntemler ve veri seti detaylandırılmıştır.

2.1. Fraktal Eğimden Arındırılmış Dalgalık Analizi

Peng ve ark. DNA dizilimlerin analiz edilmesi için EADA yöntemini önermişlerdir [15]. EADA yöntemi finansal, fiziksel, sosyal ve biyomedikal gibi çeşitli zaman serilerinin analizinde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. EADA yöntemi istatistiksel ölçekleme teoremi tabanlı bir yöntemdir. N örnekli zaman serisini $x(i)$, $i=1,\dots,N$ şeklinde gösterelim. Verilen x zaman serisinin profil fonksiyonu Denklem 1'deki gibi hesaplanabilir [15-18].

$$y(k) = \sum_{i=1}^k (x(i) - \bar{x}) \quad (1)$$

Burada $\bar{x}$ verilen $x(i)$ sinyalinin aritmetik ortalamasıdır. Ardından profil sinyali eşit m uzunluklu parçalara bölünerek her bir parçaya karşılık en küçük kareler metoduyla bir $y_m(k)$ eğrisi uydurulur. Eğri uydurma işleminde L derece ile polinomal eğilimi temsil edildiği kabul edilmektedir. Daha sonra Dalgalanma fonksiyonu Denklem 2'de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$F(m) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y(k) - y_m(k))^2} \quad (2)$$

Ölçekleme teoreminde ölçekleme üsteli α gösterilirse Dalgalanma fonksiyonu olarak tanımlanan parametre Denklem 3'te verildiği gibi hesaplanır.

$$F(m) = m^\alpha \quad (3)$$

Ölçekleme parametresi α $\log(F(m)) - \log(m)$ grafiğinin eğiminden de hesaplanabilir. İncelenen zaman serisinin bağımlılığı hakkında bilgi vermektedir. Temel EADA tanımlamasından sonra fraktal (F-EADA) daha anlaşılır bir şekilde verilebilir. F-EADA Denklem 4'te verildiği gibi tanımlanabilir.

$$F_q(m) = \sqrt[q]{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y(k) - y_m(k))^q} \quad (4)$$

Burada q , F-EADA'nın derecesini göstermektedir. Denklem 4 sıfırdan farklı q değeri için olup $q=0$ için L'Hospital kuralı dikkate alınarak Denklem 5'teki gibi bir tanımlama yapılabilir. F-EADA ile ölçekleme üsteli arasında, Denklem 6'da verilen bir ilişki vardır [18].

$$F_0(m) = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \ln(y(k) - y_m(k))\right) \quad (5)$$

$$F_q(m) = m^{h(q)} \quad (6)$$

Bu çalışmada F-EADA analizi ile F-EADA1 ve F-EADA2 (1. ve 2. Dereceden eğimden arındırılmış polinom) katsayıları öznitelik olarak kullanılmıştır. Bir kanal EMG sinyali için F-EADA1 ve F-EADA2 polinom katsayılarından her birinden 21 öznitelik, toplamda 42 öznitelik elde edilmiştir.

2.2. Pencereleli Kare Ortalamalarının Karekökü

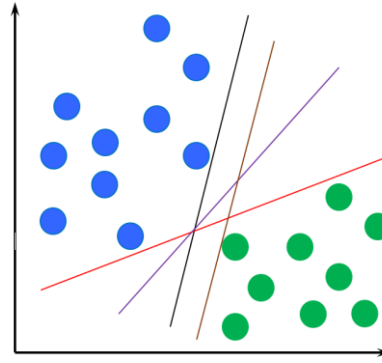
KOK değişkenliğin miktarını ölçmek için kullanılan istatistiksel temelli bir yöntemdir. Genliğinde pozitif ve negatif değişime sahip sinyallerde kullanışlı bir tekniktir. Sürekli değişen zaman serileri için sürekli bir şekilde değişen fonksiyon hesaplanabilir. KOK yöntemi EMG sinyalinin özelliği itibarıyla kullanışlı bir yöntemdir. KOK değeri Denklem 7'de verildiği gibi hesaplanabilir [19].

$$KOK = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i)^2} \quad (7)$$

Bu çalışmada örtüşmesiz kayar pencere yapısı kullanılarak her bir pencerenin KOK değeri hesaplayan bir yaklaşım kullanılmıştır. Belirlenen pencere genişliği sinyal boyunca gezdirilerek her pencere için bir KOK değeri hesaplatılmıştır. Böylece genlik bazlı değişkenliğin sinyalin tamamı yerine bölgesel olarak hesaplanması amaçlanmıştır. Pencere genişliği için 250 örnek ampirik yolla seçilmiştir. 2500 örneğe sahip bir kanal EMG sinyalinden 250 örnek pencere uzunluğu ile 10 öznitelik elde edilmiştir.

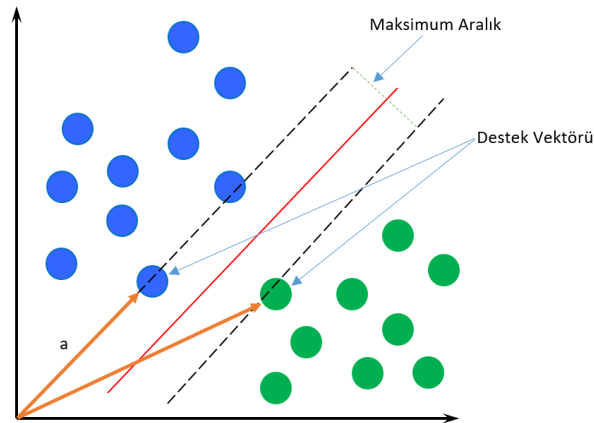
2.3. Destek Vektör Makinesi

DVM istatistiksel öğrenme teorisi temelli bir gözetimli öğrenme algoritmasıdır. Doğrusal ve doğrusal olmayan verilerin sınıflandırılmasında yaygın olarak kullanılan basit ve oldukça etkili bir yöntemdir [20]. Bu yöntem, Vapnik ve Cortes tarafından önerilmiştir [21]. Doğrusal DVM sınıflandırıcının temel çalışma prensibi, iki sınıflı verileri birbirinden ayırabilecek en uygun olan hiper düzlemi bulma esasına dayanmaktadır [22]. Sınıf etiketleri $y_n \in \{-1, 1\}$ olan ve $D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ şeklinde bir veri setimiz olduğunu düşünelim. Burada $x_n \in \mathbb{R}$, n veri kümesinin eleman sayısını tanımlamaktadır. Buna göre bu iki sınıflı verileri birbirinde ayırmak istediğimizde Şekil 1 görüldüğü gibi verileri ayırabilecek çok sayıda ayırım çizgisinin çizilebildiği görülmektedir.



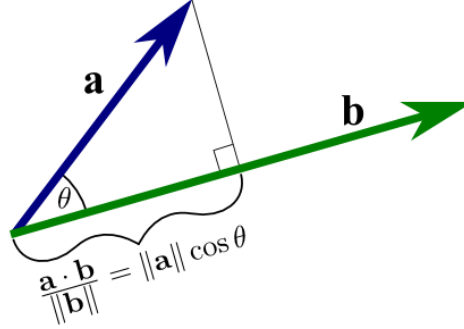
Şekil 1. Olası ayırım çizgilerinin gösterimi.

Fakat bu verileri sınıflandırmada hangi ayırım çizgisinin en iyi başarıyı sağlayacağını kestirmek oldukça zor görünüyor. DVM iki sınıflı verileri sınıflandırırken, Şekil 2'de görüldüğü gibi birbirine en yakın farklı sınıf noktaları arasındaki uzaklığı maksimum yapabilecek olan hiper düzlemi bulmaktadır [21].



Şekil 2. En iyi hiper düzlem ve marj gösterimi.

Şekil 2’deki a vektörümüzün, ağırlık vektörü (hiper düzlemin normali) w olsun. Buna göre w ağırlık vektörü, Şekil 3’teki gibi bulunabilir.



Şekil 3. Ağırlık vektörü w Hesaplanması.

Bu durumda iki sınıflı verimizi ayıracak en iyi hiper düzlem için karar fonksiyonları Denklem 8’deki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} w \cdot x_i + b &\geq 1, & \text{her } y &= +1 \\ w \cdot x_i + b &\leq -1, & \text{her } y &= -1 \end{aligned} \quad (8)$$

Burada b eğilim değerini tanımlamaktadır [21]. Sınıf etiketleri dikkate alınırsa Denklem 8 düzenlenerek Denklem 9 ve Denklem 9 kısıtlamalar ile Denklem 10’daki yazılabilir.

$$y_i \cdot (w \cdot x_i + b) \geq 1 \quad (9)$$

$$y_i \cdot (w \cdot x_i + b) \leq -1 \quad (10)$$

DVM’de hiper düzlem sınırlarının maksimum olabilmesi $\|w\|$ değerinin minimum olması ile mümkün olabilecektir [23, 24]. Bunun için maksimum aralık mesafesi, $d = (x_+ - x_-) \cdot \frac{w}{\|w\|}$ bağıntısında görüldüğü üzere d ’nin maksimum olması için $\|w\|$ mümkün olduğunca azaltılması gerekmektedir. Bu durumda, en uygun hiper düzlemin belirlenmesinde, $\min \left[\frac{1}{2} \|w\| \right]$ sınırlı optimizasyon probleminin çözümüne bağlıdır. Böylece Denklem 10, minimum $\|w\|$ sınırlamalarına bağlı olarak Denklem 11’deki gibi yazılabilir.

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 \text{ kısıt: } y_i(w x_i + b) \geq 0 \text{ ve } y_i \in \{1, -1\} \quad (11)$$

Bu optimizasyon probleminin çözümü için Lagrange çarpanları eklenerek kısıtlama olmadan Denklem 12’deki gibi yazılabilir.

$$L(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i (w x_i + b) + \sum_{i=1}^N \alpha_i \quad (12)$$

$$f(x) = \text{sign}(\sum_i \alpha_i y_i k(x, x_i) + b) \quad (13)$$

Burada, k kernel fonksiyonu ve α lagrange çarpanıdır.

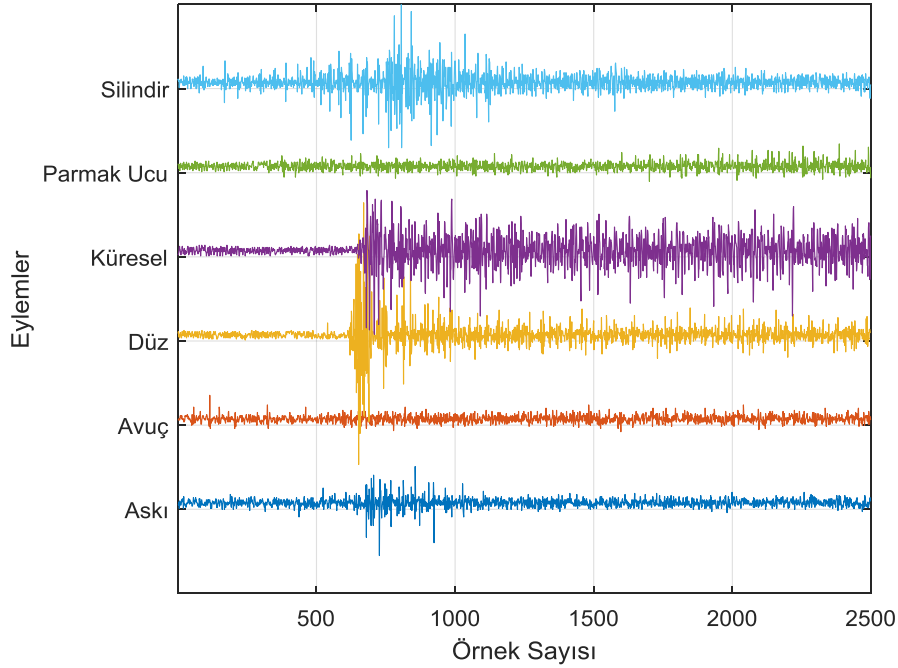
2.4. Veri Seti

EMG veri seti altı el hareketi düşünülerek ikisi erkek olmak üzere sağlıklı beş katılımcı ile oluşturulmuştur. Her bir hareket için üç kanallı 100 ölçüm kaydedilmiştir. EMG veri seti 2500 örnek uzunluğunda 50 Hz çentik ve 15-500 Hz bant geçiren filtrelenmiş 600 sinyalden oluşmaktadır. EMG veri setindeki altı el hareketi ve çalışmada kullanılan kısa tanımlamalar Tablo 1’de verilmiştir [11-12].

Tablo 1. EMG veri seti hareketleri ve tanımlamalar.

Silindirik nesne tutma	Silindir
Parmak ucu ile küçük nesne tutma,	Parmak ucu
İnce düz nesne tutma	Düz
Küresel nesne tutma	Küre
Avuç içine bakacak şekilde nesne tutma	Avuç
Ağır yük tutma	Askı

Şekil 4’de veri setine ait örnek EMG sinyalleri verilmiştir.

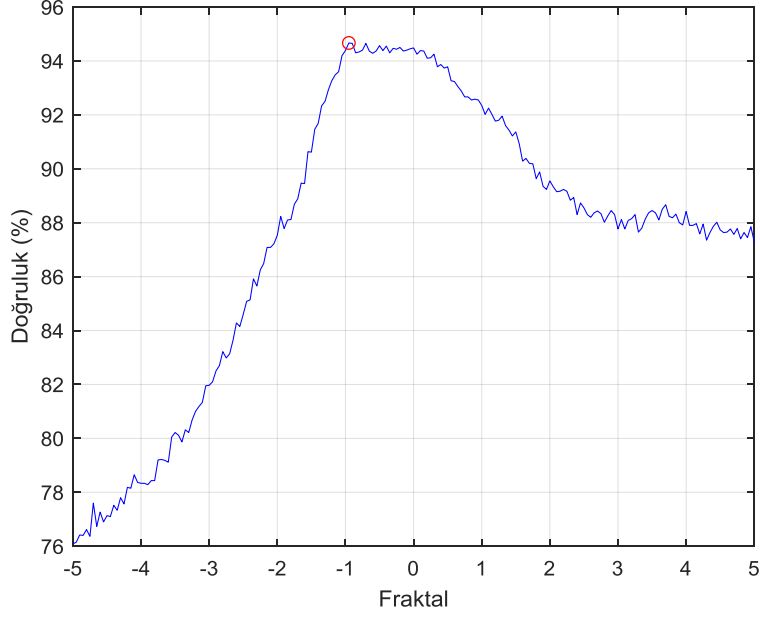
**Şekil 4.** Örnek EMG sinyalleri.

Şekil 4’de verilen sinyaller birinci kanala ait kayıtlardır. Deneysel çalışmalarda üç kanal EMG sinyalinin bir hareketi tanımladığı düşünülmüştür. Yani öznitelik çıkarma işleminde üç kanala ait öznitelikler birleştirilerek kullanılmıştır.

3. Deneysel Çalışma ve Sonuçlar

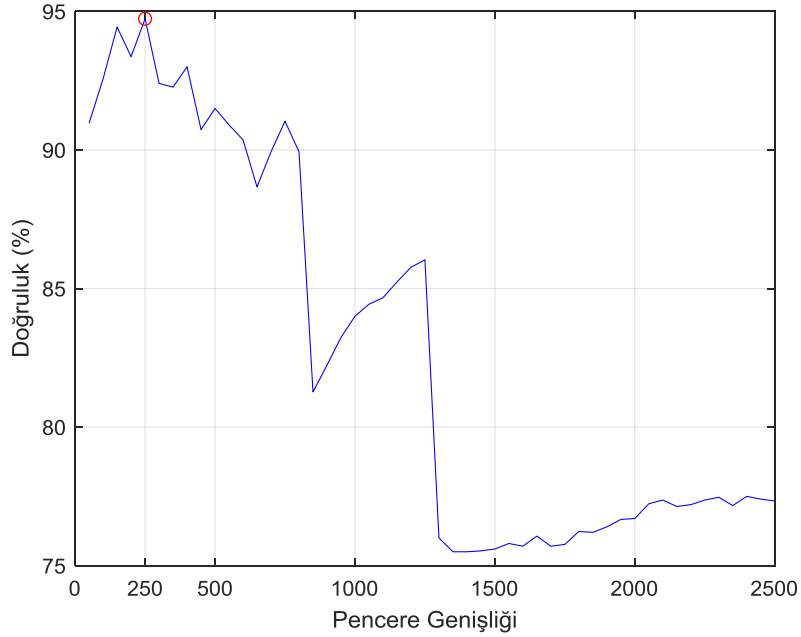
Bu çalışmada önerilen yöntem 6 temel hareketi içeren 3 kanallı 600 kayıttan oluşan veri seti ile test edilmiştir. Önerilen yaklaşımın geçerliliğini göstermek için bütün deneysel işlemlerde 10-kat çapraz doğrulama kullanılmıştır. Deneyler Matlab ortamında 2.7 GHz işlemci ve 32GB belleğe sahip bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemde F-EADA ve örtüşmesiz pencereleli KOK yöntemleri EMG sinyallerinden ayırt edici öznitelikleri çıkarmak için ve bu öznitelikleri sınıflandırmak için ise DVM sınıflandırıcı kullanılmıştır. DVM sınıflandırıcısı doğrusal çekirdeğe sahip ve çekirdek ölçeği bir olarak ampirik yolla belirlenmiştir. Deneysel çalışmada DVM’nin yanı sıra yaygın kullanılan KEYK, KA ve DDA kullanılmıştır. KEYK sınıflandırıcı için k değeri 1 ve öklid uzaklığı, KA için Gini indeksi, kök sayısı en küçük 10 ve yaprak sayısı ise en küçük 1 olarak ampirik yol ile seçilmiştir. Deneysel çalışmalarda fraktal ve pencere boyutu parametrelerinin belirlenmesinde DVM iyi başarıma sahip olduğu için kullanılmıştır. F-EADA fraktal parametresi belirlenmesinde ampirik yaklaşımla -5 ve 5 arasında 0.05 adım artışı ile en yüksek doğruluk dikkate alınarak kaba arama algoritması kullanılmıştır. F-EADA ile bir kanal EMG sinyalinden birinci ve ikinci derece polinom katsayıları kullanılarak 42

öznitelik elde edilmiştir. F-EADA yöntemi ile üç kanallı 600 EMG ölçümü için 600×126 öznitelik matrisi hesaplanmıştır. Belirtilen aralıktaki q parametresine karşın doğruluk değerleri yüzde olarak Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. q parametresine karşın doğruluk değişim eğrisi.

Şekil 5’de Şekil 5’de görüleceği gibi en yüksek başarımlar %94.67 olarak -0.95 q değeri için elde edilmiş ve deneysel çalışmanın devamında bu değer kullanılmıştır. Kayar pencere KOK ile bölgesel değişkenliğin EMG sınıflandırmada başarımlarını olumlu etkileyeceği düşünülmüştür. 50 ile 2500 arasında 50 adım aralığı ile pencere genişliği analiz edilmiştir. Pencere genişliğine karşın doğruluk değişimi Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Pencere genişliğine karşın doğruluk değişim eğrisi.

Şekil 6’da görüldüğü gibi Deneysel çalışmaların bu kısmında geleneksel KOK ve DVM sınıflandırıcısı ile %77.33 doğruluk elde edilmiştir. 250 pencere genişliği p-KOK yaklaşımında 600×30 öznitelik matrisi DVM sınıflandırıcısı ile %94.73 doğruluk başarımına sahiptir. Böylece p-KOK yaklaşımı EMG sinyalleri için KOK yöntemine göre daha ayırt edicidir. Önerilen öznitelik çıkarma yöntemlerinin tek tek ve birleştirilmiş başarımları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Önerilen öznitelik çıkarma işlemlerinin doğrulukları.

Öznitelik	Doğruluk (%)			
	DVM	kNN	KA	DDA
KOK	94.73	91.00	83.17	86.33
F-EADA	95.67	83.33	77.83	88.83
KOK+ F-EADA	96.83	88.17	84.33	90.83

Tablo 2’de KOK+F-EADA, KOK öznitelikleri ile F-EADA birleştirilerek 600×156 boyutlu öznitelik matrisi elde edilmektedir. Tablo 2’den görüleceği üzere DVM sınıflandırıcısı en yüksek doğruluğa sahiptir. Birleştirilmiş öznitelikler için ikinci en yüksek doğruluk DDA sınıflandırıcısı ile elde edilmiştir. En yüksek başarıma sahip KOK+F-EADA DVM sınıflandırıcısı yöntemine ait karmaşıklık matrisi Şekil 7’de verilmiştir.

Gerçek	Askı	97	2				1
	Avuç		94	5		1	
	Düz		4	96			
	Küresel				99		1
	Parmak Ucu		2			98	
	Silindirik	3					97
		Askı	Avuç	Düz	Küresel	Parmak Ucu	Silindirik
		Tahmin					

Şekil 7. Önerilen yönteme ait karmaşıklık matrisi.

Şekil 7’de görüleceği gibi en düşük başarımlar %94 ile avuç ile tutma eylemi ve en yüksek ise %99’luk başarımlar ise küresel tutma eyleminde elde edilmiştir. Askı ve silindirik eylemler aynı %97 gibi bir başarımla sahiptir. Karmaşıklık matrisinin satırlarında ki 1-5 arası değerler ilgili harekete ilişkin yanlış tahmini göstermektedir. Örneğin avuç eyleminde 94 tanesi doğru tahmin edilmiştir. 5 tanesi düz eylem ile 1 tanesi parmak ucu olarak yanlış tahmin edilmiştir. En yüksek başarımla sahip Küresel eylem ise 1 silindirik eylem hatası ile karıştırılmıştır. Askı eylemi 2 avuç ve 1 silindirik eylemi ile karıştırılmıştır. Silindirik eylemi ise 3 yanlış askı eylemi ile karıştırılmıştır. Ayrıca her hangi bir hareketi hatasız bir şekilde ayırt edememiştir. Önerilen yöntemin aynı veri setini kullanan yöntemler ile karşılaştırması Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Önerilen yöntemin diğer yöntemler ile karşılaştırılması.

Yöntem	Doğruluk (%)
Sapsanis C. [11]	75.000
Sapsanis ve diğerleri [12]	80.000
Arı ve diğerleri [13]	92.000
Arı ve diğerleri [14]	93.167
Önerilen Yöntem	96.833

Tablo 3'ten görüleceği üzere önerilen yöntem daha yüksek sınıflandırma doğruluğu göstermektedir. Bu karşılaştırma, önerilen yöntemin uygulama da tercih edilebilirliğini artırmaktadır.

4. Tartışma

Bu çalışmada EMG sinyallerinin sınıflandırılması için KOK, F-EADA ve DVM sınırlandırıcı yaklaşım önerilmiştir. EADA yöntemi yaygın olarak biyomedikal sinyallerden ayırt edici öznelik elde edilmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada F-EADA yönteminin EMG sınıflama için uygunluğu araştırılmıştır. Doğruluk odaklı en uygun fraktal değeri için kaba arama algoritması kullanılmıştır. Biyomedikal sinyallerden öznelik çıkarmak için KOK yöntemi kullanılmaktadır. Geleneksel KOK yöntemi bütün bir sinyal için hesaplanmaktadır. Bu çalışmada bütün bir sinyal yerine örtüşmesiz pencereli p-KOK kullanılmıştır. Bu yaklaşım sadece KOK yöntemi dikkate alındığında yaklaşık %17 doğruluk başarımı sağlamıştır. Her iki yöntem birleştiğinde %96.83 başarımla altı el hareketi tanımlanmıştır. Önerilen yöntem aynı veri setini kullanan diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında kendine en yakın yöntemden %3'ün üstünde performans sergilemektedir. Ayrıca karmaşıklık matrisi dikkate alındığında yüksek başarımla altı harekete düzgün bir şekilde dağılmıştır. Bu sonuçlar hareket tespiti ve protez/ ortorik aygıt kontrollerinde, beyin bilgisayar arayüz uygulamalarında önerilen yöntemin tercih edilebileceğini göstermektedir.

Kaynaklar

- [1] Tuncer T, Sengul D, Subasi A. Surface EMG signal classification using ternary pattern and discrete wavelet transform based feature extraction for hand movement recognition. Biomedical Signal Processing and Control 2020; 58: 101872.
- [2] Subasi A, Yaman E, Somaily Y, Alynabawi H A, Alobaidi F, Altheibani S. Automated EMG signal classification for diagnosis of neuromuscular disorders using DWT and bagging. Procedia Computer Science 2018; 140: 230-237.
- [3] Gokgoz, E, Subasi A. Comparison of decision tree algorithms for EMG signal classification using DWT. Biomedical Signal Processing and Control 2015; 18: 138-144.
- [4] Benazzouz A, Guilal R, Amirouche F, Slimane, Z E H. EMG Feature Selection for Diagnosis of Neuromuscular Disorders. 2019 International Conference on Networking and Advanced Systems (ICNAS); 26-27 June 2019; Annaba, Algeria: IEEE. pp. 1-5.
- [5] Belkhou A, Achmamad A, Jbari A. Classification and Diagnosis of Myopathy EMG Signals Using the Continuous Wavelet Transform. 2019 Scientific Meeting on Electrical-Electronics & Biomedical Engineering and Computer Science (EBBT); 24-26 April 2019; Istanbul, Turkey: IEEE. pp. 1-4.
- [6] Anil N, Sreeletha SH. EMG Based Gesture Recognition Using Machine Learning. 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS); 14-15 June 2018; Madurai, India: IEEE. pp. 1560-1564.
- [7] Arozi M, Putri, FT, Ariyanto M, Caesarendra W, Widyotriatmo A, Setiawan, JD. Electromyography (EMG) signal recognition using combined discrete wavelet transform based on artificial neural network (ANN). 2016 2nd International Conference of Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering (ICIMECE); 6-7 Oct. 2016; Yogyakarta, Indonesia: IEEE. pp. 95-99.
- [8] Mane SM, Kambli RA, Kazi FS, Singh, NM. Hand motion recognition from single channel surface EMG using wavelet & artificial neural network. Procedia Computer Science 2015; 49: 58-65.
- [9] Duan F, Dai L, Chang W, Chen Z, Zhu C, Li W. sEMG-based identification of hand motion commands using wavelet neural network combined with discrete wavelet transform. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2015; 63(3): 1923-1934.
- [10] Duque CJG, Muñoz, LD, Mejía JG, Trejos ED. Discrete wavelet transform and k-nn classification in EMG signals for diagnosis of neuromuscular disorders. 2014 XIX Symposium on Image, Signal Processing and Artificial Vision; 17-19 Sept. 2014; Armenia, Colombia: IEEE. pp. 1-5.
- [11] Sapsanis, C., Recognition of basic hand movements using Electromyography, Diploma Thesis, University of Patras, Patras, Greece, 2013

- [12] Sapsanis C, Georgoulas G, Tzes A, Lymberopoulos D. Improving EMG based classification of basic hand movements using EMD, 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC); 3-7 July 2013; Osaka, Japan: IEEE. pp. 5754-5757.
- [13] Arı A, Ayaz F, Hanbay D. EMG Sinyallerinin Kısa Zamanlı Fourier Dönüşüm Özellikleri Kullanılarak Yapay Sinir Ağları ile Sınıflandırılması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2019; 31(2): 443-451.
- [14] Arı, A, Arı B, Alçin Ö.F. Elektromiyografi Sinyallerinin Permütasyon Entropi ve Bir Boyutlu Yerel İkili Özellikler Kullanılarak Sınıflandırılması. İzmir Tepecik Eğitim ve Araştırma Hastanesi Dergisi 2020; 30: 46-49.
- [15] Peng CK, Buldyrev SV, Havlin S, Simons M, Stanley HE, Goldberger AL. Mosaic Organization of DNA Nucleotides. Physical Review E 1994; 49(2): 1685.
- [16] Castiglioni P, Andrea F. A fast DFA algorithm for multifractal multiscale analysis of physiological time series. Frontiers in physiology 2019; 10: 115.
- [17] Bursa N, Tatlıdil H. Investigation of credit default swaps using detrended fluctuation analysis which is an Econophysical technique. Eurasian Eonom Stat Empr Econ J 2015; 2: 25-33.
- [18] Qian XY, Gu GF, Zhou WX. Modified detrended fluctuation analysis based on empirical mode decomposition for the characterization of anti-persistent processes. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 2011; 390(23-24): 4388-4395.
- [19] Ulkır O, Gokhan G, Kaplanoglu E. EMG signal classification using fuzzy logic. Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering 2017; 5(2): 97-101.
- [20] Yu S, Li X, Zhang X, Wang H. The OCS-SVM: An Objective-Cost-Sensitive SVM With Sample-Based Misclassification Cost Invariance. IEEE Access 2019; 7: 118931-118942.
- [21] Vapnik VN. An overview of statistical learning theory. IEEE transactions on neural networks 1999; 10(5): 988-999.
- [22] Aslan M, Akbulut Y, Şengür A, İnce MC. Eklem tabanlı etkili düşme tespiti. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2017; 32(4): 1025-1034.
- [23] Wu X, Zuo W, Lin, L, Jia W, Zhang D. F-SVM: Combination of feature transformation and SVM learning via convex relaxation. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 2018; 29(11): 5185-5199.
- [24] Nguyen H, Demir B, Dalponte M. Weighted Support Vector Machines for Tree Species Classification Using Lidar Data. In IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium: 28 July-2 Aug. 2019; Yokohama, Japan: IEEE. pp. 6740-6743.

Güncel İkili Optimizasyon Algoritmalarının Kısıtsız Kıyaslama Fonksiyonlarındaki Performans Karşılaştırmaları

Erkan TANYILDIZI¹, Abdullah ÇELİK^{2*}

^{1,2} Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Yazılım Mühendisliği Bölümü, Elazığ
etanyildizi@gmail.com, acelik23@gmail.com

(Geliş/Received: 20/02/2020;

Kabul/Accepted:18/06/2020)

Öz: İkili optimizasyon algoritmaları, 0 ve 1 gibi kesin sonuçlar ürettiğinden algoritma geliştiricileri için ilgi alanı olmuştur. Bu çalışmada ikili problemleri çözmek için geliştirilen algoritmalarından başarımları yüksek olan optimizasyonları belirlemek amacıyla kıyaslama fonksiyonları kullanarak test yapılmıştır. İkili optimizasyonlar, optimum çözümün garanti edilemediği algoritmaların aksine 0 ve 1 gibi sonuç üreterek kolaylık sağlamaktadır. Bu kolaylığı daha etkin kullanmak amacıyla aktif olarak kullanılan optimizasyonlar ile hibrid yöntemlerin gelişimi sağlanmıştır. Bu yöntemlerden başarılı olanların belirlenmesi çalışmalarımızda rehber olması açısından önem arz etmektedir. Bunu sağlamak için ikili optimizasyon problemleri, kullanılan yöntemler, modifikasyon teknikleri hakkında literatür taraması yapıldıktan sonra 13 adet kısıtsız kıyaslama fonksiyonu kullanarak İkili Parçacık Sürü Optimizasyonu (BPSO), İkili Gri Kurt Optimizasyonu (BGWO), İkili Yusufçuk Algoritması (BDA), İkili Yarasa Algoritması (BBA) ve hibrid BPSOGSA algoritmaları test edilmiş ve optimuma en yakın sonuç veren algoritmaların tespiti yapılmıştır. Elde edilen test sonuçlarına göre optimuma en yakın sonucu BBA vermiştir.

Anahtar kelimeler: İkili optimizasyon, kısıtsız kıyaslama fonksiyonları, modifikasyon teknikleri, başarımlar değerlendirilmesi.

Performance Comparisons of Current Binary Optimization Algorithms in Unconstrained Benchmark Functions

Abstract: Binary optimization algorithms have been of interest for algorithm developers as they produce precise results such as 0 and 1. In this study, testing was done by using benchmark functions to determine the optimizations with high performance from algorithms developed to solve binary problems. Binary optimizations provide convenience by producing results like 0 and 1, unlike algorithms where the optimum solution cannot be guaranteed. In order to use this facility more effectively, the development of hybrid methods has been provided with the optimizations used actively. The determination of the successful ones is important in terms of being a guide in our studies. To achieve this, after searching the literature on binary optimization problems, methods, modification techniques, using 13 unconstrained benchmark functions, Binary Particle Swarm Optimization (BPSO), Binary Gray Wolf Optimization (BGWO), Binary Dragonfly Algorithm (BDA), Binary Bat Algorithm (BBA) and hybrid BPSOGSA algorithms were tested and algorithms that gave the best results were determined. According to the test results obtained, BBA gave the closest result to the optimum.

Key words: Binary optimization, unconstrained benchmark functions, modification techniques, performance evaluation.

1. Giriş

Optimizasyon, en iyiye ulaşma amacıyla verilen amaçlar için belirli kısıtlamalar kullanılarak en iyi çözümün elde edilme sürecidir. Bu nedenle karşılaşılan problemlerin çözümü için kullanılan metot ve toleransa bağlı olarak birçok optimizasyon teknikleri farklı alanlara uygulanmıştır [1]. Optimizasyon işlemine maliyetin azaltılıp karın artırılması, zamanın faydalı kullanılması, enerji verimliliğinin artırılması, seri üretimi gerçekleştirilen herhangi bir ürünün sayısının artırılması ya da elektronik olarak çalışan bir cihazın boyutunun küçülmesi gibi çok farklı alanlarda ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle optimizasyon algoritmaları ile ilgili çalışmalar yıllar önce başlamış ve popülerliği giderek artacak şekilde devam etmektedir [2].

Günümüzde, optimizasyonlar sosyal bilimlerden matematik bilimine, mühendislikten, fizibiliteye kadar uzanan geniş bir alanda kullanılmakta ve bu alanlardaki problemleri gerçeğe en yakın şekilde sürekli sonuçlar ile çözmektedir. Birçok gerçek hayat problemi sürekli optimizasyonlarla çözüldüğü gibi ikili optimizasyon yöntemleri ile daha net sonuçlar ortaya koyarak çözümlenebilir. Bu sayede yanıtların evet/hayır, seçme/seçmeme ya da 0-1 değerleri ile algoritmalarla kesin sonuçların alınmasını sağlamaktadır. Bu durum sağlandığında ise

* Sorumlu yazar: acelik23@gmail.com Yazarların ORCID Numarası:¹ 0000-0003-2973-9389, ² 0000-0002-3430-4630

algoritmaların başarımının değerlendirilmesi ve test problemleri üzerinde denenmesi daha net sonuçlar vermektedir [3].

Literatürlerde ikili problemleri çözmek için sürekli bir algoritma gerektirecek farklı yöntemler vardır. Bu yöntemlerden bazıları algoritmanın yapısını değiştirirken, diğerleri algoritmanın mekanizmasını ikili arama alanlarında korur. Literatürlerde Genetik Algoritma (GA), Harmoni Arama (HS), Diferansiyel Evrim (DE), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Yerçekimi Arama Algoritması (GSA) gibi stokastik optimizasyon algoritmaları ikili problemleri çözmek için uyarlanmıştır [4].

1960 ve 1970'lerde John Holland ve arkadaşları tarafından geliştirilen ve ikili optimizasyon algoritmaların ilki olarak bilinen Genetik Algoritma (GA), Charles Darwin'in doğal seleksiyon teorisine dayanan biyolojik evrimin bir modeli veya soyutlamasıdır. Adaptif ve yapay sistemlerin çalışmasında çaprazlama ve birey üretimi, mutasyon ve seçimi ilk kullanan Holland oldu [5]. Bu genetik operatörler, bir problem çözme stratejisi olarak genetik algoritmanın önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Algoritmada kullanılan parametreler ikili yapıda temsil edilmektedir. O zamandan beri, genetik algoritmaların birçok çeşidi geliştirilmiş ve grafik renklendirmeden desen tanımayaya, seyahat eden satıcı sorunu gibi ayrık sistemlerden havacılık mühendisliğinde hava folyosunun verimli tasarımı gibi sürekli sistemlere ve finansal piyasadan çok amaçlı mühendislik optimizasyonuna kadar çok çeşitli optimizasyon problemlerine uygulanmıştır [6].

İkili HS algoritması, ikili optimizasyonu gerçekleştirmek için bir dizi uyum arama kaygısı ve perde ayarlama kuralları kullanır. Ayrıca, ikili DE ayrık problemleri çözmek için bir olasılık tahmin operatörü kullanır. İkili PSO ve İkili GSA mekanizması oldukça benzerdir, çünkü her ikisi de ikili problemleri çözmek için transfer fonksiyonlarını kullanır[4].

Bu çalışmanın ikinci bölümünde ikili optimizasyonların kullandığı modifikasyon teknikleri ve yöntemler anlatılmıştır. Üçüncü bölümde ikili optimizasyon kullanılarak hibridize edilmiş algoritmalar hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde optimizasyonlar arasındaki performans değerlendirmesini yapmak için kullanılacak kısıtsız kıyaslama fonksiyonları tanıtılmıştır. Beşinci bölümde ikili optimizasyonlar kullanılarak geliştirilen Hibrid optimizasyonlarının performans değerlendirmesi için test sonuçları oluşturulmuştur. Altıncı bölümde elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır. Yedinci bölümde ise çalışmadan elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. İkili Optimizasyonlar İçin Kullanılan Modifikasyon Teknikleri

Literatürde, temel problemler için aday çözüm üretme amacıyla modifikasyon yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. İkili problemlerin çözümü için çaprazlama ve mutasyon operatörleri ile bit dizilerini kullanarak aday çözüm ürettiğinden genetik algoritma gibi yöntemlerin kullanımı kolaylık sağlamaktadır. Genetik algoritma haricindeki algoritmalar, karar değişkenleri sürekli değişen değerler alan problemlerin çözümünde kullanılmak için tasarlandığından ikili değerlere dönüşümün sağlanması gerekmektedir. Bu değişiklikler yöntemin karakteristiğine ve çalışma şekline göre farklılık gösterir. Bu nedenle, aşağıdaki gibi bazı modifikasyon teknikleri önerilmiştir [7].

- **Transfer fonksiyonu:** Bu fonksiyon, konum vektörünün elemanlarını 0'dan 1'e değiştirme olasılığını tanımlar (veya tam tersi). Bu teknik ilk olarak PSO'ya uygulanmıştır. Transfer fonksiyonları parçacıkları ikili bir alanda hareket etmeye zorlar. Bir transfer fonksiyonunun aralığı, bir parçacığın konumunu değiştirmesi olasılığını temsil ettiklerinden, $[0,1]$ aralığında sınırlanır. Hızın büyük bir mutlak değeri için pozisyon değiştirme olasılığı yüksek olur. Hızları için büyük mutlak değerleri olan parçacıklar en iyi çözümden uzaktır. Bu nedenle bir sonraki yinelemede konumlarını değiştirir[8].

- **Açı modülasyonu:** Bu teknik telekomünikasyon endüstrisinden türetilir ve sinyal işleme alanında kullanılır. Bu yöntemin ardında yatan fikir, ikili diziler oluşturmak için bir sinüs ve kosinüs fonksiyonunun kullanılmasıdır. Fonksiyonun dört gerçek değerli parametresi vardır ve her parametre seti sadece bir ikili diziyi temsil eder. Bu, ikili bir arama boşluğunun eşdeğer dört boyutlu sürekli boşluğa dönüştürülmesini kolaylaştırır[9].

- **Kuantumdan ilham alan bitler:** İki durumlu bir kuantum bilgisayarında saklanabilecek en küçük bilgi birimine kuantum biti denir. Kuantum bilgisayarlar, kuantumdan ilham alan bitlerini (Q-bitleri) manipüle ederek ve bunlara bir dizi kuantum operatörü uygulayarak çalışır. Bir Q-bit, "1", "0" durumlarını veya bu ikisinin üst üste binmesini sunabilir. Meta-sezgisel arama algoritması, yapılarını oluşturmak için kuantumdan ilham alan bitleri kullanır. [10].

- **Genetik operatörler:** Arama alanının ikili özelliği, evrimsel algoritmalarda ikili çapraz geçiş ve takas operatörü gibi genetik operatörlerin kullanılmasına izin verir. Örneğin Öztürk ve ark. genetik algoritmaların özel arama stratejileri tasarlamak için kullandığı ABC algoritmasının etkin bir ikili varyantını önermişlerdir [11,12].

• **İkili işlemler:** İkili uzayda, ikili optimizasyon problemlerini çözmek için, her vektörün elemanları mantıksal sayı olarak kabul edildiğinden XOR mantık operatöründen yararlanılır [13].

• **Farklılık ölçüsü:** İkili yapıların benzerlik/farklılığının ölçülmesi, kümeleme ve sınıflandırma gibi birçok problemde kritik rol oynar. İki nesne arasındaki benzerlik miktarını nicelemek, birbirlerine ne kadar benzediklerini veya birbirlerinden ne kadar uzakta olduklarını, iki yapının bitleri arasında ortak bir örüntüyü paylaşma derecesine benzer görülmesine göre bulunur [14].

• **Sezgisel yöntemler:** Bu yöntemlerde hedef problemin karmaşıklığı ve ölçeğine göre, uygun bir arama stratejisi tasarlamak için seçilir[3].

Hedef sorunların karmaşıklığına ve ölçeğine bağlı olarak, yukarıda bahsedilen yöntemlerden herhangi biri uygun bir arama stratejisi tasarlamak için seçilebilir. İlk iki yaklaşımı izleyen ikili algoritmalar, sürekli arama motorlarıyla çalışır. Açık modülasyon tekniği herhangi bir ikili problemi dört boyutlu bir sürekli probleme indirgese de, ikili problemin boyutu yüksekse, sürekli problemin çözümünün son derece doğru olması gerekir. Ancak bu yöntemler düşük ölçekli problemler için etkilidir. Diğer yandan, kuantumdan ilham alan bitler ve ikili veya genetik operatörler, yenilikçi modern ikili algoritmaların geliştirilmesinde kullanılan çok yönlü tekniklerdir. Ayrıca, ikili dizilerin farklılığını ölçmeye dayanan teknikler, ikili algoritmaların geleneksel arama stratejileri ile donatılmasını sağlar [11].

3. Materyal ve Metot

Gerçek yaşam ikili optimizasyon problemleri genellikle yüksek boyutlu, çok modlu ve çözülmesi zor problemlerdir. Bu, birçok çalışmayı modern ikili algoritmalar geliştirmek için motive etmiştir[11]. Bu amaçla ikili optimizasyon algoritmaları, İkili Parçacık Sürü Optimizasyonu (BPSO), İkili Karınca Kolonisi Optimizasyonu (BACO), İkili Gri Kurt Optimizasyonu (BGWO), İkili Balina Optimizasyon Algoritması (BWOA), İkili Yapay Arı Kolonisi (BABC), İkili Ateş Böceği Algoritması (BFA), İkili Diferansiyel Algoritması (BDE), İkili Yusufçuk Algoritması (BDA), İkili Kedi Sürüsü Optimizasyonu (BCSO), İkili Yarasa Algoritması (BBA), İkili Yerçekimi Arama Algoritması (BGSA) olarak geliştirilmiştir. Çalışmada BBA, BPSO, hibrid BPSOGSA, BGWO ve BDA ikili optimizasyon algoritmaları kısıtsız kıyaslama fonksiyonlarında kullanılmıştır.

3.1 İkili parçacık sürü optimizasyonu (BPSO)

İkili parçacık sürüsü optimizasyonu (BPSO), ikili optimizasyon görevlerini çözmek için önerilen parçacık sürüsü optimizasyonunun (PSO) ikili versiyonudur. PSO gibi BPSO da hız ve pozisyon güncellemesinde kişisel en iyi (en iyi) ve küresel en iyi (en iyi) çözümleri içerir. Her parçacık (çözümleri) için hız olarak güncellenir [15]:

$$v_i^d(t+1) = wv_i^d(t) + c_1r_1(pbest_i^d(t) - x_i^d(t)) + c_2r_2(gbest^d(t) - x_i^d(t)) \quad (1)$$

Daha sonra hız, Denklem 2 kullanılarak olasılık değerine dönüştürülür ve parçacığın konumu Denklem 3'te gösterildiği gibi güncellenir [16]:

$$S(v_i^d(t+1)) = \frac{1}{1+\exp(-v_i^d(t+1))} \quad (2)$$

$$x_i^d(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{if } rand < S(v_i^d(t+1)) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

3.2 PSOGSA'nın ikili sürümü (BPSOGSA)

Orijinal PSOGSA'da, ajanlar sürekli gerçek etki alanına sahip konum vektörlerine sahip oldukları için sürekli olarak arama alanı etrafında hareket edebilirler. Arama araçlarının ikili bir arama alanında hareket etmesini istemek için, konum güncellemesini değiştirmemiz gerekir. Bir maddenin pozisyonunu hız olasılığı ile değiştirmek için bir transfer fonksiyonuna da ihtiyaç duyulmaktadır. Transfer fonksiyonları hız değerlerini pozisyonların güncellenmesi için olasılık değerleriyle eşleştirir. Bir aktarım işlevi, hızın büyük bir mutlak değeri

için pozisyonu değiştirme olasılığının yüksek olmasını sağlamalıdır. Ek olarak, hızın küçük bir mutlak değeri için pozisyonun değiştirilmesi için küçük bir olasılık sunulmalıdır. Ayrıca, bir transfer fonksiyonunun aralığı [0, 1] aralığında sınırlanmalı ve hızın artmasıyla arttırılmalıdır[4].

$$S(V_i^d(t)) = |\tanh(v_i^d(t))| \quad (4)$$

Bu denklemi, BPSOGSA'daki ajanların hızlarını konum vektörlerinin elemanlarını çevirme olasılıklarıyla eşleştirmek için kullanırız. Olasılıkları hesapladıktan sonra, ajanlar Denklem 5'te sunulan kurallara göre pozisyonlarını günceller[4].

$$\begin{cases} \text{if } rand < S(V_i^d(t+1)) \text{ then } x_i^d(t+1) = \text{complement}(x_i^d(t)) \\ \text{else } x_i^d(t+1) = x_i^d(t) \end{cases} \quad (5)$$

3.3 İkili gri kurt optimizasyonu (BGWO)

Genel olarak, GWO sürekli optimizasyon problemlerini çözmek için tasarlanmıştır. Özellik seçimi gibi ikili optimizasyon sorunları için GWO'nun ikili sürümü gerekir. Bu yaklaşıma göre, kurt pozisyonunu Denklem 6'daki gibi güncellemek için geçiş operatörünü kullanır[17,18]:

$$X(t+1) = \text{Crossover}(Y_1, Y_2, Y_3) \quad (6)$$

Burada Crossover (Y1, Y2 ve Y3), çözeltiler arasındaki geçiş işlemidir ve Y1, Y2 ve Y3, sırasıyla alfa, beta ve delta kurtlarının hareketinden etkilenen ikili vektörlerdir. BGWO'da, Y1, Y2 ve Y3 sırasıyla Denklem 7, 10 ve 13 kullanılarak tanımlanır[17,18].

$$Y_1^d = \begin{cases} 1, & \text{if } (X_\alpha^d + bstep_\alpha^d) \geq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

Burada X_α^d alfa pozisyonudur, d arama alanının boyutudur ve $bstep_\alpha^d$ şu şekilde ifade edilebilen ikili adımı temsil eder[17,18]:

$$bstep_\alpha^d = \begin{cases} 1, & \text{if } cstep_\alpha^d \geq r_3 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

Buradaki r_3 , [0, 1] 'de rastgele bir vektördür ve $cstep_\alpha^d$, Denklem 9' da olduğu gibi hesaplanabilen sürekli değerli adım boyutunu belirtir[17,18].

$$cstep_\alpha^d = \frac{1}{1 + \exp(-10(A_1^d \cdot D_\alpha^d - 0.5))} \quad (9)$$

Burada A_1^d ve D_α^d , GWO'ya ait denklemler ile belirlenir[17,18].

$$Y_2^d = \begin{cases} 1, & \text{if } (X_\beta^d + bstep_\beta^d) \geq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

Burada X_β^d beta konumudur, d arama alanının boyutudur ve $bstep_\beta^d$ şu şekilde ifade edilebilen ikili adımı temsil eder[17,18]:

$$bstep_{\beta}^d = \begin{cases} 1, & \text{if } cstep_{\beta}^d \geq r_4 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

Burada r_4 , $[0, 1]$ 'de rastgele bir vektördür ve $cstep_{\beta}^d$, Denklem 12' de olduğu gibi hesaplanabilen sürekli değerli adım boyutunu belirtir[17,18].

$$cstep_{\beta}^d = \frac{1}{1 + \exp(-10(A_1^d \cdot D_{\beta}^d - 0.5))} \quad (12)$$

Burada A_1^d ve D_{β}^d , GWO'ya ait denklemler ile belirlenir[17,18].

$$Y_3^d = \begin{cases} 1, & \text{if } (X_{\delta}^d + bstep_{\delta}^d) \geq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

Burada X_{δ}^d beta konumudur, d arama alanının boyutudur ve $bstep_{\delta}^d$ şu şekilde ifade edilebilen ikili adımı temsil eder[17,18]:

$$bstep_{\delta}^d = \begin{cases} 1, & \text{if } cstep_{\delta}^d \geq r_5 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

Burada r_5 , $[0, 1]$ 'de rastgele bir vektördür ve $cstep_{\delta}^d$, Denklem 15' de olduğu gibi hesaplanabilen sürekli değerli adım boyutunu belirtir[17,18].

$$cstep_{\delta}^d = \frac{1}{1 + \exp(-10(A_1^d \cdot D_{\delta}^d - 0.5))} \quad (15)$$

Burada A_1^d ve D_{δ}^d , GWO'ya ait denklemler ile belirlenir. Y_1 , Y_2 ve Y_3 elde edildikten sonra, kurdun yeni pozisyonu Denklem 16'daki gibi çaprazlama işlemi kullanılarak güncellenir[17,18]:

$$X^d(t+1) = \begin{cases} Y_1^d, & \text{if } r_6 < \frac{1}{3} \\ Y_2^d, & \text{if } \frac{1}{3} \leq r_6 \leq \frac{2}{3} \\ Y_3^d, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

Burada d , arama alanının boyutu ve r_6 , $[0, 1]$ arasında eşit olarak dağıtılmış rastgele bir sayıdır[17,18].

Başlangıçta, gri kurt popülasyonu rastgele başlatılır (bit 1 veya 0). Daha sonra, her kurdun zindeliği değerlendirilir. En iyi, ikinci en iyi ve üçüncü en iyi çözümler alfa, beta ve delta olarak tanımlanır. Her kurt için, Y_1 , Y_2 ve Y_3 sırasıyla Denklem 7,10 ve 13 kullanılarak hesaplanır. Daha sonra, kurt pozisyonu Y_1 , Y_2 ve Y_3 arasındaki geçit uygulanarak güncellenir. Daha sonra, her kurdun zindeliği değerlendirilir. Yinelemeli olarak alfa, beta ve delta konumları güncellenir. Algoritma, sonlandırılan kriter karşılanana kadar tekrarlanır. Sonunda, alfa çözümü en uygun özellik olarak seçilir[17,18].

3.4 İkili yarasa algoritması (BBA)

İkili bir optimizasyon algoritmasının arama ajanları (parçacıkları) sadece bu hiper küpün daha yakın ve daha uzak köşelerine çeşitli sayıda bit çevirerek kayabilir. Bu nedenle, BA'nın ikili versiyonunu tasarlariken, hız ve pozisyon güncelleme sürecinin bazı temel kavramları değiştirilmelidir. BA'nın sürekli versiyonunda, yapay yarasalar, sürekli gerçek alan içindeki konum ve hız vektörlerini (veya güncellenmiş konum vektörlerini) kullanarak arama alanı etrafında hareket edebilirler. Sonuç olarak, konum güncellemesi kavramı denklem kullanarak konumlara hız ekleyerek yarasalar için kolayca uygulanabilir [19].

$$S(v_i^k(t)) = \frac{1}{1+e^{-v_i^k(t)}} \quad (17)$$

Burada $v_i^k(t)$, t tekrarında k. boyutunda i parçacığının hızıdır[19].

Transfer fonksiyonlarını kullanarak olasılıkları hesapladıktan sonra, parçacıkların pozisyonunu Denklem 26'daki gibi güncellemek için yeni bir pozisyon güncelleme denklemi gereklidir [19]:

$$x_i^k(t+1) = \begin{cases} 0 & \text{If } rand < S(v_i^k(t+1)) \\ 1 & \text{If } rand \geq S(v_i^k(t+1)) \end{cases} \quad (18)$$

Bu yöntemin bir dezavantajı vardır, zira parçacıklar 0 veya 1 değerlerini almaya zorlanmaktadır. Böylece, hız değerleri arttığında parçacıklar pozisyonlarında değişmeden kalır. Bununla birlikte, bir transfer fonksiyonu tasarlamak için yukarıda belirtilen kavramlara göre, daha iyi bir yol, konumlarını değiştirmek için yüksek hızlı parçacıkları zorunlu kılmaktır. Bunu Denklem 19 ve 20'de olduğu gibi yapmak için v şeklinde bir aktarım işlevi ve konum güncelleme kuralı önerilmektedir[19].

$$V(v_i^k(t)) = \left| \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\pi}{2} v_i^k(t)\right) \right| \quad (19)$$

$$x_i^k(t+1) = \begin{cases} (x_i^k(t))^{-1} & \text{If } rand < V(v_i^k(t+1)) \\ x_i^k(t) & \text{If } rand \geq V(v_i^k(t+1)) \end{cases} \quad (20)$$

3.5 İkili yusufçuk algoritması (BDA)

İkili bir optimizasyon probleminde, arama alanı hiper küp olarak kabul edilir, burada bir kişi konum vektörünün bir veya daha fazla bitini $x = \{x_1, x_2, \dots, x_d\}$ değiştirerek konumunu bir konumdan diğerine değiştirebilir. Orijinal Yusufçuk Algoritması (DA) sürekli optimizasyon problemlerini ele almak için tasarlandığından, bireyin pozisyonu mevcut vektörün vektörü adım vektörüne eklenerek güncellenir. Ancak bu mekanizma, özellik seçimi gibi bir ikili optimizasyon problemini ele almak için kullanılamaz[20].

Transfer fonksiyonları, mevcut iterasyonda, d. boyutunda i. arama maddesinin adım vektörünün (hız) değerine dayanarak bir konumun elemanlarını 0 veya 1 olarak değiştirme olasılığını üretmek için kullanılır. Denklem 21'de, sürekli konumların ikili olarak değiştirilme olasılığını hesaplamak için kullanılmıştır[20].

$$T(v_d^i(t)) = \left| v_d^i(t) / \sqrt{1 + (v_d^i(t))^2} \right| \quad (21)$$

Denklem 29'dan elde edilen $T(v_d^i(t))$ sonucu daha sonra Denklem 22'ye göre pozisyon vektörünün i. elemanını 0 veya 1'e dönüştürmek için kullanılır[20].

$$X(t+1) = \begin{cases} \neg X_t & r < T(v_k^i(t)) \\ X_t & r \geq T(v_k^i(t)) \end{cases} \quad (22)$$

4. Performans Karşılaştırması İçin Kullanılan Kısıtsız Kıyaslama Fonksiyonları

Çalışmamızda optimizasyonların performansını farklı açılardan test etmek için farklı özelliklere sahip iki test fonksiyonu grubu kullanılmıştır. Bunlar: Tek modlu (Tablo 1) ve çok modlu (Tablo 2) fonksiyonlardır. İsimlerinin ima ettiği gibi, tek modlu test fonksiyonlarının tek bir optimum özelliği vardır, böylece bir algoritmanın sömürüsü ve yakınsamasını kıyaslayabilirler [16].

Tablo 1.Tek modlu kıyaslama fonksiyonları[16]

Fonksiyon Adı	Fonksiyon Denklemi	Değişken Boyutu	Aralık	Optimum Değer
Sphere	$F_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	30	[-5.12,5.12]	0
Schwefel 2.22	$F_2(x) = \sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $	30	[-10,10]	0
Schwefel 1.2	$F_3(x) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^i x_j \right)^2$	30	[-100,100]	0
Schwefel 2.21	$F_4(x) = \max_i \{ x_i , 1 \leq i \leq n\}$	30	[-100,100]	0
Generalized Rosenbrock	$F_5(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100 (x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$	30	[-30,30]	0
Step	$F_6(x) = \sum_{i=1}^n (x_i + 0.5)^2$	30	[-100,100]	0
Quartic	$F_7(x) = \sum_{i=1}^n ix_i^4 + \text{random}[0,1)$	30	[-1.28,1.28]	0

Çok-modlu test fonksiyonlarının birden fazla optimum özelliği vardır, bu da onları tek-işlevli fonksiyonlardan daha zorlaştırır. Optimalardan birine küresel optimum, geri kalanına ise yerel optima denir. Bir algoritma tüm yerel optimanın küresel optimum yaklaşıma yaklaşmasını ve belirlemesini engellemelidir. Bu nedenle, algoritmaların keşfi ve lokal optimadan kaçınması, çok modlu test fonksiyonları ile test edilebilir [16].

Tablo 2.Çok modlu kalite fonksiyonları[16]

Fonksiyon Adı	Fonksiyon Denklemi	Değişken Boyutu	Aralık	Optimum Değer
Generalized Schwefel	$F_8(x) = \sum_{i=1}^n -x_i \sin(\sqrt{ x_i })$	30	[-500,500]	-418.98xn
Generalized Rastrigin	$F_9(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$	30	[-5.12,5.12]	0
Ackley	$F_{10}(x) = -20 \exp \left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \right) - \exp \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i) \right) + 20 + e$	30	[-32,32]	0
Griewank	$F_{11}(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 \prod_{i=1}^n \cos \left(\frac{x_i}{\sqrt{i}} \right) + 1$	30	[-600,600]	0
Penalized Functions 1	$F_{12}(x) = \frac{\pi}{n} \{ \sin(\pi y_1) + \sum_{i=1}^{n-1} (y_i - 1)^2 [10 \sin^2(\pi y_{i+1})] + (y_n - 1)^2 \} + \sum_{i=1}^n u(x_i, 10, 100, 4)$ $y_i = 1 + \frac{x_i + 1}{4} u(x_i, a, k, m) = \begin{cases} k(x_i - a)^m x_i > a \\ 0 - a < x_i < a \\ k(-x_i - a)^m x_i > -a \end{cases}$	30	[-50,50]	0
Penalized Functions 2	$F_{13}(x) = 0.1 \{ \sin^2(3\pi x_1) + \sum_{i=1}^n (x_i - 1)^2 [1 + \sin^2(3\pi x_i + 1)] + (x_n - 1)^2 [1 + \sin^2(2\pi x_n)] \} + \sum_{i=1}^n u(x_i, 5, 100, 4)$	30	[-50,50]	0

5. Kısıtsız Kıyaslama Fonksiyonları ile Yapılan Deneyler

Yapılan literatür araştırmasında elde edilen optimizasyon problemlerini kıyaslamak için kalite test fonksiyonları kullanılmıştır. Kısıtsız kıyaslama fonksiyonlarını uygulamak için BPSO, BBA, BPSOGSA, BGWO, BDA algoritmaları kullanılmıştır. Test sonuçlarının eşit şartlarda olması için iterasyon sayısı, parçacık sayısı, değişken boyutu ve kullanılan fonksiyonun türü aynı olması gerekir. Bu nedenle;

- Parçacık sayısı:50,
- İterasyon sayısı:1000,
- Değişken boyutu:100,

- Kullanılan fonksiyon türü sayısı:13 olarak belirlenmiştir.

Elde edilen test sonuçlarına göre tek modlu kısıtsız kıyaslama fonksiyonlarına ait sonuçlar Tablo 3, çok modlu kısıtsız kıyaslama fonksiyonlarına ait sonuçlar Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 3. Tek modlu kısıtsız kıyaslama fonksiyonlarına ait sonuçlar

Fonksiyon	İstatistik	BPSO	BBA	BPSOGSA	BGWO	BDA
F1	En iyi	18.00000	0	1.000000	32.000000	2.000000
	En kötü	43.00000	39.000000	41.000000	39.000000	36.00000
	Ortalama	18.12600	0.289000	7.687000	32.056000	13.53600
	Standart Sapma	1.426239	1.849026	11.253251	0.552421	9.791659
F2	En iyi	16.00000	0	1.000000	33.000000	3.000000
	En kötü	33.00000	41.00000	39.000000	37.000000	44.00000
	Ortalama	16.09900	0.223000	7.920000	33.035000	13.99300
	Standart Sapma	1.061285	1.936239	11.771753	0.312846	9.665214
F3	En iyi	10454.00	0	3.000000	42644.00	95.00000
	En kötü	59046.00	50454.00	45281.000	55664.00	45145.00
	Ortalama	10604.66	83.74600	5040.7520	42725.48	7938.714
	Standart Sapma	2109.9250	1691.695	9665.2969	949.8650	8703.521
F4	En iyi	1	1	1	1	1
	En kötü	1	1	1	1	1
	Ortalama	1	1	1	1	1
	Standart Sapma	0	0	0	0	0
F5	En iyi	2238.000	302.000000	1244.0000	0	709.000
	En kötü	3650.000	3748.00000	4147.0000	4161.00000	4151.00
	Ortalama	2244.306	405.058000	1774.9190	15.677000	1881.11
	Standart Sapma	76.86051	273.233173	875.84557	203.049284	935.763
F6	En iyi	57.000000	25.000000	27.000000	85.000000	27.000000
	En kötü	107.000000	99.000000	105.000000	101.000000	101.00000
	Ortalama	57.294000	25.424000	39.980000	85.300000	51.940000
	Standart Sapma	3.059236	3.359689	22.231280	2.044059	21.774263
F7	En iyi	592.000052	0.001582	17.000005	1577.00000	78.000002
	En kötü	1836.07257	1820.43668	2009.130262	2047.90624	1786.0955
	Ortalama	596.377988	10.496406	331.665571	1580.08861	611.65183
	Standart Sapma	58.766149	78.522309	541.723280	35.082173	469.17476

Tablo 3 incelendiğinde F4 ve F5 hariç tüm fonksiyonlar için BBA'nın en iyi sonuca ulaştığı görülmektedir. BBA'nın F1,F2,F3 ve F7 için optimum değeri elde ettiği, F4 için tüm algoritmaların aynı sonucu verdiği, F5'te ise BGWO'nun optimuma ulaşarak en iyi sonucu verdiği görülmektedir. F4 için tüm ikili optimizasyon algoritmaları aynı sonucu vermiştir.

Tablo 4.Çok modlu kalite fonksiyonlarına ait sonuçlar

Fonksiyon	İstatistik	BPSO	BBA	BPSOGSA	BGWO	BDA
F8	En iyi	-68.159150	-84.147098	-84.147098	-84.147098	-83.30563
	En kötü	-48.805317	-50.488259	-49.646788	-50.488259	-51.32973
	Ortalama	-68.071637	-83.504215	-78.217252	-83.985536	-74.79246
	Standart Sapma	0.958864	1.815894	9.925932	1.501577	6.834448
F9	En iyi	15.000000	0	1.000000	36.000000	1.000000
	En kötü	40.000000	43.000000	41.000000	41.000000	41.000000
	Ortalama	15.106000	0.525000	7.949000	36.040000	11.655000
	Standart Sapma	1.224853	2.104710	11.859133	0.422586	9.630718
F10	En iyi	1.711187	0	0	2.107583	0.557760
	En kötü	2.458254	2.376360	2.170738	2.319824	2.348296
	Ortalama	1.715371	0.076740	0.536441	2.110000	1.246636
	Standart Sapma	0.043084	0.233549	0.850032	0.020681	0.561815
F11	En iyi	0.236655	0	0.023147	0.459676	0.033550
	En kötü	0.466461	0.487576	0.522854	0.518773	0.541036
	Ortalama	0.237619	0.004144	0.098055	0.459908	0.161211
	Standart Sapma	0.012234	0.023773	0.129901	0.003005	0.110929
F12	En iyi	2.197151	1.325359	1.325359	2.960951	1.370520
	En kötü	3.483241	3.498949	3.573562	3.184790	3.483241
	Ortalama	2.201781	1.337168	1.693344	2.963178	1.884700
	Standart Sapma	0.062327	0.092958	0.633338	0.020818	0.469496
F13	En iyi	2.100000	0.100000	0	0	0.300000
	En kötü	3.900000	4.000000	4.000000	3.800000	3.700000
	Ortalama	2.110100	0.156400	0.710800	0.010000	1.432800
	Standart Sapma	0.103724	0.240285	1.209391	0.153374	0.984161

Tablo 4'de görüldüğü gibi BBA'nın F9,F10 ve F11'de, BPSOGSA'nın F10 ve F13'de BGWO'nun F13'de optimum sonuca ulaşmıştır. F7'de BBA, BPSOGSA ve BGWO'nun, F12'de BBA ve BPSOGSA'nın optimuma en yakın sonuca ulaşmıştır. Tek modlu kısıtsız kıyaslama fonksiyonlarında olduğu gibi Tablo 4'de de BBA en iyi performans göstermiştir.

6. Bulgular Ve Tartışma

Yapılan çalışmada ikili optimizasyon kullanılarak sunulan hibrid algoritmaların başarımını değerlendirmek için 13 adet kalite test fonksiyonu kullanılarak sonuçlar analiz edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen bulgulara göre 13 adet kalite test fonksiyonundan 8'inde Tablo 5'de belirtildiği gibi optimum sonuca ulaşılmıştır. Bunlardan BBA, 6 tanesinde optimum sonuca ulaşırken, BPSOGSA 2 tane, BGWO ise 2 tanesinde optimum sonuca ulaşmıştır.

Tablo 5. Kalite test fonksiyonları sonucu optimuma ulaşan algoritmalar

Optimuma Ulaşılan Fonksiyon	Optimuma Ulaşan Algoritmalar
F ₁	BBA
F ₂	BBA
F ₃	BBA
F ₅	BGWO
F ₉	BBA
F ₁₀	BBA,BPSOGSA
F ₁₁	BBA
F ₁₃	BPSOGSA,BGWO

Genel anlamda optimuma yakınlığı göz önüne alındığında BBA, 13 fonksiyondan 10'ünde en iyi sonucu elde etmiştir. BPSOGSA 4 adet, BGWO 2 adet fonksiyonda optimuma en yakın sonuca ulaşmıştır.

Tablo Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.. Kalite test fonksiyonları sonucu optimuma veya en yakın sonuca ulaşan algoritmalar

Optimuma Ulaşılan Fonksiyon	Optimuma Ulaşan Algoritmalar
F ₁	BBA
F ₂	BBA
F ₃	BBA
F ₅	BGWO
F ₆	BBA
F ₇	BBA
F ₈	BBA, BPSOGSA, BGWO
F ₉	BBA
F ₁₀	BBA,BPSOGSA
F ₁₁	BBA
F ₁₂	BBA,BPSOGSA
F ₁₃	BPSOGSA,BGWO

Analiz sonucuna göre BPSOGSA, hibrid edilmesinde kullanılan BPSO ve BGSA'ya göre daha iyi sonuç elde etmiştir. Tüm test sonuçlarında en iyi sonucu BBA elde etmiştir. BGWO'nun en düşük standart sapmayla

kendi en iyi sonucuna en hızlı ulaşan algoritma olduğu görülmüştür. BPSO, BGSA ve BDA diğer algoritmalara göre iyi sonuç vermediği gözlenmiştir.

6. Sonuçlar

Gerçek hayat problemlerini çözmek için evet/hayır, seçme/seçmeme ya da 0-1 gibi net sonuçlar verdiği için ikili optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır. Literatürde ikili optimizasyon kullanılarak bir çok algoritma geliştirilmiştir. Bu çalışmada ikili optimizasyon ile ilgili literatür taraması yapılarak, bu optimizasyon için kullanılan modifikasyon teknikleri ve çözüm için kullanılan yöntemler hakkında bilgi verilmiştir. İkili optimizasyon ile hibrid edilmiş çalışmalardan BPSO, BPSOGSA, BGWO, BBA ve BDA'nın çalışma şekli ve kullanılan formüller ile ilgili bilgilendirme yapılarak bu alanlarda ne tür çalışmalar yapıldığı hakkında inceleme yapılmıştır.

Yapılan literatür taramasında optimizasyon algoritmalarının performans kıyaslamasını gerçekleştirmek için kullanılan kısıtsız kıyaslama fonksiyonları tanıtılmıştır. Bu amaçla 7 adet tek modlu ve 6 adet çok modlu olmak üzere 13 adet kısıtsız kıyaslama fonksiyonu kullanılmıştır. Test sonuçlarının eşit şartlarda olması için iterasyon sayısı, parçacık sayısı, değişken boyutu ve kullanılan fonksiyonun türü eşit olarak uygulandı.

Çalışmadan elde edilen sonuca göre kullanılan optimizasyonların tek ve çok modlu fonksiyonlarda kıyaslama için etkili sonuç verdiği ancak sabit boyutlu çok modlu fonksiyonlarda etkili sonuç vermediği gözlenmiştir. Bu testler sonucunda BBA'nın mevcut yöntemler içerisinde 13 adet kısıtsız kıyaslama fonksiyonundan 10'ünde optimuma en yakın sonucu vermede daha başarılı olduğu görülmüştür. Ayrıca BPSOGSA da 4 adet kısıtsız kıyaslama fonksiyonunda optimuma en yakın sonucu vererek BBA'dan sonra en etkin algoritma olmuştur. BGWO, en düşük standart sapma ile kendi en iyi sonucuna en hızlı şekilde ulaşmıştır.

Gelecek çalışmada güncel optimizasyon algoritmalarından olan Altın Sinüs Algoritması (Gold-SA) için hibrid ikili optimizasyon algoritması geliştirilerek mevcut ikili optimizasyon algoritmaları ile performans kıyaslaması yapılacaktır.

Kaynaklar

- [1] Özsağlam Y, Çunkaş M. Optimizasyon problemlerinin çözümü için parçacık sürü optimizasyonu algoritması. Politeknik Dergisi 2008; 11(4): 299-305.
- [2] Doğan C. Balina Optimizasyon Algoritması Ve Gri Kurt Optimizasyonu Algoritmaları Kullanılarak Yeni Hibrit Optimizasyon Algoritmalarının Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2019.
- [3] Aytimur A. İkili Optimizasyon Yöntemlerinin Araştırılması ve İkili Test Problemleri Üzerinde Başarımının Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2019.
- [4] Mirjalili S, Wang G, Coelho L. Binary optimization using hybrid particle swarm optimization and gravitational search algorithm. Neural Comput & Applic 2014; 25: 1423-1435.
- [5] Reeves CR. Genetic Algorithms. School of Mathematical and Information Sciences 2010; pp. 55-82.
- [6] Yang XS. Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications. John Wiley & Sons. New Jersey, USA: Wiley, 2010.
- [7] Korkmaz S. İkili optimizasyon problemlerinin çözümü için yapay alg algoritması tabanlı yeni yaklaşımlar. Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, 2019.
- [8] Mirjalili S, Lewis A. S-shaped versus V-shaped transfer functions for binary Particle Swarm Optimization. Swarm and Evolutionary Computation 2013; 9: 1-14.
- [9] Pampara G, Engelbrecht AP, Franken N. Binary Differential Evolution. 2006 IEEE International Conference on Evolutionary Computation; 16-21 Temmuz 2006, Canada. 1873-1879.
- [10] Nezamabadi-pour H. A Quantum-Inspired Gravitational Search Algorithm for Binary Encoded Optimization Problems. Engineering Applications of Artificial Intelligence 2015; 40: 62-75.
- [11] Banitalebi A, İsmail M, Abdulaziz Z. A Self-Adaptive Binary Differential Evolution Algorithm For Large Scale Binary Optimization Problems. Information Sciences 2016; 367: 487-511.
- [12] Ozturk C, Hancer E, Karaboga D. Dynamic clustering with improved binary artificial bee colony algorithm. Applied Soft Computing 2015; 28: 69-80.
- [13] Kıran MS, Gündüz M. XOR-based artificial bee colony algorithm for binary optimization. Turkish Journal Of Electrical Engineering & Computer Sciences 2013; 21: 2307-2328.
- [14] Kashan MH, Nahavandi N, Kashan AH. DisABC: A new artificial bee colony algorithm for binary optimization. Applied Soft Computing 2012; 12: 342-352.
- [15] Too J, Abdullah A, Saad NM. A New Co-Evolution Binary Particle Swarm Optimization with Multiple InertiaWeight Strategy For Feature Selection. Informatics 2019; 6(2): 2-14.
- [16] Mirjalili S. The Ant Lion Optimizer. Advances in Engineering Software 2015; 83: 80-98.

- [17] Emary E, Zawbaa HM, Hassanien AE. Binary grey wolf optimization approaches for feature selection. *Neurocomputing* 2016; 172: 371–381.
- [18] Too J, Abdullah AR, Saad NM, Ali NM, Tee W. A New Competitive Binary Grey Wolf Optimizer to Solve the Feature Selection Problem in EMG Signals Classification. *Computers* 2018; 7, 58: 2-18.
- [19] Mirjalili S, Mirjalili SM, Yang X. Binary bat algorithm. *Neural Comput & Applic* 2013; 25: 663-681.
- [20] Mafarja M, Aljarah I, Heidari AA, Faris H, Fournier-Viger P, Li X, Mirjalili S. Binary Dragonfly Optimization for Feature Selection using Time-Varying Transfer functions. *Knowledge-Based Systems* 2018; 161: 185-204.

İnsan Hareketlerinin Tanınması için Parçacık Sürü Optimizasyonu Tabanlı Topluluk Sınıflandırıcı Yöntemi

İlhan AYDIN*, Büşran AŞICI

¹ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ iaydin@firat.edu.tr, ² busran44@gmail.com

(Geliş/Received: 07/01/2020;

Kabul/Accepted: 05/04/2020)

Öz: İnsan hareket tespiti, teknolojinin gelişmesi ile birçok çalışmanın odak noktasıdır. Hareket tespiti çalışmalarını akıllı evler, sağlık sistemleri, izleme ve güvenlik sistemleri, oyun sektörü ve spor gibi alanlarda görebilmekteyiz. Bu çalışmamızda çoğu insanın günlük olarak sıkça yaptıkları yürüme, merdivenden çıkma, merdivenden inme, oturma, ayakta durma ve uzanma aktivitelerini tespit etmek için ivme sensörü verileri kullanılmıştır ve verilerden özellik çıkarımları yapılmıştır. Ortalama alma, karelerin ortalaması, oto korelasyon, frekans spektrumunda tepe değerlerinin ve pozisyonlarının hesaplanması gibi özellikler ivme verilerinin her eksen için çıkarılmıştır. Birçok çalışmada ivme verileri ile çıkarılan özellikler bir sınıflandırma algoritması ile test edilir. Hareket tespiti için büyük veri kümeleri üzerinde tek bir sınıflandırıcı ile yüksek başarımın elde edilmesi çoğu zaman zordur. Uygulama zaman aralığı değiştiğinde tek bir öğrenme algoritması kullanmak kabul edilebilir bir performans sunmayabilir. Herhangi bir sınıflandırıcı, bir “m” zaman aralığında iyi sonuç verirken farklı bir zaman aralığında iyi sonuç vermeyebilir. Bu sebeple birden fazla sınıflandırıcının uygun şekilde birleştirilmesi ile daha yüksek başarımlar elde edilebilir. Topluluk sınıflandırıcıda, birkaç sınıflandırıcı birlikte son çıkışı oluşturur. Bu yüzden bu çalışmada topluluk seçim yöntemi önerilmiştir ve yöntemde parçacık sürü optimizasyonu tabanlı bir topluluk kullanılmaktadır. Çalışmamızda, sınıflandırıcılar bir araya getirilmekte ve sınıflandırma performansını en fazla arttıran en iyi sınıflandırıcı grup otomatik olarak seçilmektedir. Parçacık sürü optimizasyonu ile sınıflandırıcı kombinasyonu yapıldığında başarımın %98’in üzerinde olduğu kanıtlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Hareket tanıma, parçacık sürü optimizasyonu, topluluk sınıflandırma, makine öğrenmesi.

Particle Swarm Optimization Based Ensemble Classifier Method for Recognizing Human Activities

Abstract: Human motion detection is the focus of many studies with the development of technology. We can see motion detection studies in areas such as smart homes, health systems, monitoring and security systems, the game industry and sports. In this study, acceleration sensor data were used to determine the walking, go up the stairs, go down to stairs, sitting, standing and lying activities which are frequently performed by most people on a daily basis and feature extractions were made from the data. Features such as averaging, mean of squares, auto correlation, and calculation of peak values and positions in the frequency spectrum are extracted for each axis of acceleration data. In many studies, properties extracted with acceleration data are tested with a classification algorithm. It is often difficult to achieve high performance with a single classifier on large datasets for motion detection. Using a single learning algorithm may not provide acceptable performance when the application time interval changes. Any classifier may work well in an “m” time range but not in a different time interval. For this reason, higher performance can be achieved by combining more than one classifier appropriately. In the community classifier, several classifiers together form the final output. Therefore, in this study, the community selection method is proposed and the method uses a community based particle swarm optimization. In our study, classifiers are brought together and the best classifier group that maximizes the classification performance is selected automatically. When the combination of particle swarm optimization and classifier is performed, the performance has been proven to be over 98%.

Key words: Activity recognition, particle swarm optimization, ensemble classifier, machine learning.

1. Giriş

İnsan hareket tespiti, insanların aktivitelerini yorumlamak ve tanımlamak için gereklidir. Teknolojinin gelişmesi ile insan hareketleri sensörler ve aletler ile tespit edilip tanımlanmaktadır. Tanımlanan hareketler insan yaşamında farklı alanlarda kullanılabilir. İzleme sistemleri, güvenlik sistemleri, oyun sektörü, sağlık sektörü, klinik uygulamaları ve spor bu alanlardan bazılarıdır [1-4]. İnsan hareket tespiti için üstesinden gelmesi gereken konular vardır. Bu konulardan bazıları, ölçülecek niteliklerin seçilmesi, taşınabilir olma, kullanışlılık, ekonomik olarak ucuz ve erişilebilir olma, etkili sonuçlar veren özelliklerin seçimi, yeni kullanıcıları kolaylıkla

* Sorumlu yazar: iaydin@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹0000-0001-6880-4935, ²0000-0001-9735-4056

destekleme ve gerçek zamanlı veriler ile etkili sonuçlar elde etmez [1]. Kişi hareket tespit sistemlerini, kullanılan sensör veya aletlerin kullanım alanlarına göre üç farklı guruba ayırabiliriz. Bunlar, giyilebilir sensörler ile oluşturulan sistemler, çevreye yerleştirilen sensörler ile oluşturulan sistemler ve giyilebilir sensörlerle çevreye yerleştirilen sensörlerin birlikte kullanıldığı sistemlerdir [5-6].

Giyilebilir sensörleri özellikle akıllı evlerde ve sağlık sistemlerinde görebiliriz [2]. Giyilebilen sensörlere örnek olarak ivme sensörü, jiroskop sensörler, mikrofon, akıllı saatler, akıllı telefonlar ve akıllı gözlükler örnek olarak verilebilir [3]. Aydın [6] insan hareketlerinin tanınması için destek vektör makineler, yapay sinir ağları ve doğrusal ayrıştırıcı metotlarının performansını birleştiren bir yöntem önermiştir. Yin ve ark. [8] çalışmalarında, ışık, sıcaklık, mikrofon, iki eksenli ivmeölçer ve iki eksenli manyometreden oluşan beş farklı sensörü içeren giyilebilir sensör kartları kullanmışlardır. Amaçları anormal insan aktivitelerini tespit etmektir. Yin ve ark. [9], yürüme, koşma ve oturma aktivitelerini tespit etmek için birden fazla akıllı telefon ve makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanıldığı bir çalışma yapmışlardır. Akıllı telefon ile ivmeölçer, jiroskop, oryantasyon ve doğrusal ivme değerlerindeki değişiklikleri izleyerek sınıflandırma için özellik çıkarımı yapılmıştır. Çalışmalarında kullandıkları sınıflandırma algoritmaları J48, Naif Bayes, Destek Vektör Makineleri ve ileri beslemeli yapay sinir ağı algoritmalarıdır. Sonuç olarak %99'un üzerinde doğruluk elde etmişlerdir. Attal ve ark. [7], sağlıklı bireylerin vücutlarındaki üç farklı bölgeye (göğüs, sağ uyluk ve sol ayak bileği) yerleştirilen atalet sensörlerinden durma, oturma, uzanma, merdivenden çıkma ayağa kalkma gibi 12 günlük aktiviteden veriler toplamışlardır. Dört denetimli (K-En Yakın Komşu, Destek Vektör Makineleri, Denetimli Öğrenme Gauss Karışımı Modeli ve Rastgele Orman), üç denetimsiz (K- Ortalamalar, Gauss Karışım Modelleri, Gizli Markov Modeli) sınıflandırma tekniğini kullanmışlardır. Denetimli algoritmalar arasından en iyi sonuçları (özellik: %99,96) K-En Yakın Komşu algoritması, Denetimsiz algoritmalar arasından en iyi sonuçları (özellik: %98,38) Gizli Markov Modeli algoritması vermiştir. Yatani ve Truong [10], yürüme ve koşma gibi aktivitelerden farklı olarak yeme, içme, konuşma ve gülme aktivitelerini belirlemek için boğaz bölgesine yerleştirilen giyilebilir akustik sensör (BodyScope) geliştirmişlerdir.

Çevreye yerleştirilen sensörlere kameralar, Kinect, akustik sensörler, basınç sensörleri, kızılötesi sensörler örnek olarak verilebilir [11-13]. Kameralar, kişi hareket tespiti için kullanılan önemli aletlerden biridir. Mirmahboub ve ark. [14], çalışmalarında, mevcut düşme tespiti yöntemlerinin çoğundan üç ana adımın ayırt edilebileceğinden bahsetmiştir. Bu adımlar, sabit bir arka planın hareketli bir ön plandan çıkarımı olan hareket bölümleme, sınıflandırmanın yapıldığı özelliklerin ön plan dizisinden çıkarılması ve önceden eğitilmesi gereken karmaşık bir yapı veya basit bir eşik değeri ile sınıflandırmanın yapılmasıdır. Düşme tespiti için önerdikleri yöntemde, sabit bakış açısındaki tek bir kamera kullanılmaktadır. Kişi silüetini iki farklı arka plan ayırma ile alan ve silüet alanından çıkarılan özellikleri, Destek Vektör Makineleri yöntemi ile sınıflandıran bir metot sunmuşlardır. Sonuç olarak yaklaşık %4,8 hata oranı elde etmişlerdir. Khan ve ark. [15], düşme tespitinde ayak sesi sinyallerini toplamak için akustik sensörler kullanmışlardır. Bir diğer çevresel sensör ise Kinect sensörüdür. Kızılötesi kullandığı için Kinect sensörü ile derinlik görüntüleri elde edilir. Yalnızca derinlik görüntüleri ile kişi izleniminin yapılması, kişinin mahremiyetinin korunması açısından renkli kameralardan daha avantajlıdır [16]. Ayrıca az aydınlık ortamlarda (oda gibi) kişiler kolaylıkla derinlik haritalarından tespit edilebilir. Yao ve Fu [17], el hareketlerini tespit etmek için Kinect sensörünü kullanmıştır. Mastorakis ve Makis [18], Kinect sensöründen elde edilen derinlik görüntülerindeki 3B sınırlayıcı kutunun yükseklik, genişlik ve derinlik verilerinin birinci türevi olan hızdaki değişimler ile düşme tespiti yöntemi önermişlerdir. Verimli sonuçlar elde etmişlerdir. Düşme tespiti için kullandıkları hız faktörü, 3B sınırlayıcı kutunun yükseklik, derinlik ve genişlik verilerinden elde edildiğinden düşmenin tespiti için zemin koordinatlarına, başın tespit edilmesine veya kişinin kütle merkezini hesaplanmasına gerek kalmamıştır. Ancak kişi dışında hareket eden bir nesne de görüş alanı içerisinde olursa ve bu nesne de düşerse önerdikleri sistem yine düşme alarmı verebilir. Bu yüzden dezavantajlıdır. Lei Yang ve ark. [19], kişi düşme tespiti için oda ortamında Kinect sensörünü kullanmışlardır. Derinlikli görüntülerdeki hareketli bireyin silüeti, arka plan çıkarımı ile elde edilmiştir. Pozisyon ve oryantasyon analizi ve belirlenmiş bazı eşik değerlere göre düşme tespiti yapılmıştır. Bazı düşme tespiti sistemlerinde giyilebilir sensörlerle çevreye yerleştirilen sensörler bir arada kullanılmıştır. Bunlara örnek olarak Kepski ve Kwolek [2, 16, 20]'in ivme ve derinlik sensörlerini birlikte kullanarak yapmış oldukları düşme tespiti çalışmaları verilebilir. Wang ve ark. [21] insan hareket tanıma için farklı teknikleri karşılaştırmış ve telefonda alınan ivme ve jiroskop sinyallerinin kullanımının başarımlar üzerindeki etkisini karşılaştırmıştır. İvme sensör verilerinden hareket tespitinin performansını arttırmak için dinamik doğrusal ayrıştırıcı yöntemini önermişlerdir [22]. Önerilen yöntemin var olan tekniklere göre daha iyi başarımlar verdiği ispatlanmıştır.

Bu çalışmanın amacı, insanların günlük yaşamda sıkça yapmış oldukları yürüme, merdivenden çıkma, merdivenden inme, oturma, ayakta durma ve uzanma aktivitelerini tespit etmektir. Bu amaçla parçacık sürü optimizasyonu tabanlı bir topluluk sınıflandırıcı yöntemi önerilmiştir. Büyük veri kümeleri üzerinde tek bir

sınıflandırıcı ile yüksek başarımın elde edilmesi çoğu zaman zordur. Birden fazla sınıflandırıcının uygun şekilde birleştirilmesi ile daha yüksek başarımlar elde edilebilir. Bu çalışma kapsamında önerilen topluluk seçim yöntemi, parçacık sürü optimizasyonunu kullanarak sınıflandırma performansını en fazla arttıran en iyi sınıflandırıcı grup otomatik olarak seçilmektedir. Böylelikle insan aktivite tespiti için doğruluğun arttırılması amaçlanmıştır. Yapılan testler sonucunda etkili sonuçlar elde edilmiştir.

2. Parçacık Sürü Optimizasyonu

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından sunulmuş olup, sürekli doğrusal olmayan fonksiyonlar için bir optimizasyon yöntemidir [23-24]. Temel prensibi kuş ve balık sürülerinin yiyecek ararken yapmış oldukları hareketlerden esinlenilmiştir. Sürü veya popülasyon düzensiz gibi görünen bir koleksiyondur. Sürüdeki her bir parçacık rastgele bir yönde hareket ediyor gibi gözükse de kümelenme eğiliminde olan hareketli bireylerdir. Kennedy yiyecek arayan kuşlar için bir “mısır tarlası vektörü” geliştirmiştir. .

Pozisyonlar ve vektörler öncelikle rastgele atanır, potansiyel çözümler aşırı uzayda uçurulur. Sonra her parçacık aşırı uzayda, en iyi pozisyonunu takip eder. Burada bireysel en iyi konumu, popülasyona göre en iyi konumu ve komşuluğa göre en iyi konumu olmak üzere üç çeşit iyi konum vardır. Her zaman adımında rastgele bir şekilde kendi en pozisyonu ve popülasyonun en iyi pozisyonuna doğru hızlanır. Parçacık Sürü Optimizasyonu adımları aşağıda verilmiştir.

Adım 1: Aşırı uzaydaki popülasyonu tanımla.

Adım 2: Bireysel parçacıkların uygunluğunu ölç.

Adım 3: Hızları önceki en iyiye ve global en iyiye (ya da komşuluk en iyiye) göre değiştir. Hız (v) ve konum (x), Denklem 1 ve Denklem 2’ye göre güncellenir.

Adım 4: Koşula göre sonlandır.

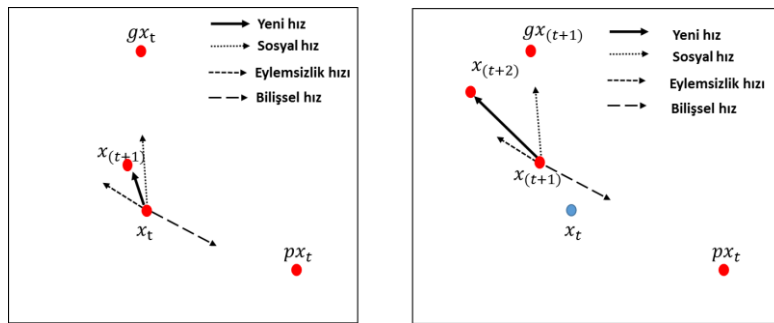
Adım 5: Adım 2’ye git

$$v_{id} = w_i \cdot v_{id} + c_1 \cdot \text{rand}().(p_{id} - x_{id}) + c_2 \cdot \text{rand}().(p_{gd} - x_{id}) \quad (1)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (2)$$

Burada v , parçacık hızını; x , parçacık konumunu; d , boyutu; c_1 ve c_2 pozitif sabit değerleri; $\text{rand}()$ rastgele fonksiyonları; p_{id} , i . parçacığın d boyutu için şu ana kadar ki en iyi pozisyonu, p_{gd} ise bütün popülasyon içinde mevcut olan global en iyi pozisyonu; w ise atalet ağırlığını temsil etmektedir. Bu formülün komşuluğa göre olan halinde p_{gd} yerine p_{ld} yazılabilir.

Global en iyi PSO algoritmasının temel adımları Şekil 1’de gösterilmektedir.



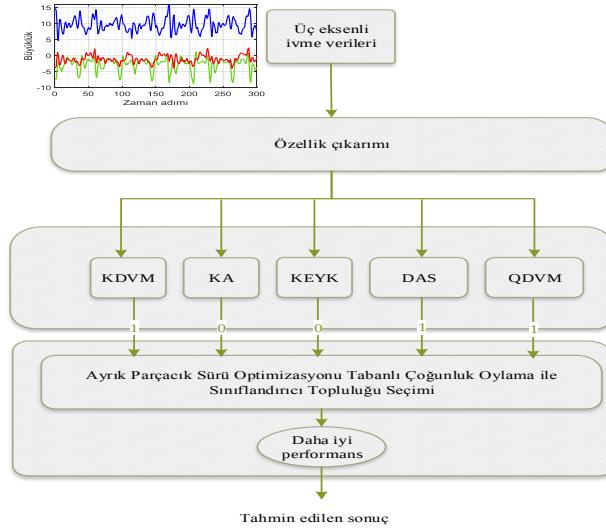
Şekil 1. Tek parçacık için hız ve konum güncellemelerinin iki boyutlu, geometrik gösterimi

Şekil 1’de parçacığın t zaman adımındaki ve $(t+1)$ zaman adımındaki durumları gösterilmiştir [14]. Şekilde x_t , t zaman anındaki pozisyonunu temsil etmektedir. Yeni pozisyon olan $x_{(t+1)}$, küresel en iyi pozisyon olan $g_{x_{(t+1)}}$ ’e yaklaşmıştır. $g_{x_{(t+1)}}$, sürü tarafından bulunan en iyi pozisyonudur. p_{x_t} ise parçacık tarafından başlangıçtan beri erişilmiş en iyi pozisyonudur. Bir sonraki zaman adımında kişisel en iyi pozisyonu Denklem 3’teki gibi hesaplanır.

$$px_{(t+1)} = \begin{cases} px_t, & f(x_{(t+1)}) \geq f(px_t) \\ x_{(t+1)}, & f(x_{(t+1)}) < f(px_t) \end{cases} \quad (3)$$

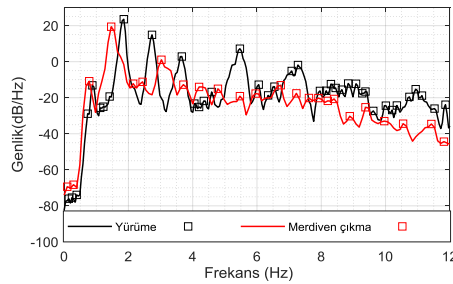
3. Hareket Tanıma için Önerilen Topluluk Sınıflandırıcı Yöntemi

Büyük veri kümeleri üzerinde tek bir sınıflandırıcı ile yüksek başarımın elde edilmesi çoğu zaman zordur. Birden fazla sınıflandırıcının uygun şekilde birleştirilmesi ile daha yüksek başarımlar elde edilebilir. Bu çalışma kapsamında önerilen topluluk seçim yöntemi parçacık sürü optimizasyonu tabanlı bir topluluk kullanarak bir araya getirilmekte ve sınıflandırma performansını en fazla arttıran en iyi sınıflandırıcı grup otomatik olarak seçilmektedir. Önerilen yöntemin blok şeması Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Parçacık sürü optimizasyonu tabanlı topluluk sınıflandırıcı

Şekil 2’de ilk olarak üç eksenli ivme verileri alınarak özellik çıkarımı yapılmaktadır. Özellik çıkarımında 66 adet özellik çıkarılmaktadır. Her bir ivme eksenine için çıkarılan özellikler, ortalama alma, karelerin ortalaması, oto korelasyon, frekans spektrumunda tepe değerlerinin ve pozisyonlarının hesaplanmasıdır. Özellik çıkarımında iki farklı hareket için frekans spektrumunda tepe değerleri Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Yürüme ve merdiven çıkma hareketleri için frekans spektrumları

Şekil 3’te de görüldüğü gibi yürüme ve merdiven çıkma hareketlerinde hem genlikler hem de oluşan tepe değerlerinin pozisyonları farklıdır. Dolayısıyla iki bilgi de özellik çıkarımında kullanılmaktadır. Özellik çıkarımından sonra elde edilen eğitim kümesi her bir sınıflandırıcıya verilerek eğitilmiş modeller elde edilmektedir. Bu modellerin seçimi için MATLAB Classification Learner aracı kullanılmıştır. Bu araç aynı veri için çoklu sınıflandırma yöntemlerini kullanarak verileri eğitmektedir. Eğitimde çapraz doğrulama kullanılmakta olup önerilen sınıflandırıcıların performansı eğitimde kullanılmayan veriler ile ölçülmektedir. Bu araç kullanılarak

ilgili eğitim kümesi farklı sınıflandırıcılar ile sınıflandırma performansları ölçülmüş ve bunlar içerisinde Kübik Destek Vektör Makineler (KDVM), Karar Ağacı (KA), K-En Yakın Komşu sınıflandırıcı (KEYK), Doğrusal ayırt edici sınıflandırma (DAS) ve Quadratik Destek Vektör Makinalar (QDVM) en yüksek performansı veren sınıflandırıcılar olduğu için seçilmiştir.

Parçacık sürü optimizasyonun orijinal versiyonu reel sayılar üzerinde çalışarak reel uzayda işlem yapar. Hem hız hem de pozisyon güncellemesi reel sayılar üzerinde verilen aralıkta yapılır. Burada önerilen yöntem farklı sınıflandırıcılar içerisinde hangi kombinasyondan sınıflandırıcı seçilirse daha iyi bir sınıflandırma performansı elde edileceğidir. Bu yüzden ayrık parçacık sürü optimizasyonu önerilmiştir. Ayrık parçacık sürü optimizasyonundan her parçacık, Denklem (4)'teki gibi kodlanmaktadır.

$$X(i) = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}) \quad (4)$$

Denklemde $x_{i,j}$, 0 ile 1 değerlerinden birini alır. Parçacık sayısı $i=1, 2, \dots, N$ ile gösterilmektedir. Her parçacığın uzunluğu (n) topluluk sınıflandırıcı sayısıdır. Bir parçacığın her bir biti bir sınıflandırıcıya karşılık gelir ve eğer 1 ise topluluk sınıflandırıcıda etkisinin olacağı ve 0 ise herhangi bir etkisinin olmayacağını ifade eder. Elimizde 6 sınıflandırıcı ve 3 parçacık olduğu varsayılırsa kodlama Tablo 1'deki gibi gösterilebilir.

Tablo 1. Altı sınıflandırıcı için üç parçacıklı parçacık sürü optimizasyon kodlaması

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
X(1)	1	0	1	0	1	1
X(2)	0	1	1	1	0	0
X(3)	1	0	0	0	1	1

Tablo 1'de X(1) parçacığında S1, S3, S5 ve S6 sınıflandırıcıları topluluk sınıflandırma için ağırlıklı oylamada olacaktır. Çünkü kodlamada sadece bu sınıflandırıcılar 1 değerini almıştır. Başlangıçta parçacıkların pozisyonları Denklem (5)'teki gibi elde edilmektedir.

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } r \geq 0.5 \\ 0, & \text{Diğer durumlarda} \end{cases} \quad (5)$$

Denklem (5)'te r , 0 ile 1 aralığında rastgele olarak üretilmiş tek düze bir reel sayıdır. Her pozisyon vektörü bir hız vektörü ile ilişkili olup bu vektör $V(i) = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,n})$ ile verilmektedir. $X(i)$ parçacığındaki her bir $x_{i,j}$ boyutu $V(i)$ 'deki $v_{i,j}$ vektörüne bağlı olarak değişir. Popülasyonda i . parçacığın hızı olan $V(i)$ 'nin her boyutu $v_{i,d}$, Denklem (6)'ya göre güncellenir.

$$v_{i,d} = \psi * v_{i,j} + r_1(pb_{i,j} - x_{i,j}) + r_2(gb_j - x_{i,j}) \quad (6)$$

Denklem (6)'da ψ ($0 < \psi < 1$) atalet momentini, r_1 bilişsel ölçekleme ve r_2 sosyal ölçekleme parametresini göstermektedir. Denklemde $pb_{i,j}$, i . parçacığın j boyutu için şu ana kadar ki en iyi pozisyonu, gb_j ise bütün popülasyon içinde j . boyut için global en iyiyi gösterir. Hız güncellemesi yapıldıktan sonra normalde sürekli uzayda çalışan parçacık sürü optimizasyonunda hız ve önceki konum toplanarak yeni pozisyon bulunmaktaydı. Fakat ayrık zamanlı parçacık sürü optimizasyonunda bu işlem Denklem (7)'deki gibi yapılmaktadır.

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } r \geq \xi(v_{i,j}) \\ 0, & \text{Diğer durumlarda} \end{cases} \quad (7)$$

Denklem 7'de r , $[0,1)$ aralığında üretilen rastgele bir sayıyı gösterirken $\xi(v_{i,j})$ ise Denklem (8)'e göre hesaplanır.

$$\xi(v_{i,j}) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{i,j})} \quad (8)$$

Denklem 8’de hız pozitif ve büyük değer olursa hesaplanan değer 1’e yakın çıktığından ilgili bitin bir olma olasılığı yükselir. Eğer hız negatif ve büyük bir değer ise hesaplanan ifade 0’a çok yakın olduğu için parçacığın ilgili pozisyonundaki bitin sıfır olma olasılığı yükselir.

Parçacık sürü optimizasyonun amaç fonksiyonu ise her bir birey için seçilen sınıflandırıcılar ile çoğunluklu oylamaya göre doğru sınıflandırılan örnek sayısının toplam örnek sayısına bölümüdür. Bu aynı zamanda topluluk sınıflandırıcısının doğruluk oranı olarak da söylenebilir. Uygulama zaman aralığı değiştiğinde tek bir öğrenme algoritması kullanmak kabul edilebilir bir performans sunmayabilir. Herhangi bir sınıflandırıcı bir m zaman aralığında iyi sonuç verirken farklı bir zaman aralığında iyi sonuç vermeyebilir. Topluluk sınıflandırıcıda, birkaç sınıflandırıcı birlikte son çıkışı oluşturur. Önerilen parçacık sürü optimizasyonu tabanlı yöntem çoğunluk oylamaya göre bir test örneğinin sınıfını belirler. İki sınıflı bir problem için 5 sınıflandırıcının çoğunluk oylamaya göre çıkışı Tablo 2’de verilmiştir.

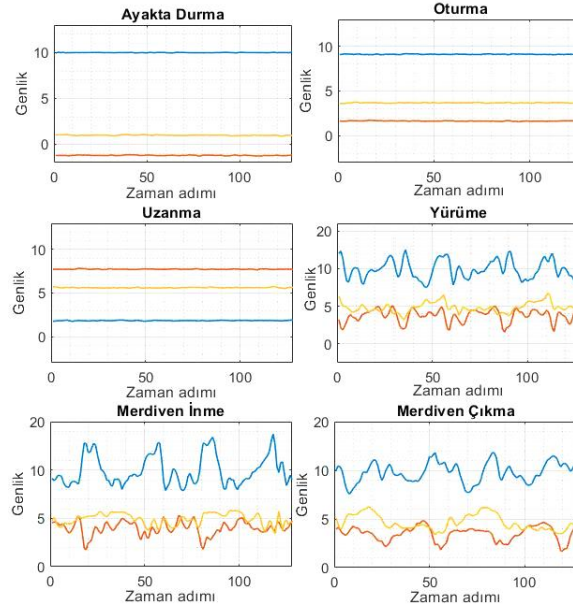
Tablo 2. Çoğunluk oylama ile sınıflandırma

Örnek No	S1	S2	S3	S4	S5	Sınıf Etiketi
1	1	1	2	2	1	1
2	1	1	1	2	1	1
3	2	2	1	2	2	2
4	1	2	1	1	1	1

Tablo 2’de birinci örnek için S1, S2 ve S5 sınıflandırıcıları 1 değerini verdiği için sonuç 1 olarak verilmiştir. Diğer örnekler de benzer şekilde sonuç vermektedir.

4. Uygulama Sonuçları

İnsan hareket tanıma için önerilen yöntem HAR veri kümesi olarak bilinen bir veri seti üzerinde uygulanmıştır [25]. Kullanılan veri seti 30 farklı kişiye ait 6 farklı hareketi içermektedir. Her bir hareket için ivme verileri 50 Hz örnekleme frekansı ile 10 saniye kaydedilmiştir. Üç eksenli ivme sensörünün her bir sinyali 128 örnek içermekte olup; yürüme, merdiven çıkma, merdiven inme, oturma, ayakta durma ve uzanma hareketlerini içermektedir. Her hareket için üç eksenli ivme verileri Şekil 4’te verilmiştir.



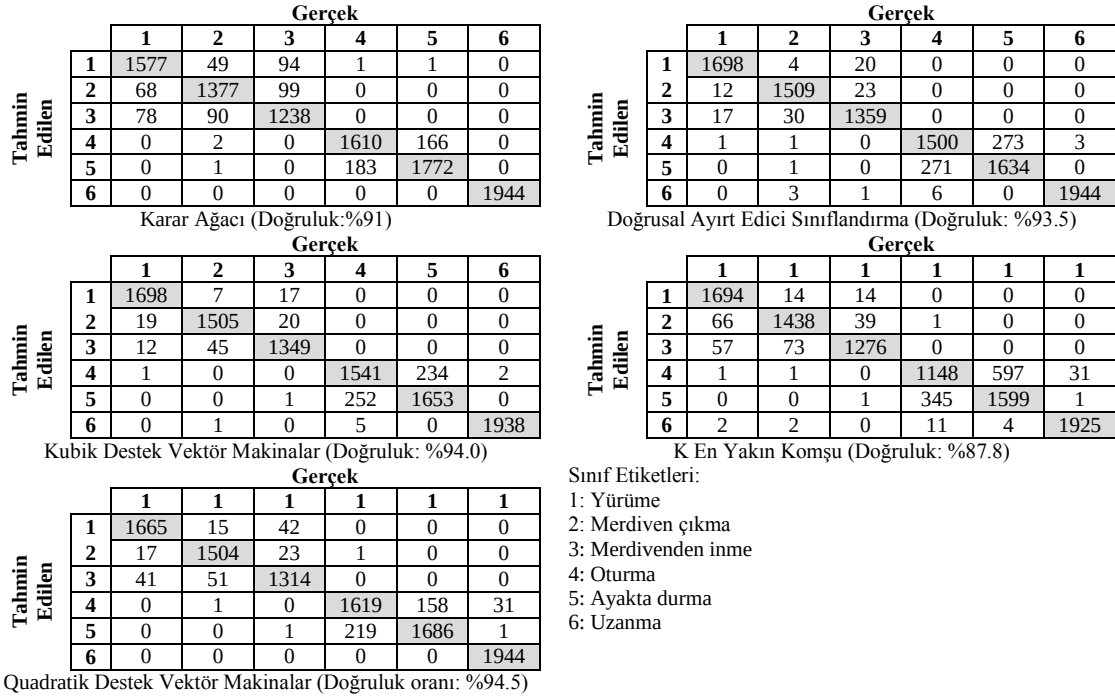
Şekil 4. Farklı hareketler için üç eksen ivme sinyalleri

Şekil 4’ten gösterildiği gibi farklı hareketlerin sinyalleri birbirine benzer şekilde bir davranış sergilemektedir. Bu yüzden veri üzerinde ön işleme yapılarak toplam 66 özellik çıkarılmıştır. Elde edilen özellikler Tablo 3’te gösterilmiştir.

Tablo 3. İvme verilerinden elde edilen özellikler

Elde edilen özellikler	İvme sensörü eksenleri		
	X	Y	Z
Ortalama	1	1	1
Karelerin ortalamasının karekökü	1	1	1
Kovaryans özellikleri	3	3	3
Frekans spektrumu tepe noktaları	6	6	6
Frekans spektrumu tepe noktalarının pozisyonu	6	6	6
Frekans güç bandı	5	5	5

Tablo 3'te toplamda 6 adet özellik her bir ivme ekseninden elde edilmiştir. Her bir özellik türü ve eksen için elde edilen özellik sayısı ilgili hücrelerde sayısal olarak verilmiştir. Dolayısıyla toplamda 66 adet özellik elde edilmiştir. Veri kümesi toplamda 10,300 adet örnekten oluşmakta olup sınıflandırma işleminde 10 noktalı çapraz doğrulama uygulanmıştır. Sınıflandırma sonucu beş sınıflandırıcı için elde edilen karmaşıklık matrisi Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'te gösterilen satır ve sütunlardaki rakamlar aktiviteleri temsil etmektedir (1: Yürüme, 2: Merdiven Çıkma, 3: Merdiven İnme, 4: Oturma, 5: Ayakta Durma, 6: Uzanma).

**Şekil 5.** Beş farklı sınıflandırıcının karmaşıklık matrisi

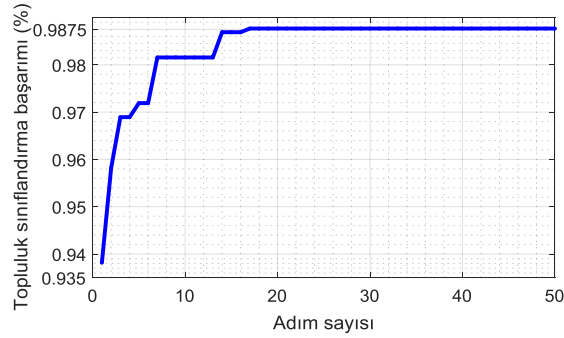
Şekil 5'e göre en iyi doğruluk oranı, Quadratik DVM ile elde edilmiştir. Karar ağacında maksimum bölme sayısı 100 olarak seçilmiş ve bölme kriteri için Gri indeks kullanılmıştır. Karesel destek vektör makinası için çekirdek fonksiyonu Quadratik seçilmiştir. Çoklu sınıflandırma için birine karşı diğeri seçilmiştir. Kübik Destek Vektör Makinasında çekirdek fonksiyonu kübik seçilmiş olup çekirdek ölçeği otomatik seçilmiş ve çoklu sınıflandırma birine karşı diğeri yöntemine göre yapılmıştır. Ağırlıklı en yakın komşu algoritmasına göre mesafe fonksiyonu Öklid seçilmiş ve k değeri 10 olarak alınmıştır.

Birden fazla sınıflandırıcının uygun şekilde birleştirilmesi ile daha yüksek başarımlar elde edilebileceğinden, tek bir sınıflandırıcı yerine en iyi performansı veren beş sınıflandırıcı seçilmiştir. Seçtiğimiz beş sınıflandırıcının performanslarını çoğunluk oylama ile birleştirmek için parçacık sürü optimizasyonu tabanlı bir yöntem seçilmiştir. Amaç en iyi kombinasyonu sağlayan sınıflandırıcıları seçerek hareket tanıma performansını yükseltmektir. Parçacık sürü optimizasyonun parametreleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Ayırık parçacık sürü optimizasyonun parametreleri

Parametre	Değer
Popülasyon Boyutu	15
Adım Sayısı	50
C_1	1.04
C_2	1.04
W	0.1
Parçacık boyutu	5

Parçacık sürü optimizasyonunda her bir parçacık 5 bit ile ifade edilmektedir. Bir sınıflandırıcı çoğunluk oylamada kullanılacaksa ilgili parçacığın biti 1, kullanılmayacaksa 0 seçilir. Şekil 6’da parçacık sürü optimizasyonunun 40 yineleme boyunca amaç fonksiyonu gösterilmiştir.



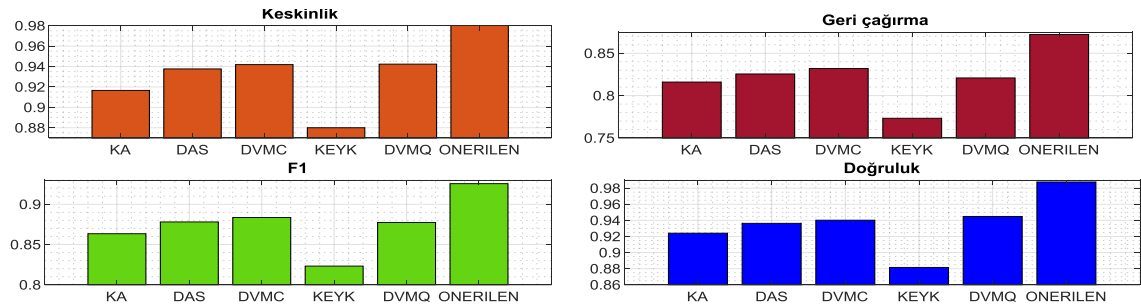
Şekil 6. Parçacık sürü optimizasyonunun

Şekil 6’da gösterildiği gibi parçacık sürü optimizasyonu ile sınıflandırıcı kombinasyonu yapıldığında başarımın %98’in üzerinde olduğu görülmektedir. Tablo 5’te ayrı parçacık optimizasyonu ve çoğunluk oylama yöntemine göre elde edilen karmaşıklık matrisi verilmiştir.

Tablo 5. Önerilen yöntemin karmaşıklık matrisi

	1	2	3	4	5	6
1	1717	1	4	0	0	0
2	9	1533	2	0	0	0
3	32	48	1326	0	0	0
4	0	0	0	1748	30	0
5	0	0	0	1	1905	0
6	0	0	0	0	0	1944

Tablo 5’e göre parçacık sürü optimizasyonu karar ağacı, karesel destek vektör makinalar ve doğrusal ayırt edici sınıflandırıcıları birleştirerek en iyi performansı elde etmiştir. Sınıflandırma başarımlarını ölçmek için F1, geri çağırma, keskinlik parametreleri ile birlikte doğruluk oranı kullanılmıştır. Şekil 7’de her bir durum için bu sonuçlar verilmiştir.



Şekil 7. Farklı performans ölçümlerine göre algoritmaların başarımları

Şekil 7’de de görüldüğü gibi farklı başarımlar ölçümleri göz önüne alındığında önerilen yöntemin daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Birden çok sınıflandırma yönteminin birleştirilmesi ve buna göre uygun olanların kombinasyonu ile yapılan sınıflandırma işlemi oldukça yüksek başarımlar vermektedir.

Önerilen yöntemin sonuçları literatürde hareket tanıma için geliştirilen diğer teknikler ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla aynı veri kümesi üzerinde ivme, jiroskop ve diğer ekstra sensörlerden elde edilen özellikler kullanan çalışmalar seçilmiştir. Karşılaştırma sonuçlarında kullanılan sensörler, özellik çıkarımı ve başarımlar oranları verilmiştir. Karşılaştırma sonuçları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Önerilen yöntemin farklı yöntemler ile karşılaştırma sonuçları

Referans	Kullanılan sensörler	Özellik çıkarımı	Sınıflandırıcı	Doğruluk oranı (%)
[6]	Üç eksen ivme	Zaman ve frekans domeni özellikleri	Çoklu sınıflandırma	95.37
[21]	Jiroskop ve ivme	Zaman ve frekans özellikleri, temel bileşen tabanlı özellik seçimi	Bayes sınıflandırıcı	90.10
[22]	Üç eksen ivme	Zaman domeninde istatistiksel özellikler	Dinamik doğrusal ayrıştırıcı	92.86
[26]	Jiroskop ve ivme	Gradyan histogramı ve merkezi Fourier tanımlayıcıları	Destek vektör makinalar	92.67
Önerilen Yöntem	Üç eksen ivme	Zaman ve frekans domeni özellikleri	PSO tabanlı topluluk sınıflandırıcı	98.77

Tablo 6’da jiroskop ve ivme sensörleri kullanıldığında elde edilen sonuçlar listelenmiştir. Önerilen yöntemler aynı veri kümesi üzerinde uygulanmıştır. Önerilen çalışmada kullanılan veri seti 10300 örnekten oluşmaktadır. Fakat bazı çalışmalarda veri kümesi boyutu daha düşük tutulmuştur. Tablo 6’da verilen ilk çalışmada farklı sınıflandırma yöntemleri birleştirilerek elde edilen özelliklere göre sınıflandırma başarımları artırılmaya çalışılmıştır. Wang ve ark. [21] tarafından sunulan çalışmada ivme ve jiroskop sinyallerinden özellik çıkarımı yapılmış ve iki bilgi birleştirilerek hareket tanıma başarımları artırılmaya çalışılmıştır. Chen ve ark. [22]’nin sunduğu çalışmada zaman domeninde bazı istatistiksel özellikler çıkarılmıştır. Temel katkı noktası ise dinamik doğrusal ayrıştırıcı tarafında yapılmıştır. Jain ve Kanhangad [26] önerdikleri çalışmada jiroskop ve ivme sinyallerinden tek boyutlu gradyan histogramı ve merkezi Fourier tanımlayıcıları ile özellikler elde etmişlerdir. Elde edilen özellikler destek vektör makinalar ile sınıflandırılmıştır. Tablo 6’da verilen sonuçlar karşılaştırıldığında çoklu sınıflandırıcıların en uygun biçimde birleştirilmesi toplam hareket tespit performansını önemli ölçüde arttırmaktadır.

3. Sonuçlar

Sensör tabanlı insan hareketlerini tanımak, insanların sağlıklı olup olmadığını izleme ve sağlıklı yaşam süresini iyileştirme vaadiyle çok sayıda örüntü tanıma araştırmacısının ilgi alanı olmuştur. Bu hedefler göz önüne alındığında, akıllı ortamlar çok sık talep edilen uygulamaların geliştirilmesi için önem arz etmektedir. Bu nedenle, akıllı ortamlar düşük sensör bilgisini kullanarak olay odaklı bir sistem yardımıyla kullanıcıların aktivitelerini sürekli olarak gözlemlenmesini gerektirir. Bu çalışmada insan hareketlerinin tanınması için ivme sensör bilgilerinden zaman ve frekans domeninde farklı özellikler elde edilmiştir. Elde edilen özellikler bir topluluk sınıflandırıcı ile değerlendirilerek arızaların belirlenmesi amaçlanmıştır. Sınıflandırma aşamasında tek bir sınıflandırıcı kullanmak yerine beş sınıflandırıcıdan en uygun olanlar parçacık sürü optimizasyonu ile seçilerek sonuçları birleştirilmiştir. Önerilen yöntemin temel avantajı herhangi bir sınıflandırıcının yanlış olarak sınıflandırdığı bir hareket eğer çoğunluk tarafından doğru sınıflandırılmış ise bu hareketin doğru sınıflandırılmasının sağlanmasıdır. Topluluk sınıflandırıcı olarak ifade edilen sistemde hangi makine öğrenmesi yöntemlerinin seçileceği yapılan testler sonucunda belirlenmiştir. Bu amaçla Matlab’da bulunan sınıflandırıcı eğitim aracı kullanılmış ve en yüksek başarımları veren beş sınıflandırıcının sonuçları birleştirilmiştir. Bu aşamada parçacık sürü optimizasyonu ile bu sınıflandırıcılar içerisinde uygun olanların sonuçlarının birleştirilmesi sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde topluluk sınıflandırıcı ve parçacık sürü optimizasyonu kullanıldığında oldukça iyi sonuçların elde edildiği görülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Wong MS, Lo KH, Wong WY. Clinical Applications of Sensors for Human Posture and Movement Analysis: A Review. *Prosthetics and Orthotics International* 2007; 31(1): 62–75.
- [2] Kwolek B, Kepski M. Human fall detection on embedded platform using depth maps and wireless accelerometer. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 2014; 117(3): 489-501.
- [3] Siddiqi MH, Ali R, Rana MS, Hong EK, Kim ES, Lee S. Video-based human activity recognition using multilevel wavelet decomposition and stepwise linear discriminant analysis. *Sensors* 2014; 14: 6370-6392.
- [4] Shih HC. A survey of content-aware video analysis for sports. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 2017; 28(5), 1212-1231.
- [5] Lara OD, Labrador MA. A Survey on Human Activity Recognition using Wearable Sensors. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 2013; 15(3): 1192-1209.
- [6] Aydin I. Fuzzy Integral and Cuckoo Search Based Classifier Fusion for Human Action Recognition. *Advances in Electrical and Computer Engineering* 2018; 18(1): 3-11.
- [7] Attal F, Mohammed S, Dedabrishvili M, Chamroukh Fi, Oukhellou L, Amirat Y. Physical Human Activity Recognition Using Wearable Sensors. *Sensors* 2015; 15(12): 31314-31338.
- [8] Yin J, Yang Q, Pan JJ. Sensor-Based Abnormal Human-Activity Detection. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 2008; 20(8): 1082-1090.
- [9] Yin X, Shen W, Samarabandu J, Wang X. Human activity detection based on multiple smart phone sensors and machine learning algorithms. 2015 IEEE 19th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD); 2015; Calabria. 582-587.
- [10] Yatani K, Truong KN. BodyScope: A wearable acoustic sensor for activity recognition. *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing*. Pittsburgh, Pennsylvania: Association for Computing Machinery, 2012; 341-350.
- [11] Huang P, Hsu LP. Development of a wearable biomedical health-care system. 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems; 2005. 1760-1765.
- [12] Cornacchia M, Ozcan K, Zheng Y, Velipasalar S. A Survey on Activity Detection and Classification Using Wearable Sensors. *IEEE Sensors Journal* 2017; 17(2): 386-403.
- [13] Zawar HMS. Different Approaches for Human Activity Recognition– A Survey. *CoRR* 2019; abs/1906.05074.
- [14] Mirmahboub B, Samavi S, Karimi N, Shirani S. Automatic Monocular System for Human Fall Detection Based on Variations in Silhouette Area. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 2013; 60(2): 427-436.
- [15] Khan MS, Yu M, Feng P, Wang L, Chambers J. An unsupervised acoustic fall detection system using source separation for sound interference suppression. *Signal Processing* 2015; 110: 199-210.
- [16] Kwolek B, Kepski M. Fuzzy inference-based fall detection using kinect and body-worn accelerometer. *Applied Soft Computing* 2016; 40: 305-318.
- [17] Yao Y, Fu Y. Contour Model-Based Hand-Gesture Recognition Using the Kinect Sensor. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 2014; 24(11): 1935-1944.
- [18] Mastorakis G, Makris D. Fall detection system using Kinect's infrared sensor. *Journal of Real-Time Image Processing* 2014; 9(4): 635–646.
- [19] Yang L, Ren Y, Zhang W. 3D depth image analysis for indoor fall detection of elderly people. *Digital Communications and Networks* 2016; 2: 24-34.
- [20] Kepski M, Kwolek B. Embedded system for fall detection using body-worn accelerometer and depth sensor. 2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS); 2015; Warsaw. 755-759.
- [21] Wang A, Chen G, Yang J, Zhao S, Chang CY. A comparative study on human activity recognition using inertial sensors in a smartphone. *IEEE Sensors Journal* 2016; 16(11): 4566-4578.
- [22] Chen YP, Yang JY, Liou SN, Lee GY, Wang JS. Online classifier construction algorithm for human activity detection using a tri-axial accelerometer. *Applied Mathematics and Computation* 2008; 205(2): 849-860.
- [23] Eberhart R, Kennedy J. Particle swarm optimization. In *Proceedings of the IEEE international conference on neural networks*; 1995; Australia. 1942-1948.
- [24] Karaboğa D. Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları. Nobel Yayın Dağıtım Tic. Ltd. Sti., 2011.
- [25] Anguita D, Ghio A, Oneto L, Parra X, Reyes-Ortiz JL. A Public Domain Dataset for Human Activity Recognition Using Smartphones. 21th European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning, ESANN 2013; 2013; Belgium.
- [26] Jain A, Kanhangad V. Human activity classification in smartphones using accelerometer and gyroscope sensors. *IEEE Sensors Journal* 2017; 18 (3): 1169-1177.

Kaotik Haritalı Çok Amaçlı Altın Sinüs Algoritmasının Performans Analizi

Eyüp ERÖZ^{1*}, Erkan TANYILDIZI²

¹ Yazılım Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Yazılım Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ erozeyup@gmail.com, ² etanyildizi@gmail.com

(Geliş/Received: 24/01/2020;

Kabul/Accepted: 18/07/2020)

Öz: Çok amaçlı optimizasyon birden fazla amacı olan kısıtlı veya kısıtsız problemlere uygun çözümler üretme işlemidir. Sezgisel çok amaçlı optimizasyonda global optimuma yakın çözümler elde etmede rastgele üretilen sayı dizesi büyük öneme sahiptir. Rasgele üretilen sayı dizisinin belli bir alanda toplanması, global optimumdan uzaklaşma riskini arttırmaktadır. Bu nedenle üretilen sayıların aynı olmaması ve yayılmış bir spektruma sahip olması sezgisel optimizasyon algoritmalarının performansını etkilemektedir. Kaotik haritalar ayırık zamanlı sistemlerdir ve kaotik haritalarla üretilen sayılar geniş bir spektruma sahip olup periyodik değildir. Kaos temelli optimizasyon algoritmaları doğası gereği lokal minimumlardan kaçabilme, hızlı ve esnek olabilme gibi faktörlerden dolayı optimizasyon problemlerinin çözümünde incelemeye değer bir konu haline gelmiştir. Bu nedenle sezgisel çok amaçlı optimizasyon algoritmalarında, kaotik harita kullanılarak lokal optimuma takılma riskinin azaltılması hedeflenmiştir. Bu çalışmada kaotik haritaların, yeni ve başarılı olan Çok Amaçlı Altın Sinüs Algoritması (MOGoldSA) üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kaotik harita, Çok Amaçlı optimizasyon, sezgisel yöntemler.

Performance Analysis of Multiobjective Golden Sine Algorithm with Chaotic Map

Abstract: Multiobjective optimization is the process of producing solutions suitable for limited or unconstrained problems with more than one purpose. In intuitive multi-objective optimization, the randomly generated number string is of great importance in obtaining solutions close to the global optimum. Collecting the randomly generated number string in a certain area increases the risk of diverging from the global optimum. Therefore, the numbers produced are not the same and have a spread spectrum affects the performance of heuristic optimization algorithms. Chaotic maps are discrete time systems and the numbers produced with chaotic maps have a wide spectrum and are not periodic. Due to the nature of chaos-based optimization algorithms, it has become a subject to be examined in the solution of optimization problems due to factors such as being able to escape local minimums and being fast and flexible. Therefore, in intuitive multi-purpose optimization algorithms, it is aimed to reduce the risk of getting stuck in the local optimum by using chaotic map. In this study, the effects of chaotic maps on the new and successful Multiobjective Golden Sine Algorithm (MOGoldSA) were investigated.

Key words: Chaotic map, Multiobjective optimization, heuristic methods.

1. Giriş

Metasezgisel optimizasyon algoritmaları dönüşümü kolay, türevi olmayan, problemleri çözüm kapasitesi yüksek ve geniş bir kullanıma sahip olduğu için oldukça popüler bir alandır. Metasezgisel optimizasyon algoritmaları olayları fiziksel veya biyolojik olarak taklit ederek problemleri çözüme kavuştururlar [1]. Metasezgisel optimizasyon, rasgele üretilen bir sayı dizisinden yola çıkarak optimizasyon problemlerine uygun çözümler üretme işlemidir. Sezgisel optimizasyonda, problemler uygun çözümler üretirken başlangıç değerlerinin yani rasgele üretilen sayı dizilerinin önemi büyüktür. Rasgele sayı dizilerinin geniş bir spektruma sahip olmaması veya hep aynı değerleri üretmesi optimizasyon algoritmasının performansını etkilemektedir [2]. Bilindiği üzere sezgisel optimizasyonda amaç global optimuma uygun çözümler üretmektir. Bu doğrultuda başlangıçtaki rasgele sayı dizilerinin geniş bir spektrumda ve her defasında farklı değerler olarak üretilmesini sağlamak için kaotik haritalar kullanılmıştır [3].

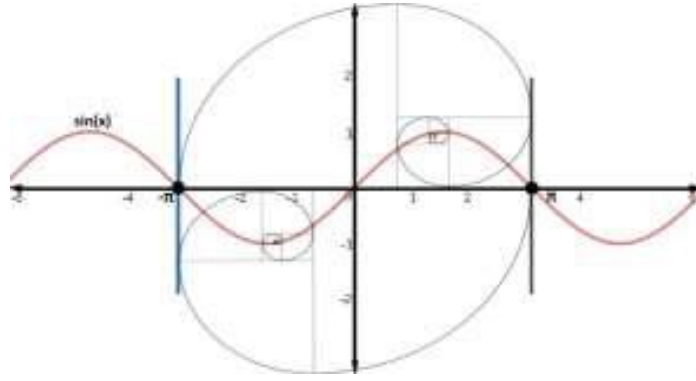
Kaotik sistemler başlangıç koşullarına duyarlı dinamik sistemlerdir. Kaos teorisi ise kaotik dinamik sistemlerin çalışmasıdır. Kaos teorisinin en bilindik örneği olan “kelebek etkisi” de göz önüne alındığında temel mantık olarak başlangıç koşullarındaki küçük değişikliklerin sonuçlara etkisi büyük olmaktadır. Bu doğrultuda çok amaçlı optimizasyon algoritmalarının başlangıçtaki rasgele sayı dizisinin, kaotik haritalar ile belirlenmesinin optimizasyon problemlerine uygun çözümler üretmede daha hızlı ve etkili olacağı ön görülmüştür. Kaotik sayı

* Sorumlu yazar: erozeyup@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-2670-0606, ² 0000-0003-2973-9389

dizesinin üretilmesi ve saklanması oldukça kolaydır. Basit bir fonksiyon ile istenilen spektrumdaki sayıları üretmek kolaydır. Üretilen kaotik temelli sayı dizesi sayesinde optimizasyon algoritmaları lokal optimumdan kaçabilmektedir. Bu düşünce ile geliştirilen birçok kaotik temelli çok amaçlı optimizasyon algoritması bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak; Kaotik temelli NSGA-II (CNSGAI) [4], Kaotik Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu (CMOPSO) [5], Kaotik Çok Amaçlı Karga Arama Algoritması (CMOCSA) [6], Kaotik Çok Amaçlı Karınca Optimizasyon Algoritması (CMOAO) [7], Kaotik Çok Amaçlı Diferansiyel Evrim Algoritması (CMODE) [8], Kaotik Çok Amaçlı Yapay Arı Kolonisi Algoritması (CMOABC) [9] ve Çok Amaçlı Kaotik Evrim (MOCE) [10] verilebilir. Çok amaçlı altın sinüs algoritmasının kaotik olarak değerlendirilmesinin sebebi ise, kısıtlı, kısıtsız ve mühendislik problemlerinde hızlı ve etkili sonuçlar üretmiş olmasıdır.

2. Çok Amaçlı Altın Sinüs Algoritması (MOGoldSA)

MOGoldSA, tek amaçlı optimizasyon algoritması olan Gold-SA' nın çok amaçlı problemler için uygulanabilir halidir. Gold-SA, sinüs fonksiyonundan yola çıkılarak geliştirilmiş matematik tabanlı metasezgisel bir tek amaçlı optimizasyon algoritmasıdır. Trigonometrik bir fonksiyon olan sinüs, "sin" kısaltması ile ifade edilmektedir. Sinüs, merkezi orijin olan 1 birimlik yarıçap dairesinde bir noktanın y eksenine göre koordinatıdır. Orijinden noktaya çizilen bir doğrunun y eksenine yaptığı açı kullanılarak ya da aynı açıya sahip bir dik üçgende, bu açının karşısındaki kenarın hipotenüse bölümüyle hesaplanmaktadır. Fonksiyonun tanım aralığı; $[-1, 1]$. Sinüs fonksiyonu, değerleri düzenli aralıklarla tekrarlayan periyodik bir fonksiyondur. Sinüs fonksiyonunun süresi 2π 'dir ve sinüs değerlerine sahip tüm birim daireler Şekil 1' de gösterildiği gibi taranabilir [11].



Şekil 1: GoldSA [11]

GoldSA' nın en iyi sonucu vermesi için denklem 1 kullanılır:

$$V(i, j) = V(i, j) * |\sin r_1| - p * \sin r_1 * |x_1 * D(j) - x_2 * V(i, j)| \quad (1)$$

Burada, $V(i, j)$, i . boyuttaki mevcut çözümün değeridir. $D(j)$ belirlenen hedef değeri, r_1 $[0, 2\pi]$ aralığında ve p $[0, \pi]$ aralığında rastgele bir sayıdır. x_1 ve x_2 altın bölüm yöntemi ile elde edilen katsayılardır. Bu katsayılar arama alanını daraltır ve mevcut değerin hedef değere yaklaşmasına izin verir.

Gold-SA' nın problemlere çözümler üretirken, arama uzayını geniş şekilde taraması, optimuma yakın sonuç üretmesi ve hızlı çalışması gibi özelliklerinden hareketle çok amaçlı optimizasyon problemleri üzerinde de aynı başarıyı gösterebilir hipotezinden yola çıkarak MOGoldSA geliştirildi. MOGoldSA' nın arşiv boyutu dışındaki tüm parametreleri Gold-SA ile aynıdır. Bu doğrultuda MOGoldSA' nın sözde kodu Şekil 2' de verilmiştir [12].

Çok Amaçlı Altın Sinüs Algoritması' nda p parametresi her arama ajanı için $[0, \pi]$ aralığında rastgele olarak belirlenmektedir. Rasgele üretilen bu değerler arama uzayının geniş şekilde taranmasını engellemektedir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için Mirjalili ve Amir H. Gandomi [13], kaotik haritaları Denklem 2 ve Denklem 3 ile normalize ederek başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Bu çalışmada normalize edilmiş kaotik haritalara entegre olarak adaptif olarak azalan Denklem 1' de gösterilen r_1 deseni ilk kez kullanılarak çok amaçlı optimizasyon problemlerine daha iyi çözümler bulabilmek için arama uzayının mümkün olduğunca tamamının taranması hedeflenmektedir.


```

Başlangıç popülasyonunu, Denklem 4.2 ile her boyut için arama ajanı sayısı kadar düzgün dağılıma bağlı olarak rasgele oluştur
Arama ajanlarının uygunluğunu hesapla
En iyi arama ajanını hedef olarak ata
Arşiv oluştur
while maksimum iterasyon sayısı
    Fonksiyon değerlerini al
    Roulette wheel ile en iyi arama ajanlarını bul ve Arşiv güncelle
    if Arşiv dolu ise
        Mevcut arşiv üyelerinden birini çıkarmak için arşiv bakım mekanizmasını çalıştır
        Yeni çözümleri arşive ekleyerek arşivi güncelle
    else
        Yeni çözümleri arşive ekleyerek arşivi güncelle
    end if
    for arama ajanı sayısı
         $r \leftarrow rand(0,1)$ 
         $r_1 \leftarrow 2\pi * r$ 
         $r_2 \leftarrow \pi * r$ 
        for boyut sayısı
             $V(i, j) = V(i, j) * |\sin r_1| - r_2 * \sin r_1 * |x_1 * D(j) - x_2 * V(i, j)|$ 
        end for
    end f***or
    En iyi çözümü (arama ajanı) bul ve  $D(j)$ ' ye hedef değer olarak ata
    if  $V(i, j) < D(j)$ 
        then  $b \leftarrow x_2, x_2 = x_1$ 
             $x_1 \leftarrow a * \varphi + b * (1 - \varphi)$ 
        else  $a \leftarrow x_1, x_1 = x_2$ 
             $x_2 \leftarrow a * (1 - \varphi) + b * \varphi$ 
        if  $x_1 == x_2$ 
            then  $a = random1, b = random2$ 
                 $x_1 = a * \varphi + b * (1 - \varphi)$ 
                 $x_2 = a * (1 - \varphi) + b * \varphi$ 
        end if
    end while
return En iyi çözüm kümesi ve elde edilen global optimum sonuç

```

Şekil 2: MOGoldSA sözde kodu [12]

$$V(t) = Max - \frac{t}{T}(Max - Min) \quad (2)$$

$$Normalize(K_i(t); [a, b]'dan [0, V(t)]'ye): K_i^{norm}(t) = \frac{(K_i(t)-a) \times (V(t)-0)}{(b-a)} + 0 = \frac{(K_i(t)-a) \times (V(t))}{(b-a)} \quad (3)$$

Burada, K : Kaotik harita, i : Kaotik haritanın indeksi, t : Mevcut iterasyon, T : Maksimum iterasyon sayısı, $[Max - Min]$: Uyarlanabilir aralığı temsil eder. $[a, b]$: Kaotik haritaların aralığını gösterir. $V(t)$ her iterasyonda azaltılırken her iterasyonda $[a, b]$, $[0, V(t)]$ ile eşleşir. Bu durum adaptif normalizasyon sürecini ifade eder. Sonuç olarak p katsayısının değeri Denklem 4 kullanılarak güncelleştirilir.

$$p(t) = K_i^{norm}(t) + c - t \times ((c)/T) \quad (4)$$

Rasgele üretilen diziye kaotik haritalar eklemek, hem adaptif p 'nin hem de kaotik haritaların rasgele davranışlarına aynı anda katkıda bulunur. Kaotik haritalar her defasında farklı rasgele dizi üretilip geniş bir spektruma sahip olmayı sağlamaktadır. p 'nin değerini aniden değiştirip yerel minimumdan kurtulmaya yardımcı olarak, daha iyi yakınsama hızı sağlamaktadır. Uyarlamalı normalleştirme ise kaos tabanlı MOGoldSA' nın arama evresinden sömürü evresine geçişini yavaşlatmayı sağlamaktadır.

3. Kaotik Haritalı MOGoldSA Yöntemleri

Literatürde birçok kaotik harita tanımlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan kaotik haritalar Tablo 1' de verilmiştir. MOGoldSA' da rastgele değerler kullanan kısımlar kaotik harita denklemleri ile değiştirilerek MOGoldSA' nın on farklı kaotik versiyonu oluşturulmuştur.

Tablo 1. Kaotik Haritalar [3]

	Kaotik Harita	Foksiyon
C1	Chebyshev	$x_{i+1} = \cos(\cos^{-1}(x_i))$ (5)
C2	Çember	$x_{i+1} = \text{mod}\left(x_i + b - \left(\frac{a}{2\pi}\right)\sin(2\pi x_i), 1\right), a = 0.5, b = 0.2$ (6)
C3	Gauss/Mouse	$x_{i+1} = \begin{cases} 1 & x_i = 0, \\ \frac{1}{\text{mod}(x_i, 1)} & \text{aksi takdirde} \end{cases}$ (7)
C4	İteratif	$x_{i+1} = \sin\left(\frac{a\pi}{x_i}\right) a = 0.7$ (8)
C5	Lojistik	$x_{i+1} = ax_i(1 - x_i), a = 4$ (9)
C6	Parçalı	$x_{i+1} = \begin{cases} \frac{x_i}{P} & 0 \leq x_i < P \\ \frac{x_i - P}{0.5 - P} & P \leq x_i < 0.5, \\ \frac{1 - P - x_i}{0.5 - P} & 0.5 \leq x_i < 1 - P, \\ \frac{1 - x_i}{P} & 1 - P \leq x_i < 1 \end{cases}$ (10)
C7	Sinüs	$x_{i+1} = \frac{a}{4}\sin(\pi x_i) a = 4,$ (11)
C8	Singer	$x_{i+1} = \mu(7.86x_i - 23.31x_i^2 + 28.75x_i^3 - 13.302875x_i^4), \mu = 2.3$ (12)
C9	Sinüzoidal	$x_{i+1} = ax_i^2 \sin(\pi x_i), a = 2.3$ (13)
C10	Tent	$x_{i+1} = \begin{cases} \frac{x_i}{0.7} & x_i < 0.7 \\ \frac{10}{3}(1 - x_i)x_i & x_i \geq 0.7 \end{cases}$ (14)

4. Deneysel Sonuçlar

Geliştirilen yöntemin başarısını test etmek için literatürde yer alan 14 farklı kıyaslama fonksiyonu kullanılarak (kısıtlı, kısıtsız ve mühendislik problemlerinin) performans değerleri incelenmiştir. Kullanılan mühendislik problemlerinin matematiksel ifadeleri Tablo 2’ de verilmiştir. Kullanılan kısıtlı ve kısıtsız kıyaslama fonksiyonlarının matematiksel ifadeleri Tablo 3’ de gösterilmiştir.

Tablo 2. Mühendislik problemlerinin matematiksel gösterimi

F	DEĞİŞKEN SINIRI	AMAÇ FONKSİYONLARI
BEAM	$\rho = \frac{7800kg}{m^3}, P = 1 kN,$ $E = 207 GPa, S_y = 300 MPa,$ $\delta_{max} = 5 mm$	$\min f_1(d, l) = \rho \frac{\pi d^2}{4} l$ $\min f_2(d, l) = \delta = \frac{64Pl^3}{3E\pi d^4}, \sigma_{max} = \frac{32Pl}{\pi d^3} \leq S_y$
DISC	$55 \leq x_1 \leq 80$ $75 \leq x_2 \leq 110$ $1000 \leq x_3 \leq 3000$ $2 \leq x_4 \leq 20$	$\min f_1(x) = 4.9e - 5(x_2^2 - x_1^2)(x_4 - 1)$ $\min f_2(x) = (9.82e6) \frac{x_2^2 - x_1^2}{x_3 x_4 (x_2^3 - x_1^3)}$ $g_1 = 20 + x_1 - x_2 \leq 0$ $g_2 = 2.5(x_4 + x_1) - 30 \leq 0$ $g_3 = \frac{x_3}{3.14(x_2^2 - x_1^2)} - 0.4 \leq 0$ $g_4 = 2.22e - 3x_3 \frac{x_2^3 - x_1^3}{(x_2^2 - x_1^2)^2} - 1 \leq 0$ $g_5 = 900 - \left(\frac{2.66e - 2x_3 x_4 (x_3^3 - x_1^3)}{x_2^2 - x_1^2}\right) \leq 0$
FBTP	$1 \leq x_1, x_4 \leq 3$ $\sqrt{2} \leq x_2, x_3 \leq 3$	$\min f_1(x) = L(2x_1 + \sqrt{2x_2} + \sqrt{x_3} + x_4)$ $\min f_2(x) = (F \frac{L}{E}) \left(\frac{2}{x_2} + 2 \frac{\sqrt{2}}{x_2} - 2 \frac{\sqrt{2}}{x_3} + \frac{2}{x_4}\right)$
GEAR	$12 \leq x_1, x_2, x_3, x_4 \leq 60$	$\min f_1(x) = \left(\left(\frac{1}{6.931}\right) - \left(\frac{x_1 x_2}{x_3 x_4}\right)\right)^2$ $\min f_2(x) = \max([x_1, x_2, x_3, x_4])$

Tablo 3: Kısıtlı-kısıtsız kıyaslama fonksiyonlarının matematiksel gösterimi

F	DEĞİŞKEN SINIRI	AMAÇ FONKSİYONLARI
ZDT1	$x_i \in [0,1]$ $i = 1, \dots, n$ $n = 30$	$f_1(x) = x_1$ $f_2(x) = g(x) \left(-\sqrt{f_1/g(x)} \right)$ $g(x) = 1 + 9 \left(\sum_{i=2}^m x_i \right) / (n-1)$
ZDT6	$x_i \in [0,1]$ $i = 1, \dots, n$ $n = 10$	$f_1(x) = 1 - \exp(-4x_1) \sin^6(\pi x_1)$ $f_2(x) = g(x) (1 - (x_1/g(x))^2)^{0.25}$ $g(x) = 1 + 9 \left[\left(\sum_{i=2}^m x_i / (n-1) \right) \right]^{0.25}$
FON	$x_i \in [-4,4]$ $i = 1, \dots, n$ $n = 10$	$f_1(x) = 1 - \exp \left(- \sum_1^3 \left(x_i - \frac{1}{\sqrt{3}} \right)^2 \right)$
KUR	$x_i \in [-5,5]$ $i = 1, \dots, n$ $n = 3$	$f_1(x) = \sum_{i=1}^{n-1} \left(-10 \exp \left(-0.2 \sqrt{x_i^2 + \sqrt{x_{i+1}^2}} \right) \right)$ $f_2(x) = \sum_{i=1}^n (x_i ^{0.8} + 5 \sin x_i^3)$
VIE	$x_i \in [-3,3]$ $i = 1, \dots, n$ $n = 2$	$f_1(x) = 0.5(x_1^2 + x_2^2) + \sin(x_1^2 + x_2^2)$ $f_2(x) = 15 + \frac{1}{8}(4 + 3x_1 - 2x_2)^2 + \frac{1}{27}(1 + x_1 - x_2)^2$ $f_3(x) = (1 + x_1^2 + x_2^2)^{-1} - 1.1 \exp(-x_1^2 - x_2^2)$
POLO	$x_i \in [-\pi, \pi]$ $i = 1, \dots, n$ $n = 2$	$f_1(x) = [1 + (A_1 - B_1)^2 + (A_2 - B_2)^2]$ $f_2(x) = [(x_1 + 3)^2 + (x_2 + 1)^2]$ $A_1 = 0.5 \sin 1 - 2 \cos 1 + \sin 2 - 1.5 \cos 2$ $A_2 = 1.5 \sin 1 - \cos 1 + 2 \sin 2 - 0.5 \cos 2$ $B_1 = 0.5 \sin x_1 - 2 \cos x_1 + \sin x_2 - 1.5 \cos x_2$ $B_2 = 1.5 \sin x_1 - \cos x_1 + 2 \sin x_2 - 0.5 \cos x_2$
CNEX	$x_1 \in [0,11]$ $x_2 \in [0,5]$	$f_1(x) = x_1$ $f_2(x) = (1 + x_2)/x_1$ $g_1(x) = 9x_1 + x_2 \geq 6$ $g_2(x) = -x_2 + 9x_1 \geq 1$
SRN	$x_1 \in [-20,20]$ $x_2 \in [-20,20]$	$f_1(x) = 2 + (x_1 - 2)^2 + (x_2 - 2)^2$ $f_2(x) = 9x_1 - (x_2 - 1)$ $g_1(x) = x_1^2 + x_2^2 \leq 225$ $g_2(x) = x_1 - 3x_2 + 10 \leq 0$
BNH2	$x_i \in [-7,4]$ $i = 1, \dots, n$ $n = 2$	$f_1(x) = x_1^2 - x_2$ $f_2(x) = -0.5x_1 - x_2 - 1$ $g_1(x) = 6.5 - \frac{x_1}{2} - x_2 \geq 0$ $g_2(x) = 7.5 - \frac{x_1}{2} - x_2 \geq 0$ $g_3(x) = 30 + 5x_1 - x_2 \geq 0$
CTP8	$x_i \in [0,1]$ $i = 1, \dots, n$ $n = 2$	$f_1(x) = x_1$ $f_2(x) = g(x) \left(1 - \frac{f_1(x)}{g(x)} \right)$ $g(x) = \cos(\theta) [f_2(x) - e] - \sin(\theta) x_1$ $\geq a [\sin\{b\pi [\sin(\theta) (f_2(x) - e) + \cos(\theta) x_1]^c\}]^d$

Geliştirilen algoritmaların başarısını değerlendirmek için kullanılan ölçütlere performans ölçütleri denilmektedir. Çalışmamızda literatürde yer edinmiş ve çok amaçlı optimizasyon algoritmalarının karşılaştırılmasında sıkça kullanılan performans ölçütleri kullanılmıştır. Bunlar; Uzaklık Mesafesi (GD), Ters Uzaklık Mesafesi (RGD), Boşluk(S), Yayılma (SP) ve Maksimum Yayılma(MS) performans ölçüm metrikleridir.

Uzaklık Mesafesi (GD):

GD, 1998 yılında Veldhuizen tarafından önerilmiştir ve elde edilen çözümlerin, Pareto-optimal cephe arasındaki mesafelerin ölçümü ile hesaplanmaktadır [15]. Q , elde edilen çözüm seti ve P , Pareto optimal cephesinde baskın olmayan çözümler kümesi olsun. Bir Q çözümün P optimal çözüm kümesine ait olup olmadığı Q 'nın P 'ye olan ortalama uzaklığı ile belirlenmektedir. GD değeri Denklem 15 şeklinde hesaplanır [14,15]:

$$GD = \frac{(\sum_{i=1}^{|Q|} d_i^p)^{1/p}}{|Q|} \quad (15)$$

$p = 2$ için, d_i parametresi $i \in Q$ çözümü ile P 'nin en yakın üyesi arasındaki Denklem 16' da verilen (nesnel alanda) Öklid mesafesidir:

$$d_i = \min_{k=1} |P| \sqrt{\sum_{m=1}^M (f_m^i - f_m^k)^2} \quad (16)$$

Burada f_m^k , P 'nin k . elemanının m . amaç fonksiyon değeridir.

Ters Uzaklık Mesafesi (RGD):

Ters uzaklık mesafesi (RGD), hem çeşitliliği hem de çözümleri birleştirerek hesaba katan GD'nin geliştirilmiş bir halidir. Bununla birlikte, çözümlerin Pareto-optimal cepheye en yakın ortalama mesafesini hesaplayan GD'nin aksine, Pareto-optimal cephedeki örnek noktaların elde edilen çözümlere en yakın ortalama mesafesini hesaplar. RGD hesaplama formülü Denklem 17' de verilmiştir.

$$RGD = \frac{(\sum_{i=1}^{|P|} d_i^q)^{1/q}}{|P|} \quad (17)$$

RGD'nin en büyük avantajı, çözümlerin hem yakınsamasını hem de çeşitliliğini aynı anda ölçebilmesidir. GD'ye benzer şekilde, RGD hedeflerin sayısı arttıkça katlanarak maliyetli hale gelmesidir [15].

Maksimum Yayılma (MS)

Zitzler (1999), denklem 18' de gösterildiği gibi baskın olmayan kümede gözlenen aşırı fonksiyon değerleri tarafından oluşturulan bir hiper kutunun köşegeninin uzunluğunu ölçen metrik tanımlamıştır [16]:

$$D = \sqrt{\sum_{m=1}^M \left(\max_{i=1} f_m^i - \min_{i=1} f_m^i \right)} \quad (18)$$

İki amaç problem için MS, amaç uzayındaki iki uç çözüm arasındaki Öklid mesafesini ifade etmektedir. Yukarıdaki metriğin normalleştirilmiş bir versiyonuna sahip olmak için, denklem 19 kullanılarak değiştirilebilir:

$$\bar{D} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left(\frac{\max_{i=1} f_m^i - \min_{i=1} f_m^i}{F_m^{max} - F_m^{min}} \right)^2} \quad (19)$$

Burada, F_m^{max} ve F_m^{min} , seçilen Pareto-optimal çözüm setinin (P) m . hedefinin maksimum ve minimum değeridir. Bu şekilde, yukarıdaki metrik ile geniş çapta yayılmış bir dizi çözüm elde edilir. Bununla birlikte, ne D ne de $\bar{D}$, ara çözümlerin tam dağılımını değerlendiremez [14].

Boşluk (S)

Schott (1995), elde edilen baskın olmayan kümedeki ardışık çözümler arasındaki bağıl mesafe ölçüsünün hesaplanmasına dayalı olan metriği denklem 20’ deki gibi önermiştir [17,18]:

$$S = \sqrt{\frac{1}{|Q|} \sum_{i=1}^{|Q|} (d_i - \bar{d})^2} \quad (20)$$

Burada, $d_i = \min_{k \in Q \wedge k \neq i} \sum_{i=1}^M |f_i^m - f_i^k|$ olmak üzere ve $\bar{d} = \sum_{i=1}^{|Q|} d_i / Q$ yukarıdaki mesafe ölçüsünün ortalama değeridir.

Yayılma (SP)

Yayılma derecesini dikkate almayan ölçümlerde, çözümler belli aralıklarda aynı sonucu ürettiği için Deb ve arkadaşları tarafından yayılma derecesini dikkate alan yeni bir metrik (Spread) geliştirilmiştir. Spread ölçütünün formülasyonu Denklem 21’ de verilmektedir.

$$\Delta = \frac{\sum_{m=1}^M d_m^e + \sum_{i=1}^{|Q|} |d_i - \bar{d}|}{\sum_{m=1}^M d_m^e + |Q| \bar{d}} \quad (21)$$

Burada, d_i , komşu çözümler arasında herhangi bir mesafe ölçümü olabilir ve $\bar{d}$, bu mesafe ölçümlerinin ortalama değeridir. Öklid mesafesi veya kalabalık mesafesi d_i ’ yi hesaplamak için kullanılabilir. d_m^e parametresi, m . hedef fonksiyonuna karşılık gelen P^* ve Q nin uç çözümleri arasındaki mesafedir [14].

Tablo 4’ e bakıldığı zaman GD ölçütüne göre istatistiksel veriler görülmektedir. Sonuçlara göre F4, F6, F11, F13 ve F14 fonksiyonlarında MOGoldSA, F2 ve F10’da C8, F1 ve F12’ de C1, F1’ de C2, F3’te C7,F5’te C10 algoritmaları başarılı sonuçlar üretmiştir.

Tablo 4: GD ölçütüne göre istatistiksel sonuçlar (İ: istatistiksel, Ort: ortalama değer, M: MOGoldSA, C1-C10: Kaotik haritalı MOGoldSA)

F	İ	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14
M	Ort	0,0018	8,3199	0,0125	0,0116	0,1685	1,7130	0,0013	1,31E+05	15,8700	0,2749	2,3918	0,0263	0,4963	0,8449
	Std	0,0002	0,0753	0,0052	0,0034	0,1868	0,2213	0,0001	5,12E+04	0,1832	0,2072	0,8702	0,0167	1,1031	1,1038
	En iyi	0,0015	8,1946	0,0054	0,0055	0,0522	1,2180	0,0011	6,71E+04	15,3711	0,0314	0,8173	0,0050	0,0013	0,0003
	En kötü	0,0029	8,4382	0,0256	0,0209	1,0355	2,0817	0,0014	2,80E+05	16,1202	0,6265	4,3257	0,0715	3,1007	3,2217
C1	Ort	0,0019	8,3330	0,0159	0,0169	0,2150	7,2059	0,0013	1,19E+05	15,7261	0,3725	5,8174	0,0258	1,6759	1,3003
	Std	0,0006	0,1054	0,0143	0,0166	0,3487	28,6789	0,0001	4,37E+04	0,2125	0,1954	14,6580	0,0150	1,4865	1,2621
	En iyi	0,0014	8,1074	0,0069	0,0060	0,0687	1,4821	0,0011	4,49E+04	15,2097	0,0328	1,2962	0,0071	0,0011	0,0002
	En kötü	0,0050	8,5934	0,0854	0,0924	1,9866	159,0466	0,0017	2,22E+05	16,0554	0,8270	82,9411	0,0568	3,3801	3,1894
C2	Ort	0,0017	8,3000	0,0139	0,0170	0,2588	1,9341	0,0013	1,32E+05	15,7143	0,3311	2,8275	0,0288	2,4400	1,2334
	Std	0,0002	0,1021	0,0107	0,0148	0,4427	0,2131	0,0002	4,85E+04	0,2152	0,2146	1,4607	0,0197	1,1341	1,3320
	En iyi	0,0014	8,0520	0,0054	0,0054	0,0691	1,4358	0,0011	3,86E+04	15,2487	0,0402	1,2939	0,0075	0,0012	0,0003
	En kötü	0,0020	8,5105	0,0649	0,0627	2,3990	2,4182	0,0021	2,62E+05	16,0393	0,6688	7,4301	0,0806	3,3788	3,3160
C3	Ort	0,0017	8,3072	0,0145	0,0153	0,1837	1,9951	0,0013	1,42E+05	15,7096	0,4276	3,2260	0,0333	1,6831	1,1971
	Std	0,0002	0,1035	0,0080	0,0104	0,1874	0,2184	0,0001	7,41E+04	0,2438	0,2060	1,4267	0,0187	1,4813	0,9893
	En iyi	0,0013	8,0450	0,0060	0,0005	0,0615	1,5117	0,0011	5,57E+04	15,2326	0,0420	1,2835	0,0080	0,0009	0,0002
	En kötü	0,0022	8,4974	0,0484	0,0479	0,9753	2,4390	0,0018	3,56E+05	16,1635	0,9420	7,4359	0,0788	3,4575	2,8035
C4	Ort	0,0017	8,3224	0,0126	0,0135	0,2078	1,8997	0,0013	1,21E+05	15,7494	0,3857	3,1026	0,0296	1,2962	1,2515
	Std	0,0002	0,0975	0,0043	0,0039	0,1737	0,2272	0,0001	4,65E+04	0,1634	0,1700	1,3081	0,0166	1,5032	1,0860
	En iyi	0,0014	8,1365	0,0062	0,0075	0,0595	1,3834	0,0012	5,54E+04	15,3458	0,0444	1,1690	0,0072	0,0014	0,0003
	En kötü	0,0021	8,6426	0,0218	0,0218	0,9515	2,2765	0,0019	2,51E+05	15,9880	0,6818	5,2628	0,0788	3,3679	3,0271
C5	Ort	0,0017	8,3130	0,0174	0,0134	0,2096	6,3460	0,0013	1,29E+05	15,7213	0,3469	3,0392	0,0384	1,8277	1,1596
	Std	0,0002	0,0999	0,0184	0,0076	0,2281	24,2520	0,0001	5,43E+04	0,2565	0,1923	1,6124	0,0230	1,5230	1,1629
	En iyi	0,0014	8,1101	0,0069	0,0058	0,0710	1,5239	0,0011	4,88E+04	15,2398	0,0323	0,6782	0,0157	0,0011	0,0003
	En kötü	0,0023	8,4549	0,1065	0,0482	1,1356	134,7480	0,0014	2,71E+05	16,1714	0,6920	7,2247	0,1099	3,3499	3,1608
C6	Ort	0,0018	8,3031	0,0175	0,0163	0,2324	1,9527	0,0013	1,16E+05	15,7738	0,3600	2,9896	0,0270	1,9851	1,0787
	Std	0,0001	0,0743	0,0140	0,0143	0,4670	0,2523	0,0001	4,55E+04	0,1933	0,2230	1,3382	0,0160	1,4361	1,2147
	En iyi	0,0015	8,1373	0,0073	0,0065	0,0774	1,5239	0,0012	5,92E+04	15,3255	0,0319	1,3425	0,0075	0,0011	0,0003
	En kötü	0,0019	8,5119	0,0660	0,0822	2,6451	2,3934	0,0015	2,16E+05	16,0716	0,7712	7,2247	0,0812	3,2526	3,8606

Tablo 4: GD ölçütüne göre istatistiksel sonuçlar (devam)

F	<i>I</i>	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14
C7	Ort	0,0017	8,3250	0,0124	0,0146	0,1510	1,9204	0,0013	1,29E+05	15,8390	0,3242	2,8455	0,0308	1,5177	1,0963
	Std	0,0002	0,1300	0,0052	0,0119	0,1097	0,2254	0,0001	6,08E+04	0,1614	0,2086	1,2679	0,0194	1,5178	1,1465
	En iyi	0,0013	8,0018	0,0054	0,0067	0,0572	1,4960	0,0012	5,14E+04	15,3908	0,0386	0,7718	0,0068	0,0016	0,0002
	En kötü	0,0020	8,5596	0,0311	0,0692	0,5553	2,3802	0,0015	3,43E+05	16,0761	0,6123	6,4154	0,0889	3,5994	3,4080
C8	Ort	0,0017	8,2322	0,0153	0,0121	0,1414	7,2071	0,0013	1,32E+05	15,7590	0,2902	3,0378	0,0316	1,8527	0,7797
	Std	0,0002	0,4424	0,0130	0,0046	0,0522	29,0651	0,0001	6,55E+04	0,2336	0,2186	1,3643	0,0177	1,4415	0,9194
	En iyi	0,0014	5,9419	0,0052	0,0052	0,0503	1,6029	0,0012	4,35E+04	15,2692	0,0265	1,2403	0,0058	0,0010	0,0003
	En kötü	0,0020	8,5686	0,0690	0,0225	0,2687	161,0950	0,0016	2,59E+05	16,1254	0,8765	6,9020	0,0636	3,3179	3,6920
C9	Ort	0,0017	8,3052	0,0141	0,0193	0,1860	1,9214	0,0013	1,40E+05	15,8101	0,2927	2,9073	0,0257	1,6732	1,1073
	Std	0,0002	0,0949	0,0115	0,0249	0,1106	0,2409	0,0001	5,33E+04	0,1931	0,2216	1,4787	0,0126	1,4927	1,2232
	En iyi	0,0015	8,1119	0,0062	0,0048	0,0592	1,4999	0,0012	7,38E+04	15,3524	0,0367	0,8607	0,0092	0,0008	0,0003
	En kötü	0,0022	8,4867	0,0695	0,1192	0,5561	2,4462	0,0016	2,72E+05	16,1674	0,8550	7,0791	0,0533	3,2864	3,1565
C10	Ort	0,0017	8,3093	0,0135	0,0178	0,1308	6,2348	0,0013	1,30E+05	15,7671	0,3876	3,1695	0,0266	2,0185	0,9141
	Std	0,0002	0,1225	0,0071	0,0202	0,0852	19,2587	0,0001	5,99E+04	0,2583	0,2258	1,9354	0,0150	1,4648	1,0745
	En iyi	0,0015	8,0122	0,0050	0,0061	0,0537	1,4231	0,0012	4,24E+04	15,2144	0,0373	1,1664	0,0103	0,0016	0,0003
	En kötü	0,0023	8,4963	0,0427	0,0967	0,5213	104,7439	0,0017	2,72E+05	16,1108	0,8129	9,5690	0,0612	3,6282	3,1713

Tablo 5’ te RGD ölçütüne göre istatistiksel veriler yer almaktadır. Ortalama sonuçlarına göre F1, F3, F4, F6,F7, F10-F13 fonksiyonlarında MOGoldSA diğerlerine göre üstün performans sergilemiştir. F2 ve F14’te C8, F5’te C7, F9’ da ise C9 kaotik haritalı MOGoldSA algoritmaları başarılı sonuçlar üretmiştir.

Tablo 5: RGD ölçütüne göre istatistiksel sonuçlar (İ: istatistiksel, Ort: ortalama değer, M: MOGoldSA, C1-C10: Kaotik haritalı MOGoldSA)

F	<i>I</i>	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14
M	Ort	0,0139	8,6256	0,0911	0,0971	0,1540	5,5666	0,0066	7,85E+04	15,0890	0,1900	3,4931	0,1076	0,7300	0,2182
	Std	0,0015	0,0059	0,0219	0,0300	0,0391	0,4415	0,0006	3,20E+04	0,1908	0,0413	0,9362	0,0415	0,8493	0,3521
	En iyi	0,0113	8,6062	0,0688	0,0606	0,0899	4,7980	0,0057	5,30E+04	14,8700	0,1304	1,7486	0,0596	0,0063	0,0065
	En kötü	0,0174	8,6319	0,1681	0,1843	0,2526	6,6794	0,0078	2,10E+05	15,5397	0,2964	5,7345	0,2540	2,5414	1,0779
C1	Ort	0,0155	8,6213	0,1162	0,1476	0,1630	6,2062	0,0099	7,69E+04	15,0457	0,2315	8,0721	0,1277	1,3935	0,4091
	Std	0,0020	0,0276	0,0438	0,0879	0,0412	0,7296	0,0021	1,88E+04	0,1794	0,0669	20,8885	0,0552	1,1752	0,4266
	En iyi	0,0118	8,4773	0,0674	0,0775	0,1057	5,2851	0,0068	5,58E+04	14,8746	0,1370	2,1990	0,0702	0,0092	0,0075
	En kötü	0,0216	8,6322	0,2693	0,5136	0,3149	7,8554	0,0160	1,63E+05	15,5230	0,4027	118,2144	0,2879	2,7222	1,0075
C2	Ort	0,0161	8,6246	0,1094	0,1343	0,1614	6,4102	0,0101	7,62E+04	15,0656	0,2269	4,3342	0,1232	2,0541	0,3461
	Std	0,0021	0,0079	0,0302	0,0527	0,0281	1,2850	0,0016	2,01E+04	0,1969	0,0680	2,5655	0,0350	0,9401	0,3845
	En iyi	0,0125	8,6016	0,0643	0,0629	0,1225	4,8798	0,0070	5,37E+04	14,8552	0,1343	1,8702	0,0738	0,0103	0,0075
	En kötü	0,0211	8,6323	0,1954	0,2862	0,2225	11,7756	0,0146	1,34E+05	15,4928	0,3830	15,4309	0,2240	2,8145	0,9632
C3	Ort	0,0166	8,6223	0,1198	0,1674	0,1759	6,5419	0,0107	8,54E+04	15,0878	0,2263	5,1722	0,1252	1,4867	0,2957
	Std	0,0027	0,0097	0,0321	0,2402	0,0540	1,8062	0,0027	2,69E+04	0,2201	0,0769	2,0466	0,0370	1,1225	0,3315
	En iyi	0,0119	8,6010	0,0706	0,0743	0,0896	5,1555	0,0078	5,40E+04	14,8501	0,1156	2,8164	0,0657	0,0101	0,0072
	En kötü	0,0249	8,6325	0,2056	1,4144	0,3755	15,3156	0,0211	1,77E+05	15,5536	0,5396	9,8725	0,2297	2,6372	0,8605
C4	Ort	0,0169	8,6183	0,1172	0,1058	0,1619	6,5518	0,0103	7,67E+04	15,0621	0,2405	4,5582	0,1283	1,2300	0,3716
	Std	0,0028	0,0318	0,0388	0,0356	0,0268	1,1956	0,0018	2,34E+04	0,1806	0,0790	1,7841	0,0382	1,2001	0,3383
	En iyi	0,0130	8,4593	0,0693	0,0706	0,1179	5,3827	0,0079	4,96E+04	14,8735	0,1323	1,9375	0,0737	0,0092	0,0072
	En kötü	0,0248	8,6320	0,2543	0,2196	0,2259	9,9374	0,0163	1,44E+05	15,5271	0,5116	9,7067	0,2119	2,9509	0,9038
C5	Ort	0,0164	8,6202	0,1289	0,1118	0,1703	6,4240	0,0100	7,98E+04	15,0455	0,2249	4,2867	0,1274	1,5668	0,3183
	Std	0,0020	0,0143	0,0508	0,0236	0,0360	1,2863	0,0033	1,91E+04	0,1716	0,0539	1,6461	0,0417	1,2474	0,3736
	En iyi	0,0130	8,5827	0,0818	0,0658	0,1202	4,8713	0,0064	5,33E+04	14,8770	0,1570	2,1506	0,0646	0,0092	0,0077
	En kötü	0,0201	8,6322	0,3482	0,1742	0,2478	11,4886	0,0238	1,30E+05	15,5120	0,3670	9,7562	0,2119	2,7386	0,9388
C6	Ort	0,0154	8,6193	0,1344	0,1349	0,1651	6,1323	0,0105	8,07E+04	15,1242	0,2379	4,6993	0,1266	1,6873	0,2806
	Std	0,0020	0,0221	0,1014	0,0707	0,0351	0,5991	0,0023	2,27E+04	0,2256	0,0772	1,9218	0,0475	1,1153	0,3616
	En iyi	0,0119	8,5240	0,0675	0,0659	0,1237	5,0300	0,0068	5,24E+04	14,8659	0,1231	2,1506	0,0771	0,0090	0,0073
	En kötü	0,0187	8,6319	0,6048	0,4270	0,2880	7,4870	0,0152	1,31E+05	15,5606	0,4514	9,7562	0,2918	2,7826	1,1942
C7	Ort	0,0162	8,6202	0,1060	0,1172	0,1521	6,5014	0,0104	8,71E+04	15,1280	0,2549	5,4017	0,1256	1,3254	0,2778
	Std	0,0024	0,0210	0,0218	0,0310	0,0243	2,0238	0,0037	3,94E+04	0,1866	0,1115	3,2640	0,0375	1,1795	0,3254
	En iyi	0,0119	8,5378	0,0666	0,0683	0,1094	5,2940	0,0072	4,82E+04	14,8742	0,1161	2,0353	0,0850	0,0096	0,0065
	En kötü	0,0226	8,6344	0,1560	0,2132	0,2015	15,7028	0,0274	2,52E+05	15,5380	0,6373	17,8493	0,2409	2,8171	0,8939
C8	Ort	0,0159	8,5112	0,1179	0,1093	0,1657	6,9378	0,0102	8,30E+04	15,0838	0,2180	4,5841	0,1328	1,5990	0,1785
	Std	0,0026	0,0600	0,0412	0,0316	0,0242	5,1348	0,0020	2,61E+04	0,1795	0,0557	1,8419	0,0518	1,1549	0,2730
	En iyi	0,0115	5,3035	0,0604	0,0750	0,1310	5,2226	0,0071	5,29E+04	14,8677	0,1013	2,7531	0,0701	0,0103	0,0068
	En kötü	0,0223	8,6314	0,2435	0,2116	0,2314	33,9452	0,0168	1,58E+05	15,4704	0,3321	12,1250	0,2930	2,8010	0,9023

Tablo 5: RGD ölçütüne göre istatistiksel sonuçlar (devamı...)

<i>F</i>	<i>I</i>	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14
C9	<i>Ort</i>	0,0163	8,6220	0,1400	0,1457	0,1699	6,2038	0,0099	7,07E+04	15,0803	0,2390	4,6640	0,1286	1,4906	0,3594
	<i>Std</i>	0,0022	0,0163	0,1260	0,1006	0,0348	0,7780	0,0016	1,52E+04	0,1982	0,0884	1,9294	0,0419	1,2312	0,3994
	<i>En iyi</i>	0,0130	8,5470	0,0714	0,0676	0,1208	4,8604	0,0079	5,05E+04	14,8699	0,1326	2,0254	0,0718	0,0084	0,0066
	<i>En kötü</i>	0,0230	8,6316	0,7894	0,5954	0,2780	8,6924	0,0145	1,24E+05	15,5507	0,5094	9,0899	0,2165	2,9830	1,0989
C10	<i>Ort</i>	0,0162	8,6149	0,1245	0,1374	0,1672	7,8045	0,0095	7,96E+04	15,0610	0,2502	4,9901	0,1315	1,7508	0,2642
	<i>Std</i>	0,0024	0,0419	0,0640	0,0999	0,0444	5,7384	0,0016	2,35E+04	0,1844	0,0854	2,6161	0,0394	1,1106	0,3529
	<i>En iyi</i>	0,0119	8,4077	0,0630	0,0815	0,1169	5,0802	0,0071	5,19E+04	14,8648	0,1520	2,0205	0,0697	0,0096	0,0073
	<i>En kötü</i>	0,0216	8,6324	0,3562	0,6313	0,2870	33,3053	0,0136	1,36E+05	15,5522	0,5657	14,7089	0,2183	2,7814	0,9537

Tablo 6' da MS ölçütüne göre istatistiksel veriler yer almaktadır. Ortalama sonuçlarına göre F1, F9 ve F12' de C6, F7, F8 ve F11 fonksiyonlarında C7 iyi performans sergilerken, F3 ve F5 fonksiyonlarında C10, F10 ve F13 fonksiyonlarında ise MOGoldSA optimuma yakın sonuçlar üretmeyi başarmıştır.

Tablo 6: MS ölçütüne göre istatistiksel sonuçlar (İ: istatistiksel, Ort: ortalama değer, M: MOGoldSA, C1-C10: Kaotik haritalı MOGoldSA)

<i>F</i>	<i>I</i>	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14
M	<i>Ort</i>	2,6048	15,8942	7,3048	7,4875	15,6436	550,3116	1,3844	1,19E+07	12,8344	31,1862	279,4438	8,4128	1,0207	3,0685
	<i>Std</i>	0,0190	0,1997	0,6430	0,5528	2,0664	3,3891	0,0053	9,30E+05	0,0953	1,6925	16,5129	0,0496	0,9002	1,9061
	<i>En iyi</i>	2,5619	15,2051	5,5762	5,4992	14,5267	542,8399	1,3669	9,95E+06	12,5153	28,5832	243,6088	8,3217	0,0187	1,1661
	<i>En kötü</i>	2,6480	16,1176	8,0135	7,9759	24,2854	553,5211	1,3893	1,28E+07	12,9014	34,0843	305,4576	8,5017	2,9087	6,2892
C1	<i>Ort</i>	2,5802	15,8971	7,2520	6,9349	15,4176	578,5798	1,3701	1,20E+07	12,8495	31,5682	274,6033	8,4252	1,9431	3,3885
	<i>Std</i>	0,0465	0,1989	0,6658	0,9021	1,8261	146,2923	0,0216	8,02E+05	0,0707	1,2712	29,0575	0,0597	0,7807	1,9081
	<i>En iyi</i>	2,4657	15,4548	5,2635	4,4843	14,5242	545,3551	1,2927	1,02E+07	12,6047	28,7205	141,5169	8,2953	0,0567	1,1475
	<i>En kötü</i>	2,6718	16,1198	7,9522	7,9497	22,6497	1353,0341	1,3889	1,28E+07	12,8977	33,2183	305,6006	8,5017	3,3600	8,1067
C2	<i>Ort</i>	2,5869	15,8124	7,3035	7,0703	16,2571	549,8367	1,3741	1,20E+07	12,8351	31,3849	276,6534	8,4089	2,2793	3,3286
	<i>Std</i>	0,0596	0,4183	0,6012	0,7048	3,3396	7,4998	0,0172	8,17E+05	0,1044	1,6655	16,6448	0,0704	0,6598	2,3312
	<i>En iyi</i>	2,3713	13,9126	5,7275	5,2423	14,4483	528,5836	1,3156	1,02E+07	12,3891	28,5490	222,0262	8,2497	1,3147	1,1506
	<i>En kötü</i>	2,6327	16,1244	7,9966	7,9677	29,6872	553,5387	1,3891	1,28E+07	12,8967	34,0964	295,3651	8,5022	3,4928	8,6117
C3	<i>Ort</i>	2,5920	15,8391	7,2041	6,9043	15,5402	551,0465	1,3653	1,19E+07	12,8372	31,7141	267,0346	8,4020	1,8115	4,3031
	<i>Std</i>	0,0385	0,2676	0,6462	1,4978	1,8479	5,4147	0,0240	8,46E+05	0,0725	1,4793	20,4488	0,0891	0,8927	2,0126
	<i>En iyi</i>	2,4775	15,0617	5,4842	0,5947	14,1275	531,4326	1,2599	1,04E+07	12,6276	28,7927	232,6369	8,1755	0,0209	1,1602
	<i>En kötü</i>	2,6235	16,1017	7,9357	8,0183	22,2433	553,5310	1,3873	1,28E+07	12,8994	33,8330	307,4832	8,5016	3,2693	9,5035
C4	<i>Ort</i>	2,6009	15,8667	7,2173	7,3819	16,0301	545,4246	1,3744	1,18E+07	12,8390	31,5710	273,5217	8,3969	1,6280	3,6766
	<i>Std</i>	0,0325	0,2758	0,5802	0,4494	1,8429	16,0517	0,0157	8,46E+05	0,0645	1,5637	16,4413	0,0832	0,9637	2,1020
	<i>En iyi</i>	2,4731	15,1088	5,5466	6,2653	14,7046	485,4137	1,3205	1,04E+07	12,6668	27,6263	246,8166	8,1876	0,0397	1,1647
	<i>En kötü</i>	2,6237	16,1122	7,9918	7,9448	21,8766	553,4758	1,3898	1,28E+07	12,8978	33,5374	306,9914	8,5016	3,6670	8,6138
C5	<i>Ort</i>	2,5893	15,8672	7,1013	7,3029	15,8672	575,3540	1,3693	1,18E+07	12,8566	31,5961	276,6824	8,4290	2,0600	3,4141
	<i>Std</i>	0,0392	0,2890	0,6116	0,4903	2,3206	138,7188	0,0246	8,00E+05	0,0501	1,4614	15,1228	0,0688	0,8149	2,2299
	<i>En iyi</i>	2,4897	14,6790	5,9712	6,0202	14,3456	514,7806	1,2632	1,04E+07	12,7271	28,7932	259,2323	8,2727	0,0370	1,1508
	<i>En kötü</i>	2,6236	16,1199	7,9602	7,9519	23,4614	1308,5832	1,3885	1,28E+07	12,9007	33,3065	309,0974	8,5014	4,0221	8,9736
C6	<i>Ort</i>	2,5784	15,9021	7,2224	7,0197	15,9135	551,3852	1,3683	1,18E+07	12,7894	31,4504	269,4132	8,3957	1,9611	3,4703
	<i>Std</i>	0,0497	0,2037	0,6065	0,8262	3,0200	3,1412	0,0209	8,45E+05	0,1660	1,5049	15,7129	0,0657	0,8602	2,1715
	<i>En iyi</i>	2,4129	15,4294	5,3703	4,8267	14,5152	541,4408	1,3031	1,02E+07	12,1394	28,7932	239,0199	8,2478	0,0169	1,1646
	<i>En kötü</i>	2,6236	16,1217	7,9714	7,9785	30,3976	553,5392	1,3885	1,28E+07	12,8981	33,2019	304,9052	8,5022	3,3803	8,6188
C7	<i>Ort</i>	2,5907	15,9209	7,3008	7,2345	15,3555	550,4259	1,3610	1,17E+07	12,8439	31,3497	266,9841	8,4333	1,8315	3,8330
	<i>Std</i>	0,0324	0,1522	0,5892	0,6562	1,4450	7,6938	0,0305	9,19E+05	0,0503	1,6194	24,1792	0,0532	0,8903	2,4135
	<i>En iyi</i>	2,5176	15,6095	6,0394	5,3518	14,6193	514,1951	1,2417	1,01E+07	12,7190	28,7615	198,4121	8,3519	0,0290	1,1628
	<i>En kötü</i>	2,6236	16,1174	7,9742	7,9970	20,6715	553,4932	1,3872	1,28E+07	12,8955	34,0922	304,8869	8,5018	3,3947	8,2303
C8	<i>Ort</i>	2,5973	15,8259	7,2492	7,3733	15,2402	577,7227	1,3664	1,18E+07	12,8240	30,9900	275,3640	8,4233	1,9403	3,7281
	<i>Std</i>	0,0412	0,5306	0,6654	0,6111	0,7989	146,4796	0,0226	9,10E+05	0,1344	1,4758	13,3159	0,0711	0,8464	2,4706
	<i>En iyi</i>	2,4076	13,3190	4,8980	5,3468	14,0735	514,5240	1,2963	1,02E+07	12,3405	28,5439	251,7248	8,2673	0,0276	1,1569
	<i>En kötü</i>	2,6233	16,1161	7,9937	7,9680	17,3395	1352,3020	1,3877	1,28E+07	12,8999	33,3731	296,9698	8,5017	3,6277	9,7045
C9	<i>Ort</i>	2,5907	15,9238	7,1275	7,2222	15,4863	549,8561	1,3718	1,21E+07	12,8355	30,7425	273,7712	8,3936	1,8580	2,6943
	<i>Std</i>	0,0397	0,1832	1,0437	0,6742	1,3288	7,3661	0,0159	8,19E+05	0,0947	1,4733	18,8937	0,0568	0,7481	1,5974
	<i>En iyi</i>	2,4492	15,3768	2,2704	5,8911	14,4867	519,8859	1,3181	1,03E+07	12,4495	28,1407	231,9013	8,2583	0,0448	1,1675
	<i>En kötü</i>	2,6236	16,1200	7,8399	7,9981	19,1155	553,5394	1,3866	1,28E+07	12,8977	33,5751	308,2509	8,5006	2,8909	5,7718
C10	<i>Ort</i>	2,5896	15,8535	7,0448	7,0796	15,1402	591,4097	1,3750	1,19E+07	12,8267	31,5494	273,2578	8,4016	1,9810	3,2256
	<i>Std</i>	0,0371	0,2242	0,7921	0,6919	0,8425	156,3896	0,0144	8,85E+05	0,0868	1,3433	20,9193	0,0595	0,8776	1,9997
	<i>En iyi</i>	2,5003	15,3484	5,1097	4,8766	14,3109	540,9990	1,3392	1,02E+07	12,5066	29,2098	223,0550	8,2349	0,0327	1,1531
	<i>En kötü</i>	2,6284	16,1237	7,9699	7,9198	18,8727	1259,9595	1,3897	1,28E+07	12,8953	33,6620	309,3080	8,5014	3,3343	7,1752

Tablo 7’ de S ölçütüne göre istatistiksel verilerde ortalama değeri göz önüne alındığında, F4,F6,F7 ve F14 fonksiyonlarında C6, F5,F10 ve F12’ de C7, F2 ve F9 fonksiyonlarında C5 ve F11 ve F13 fonksiyonlarında MOGoldSA başarılı sonuçlar ortaya koymuştur. Bunun yanı sıra C4 F1 fonksiyonunda ve C10 ise F8 fonksiyonunda başarılı sonuçlar üreten kaotik haritalı optimizasyon algoritması olmuştur.

Tablo 7: S ölçütüne göre istatistiksel sonuçlar (İ: istatistiksel, Ort: ortalama değer, M: MOGoldSA, C1-C10: Kaotik haritalı MOGoldSA)

F	İ	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14
M	Ort	0,7130	3,7271	1,3854	1,2068	2,6215	121,9921	0,0947	2,62E+06	1,8061	4,3212	3,2750	1,9543	0,1209	0,3769
	Std	0,1027	0,4096	0,3471	0,4399	0,4345	21,1555	0,0126	3,68E+05	0,5181	0,8779	0,8507	0,3496	0,2044	0,3205
	En iyi	0,4882	2,9373	0,8477	0,5627	1,7529	79,3183	0,0603	1,74E+06	1,0014	2,2676	1,8832	1,2822	0,0056	0,0711
	En kötü	0,8967	4,5093	2,2420	2,4437	3,3418	158,1088	0,1187	3,21E+06	2,9241	6,2651	5,8920	2,9506	0,8390	1,0652
C1	Ort	0,6301	3,4468	1,3995	1,2400	2,6509	116,9188	0,0565	2,54E+06	1,8093	4,2667	5,0644	1,6991	0,3255	0,4437
	Std	0,0816	0,6125	0,4094	0,4431	0,6379	46,7984	0,0112	4,52E+05	0,5350	0,8885	5,7264	0,4829	0,2790	0,3257
	En iyi	0,4833	2,2644	0,7136	0,3676	1,4194	71,0376	0,0400	1,87E+06	0,9749	2,7209	2,3205	0,7734	0,0103	0,0310
	En kötü	0,8011	4,5256	2,3986	1,9930	3,9124	342,9236	0,0842	3,55E+06	3,0254	6,7834	33,7607	2,3745	1,1225	0,9543
C2	Ort	0,5911	3,5598	1,3166	1,2853	2,5084	106,1104	0,0532	2,72E+06	1,8800	4,4123	3,6110	1,8176	0,4902	0,3611
	Std	0,0707	0,5839	0,4375	0,4490	0,5472	23,2164	0,0134	5,17E+05	0,4603	0,9566	1,4344	0,2620	0,3122	0,3609
	En iyi	0,4650	2,2434	0,5972	0,4656	1,6542	58,8141	0,0278	1,66E+06	1,0452	2,8516	1,9779	1,2962	0,0438	0,0301
	En kötü	0,7177	4,4367	2,5374	2,2695	3,6486	160,6832	0,0775	3,74E+06	2,7977	6,4823	8,0403	2,4167	1,0582	1,4744
C3	Ort	0,5715	3,5358	1,4073	1,2356	2,6502	108,4058	0,0506	2,59E+06	1,8073	4,2403	3,6145	1,6545	0,3643	0,4854
	Std	0,1006	0,5072	0,4906	0,4631	0,5333	26,7548	0,0135	4,06E+05	0,4980	0,8396	1,3394	0,3288	0,3275	0,3571
	En iyi	0,3321	2,4642	0,2994	0,0517	1,6336	56,5219	0,0225	1,79E+06	0,8836	2,6079	2,2933	1,1329	0,0025	0,0348
	En kötü	0,7584	4,2263	2,6254	2,1946	3,8290	158,8796	0,0818	3,70E+06	2,8588	6,5276	7,7766	2,2861	1,2739	1,6491
C4	Ort	0,5664	3,5546	1,3118	1,2857	2,5796	105,9742	0,0514	2,72E+06	1,7782	4,6459	3,8435	1,6906	0,2374	0,4311
	Std	0,0908	0,4276	0,5075	0,3880	0,5695	26,8306	0,0120	4,58E+05	0,5874	1,0590	1,3940	0,3777	0,2639	0,3188
	En iyi	0,4013	2,7758	0,3400	0,6281	1,4750	27,4673	0,0261	1,54E+06	0,7570	3,0348	1,8782	0,7317	0,0066	0,0406
	En kötü	0,7454	4,6894	2,2597	1,9837	3,7054	164,7560	0,0775	3,44E+06	3,1551	7,9077	6,5114	2,2257	0,9471	1,2843
C5	Ort	0,5976	3,2892	1,1612	1,2509	2,7040	115,5966	0,0578	2,71E+06	1,7179	4,2176	3,6857	1,7561	0,3920	0,4223
	Std	0,0871	0,5074	0,3640	0,4758	0,6980	55,5482	0,0146	5,14E+05	0,5219	0,8210	1,8452	0,4054	0,3544	0,3242
	En iyi	0,4374	1,8822	0,6046	0,4706	1,5163	59,8429	0,0314	1,74E+06	0,9305	2,7342	1,8865	0,4044	0,0062	0,0339
	En kötü	0,7803	4,3849	2,2641	2,0438	3,8524	380,1114	0,0850	3,53E+06	2,7060	5,6040	11,4118	2,3567	1,1596	1,0479
C6	Ort	0,6030	3,3114	1,4743	1,1555	2,6722	98,5729	0,0491	2,54E+06	1,7533	4,4947	3,8421	1,7930	0,3541	0,3075
	Std	0,0990	0,5455	0,4659	0,3754	0,6222	28,0088	0,0086	4,03E+05	0,4629	0,9487	1,8449	0,3103	0,3384	0,2906
	En iyi	0,3796	2,5501	0,4391	0,5020	1,7289	46,5014	0,0289	1,66E+06	1,0591	2,6272	2,2333	1,1662	0,0026	0,0421
	En kötü	0,8016	5,0049	2,6339	1,7605	3,9219	163,0092	0,0660	3,53E+06	2,8209	6,2561	11,4118	2,2805	1,2952	1,0143
C7	Ort	0,5738	3,4520	1,1762	1,3991	2,2313	102,7206	0,0569	2,58E+06	1,6933	4,0721	3,3128	1,6528	0,3360	0,3864
	Std	0,0901	0,4886	0,4497	0,5661	0,4670	22,8514	0,0122	4,74E+05	0,4317	0,8823	0,8558	0,3331	0,3545	0,3224
	En iyi	0,3913	2,3471	0,3561	0,4161	1,2817	34,4023	0,0367	1,63E+06	0,9986	1,9800	1,8569	0,8257	0,0064	0,0321
	En kötü	0,7873	4,5966	2,1864	2,7050	3,0217	144,9928	0,0849	3,69E+06	2,8159	6,2370	4,9263	2,2804	1,3247	1,1599
C8	Ort	0,6193	3,6377	1,2547	1,2354	2,6860	113,8887	0,0521	2,71E+06	1,8228	4,2372	4,0497	1,7198	0,3948	0,3301
	Std	0,0942	0,5418	0,3871	0,4798	0,6161	59,2605	0,0124	3,88E+05	0,5588	1,0122	1,6499	0,4183	0,3558	0,2992
	En iyi	0,3771	1,7626	0,6072	0,4695	1,0678	60,3659	0,0316	1,97E+06	0,5469	2,1881	2,0136	0,9124	0,0026	0,0269
	En kötü	0,8150	4,7015	2,1250	2,4979	3,6226	409,2969	0,0779	3,46E+06	3,0113	6,9248	9,1360	2,5884	1,0907	0,9428
C9	Ort	0,5952	3,5890	1,2355	1,2650	2,7025	110,2212	0,0560	2,65E+06	1,7655	4,3428	3,4605	1,6881	0,2733	0,3478
	Std	0,0990	0,4861	0,4865	0,4716	0,4224	19,8393	0,0132	3,62E+05	0,3358	0,9329	1,2831	0,3195	0,2564	0,3264
	En iyi	0,3930	2,2201	0,1912	0,5559	1,6833	68,5404	0,0240	1,93E+06	1,1178	2,7166	1,9136	0,8519	0,0074	0,0461
	En kötü	0,7742	4,2890	2,5498	2,1881	3,5736	147,2186	0,0802	3,48E+06	2,5629	6,3252	7,4553	2,2829	0,8099	1,1283
C10	Ort	0,6149	3,5178	1,2517	1,2319	2,6049	113,0601	0,0524	2,47E+06	1,9336	4,6251	3,9399	1,7240	0,3165	0,3454
	Std	0,1058	0,5964	0,4667	0,5381	0,5713	42,5186	0,0152	4,90E+05	0,4897	0,9232	2,9139	0,3183	0,2996	0,2827
	En iyi	0,3727	2,2609	0,3062	0,3648	1,3449	65,6300	0,0277	1,53E+06	0,7348	2,6110	1,5699	0,9884	0,0053	0,0359
	En kötü	0,8038	4,8998	2,1961	2,8677	3,7212	297,2367	0,0823	3,23E+06	2,9062	6,6507	16,6164	2,3321	1,3040	0,9333

Tablo 8’ de SP ölçütüne göre istatistiksel verilerde ortalama değeri göz önüne alındığında, MOGoldSA F1, F6, F7, F9 ve F11-F14 kıyaslama fonksiyonlarında en iyi sonucu üreten algoritma olmuştur. MOGoldSA’ yı F4 ve F10 fonksiyonlarında başarılı sonuçlar üreten C3 takip etmektedir. C4, C5 ve C6 kaotik haritalı optimizasyon algoritmaları ise sırasıyla F8, F2 ve F3 fonksiyonlarında başarılı sonuçlar üretmiştir.

Tablo 8: SP ölçütüne göre istatistiksel sonuçlar (İ: istatistiksel, Ort: ortalama değer, M: MOGoldSA, C1-C10: Kaotik haritalı MOGoldSA)

<i>F</i>	<i>I</i>	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14
M	<i>Ort</i>	0,8793	0,8870	1,2469	1,3256	0,9176	0,9380	0,7270	0,8146	0,9175	1,1735	0,7392	0,9355	0,8864	1,0225
	<i>Std</i>	0,0640	0,0190	0,1658	0,2013	0,1167	0,0439	0,0488	0,0486	0,0261	0,0468	0,0722	0,1044	0,1260	0,2028
	<i>En iyi</i>	0,7628	0,8402	0,8927	0,7715	0,7183	0,8505	0,6420	0,7322	0,8794	1,0623	0,5707	0,7396	0,6177	0,8036
	<i>En kötü</i>	1,0124	0,9243	1,5324	1,5851	1,1403	1,0225	0,8420	0,9246	0,9886	1,2750	0,8726	1,1161	1,0866	1,3920
C1	<i>Ort</i>	0,9488	0,8882	1,3063	1,2726	0,8835	1,0200	0,8993	0,8313	0,9210	1,1743	0,7795	1,0202	0,9059	1,0690
	<i>Std</i>	0,0583	0,0238	0,1768	0,2049	0,0909	0,0577	0,0945	0,0491	0,0247	0,0532	0,0732	0,1078	0,0610	0,1804
	<i>En iyi</i>	0,8329	0,8388	0,8309	0,8060	0,7221	0,9225	0,7316	0,7538	0,8749	1,0478	0,6467	0,8140	0,7888	0,8436
	<i>En kötü</i>	1,0770	0,9372	1,5839	1,6278	1,0937	1,1226	1,1348	0,9559	0,9726	1,2880	0,9361	1,2143	1,0498	1,4409
C2	<i>Ort</i>	0,9611	0,8929	1,3187	1,2699	0,9080	1,0104	0,9251	0,8152	0,9217	1,1760	0,7677	1,0162	0,9088	1,0632
	<i>Std</i>	0,0565	0,0283	0,1739	0,2472	0,0949	0,0641	0,0847	0,0503	0,0275	0,0480	0,0721	0,0847	0,0477	0,1554
	<i>En iyi</i>	0,8695	0,8335	0,8478	0,6326	0,7723	0,8890	0,7955	0,6911	0,8558	1,0502	0,6715	0,8880	0,8434	0,8260
	<i>En kötü</i>	1,0841	0,9501	1,5656	1,6520	1,0717	1,2096	1,1566	0,8988	0,9701	1,2763	0,9168	1,1725	1,0604	1,3411
C3	<i>Ort</i>	0,9881	0,8977	1,2835	1,2379	0,8987	1,0252	0,9413	0,8259	0,9268	1,1647	0,7785	1,0156	0,9235	1,1560
	<i>Std</i>	0,0789	0,0273	0,2082	0,1875	0,0907	0,0607	0,0830	0,0604	0,0202	0,0447	0,0687	0,0827	0,0660	0,1876
	<i>En iyi</i>	0,8185	0,8494	0,8452	0,9018	0,7413	0,9200	0,7786	0,7362	0,8912	1,0676	0,5807	0,8384	0,8201	0,8573
	<i>En kötü</i>	1,1254	0,9765	1,5818	1,6266	1,0921	1,1607	1,0853	0,9613	0,9703	1,2365	0,9221	1,1934	1,1351	1,4104
C4	<i>Ort</i>	0,9840	0,8891	1,3378	1,2364	0,9360	1,0105	0,9222	0,8031	0,9277	1,1758	0,7538	1,0299	0,9324	1,1022
	<i>Std</i>	0,0713	0,0278	0,1671	0,2020	0,0864	0,0624	0,0968	0,0703	0,0257	0,0477	0,0709	0,0888	0,0625	0,1698
	<i>En iyi</i>	0,8601	0,8487	0,9594	0,8050	0,7964	0,9010	0,7590	0,6571	0,8841	1,0758	0,5816	0,8191	0,8042	0,8662
	<i>En kötü</i>	1,1948	0,9653	1,5601	1,5915	1,1299	1,1539	1,1234	0,9585	0,9856	1,2469	0,8555	1,1661	1,0723	1,4048
C5	<i>Ort</i>	0,9716	0,8853	1,2788	1,2805	0,9155	1,0210	0,8794	0,8178	0,9282	1,1880	0,7865	1,0089	0,9162	1,0754
	<i>Std</i>	0,0703	0,0226	0,2487	0,2512	0,0994	0,0731	0,1116	0,0548	0,0265	0,0374	0,0806	0,1028	0,0487	0,1749
	<i>En iyi</i>	0,8353	0,8416	0,8252	0,6652	0,7413	0,8857	0,6672	0,7311	0,8744	1,1227	0,6374	0,7770	0,8331	0,8718
	<i>En kötü</i>	1,1128	0,9285	1,5890	1,6746	1,1581	1,2143	1,1103	0,9646	0,9837	1,2739	0,9414	1,1837	1,0026	1,3892
C6	<i>Ort</i>	0,9459	0,8907	1,2419	1,2513	0,9203	1,0121	0,9364	0,8157	0,9193	1,1859	0,7728	1,0197	0,9187	1,1358
	<i>Std</i>	0,0706	0,0274	0,2337	0,2117	0,1038	0,0476	0,1126	0,0495	0,0222	0,0416	0,0753	0,0756	0,0644	0,1799
	<i>En iyi</i>	0,7745	0,8325	0,7609	0,8450	0,7587	0,9229	0,6672	0,6928	0,8799	1,1015	0,6204	0,8807	0,8153	0,8787
	<i>En kötü</i>	1,0737	0,9534	1,5658	1,6052	1,1851	1,1169	1,1731	0,8808	0,9634	1,2570	0,9520	1,1696	1,0904	1,4116
C7	<i>Ort</i>	0,9850	0,9028	1,3567	1,2843	0,8838	1,0214	0,8963	0,8312	0,9206	1,1820	0,7914	1,0152	0,9215	1,0975
	<i>Std</i>	0,0662	0,0252	0,1804	0,2558	0,0933	0,0614	0,0798	0,0799	0,0262	0,0458	0,0863	0,0812	0,0626	0,1983
	<i>En iyi</i>	0,8555	0,8699	0,9144	0,6039	0,6264	0,9211	0,7806	0,6651	0,8764	1,1057	0,6740	0,7928	0,7854	0,8627
	<i>En kötü</i>	1,1445	0,9738	1,5911	1,6429	1,0715	1,1686	1,0450	0,9865	0,9932	1,2757	0,9767	1,1484	1,0457	1,4384
C8	<i>Ort</i>	0,9564	0,8908	1,2946	1,2804	0,8890	1,0113	0,9125	0,8080	0,9254	1,1760	0,7866	1,0099	0,9004	1,1656
	<i>Std</i>	0,0627	0,0325	0,1807	0,2256	0,1003	0,0810	0,0915	0,0638	0,0251	0,0615	0,0750	0,1010	0,0666	0,1795
	<i>En iyi</i>	0,7929	0,8537	0,9247	0,5886	0,6958	0,8954	0,7440	0,6951	0,8649	1,0586	0,6552	0,8361	0,8010	0,8582
	<i>En kötü</i>	1,0588	0,9822	1,5012	1,5997	1,1547	1,3793	1,1016	0,9358	0,9873	1,2993	0,9163	1,2135	1,1227	1,4428
C9	<i>Ort</i>	0,9628	0,8859	1,3441	1,2834	0,8998	1,0045	0,9081	0,8060	0,9274	1,1781	0,7721	1,0032	0,9049	1,0237
	<i>Std</i>	0,0709	0,0199	0,2085	0,2577	0,0956	0,0566	0,1000	0,0681	0,0322	0,0561	0,0825	0,0854	0,0684	0,1531
	<i>En iyi</i>	0,8028	0,8541	0,8961	0,6132	0,7131	0,8988	0,7362	0,6844	0,8753	1,0417	0,6031	0,8201	0,7368	0,8435
	<i>En kötü</i>	1,0746	0,9471	1,5932	1,6154	1,1361	1,1358	1,1556	0,9166	1,0109	1,2819	0,9425	1,1805	1,0166	1,4465
C10	<i>Ort</i>	0,9615	0,8914	1,2862	1,2837	0,9169	1,0322	0,8893	0,8128	0,9335	1,1824	0,8188	1,0119	0,9116	1,0799
	<i>Std</i>	0,0772	0,0312	0,2042	0,2228	0,1192	0,1072	0,0767	0,0621	0,0327	0,0371	0,0824	0,0811	0,0635	0,1716
	<i>En iyi</i>	0,8087	0,8151	0,7356	0,8445	0,7505	0,9240	0,7496	0,6983	0,8891	1,0962	0,6285	0,8841	0,7674	0,8464
	<i>En kötü</i>	1,0693	0,9490	1,5566	1,5358	1,2755	1,4355	1,0847	0,9752	0,9924	1,2448	0,9520	1,1847	1,0908	1,3578

5. Sonuçlar

Çok amaçlı altın sinüs algoritmasının (MOGoldSA) performansını iyileştirmek için kaotik haritalar kullanılmıştır. Kaotik haritalar MOGoldSA'nın geniş arama alanına ulaşmasına ve sömürü evresine yavaş yavaş geçmesine yardımcı olmaktadır. Bu performans verilerinden yola çıkılarak çok amaçlı optimizasyonda başlangıçta kullanılan rasgele sayı dizelerine yapılan küçük müdahaleler sonucunda, probleme uygun çözümler üretmede daha iyi sonuçlar alındığı görülmüştür. Çalışmada kullanılan kısıtlı, kısıtsız ve mühendislik problemlerine uygun çözümler üretmede kaotik haritalar genel olarak başarılı sonuçlar üretmiştir. GD ve RGD ölçütünde Chebyshev ve Singer, MS ve S ölçütünde Parçalı ve Sinüs, SP ölçütüne göre de Gauss/Mouse kaotik haritaları başarılı sonuçlar ortaya koymuştur. Bu başarılar sonucunda, kaotik haritalar ile birleştirilmiş MOGoldSA'nın iyileştirme yeteneğine sahip olduğu kanıtlanmıştır. Gelecek çalışmalarda gerçek yaşam problemleri üzerinde uygulanarak daha verimli kaotik temelli çok amaçlı optimizasyon algoritması oluşturma hedeflenmektedir.

Kaynaklar

- [1] Mirjalili S, Lewis A. The Whale Optimization Algorithm. *Adv Eng Softw*, 2016; 95: 51-67
- [2] Tanyıldızı E, Cigal T. Kaotik Haritalı Balina Optimizasyon Algoritmaları. *Fırat Üniversitesi Müh Bil Dergisi*, 2017; 29(1): 307 – 317.
- [3] Tanyıldızı E, Demir G. Nümerik Optimizasyon için Kaotik Altın Sinüs Algoritması. *Fırat Üniversitesi Müh Bil Dergisi*, 2019; 31(1): 91 – 97.
- [4] Danqing G, Junping W, Jun H. Renmin H and Maoqiang S. Chaotic-NSGA-II: An effective algorithm to solve multi-objective optimization problems. *ICISS 2010*; Guilin, China.
- [5] Ying S, Yuelin G, Xudong S. Chaotic Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm Incorporating Clone Immunity. *Mathematics*, 2019; 7(146):1-16.
- [6] Dunia S, Ramzy A. A Chaotic Crow Search Algorithm for High-Dimensional Optimization Problems. *Basrah Journal for Engineering Sciences* January 2018; 17(1):15-25
- [7] Wei G, Shoubin W. Chaos Ant Colony Optimization and Application. *Fourth International Conference on Internet Computing for Science and Engineering*, 2009; Harbin, China.
- [8] Zhang H, Zhou J, Zhang Y, Fang N, and Zhang R. Short term hydrothermal scheduling using multi-objective differential evolution with three chaotic sequences. *Int J Elec Power*, 2013; 47: 85–99.
- [9] Ayan K, and Kilic U. Solution of multi-objective optimal power flow with chaotic artificial bee colony algorithm. *Int Rev Electr Eng-I*; 2011; 6(3):1365–1371.
- [10] Pei Y, and Hao J, "Non-dominated sorting and crowding distance based multi-objective chaotic evolution", *ICSI 2017*; Japan, pp. 15-22,
- [11] Tanyıldızı E, Demir G. Golden Sine Algorithm: A Novel Math-Inspired Algorithm. *Adv Electr Comput En*, 2017; 17(2):71-78.
- [12] Eröz E. Yeni Çok Amaçlı Optimizasyon Algoritması: MOGoldSA, Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Yazılım Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, 2020
- [13] Mirjalili S, Gandomi AH. Chaotic gravitational constants for the gravitational search algorithm. *Appl Soft Comput*, 2017. 53: 407-419.
- [14] Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. New York: John Wiley&Sons, 2001.
- [15] Van Veldhuizen, DA and Lamont GB. Multiobjective evolutionary algorithm research: A history and analysis. Technical Report TR-98-03, Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate School of Engineering, Air Force Institute of Technology, WrightPatterson AFB, Ohio, 1998
- [16] Zitzler E. Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications, Ph.D Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Switzerland. 1999.
- [17] Miettinen K. Nonlinear multiobjective optimization, Kluwer Academic Publishers, Boston: SpringerScience& Bus Media. 1999.
- [18] Schott JR. Fault Tolerant Design Using Single and Multi-Criteria Genetic Algorithms. Master of Science Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1995.

Kentiçi Otopark Analizi: Elazığ İli Örneği

Ahmet ATALAY^{1*}, Yunus İÇEN²

¹ İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye

² İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye

*¹ ahatalay@atauni.edu.tr, ² yunusicen@gmail.com

(Geliş/Received: 14/11/2019;

Kabul/Accepted: 29/05/2020)

Öz: Gün geçtikçe artan nüfus, sosyo ekonomik gelişmişlik beraberinde otomobil sahipliğini artırmaktadır. Gelişmekte olan kentler artan otomobil sahipliği ile beraber trafik tıkanıklığı, gürültü, hava kirliliği, zaman kaybı ve otopark sorunları gibi kent içi ulaşım sorunları ile karşı karşıyadır. Bu çalışmanın amacı ülkemizin gelişmekte olan kentlerinden Elâzığ ili kentiçi ulaşım sorunlarından otopark sorunu ele alınmıştır.

Çalışma kapsamında Elâzığ ili için otopark ihtiyacı bugün ve gelecek 20 yıl için hesaplanmıştır. Elâzığ kent merkezinde hizmet veren yol dışı otoparklar standart ve yönetmeliklere göre uygunlukları incelenmiştir. Çalışma da ayrıca Gazi, Hürriyet ve Vali Fahri Bey Caddelerinde yol kenarı park etütleri yapılmıştır. Park etütleri belirtilen caddelerde eş zamanlı olarak iki haftalık zaman diliminde yapılmıştır.

Bu çalışma sonucunda Elâzığ’ın mevcut otopark ihtiyacının yapılan hesaplarla yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Doğu Katlı otoparkı, Hükümet konağı otoparklarının standart ve yönetmeliklere göre uygun olarak planlandığı belirlenmiştir. Etüdü yapılan diğer otoparklarda ise tasarım hataları gözlenmiştir. Yol kenarı park etütlerine göre Gazi Caddesi üzerinde araçların 30 derece ile park etmesi halinde caddenin park kapasitesinin %22, 45 derece ile park etmesi halinde %64 oranında artacağı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Otopark Analizi, Yol kenarı Park, Yol dışı Park, Otopark Şekilleri, Kentiçi Otopark Sorunu.

Urban Parking Analysis, A Case Study: Elazığ Province

Abstract: The population, which is increasing day by day, increases automobile ownership along with socio-economic development. Developing cities are faced with urban transportation problems such as traffic congestion, noise, air pollution, waste of time and parking problems with increasing car ownership. The aim of this study is to address the problem of parking in the city of Elazığ, one of the developing cities of Turkey.

Within the scope of the study, the need for parking for Elâzığ province is calculated for the present and next 20 years. The compliance of the off-road parking lots in Elazığ city center according to the standards and regulations were examined. In addition, roadside parking surveys were conducted in Gazi, Hürriyet and Governor Fahri Bey Streets. Parking surveys were carried out simultaneously in the specified streets for two weeks.

As a result of this study, it was found that the existing parking need of Elâzığ was insufficient with the calculations made. It has been determined that the parking lots of the East Storey and the Government mansion car parks are planned in accordance with the standards and regulations. Design errors were observed in the other car parks under investigation. According to the roadside studies, if the vehicles are parked at 30 degrees on Gazi Street, the parking capacity of the street will increase by 22% and 64% if it is parked at 45 degrees.

Key words: Parking Analysis, On-Road Parking, Off-Road Parking, Parking Lot Types, Urban Parking Problem.

1. Giriş

Son yıllarda şehirlerimizde köylerden kente göç ile beraber nüfus hızla artmaktadır. Bu göç hareketi genellikle ekonomik kalkınma ve çocukların eğitimi düşünülerek bireyler tarafından yapılmaktadır. Şehirlerde artan nüfus ile beraber bu çoğalma kentlerde ekonomik, sosyal ve çevresel kalkınmaları da hızlandırmaktadır. Dünya kamuoyunda bu durum “sürdürülebilir kalkınma” olarak tanımlanmış ve bunun sürekliliğinin sağlanmasına yönelik ciddi çalışmalar yapılmıştır. Sürdürülebilir kalkınmaya etki eden en önemli faktörlerden birisi “ulaşım” dır. Çünkü ulaşımın ekonomik, sosyal ve çevresel faktörlere etkisi oldukça fazladır [1-3].

Günümüzde ekonomik gelişme ile birlikte, taşıt sahipliğinin hızla artması sonucu birçok kentimizde park yeri sorunu yaşanmaktadır. Mevcut alt yapının yetersizliği de bu sorunu içinden çıkılmaz bir hale getirmektedir. Park sorununun çözülmesi için gerekli etütlerin yapılarak yerel yönetimlerce bir park politikasının belirlenmesi

* Sorumlu yazar: ahatalay@atauni.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-8476-8900, ² 0000-0002-0083-0739

zorunludur. Bunun yanında eğitim ve denetimin de bu politikanın içinde yer alması gereklidir [4]. Sürücülerin mevcut trafik akışına ek olarak park yeri aramaları için yaptıkları yer değiştirmeler ilave trafik yükü oluşturmaktadır. Zaman kaybı, yakıt tüketimi, sinir stres sürücü davranışı olumsuz etkiler. Bu sebeple otopark sorunları incelenirken trafik akışı da incelenmelidir [5].

Otopark sorunları hakkında literatürde yapılmış olan çalışmaları üç grupta toplanabilir. Birinci grup çalışmalar otopark ihtiyacı ve kapasite analizi yapılan çalışmalardır. Yol kenarı ve yol dışı park etütleri yapılarak çözüm önerileri belirlenmesi [4-9], kentler için otopark planlamasında etkili faktörlerin belirlenmesi, kentler için otopark planlamasının önemi [10-12], kentlerde trafik yoğunluğu, arz talep ve otopark yer seçimi ilişkisinin incelenmesi [13-15], çalışmalardır. Ayrıca otopark yönetimi [16-18], otopark tasarım ve projelendirilmesi [19-21], hastane otoparklarının tasarlanması [22], üniversite kampüs otoparkları için etütler [23, 24], yol kenarı park yapma alışkanlıklarının incelenmesi [25], açık ve kapalı otoparkların özelliklerinin incelenmesi [26] çalışmalarıdır.

İkinci grup çalışmalar akıllı otopark planlama ve işletme çalışmalarıdır. Klasik ve otomatik otoparkların karşılaştırılması[27], akıllı otopark sisteminin simülasyonu [28], otopark sorununa RFID (Radio Frequency Identification-Radyo frekanslı tanıma) teknolojisini uygulama [29], teknolojik, çevreci, daha az yer kaplamasına rağmen daha çok araç park kapasitesine sahip, sürücülere kolaylık ve güvenlik sağlayan tamamen otomatik bir otopark prototipi[30], otomatik otopark sistemlerinin avantajları [31], akıllı otoparklarda ödeme sisteminin NFC (Yakın Alan İletişimi) kartlarla yapılması[32], özellikle internet olmayan yerlerde IPS (Indoor Positioning System-İç mekân Konumlandırma Sistemi) teknolojisini kullanılması [33], otopark sorunun çözümünde otopark kılavuz bilgi sistemlerinin (OKBS) uygulamaları [34] çalışmalarıdır.

Üçüncü grup çalışmalar mevcut otoparkların işletme ve yönetimi bakımından memnuniyet tespiti için yapılan çalışmalardır. Kentlerde park-et devam-et sistemlerinin uygulamaları için kullanıcılara anket uygulaması [35], kent merkezinde otopark yönetim politikalarını belirlemek amacı ile hane halkı anketi uygulaması çalışmaları yapılmıştır [36-37]. Üniversite kampüslerinde otopark sorununa etki eden faktörleri belirlemek amacı ile anket uygulaması [38-40], otopark ve yeşil alan sorunlarını tespit etmek amacıyla anket uygulaması [41] çalışmalarıdır. Ayrıca kentiçi alternatif otopark hizmetlerinin sunumu, Sürücülerin park etme tercih ve tutumları belirlemek amacı ile anket uygulama çalışmaları [42, 43] yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı kentlerde otopark ihtiyacının belirlenmesi ve geliştirmekte olan kentlerde karşılaşılan otopark sorunlarını tespit etmek ve öneriler sunmaktır. Bu çalışmada nüfus ve araç sayısı dikkate alınarak Elâzığ ili için otopark ihtiyacı belirlenmesi yapılacaktır. Bu çalışmanın önceki çalışmalardan farkı, iki haftalık zaman dilimlerinde trafiğin zirve saatlerinde yol kenarı ve yol dışı park etütleri eş zamanlı olarak yapılmış çalışmanın verileri elde edilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak yapılan analizler sonucu yol kenarı ve yol dışı parkların doluluk oranları tespit edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada otopark ihtiyacı belirlenmesi için materyal olarak Elâzığ ili kent merkezindeki nüfus ve araç sayıları kullanılmıştır. Bu veriler Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) den elde edilen veriler kullanılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Elâzığ ili nüfus ve araç bilgileri [44]

Yıl	Elazığ Nüfusu	Erkek Nüfusu	Kadın Nüfusu	Nüfus Yoğunluğu	Nüfus Artış miktarı (%)	Otomobil Sayısı	Otomobil Artış miktarı (%)	Kamyonet Sayısı	Kamyonet Artış miktarı (%)
2009	550.667	273.212	277.455	59 /km ²	1,16	36.216	7,56	11.690	12,42
2010	552.646	272.500	280.146	59 /km ²	0,36	39.367	8,00	13.485	13,31
2011	558.556	277.151	281.405	60 /km ²	1,07	43.283	9,05	15.219	11,39
2012	562.703	279.599	283.104	60 /km ²	0,74	46.786	7,49	16.903	9,96
2013	568.239	282.049	286.190	61 /km ²	0,98	50.590	7,52	18.154	6,89
2014	568.753	281.583	287.170	61 /km ²	0,09	54.277	6,79	19.300	5,94
2015	574.304	285.511	288.793	62 /km ²	0,98	58.494	7,21	20.711	6,81
2016	578.789	287.991	290.798	62 /km ²	0,78	62.731	6,75	22.121	6,30
2017	583.671	290.692	292.979	63 /km ²	0,84	67.192	6,64	23.550	6,06
2018	595.638	296.641	298.997	64 /km ²	2,05	70.389	4,54	24.737	4,79

Bu çalışmada otopark etütleri materyal olarak Elâzığ ili kent merkezindeki otoparklardan elde edilen veriler kullanılmıştır. Çalışmanın veri tabanı 01.04.2019-14.04.2019 zaman diliminde sabah, öğle, akşam saatlerinde

Elâzığ kent merkezinde yol kenarı ve yol dışı park gözlemleri sonucu elde edilmiştir. Gözlemler sabah, öğle ve akşam saatleri 09.00-11.00, 13.00-15.00, 17.00-19.00 saatleri arasında 30 dakikalık aralıklarla yapılmıştır.

2.1. Otopark ihtiyacının belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında literatürde yapılan araştırmalar sonucunda ABD ve Almanya’da otopark hesaplamalarında kullanılan kabuller dışında özellikle ülkemize benzer ülkeler için yapılan kabullere rastlanılmadığı için var olan kabuller kullanılmıştır. ABD ve Almanya’da otopark hesaplamalarında kullanılan kabuller şu şekildedir [45].

I. ABD’de büyük şehirlerde pik saatlerde şehirdeki tüm araçların %12’sinin merkez bölgede park edeceği, küçük şehirlerde ise %18’inin merkezde park edeceği göz önüne alınır.

II. Almanya’ da ki gözlemlere göre

a) Kentteki her 5-8 araca karşı kent merkezinde 1 adet otopark yeri düşünülür.

b) Kent içi otopark ihtiyacı (P) için formül:

$$P = \frac{E}{k \cdot D} \quad (1)$$

P: Otopark ihtiyacı

E: Kentin toplam nüfusu.

D: Araç başına düşen nüfus.

k: Yöresel katsayı (3-5)

c) Şehir merkezinde her gün giren araçların %7-9’u için 1 otopark yeri hesaplanır.

Bu çalışmada otopark ihtiyacı araç sayısına göre ve nüfusa göre olmak üzere iki farklı şekilde belirlenmiştir.

a. Araç sayısına göre: ABD ve Almanya’da otopark hesaplamalarında kullanılan kabullere göre büyük şehirlerde %12 ve küçük şehirlerde %18 belirtilmiştir. Elâzığ ili için şehir merkezinde park edecek araçların oranı kabul oranlarına göre %15 olarak kabul edilmiştir. Şehir merkezindeki araç sayısının şehirdeki otomobil ve kamyonet araç sayılarının toplamının %15’i dikkate alınarak otopark ihtiyacı belirlenmiştir.

b. Nüfusa göre: Yukarıda açıklanan (1)’nolu eşitlik kullanılarak otopark ihtiyacı belirlenmiştir. Yöresel katsayı Elâzığ ili için 5 olarak kabul yapılmıştır.

2.2. Park etütleri

Park etütlerinin gayesi ne kadar süre ile park edildiği, işyeri sahiplerinin ve vatandaşların ne kadar yararlandığı, daha fazla kapasite ile nasıl hizmet verilebileceği gibi verileri elde etmek için yapılır. Genelde merkezi caddelerde, iş merkezlerinin yoğun olduğu yerlerde yapılır. Otopark etütleri yol dışı park etüdü ve yol kenarı park etüdü olacak şekilde ikiye ayrılır [5].

Kanun ve yönetmeliklerle ebatları, alanları, kullanım çeşidi ve fiyatı belirlenen özel otoparklara araçların park etmesine yol dışı park olarak adlandırılır. Bu parklar; açık otopark, kapalı otopark, katlı otopark, zemin altında veya üstünde olacak şekilde yapılabilirler.

Araçlarını otoparka bırakanlar bir miktar yol yürümek zorunda olduklarından yol dışı otoparkların yerlerinin belirlenmesinde dikkatli davranılması gerekmektedir. Yürüme mesafesinin maksimum 300 m olması idealdir [4]. Yol kenarı veya kaldırım kenarı da denilen yol kenarı park, araçların caddelerde kaldırım kenarlarına park etmesi olayıdır. Yol kenarı parklarının amacı mevcut trafik akışını sağlamakla beraber bireylerin banka, iş merkezleri, alışveriş gibi nedenlerle kısa süreli olarak araçlarını park etmelerine olanak sağlamaktır. Mümkün olabildiğince cadde kenarı parklanmaları bu kısa süreli müşterilerin kullanması gerekmektedir.

2.2. 1. Yol dışı park etütleri

Yol dışı park etüdü için, 12 saatlik uzun veya sabah 09:00-11:00 ve öğlen 14:00-16:00 saatleri arasında kısa süreli etütler yapılması uygundur. Etüt için önce, bir harita üzerinde yol dışı park yerleri tespit edilir. Bunların kapasiteleri öğrenilir. Daha sonra belirlenen park yerleri dolaşarak föyler doldurulur ve föylerdeki bilgilerle önceden belirlenen bilgiler karşılaştırılarak etüt tamamlanır.

Yol dışı park etüdü için kullanılacak sayım föyünde, park yeri, taşıt sayısı ve park süreleri yazılır. Yol kenarı park etüdüde olduğu gibi yol dışı park yerleri 15, 20, 30 dakikada bir dolaşarak föy doldurulur.

Sayım föyünde, ayrıca yol dışı park yerinin (m²) olarak alanı yazılarak, her park yerinin günün belirli zamanlarında % kaç dolulukla çalıştığı, araç sayısı ile park kapasitesi karşılaştırılarak, park düzenlemesinin uygun olarak yapıp yapılmadığı da araştırılabilir. Uygun bir şekilde düzenlenmiş bir yol dışı park yerinde, sirkülasyon yolları da dahil olmak üzere araç başına 30 m² alan alınması yeterlidir. Yol dışı park etüdü sonucunda, her küçük bölge için park kapasitesi ve ihtiyacı grafiklerle belirtilir [4].

Bu çalışma kapsamında yol dışı parkların uygun olup olmadıkları TS 10551'nolu standart ve 2018 yılında yayınlanan Otopark Yönetmeliğinde belirtilen esaslar dikkate alınarak belirlenmiştir [44,45]. Belirtilen standart ve yönetmeliğe göre yol dışı parkların ölçüleri aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- 1) Otopark giriş kapısı genişliği net 2,75 metreden az olamaz.
- 2) Otopark giriş kapısı yüksekliği net 2,00 metreden az olamaz.
- 3) Otopark iç yüksekliği giriş altı dâhil olmak üzere hiçbir yerde net 2,10 metreden az olamaz.
- 4) Umumi otoparklarda rampa eğimi %15'ten fazla olamaz. Umumi otoparklar haricinde, otopark ihtiyacını bünyesinde karşılayan binalarda otopark rampası eğimi %20'den fazla olamaz.
- 5) Otopark rampa genişliği 2,75 metreden az olamaz. Rampalar dönüş kısımlarında asgari 2,75 metre iç yarıçapında düzenlenir [45].
- 6) Rampa eğimi %10, en çok %12 olmalıdır.
- 7) Genişlik Düz Rampada 3,30 m, kurplu rampada iç iz 3,60 m, dış iz 3,10 m, spiral rampada iç kurp çapı 9,00 m, dış kurp çapı 16,50 m [46].

TS 1051 de rampa eğimi en çok %12 olmalıdır belirtilmesine rağmen 2018 yılında yayımlanan Otopark Yönetmeliğinde rampa eğimi umumi otoparklarda en fazla %15, umumi olmayan otoparklarda ise en fazla %20 olması gerektiği belirtilmiştir [46,47]. Bu çalışmada kapsamında incelenen otoparklarda rampa eğimin en fazla %15 olması standardına göre değerlendirilmiştir.

2.2. 2. Yol kenarı park etütleri

Yol kenarı park etüdü de hafta içi yani iş günlerinde yapılır. Etüt yapılacak saatler 07:00-19:00 saatleridir. Eğer 12 saat etüt yapılmıyorsa 6 saat yapılabilir bu durumda etüt yapılacak saatler 09.00-11.00, 13.00-15.00 ile 17.00-19.00 arasında yapılır. Etüt yapacak personel 15 veya 30 dakika arayla park eden araçlar sayılır ve araçların plakaları önceden hazırlanan etüt föylerine kaydedilir. Böylece sayım işlemi belirlenen tarihler arasında yapılır. Etüt için önce park süreleri incelenir. Görevlinin etüt yapacağı bölgenin özelliğine göre kaç dakikada bir gözlem turu yapacağı belirtilir (15 dk. veya 30 dk. gibi). Ancak verilen bu süre içinde, etüt yapacağı bölge içi yolları dolaşabilmelidir. Görevli sokağın bir ucundan bir ucuna giderek yol kenarı parkındaki araçların plaka numaralarını yazar. Bu arada, büyük bir mağazanın etrafında yol kenarı parkının çalışanlar veya müşteriler tarafından ne miktarda kullanıldığını anlamak istenilebilir. Genellikle yol kenarı parkları çalışanlar kullanıyor ise çalışanlar için yol dışı park yeri gereksinimi bulunuyor demektir. Föylerde değişik turlara ait sütunlarda aynı plaka numarasının tekrarlanması ile aracın ne kadar süre ile park ettiği anlaşılır.

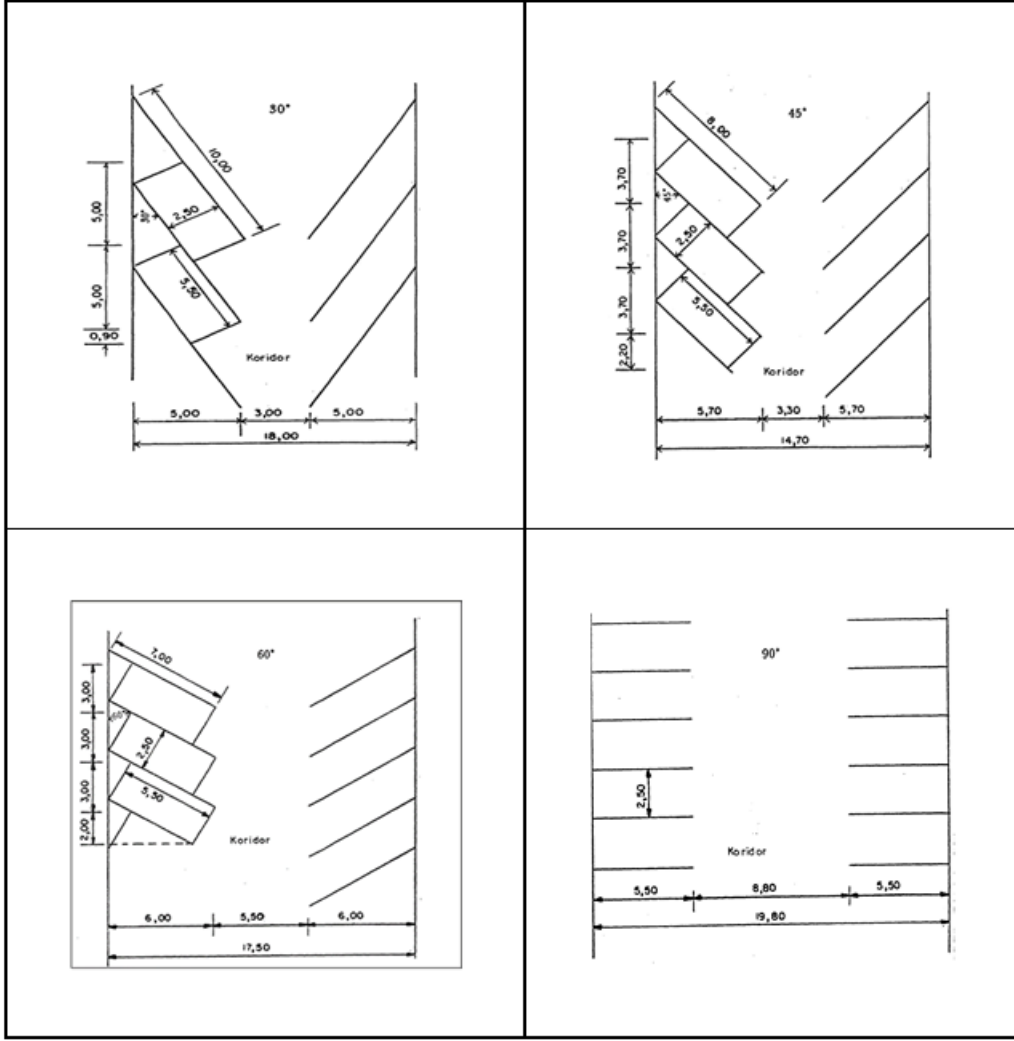
Etüde bu şekilde devam edilerek hazırlanan föylerdeki bilgiler bir toplama tablosunda özetlenir. Toplama tabloları etüdün amacına göre değişik şekillerde düzenlenebilir. Park süreleri olarak 15 dakikadan az veya 15-30 dakika gibi süreler alınabilir. Toplama tabloları bir sokak, küçük bir bölge veya bütün bir şehir için hazırlanabilir. Ayrıca grafik ve haritalarla da daha uygun bir şekilde sonuçlar verilebilir.

2.3. Park düzenleme şekilleri

Parkların düzenleme esasları Türk Standardı TS 10551'de hem yol dışı hem de yol kenarı parklar için belirtilmiştir.

2.3.1. Yol dışı Park Düzenleme Şekilleri

Yol dışı parkları 30⁰, 45⁰, 60 ve 90⁰ olarak düzenlenir her biri için ayrı manevra aralıkları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Yol dışı park düzenleme şekilleri [46,47]

2.3.1. Yol kenarı park düzenleme şekilleri

Yol kenarı park yerlerinde, eksene paralel 30°, 45°, 60° ve 90°'lik park şekilleri düzenlenebilir. Park açısı büyüdükçe, belirli bir yol uzunluğunda daha fazla araç park edilebileceği açıkça görülebilir. Ancak trafik şartları da yol daralmasından dolayı ağırlaşır, park alanlarına giriş ve çıkış hareketleri zorlaşır ve tehlikeli olur. Bu nedenle yol kenarı parklarda genellikle eksene paralel park şekli tercih edilmelidir. Bazı yerlerde park gereksinimi trafik akımından daha önemli olabilir. Bu gibi durumlarda açılı parklar kullanılmalıdır. Kent içi yerlerde park şekillerine göre park yeri belirlemesi TS 10551'deki esaslara göre Tablo 2'de belirtilmiştir.

Tablo 2. Yol kenarı park düzenleme şekilleri [44, 45]

Park Şekli	Standart Uzunluklar	L mesafede park sayısı	yeri L=100 m için park adedi
PARALEL		$N=L/6,7$	15 adet
30 DERECE		$N=(L-0,9)/5$	19,8
45 DERECE		$N=(L-2)/3,7$	26,5
60 DERECE		$N=(L-2)/3$	32,6
90 DERECE (Yola dik)		$N=(L)/2,6$	38,5

3. Bulgular ve Tartışma

Elâzığ ili özellikle son yıllarda gelişmekte olan iller arasındadır. Elâzığ ili yıllara göre nüfus ile ilgili bilgiler incelendiğinde son on yıl için ortalama nüfus artışı %0,875 olarak belirlenmiştir. Son on yılda otomobil ve kamyonet sayısı incelendiğinde ortalama artış yüzdesi sırasıyla %7,04 ve %8,61 olarak belirlenmiştir.

Elâzığ'da kent merkezi ve ilçe merkezleri nüfus dağılımları incelendiğinde Nüfusun %75 i Elâzığ şehir merkezinde olduğu belirlenmiştir. Otomobil ve kamyonet sayısına göre otopark ihtiyacı belirlenirken araç sayısının %15 i alınarak belirlenmiştir. Nüfus ve araç sayıları dikkate alınarak Elâzığ ili otopark ihtiyaçları Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 3. Otopark İhtiyacı [1]

Yıl	Nüfusa Göre	Araç Sayısına Göre
2009	9.581,2	7.185,9
2010	10.570,4	7.927,8
2011	11.700,4	8.775,3
2012	12.737,8	9.553,4
2013	13.748,8	10.311,6
2014	14.715,4	11.036,6
2015	15.841,0	11.880,8
2016	16.970,4	12.727,8
2017	18.148,4	13.611,3
2018	19.025,2	14.268,9

Elâzığ ili için ilerideki 20 yıl için otopark ihtiyacı belirlenirken yukarıda belirtilen ortalama nüfus artış oranı, ortalama otomobil ve kamyonet artış oranları dikkate alınarak belirlenmiştir. Nüfus, otomobil ve araç sayıları için başlangıç yılı değerleri 2018 yılı alınmıştır. 2018 -2038 yılları arasındaki otopark ihtiyacı Tablo 4'deki gibi elde edilmiştir.

Tablo 4. Elâzığ ili 2018-2038 yılları için otopark ihtiyacı [1]

Yıl	Nüfusa Göre	Araç Sayısına Göre
2018	19.025,2	14.268,9
2019	20.442,2	15.331,7
2020	21.965,7	16.474,3
2021	23.603,8	17.702,8
2022	25.365,0	19.023,7
2023	27.258,8	20.444,1
2024	29.295,2	21.971,4
2025	31.485,0	23.613,8
2026	33.840,1	25.380,0
2027	36.372,8	27.279,6
2028	39.096,8	29.322,6
2029	42.026,6	31.520,0
2030	45.178,0	33.883,5
2031	48.567,8	36.425,8
2032	52.214,2	39.160,7
2033	56.137,0	42.102,7
2034	60.357,1	45.267,8
2035	64.897,5	48.673,1
2036	69.782,5	52.336,9
2037	75.038,7	56.279,0
2038	80.694,5	60.520,9

Çalışmanın birinci aşamasında ABD ve Almanya'da yapılan kabullere göre otopark ihtiyacı belirlemek için matematiksel formül ve araç sayısının %15'ine göre Elâzığ ili için otopark ihtiyacı 2018-2038 yılları için ayrı ayrı belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucu Elâzığ ilinin otopark ihtiyacı nüfusa göre 19.025 adet, araç sayısına göre 14.268 adet olarak belirlenmiştir. 2038 yılı için nüfusa göre 80.694 adet ve araç sayısına göre 60.520 adet belirlenmiştir.

3. 1. Elâzığ ili yol dışı parklar

Kent içi park etüdü için yol dışı park etüdü yapılacak otoparklardan sadece merkezi trafiğin yoğun olduğu, iş merkezlerinin, özel hastaneler, bankalar, vergi daireleri, noterlerin en yoğun olarak bulunduğu yerlerde otopark sıkıntısının azami olarak hissedildiği alanlarda bulunan otoparklar seçilmiştir. Bu otoparklar; Polatlar kapalı otoparkı, Doğu katlı otoparkı, Hazar otoparkı, Hükümet Konağı kapalı otoparkı, İzzet Paşa kapalı otoparkı, İbrahim Ethem kapalı otoparkı, Enhas kapalı otoparkı, Müftülük Kapalı otoparklarıdır. Çalışma kapsamında

seçilen otoparklardan başka otoparklar mevcuttur. Diğer otoparklar şehir merkezinin ikinci derece yoğun olduğu bölgelerinde bulunduğundan çalışma kapsamına dâhil edilmemiştir.

Yol kenarı park etütü olarak da şehrin ana arterleri olan Gazi Caddesi, Vali Fahri Bey Caddesi ve Hürriyet Caddeleri seçilmiştir. Etüt çalışmaları 01.04.2019 ve 14.04.2019 sabah, öğle ve akşam olmak üzere 09.00-11.00, 13.00-15.00, 17.00-19.00 saatleri arasında 30 dakikalık aralıklarla yapılmıştır. Yol dışı parklar ve yol kenarı parklar için iki farklı sayım föyü hazırlanmıştır. Etütlerin sonuçlarına göre en yüksek doluluk oranı İbrahim Ethem ve Polatlar otoparklarında belirlenmiştir.

Tablo 5. Etüt yapılan otoparklar ile ilgili bilgiler [1]

Kapalı Otopark Adı	Kapasitesi	Abone Sayısı	Ortalama Doluluk Oranları %
Polatlar Otoparkı	50	30	61,96
Doğu Katlı Otoparkı	600	200	35,17
Hazar Otoparkı	250	120	50,17
Hükümet Konağı Otoparkı	500	100	24,29
İzzet Paşa Otoparkı	100	50	58,74
İbrahim Ethem Otoparkı	80	40	68,28
Enhas Otoparkı	200	100	53,29
Müftülük Otoparkı	100	40	44,07

Çalışmanın ikinci aşamasında yol dışı otoparklar kapasite doluluk oranları incelenmiştir. Elâzığ ilinde bulunan Polatlar, Doğu katlı, Hazar, Hükümet Konağı, İzzet Paşa, İbrahim Ethem, Enhas, Müftülük kapalı otoparkları 01.04.2019 – 14.04.2019 tarihlerinde ve 09.00- 11.00, 11.00- 13.00, 17.00- 19.00 saatlerinde yapılan gözlemler ile doluluk oranları tespit edilmiştir. Polatlar %61,96, Doğu katlı %35,17, Hazar %50,17, Hükümet Konağı %24,29, İzzet Paşa %58,74, İbrahim Ethem %68,29, Enhas %53,29, Müftülük %44,07 doluluk oranına sahip oldukları belirlenmiştir. Buna göre Polatlar ve İbrahim Ethem kapalı otoparkları en fazla doluluk oranına sahip olan kapalı otoparklardır. En düşük doluluk oranına sahip kapalı otoparklar ise Hükümet Konağı ve Doğu katlı otoparklarıdır.

Çalışmanın üçüncü aşamasında ülkemizdeki standartlar ve yönetmeliklere göre otoparkların incelenmesi yapılmıştır. Bu kapsamda TSE'nin TS 10551'nolu Türk Standardı ve 2018 yılında yayımlanan Otopark Yönetmeliği Esasları kullanılmıştır. Etüt çalışması yapılan otoparklardan Doğu katlı otoparkı, İbrahim Ethem ile Hükümet konağı otoparkının yönetmelik ve standartlara uygun olarak yapıldığı tespit edilmiştir. Polatlar kapalı otoparkında ise giriş çıkış rampa eğiminin %15'ten fazla olmasından dolayı standartlara uygun olmadığı tespit edilmiştir. Hazar kapalı otoparkının giriş çıkış rampa eğiminin %20'den fazla olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla standartlara uygun değildir. İzzet Paşa kapalı otoparkının giriş çıkış kapı genişliğinin standartlara uygun olduğu ancak rampa eğiminin yaklaşık %20'nin üzerinde olmasından dolayı standartlara uygun olmadığı tespit edilmiştir.

Enhas kapalı otoparkının giriş çıkış araç manevra mesafesinin dar olması sebebiyle standartlara uygun değildir. Müftülük kapalı otoparkının rampa eğimi %15'ten fazla olması ve rampa genişliğinin dar olması sebebiyle standartlara uygun olmadığı tespit edilmiştir. 2018 yılında yayımlanan otopark yönetmeliğinde belirtildiği üzere; otopark giriş kapısı genişliği net 2,75 metreden az, giriş kapısı yüksekliği 2,00 metreden, otopark iç yüksekliği giriş altı hiçbir yerde 2,10 metreden, otopark rampa genişliği 2,75 metreden az olamamalıdır. Umumi otoparklarda rampa eğimi %15'ten fazla olmamalıdır.

3. 1. Elâzığ ili yol kenarı parklar

Yol kenarı park etütleri 01.04.2019- 14.04.2019 tarihleri arasında yapılmıştır. Yapılan etütler sonucunda sabah, öğlen ve akşam olmak üzere yapılmış ve analiz süresince ortalama değerler belirlenmiştir. Yol kenarı park etütlerinde beş saatten fazla kullanım oranlarının yüksek olduğu tespit edilmiştir (Tablo 6).

Tablo 6. Elâzığ ili yol kenarı park etüt sonuçları [1]

Cadde Adı	Cadde genişliği	Ortalama doluluk	1 Saatten az	2 saatten fazla	3 saatten fazla	4 saatten fazla	5 saatten fazla
Gazi Caddesi	10 m	98,32	27,61	13,15	4,53	4,44	48,61
Vali Fahri Bey	10 m	97,42	26,92	7,91	6,48	3,85	52,53
Hürriyet Cad.	6 m+6 m çift yönlü	97,87	25,29	5,46	4,54	3,03	59,58

Çalışmanın dördüncü aşamasında yol kenarı park etütleri yapılmıştır. Gazi caddesi için, 1 saat ve daha az ortalama park oranı %27,61 iken 5 saat ve daha fazla park etme oranı %48,61'dir. Vali Fahri Bey Caddesi için, 1 saat ve daha az park etme oranı ortalama %26,92 iken bu oran 5 saat ve daha fazla park etme için %52,53'tür. Hürriyet Caddesi için, 1 saat ve daha az park edenler %25,29, 5 saat ve daha fazla park edenlerin sayısı %59,58'dir. Beş saat ve daha fazla süre ile park etme oranının yüksek olmasının nedeni cadde üzerinde bulunan işyeri sahiplerinin araçlarını park etmek için yol kenarını kullanmalarıdır. Yol kenarı parklar yolun kapasitesini düşürmektedir. Ayrıca ikinci sıra park yapıldığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı yolda kuyruklanmalar oluşmaktadır.

Gazi Caddesinde yol kenarı parka müsaade edilen uzunluk 435 metredir. Genişliği 7,5 m – 12 m olup tek yönlü akan trafikte açılı park etmek daha avantajlıdır. Gazi Caddesi yol kenarı mevcut paralel park yerine 30°'lik park edildiği takdirde %22, 45°'lik park edildiği takdirde %64'lük kapasite artışına ulaştığı hesapla bulunmuştur.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada literatürde var olan yöntemler, standartlar ve yönetmelikler kullanılarak Elâzığ il merkezi ölçeğinde vaka çalışması yapılmıştır. Çalışma bulgularından Elâzığ ilinde hem bugün hem de gelecek 20 yıl için yeni park yerine ihtiyaç olduğu tespit edilmiştir. Yapılan otopark ihtiyacı hesaplarına göre kentin mevcut otopark sayısı ve kapasitesi yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Bugün bile yetersiz kalan bu oranın, 20 yıl sonrası için yapılan hesaplamalarda daha yüksek seviyelere ulaşacağı tespit edilmiştir.

Elâzığ gibi gelişmekte olan kentlerimizde gelecekte yaşanacak problemleri önlemek amacıyla ulaşım politikaları geliştirilmelidir. Kentlerde arazi kullanım planları ve ulaşım planları hazırlanırken resmi kurum ve kuruluşların, iş ve alışveriş merkezlerinin nerelerde konumlandırılacağı gibi faktörler dikkate alınarak gelecekteki trafiğin tahmini doğru yapılmalıdır. Gelecekteki trafik belirlendikten sonra otopark planlaması yapılmalıdır. Otopark planlamaları yapılırken özel araç kullanımından ziyade bütünlük bir toplu taşıma sistemine uygun şekilde planlanmalıdır. Örneğin otoparklar “park et-devam et” istasyonları olarak planlanmalıdır.

Çalışma kapsamında incelenen otoparklar 09.00-17.00 arasında maksimum doluluk oranına sahip oldukları, 17.00-19.00 saatleri arasında ise minimum doluluk oranına sahip oldukları tespit edilmiştir. Bunun sebebi otopark abonelerinin ağırlıklı olarak merkezi iş alanlarında çalışan bireylerden oluşması dolayısıyla mesai saatleri bitiminde araçlarını otoparktan almalarıdır. Otoparkların şehir merkezinde ticari merkezler ve resmi kurumların yoğun olarak bulunduğu alanlarda oldukları için hareketlilik 09.00-17.00 arasında yoğun olmaktadır. Dolayısıyla 09.00-17.00 saatleri dışında otoparklar minimum kullanım oranına sahiptir. Polatlar ve İbrahim Ethem kapalı otoparklarının doluluk oranlarının diğer otoparklara kıyasla daha fazla olmasının sebebi, bu iki otoparkın iş merkezlerinin altında bulunması ve otoparkları kullanan sürücülerin araçlarını park ettikten sonra asansör ile ana caddeye ulaşabilmeleri olarak düşünülmektedir. Hükümet Konağı ve Doğu katlı otoparklarının doluluk oranlarının düşük olmasının sebebi bu iki otoparkın kullanan taşıt sürücülerinin ana caddeye belirli bir mesafe yürümek zorunda kaldıklarından tercih edilmedikleri düşünülmektedir. Ayrıca bu iki otoparkın yeni faaliyete geçtiklerinden dolayı vatandaşlar tarafından bilinmediği düşünülmektedir.

Doğu katlı otoparkı, İbrahim Ethem ile Hükümet konağı otoparkının yönetmelik ve standartlara uygun olarak yapıldığı tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen Polatlar, Hazar, İzzet Paşa ve Enhas otoparkları çalışma kapsamında dikkate alınan standart ve yönetmeliğe uymadıkları tespit edilmiştir.

Yol kenarı parklar için üç ana caddede yapılan etütler neticesinde, park etme doluluk oranları %100'e yakındır. Ancak caddelerin üçünde de paralel park yapılmaktadır. Paralel park sebebiyle park yeri sayısı oldukça düşüktür.

Yol kenarı ikinci sıra parklanmalar sonucu yolların kapasitesi düşmekte ve trafik tıkanıklığı oluşmaktadır. Bundan dolayı zaman, yakıt tüketimi ve karbon salınımı artmaktadır. Bunu önlemek için yol kenarı parkı yasaklamak veya caydırıcı tedbirler almak gerekmektedir. İkinci sıra park yapmaya izin verilmemeli, cadde mobesse kameralarından devamlı izlenilip kural dışı park eden sürücüler için caydırıcı parasal yaptırımlar uygulanmalıdır. Caydırıcı tedbirler için süre ile orantılı ücretlendirme yapılmalıdır. Yol kenarı park ücreti yüksek olduğu zaman kullanıcılar kapalı otoparkları kullanma ihtiyacı duyacaklardır.

Vali Fahri Bey ile Hürriyet Caddelerinin genişliklerinin yeterli olmaması sebebiyle açılı park yapılmasına uygun olmadıkları tespit edilmiştir. Kentin merkez caddeleri olan Hürriyet, Gazi ve Vali Fahri Bey Caddelerinde trafik akımının sürekliliğini sağlamak için trafik polisleri ve belediye zabıtalı tarafından denetimlerin arttırılması ve kurallara uymayan sürücüler için cezai yaptırımlar uygulanmalıdır.

Bu çalışmada gündüz saatlerinde kapalı otoparkların ve yol kenarı parkların doluluk oranları yüksek olduğu, akşam saatlerinde ise minimum seviyede olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeninin inceleme yapılan otoparkların bulunduğu bölge ticari alanlar, resmi kurum ve kuruluşların yoğun olduğu bölgeler olduğu için trafik

hareketliliğinin gündüz mesai saatleri içerisinde otopark talebini fazla olmaktadır. Bunun yanı sıra akşam saatlerinde talep azalmasından dolayı doluluk oranlarında azalma olmaktadır. Kapalı otoparklar ile yol kenarı park yerlerindeki doluluk oranları karşılaştırıldığı zaman yol kenarı parkların doluluk oranları daha yüksektir. Bunun nedeni yol kenarı parklar ücretsiz ve park yapma açısından daha pratik olmasından kaynaklanmaktadır.

İmar planları hazırlanırken ulaşım konusunda deneyimli teknik elemanlar tarafından daha kapsamlı etüt planlama çalışmaları yapılmalıdır. Kentin yöneticileri tarafından ulaşım ile ilgili kararlar alınırken vatandaşların düşüncelerinin dikkate alınması daha faydalı olacaktır. Bunun için anket çalışmaları yapıp sonuçlar değerlendirilerek karar verilmelidir. Elâzığ gibi gelişmekte olan illerin ilerleyen zamanlarda ulaşım problemlerinin daha karmaşık hal almaması için ulaşım planının yaptırılması gerekmektedir. Yapılacak ulaşım planlamasında şehrin arazi kullanımı, sosyo-ekonomik yapısı, kültürel ve tarihi yapısı göz önünde bulundurulmalıdır. Ulaşım planlaması yapıldıktan sonra kararlı bir şekilde planın uygulanması faydalı olacaktır.

Gelecekte yapılacak çalışmada Elâzığ ili şehir merkezinde bulunan bütün otoparklar çalışmaya dahil edilerek problem daha geniş bir çerçevede ele alınması faydalı olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışmada A.A., fikir sahibi, Y.İ., sahada ölçümleri gerçekleştirdi, çalışmanın veri tabanını oluşturdu, A.A., ve Y.İ., makaleyi yazdı ve sonuçları yorumladı, A.A., yayınlama aşamasındaki işlemleri gerçekleştirdi.

Kaynaklar

- [1] İçen, Y., Elazığ İli Kentiçi Otopark Sorununun İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye, 2019.
- [2] Evren G., İstanbul Ulaştırması Yönetimi sorunu ve Sürdürülebilir Ulaştırma Bağlamında Bir Değerlendirme, Ulusal Toplu Ulaşım Sempozyumu ve Sergisi, İstanbul, 2010.
- [3] Sevginer c., Bilge E, Demir Ö., Gezer U.Y., Sürdürülebilir Ulaşım İçin Çözüm Önerisi: Taksie Yönelik araç Platformu, 9. Ulaştırma Kongresi, İstanbul, 2011.
- [4] Haldenbilen, S., Murat, Y.Ş., Baykan, N., Meriç, N., Kentlerde Otopark sorunu: Denizli Örneği. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri dergisi, 1999, 5(2-3), 1099-1108.
- [5] Yarbaşı, S., Erzurum Kentiçi Ulaşım Sorunlarından Otoparklar Üzerine Bir Araştırma. Y. Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye, 2002.
- [6] Baerwald, J.E., Transportation And Traffic Engineering Handbook, Institute of Transportation Engineers, New Jersey, ISBN: 0-13-930578-5, 655 p, 1965.
- [7] Manville, M., ve Shoup, D., Parking, People, and Cities, Journal Of Urban Planning And Development, 131-42: 233-245, 2005.
- [8] Güngör, E.K., Konya Şehir Merkezindeki Otopark Sorunu Ve Öneriler. Y. Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye, 2006.
- [9] Kan, H., İstanbul ili, tarihi yarımada ve yakın çevresinin mevcut otopark envanteri ve Araç park etme sorununa ait çözüm Stratejileri. Y. Lisans Tezi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2017.
- [10] Edwards, J., "The Main Street Parking Initiative", Institute of Transportation Engineers, ITE Journal, Nov 2006, 76-11: 30, 2006.
- [11] Moore, B., Downtown Parking in Small Communities, The Review Magazine, 81-1: 17-19, 2008.
- [12] İskender, E., Otopark Etüt Metodolojisi İçin Gerçek Zamanlı Saha Araştırma Sisteminin Tasarımı Ve Uygulama Örnekleri. Y. Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [13] O'flaherty, C.A., Design of off-street parking facilities, Transport Planning and Traffic Engineering, USA, Elsevier, 1996, 409-434.
- [14] Çiçek, C., Otoparklarda Kullanılan Yeni Teknolojilerin Türkiye'de Uygulanabilirliğinin Araştırılması. Y. Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye, 2015.
- [15] Uyur, E., Otopark Sorununun Arz Ve Talep Temelinde İncelenmesine Yönelik Bir Araştırma: Kadıköy Merkez Örneği. Y. Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [16] Council, F.B., "Transportation Demand Management; A Small and Mid-Size Communities Toolkit", 2009, http://www.fraserbasin.bc.ca/_Library/CCAQ/toolkit_tdm_2009.pdf, 14 Aralık 2014.
- [17] Şahin, A., Otopark Geliştirme Analizi: İstanbul Merter Yer Altı Otoparkı Örneği. Y. Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [18] Özen, M., Küçük Kentlerde Otopark Planlaması Ve Yönetimi. Y. Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 1965.

- [19] Gülhan, G.ve Ceylan,H., Otopark Sorununa Otopark Yönetimi temelinde Yaklaşımlar:İzmir Örneği.Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik fakültesi Mühendislik bilimleri Dergisi,12(1),63-73, 2010.
- [20] Taş, C., Kent içi otoparkların planlama ve yönetimUygulamalarının incelenmesi.Y.Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul,Türkiye, 2012.
- [21] Hajimohammadipour, O., An investigation of Surface parking lots and developing design strategies.M.sc. thesis, graduate school of science engineering and technology, İstanbul,Turkey. 2015.
- [22] Karaağaç, İ., Hastane Projelerinin Otopark Planlamasında Dikkate Alınacak Hususların İncelenmesi.Y.Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü,Eskişehir,Türkiye. 2017.
- [23] Balsas C.J.L, Sustainable transportation planning on college campuses”, Transport Policy, 10 (2003): 35–49, 2002.
- [24] Kılıç, D., Atatürk üniversitesi doğu Kampüsü otopark sorununun Değerlendirilmesi.Y.Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü,Erzurum,Türkiye. 2019.
- [25] Tozluoğlu, Ç., Park yapma alışkanlıklarının analiz edilmesi ve uygulamaBölgesi için otopark politikaları önerisi.Y.Lisans Tezi,BilişimEnstitüsü,İstanbul,Türkiye. 2017.
- [26] Salman, A.I., Analysing of parking sysytems for on-street and off-street: case study for İstanbul. M. Sc. Thesis, Graduate School Of Science Engineering and Technology, Istanbul,Turkey. 2017.
- [27] Abboud, N.W., Automation of Parking Industry : A Strategic andManagerial Overwiev, M. Sc. Thesis, Mussachussetts Institute of Technology, ABD, 17-19, 36, 43, 44, 47, 48. 1994.
- [28] Altun, F., Akıllı Otopark Sisteminin Tasarım ve simülasyonu.Y.Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü,Kayseri,Türkiye. 2001.
- [29] Pala, Z., Rfid teknolojisi İle otomasyon Bir uygulama olarak: otopark takibi.Y.Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul,Türkiye. 2007.
- [30] Erdoğan, E., Dairesel yapıda bir otomatik otopark sistemininPrototip tasarımı ve uygulaması.Y.Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü,Ankara,Türkiye. 2015.
- [31] Karasay, T., Mekanik Otopark Tesislerinin Yer Seçimi Ve Boyutlandırılması İçin Genetik Algoritma Tabanlı Bir Yaklaşım.Y.Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul,Türkiye. 2016.
- [32] Güngör, A., Akıllı Şehir Otopark Sistemlerinde Nfc Kartların Ödeme Aracı Olarak Kullanılması Ve Güvenlik Alt Yapısı; İspark Ve İstanbul Kart Örneği.Y.Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul,Türkiye. 2017.
- [33] Yıldırım, G., Mobil uygulamalarda arayüz tasarımıkapalı otoparklar için IPS kullanılan mobil uygulama.Y.Lisans Tezi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü,İstanbul,Türkiye. 2017.
- [34] Sayın, M., Otopark Kılavuz Bilgi Sistemi Uygulamaları: Ankara İçin Örnek Bir Uygulama Çalışması.Y.Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü,Ankara,Türkiye. 2019.
- [35] Özdemir, V.İ., Park et ve devam et tesisler ve Harem otoparkı örneği.Y.Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul,Türkiye. 2006.
- [36] Barhani, E., Parking management strategies for sustainableTransportation:A case study for İstanbul.Master of Science, graduate school of science engineering and technology,İstanbul,Turkey. 2007.
- [37] Okubay, M., BölgeselOtopark yönetimi ve stratejileri:Tarihi yarımada - eminönü bölgesi örneği.Y.Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul,Türkiye. 2008.
- [38] Selim, C., Otopark alanlarının planlama ve Tasarım ilkeler.: Ege üniversitesiYerleşkesi örneği.Y.Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü,İzmir,Türkiye. 2011.
- [39] Akyüz, M.H., Kent içi üniversite kampüslerindeOtopark planlaması ve yönetimi:Yıldız teknik üniversitesi merkez kampüsü örneği.Y.Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul,Türkiye. 2016.
- [40] Yıldırım, H., Otopark alanlarının tasarımı ve kullanıcı Taleplerinin Süleyman Demirel üniversitesi yerleşkesi Örneğinde irdelenmesi.Y.Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü,İsparta,Türkiye. 2019.
- [41] Sabitoğlu, B., Alternatif bir yeşil alan modeli olarak otopark üstü park ve bahçeler İstanbul Esenler nenehatun parkı örneği.Y.Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul,Türkiye. 2011.
- [42] Kozalı, B., Kamusal Bir Mal Olarak Kentiçi Otopark Alanları.Y.Lisans Tezi,Sosyal Bilimleri Enstitüsü,İstanbul,Türkiye. 2014.
- [43] Uzun, M., Kamu Ve Özel Otopark İşletmelerinde Hizmet Kalitesinin Ölçümü Ve Mukayesesi.Y.Lisans Tezi,Dış Ticaret Enstitüsü,İstanbul,Türkiye. 2017.
- [44] TUİK, www.tuik.gov.tr, 2019
- [45] Özdirim, M., Trafik Mühendisliği KGM, Ankara, Türkiye, 1994.
- [46] Anonim, Türk Standartları Enstitüsü TS 10551, 1992.
- [47] Anonim, Otopark yönetmeliği 30340, 2018.

Kimyasal Banyo Depolama Yöntemi ile Üretilen PbS İnce Filmleri Üzerine Tavlamanın Etkileri

Ayça Kıyak Yıldırım*

¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Motorlu Taşıtlar ve Ulaştırma Teknolojisi Bölümü, Bilecik, TÜRKİYE

*¹ ayca.kiyak@bilecik.edu.tr

(Geliş/Received: 23/05/2019;

Kabul/Accepted: 10/05/2020)

Öz: Bu çalışmada hem sodyum sülfid kullanılarak hem de sodyum sülfid kullanılmadan kimyasal banyo depolama metodu ile PbS ince filmleri üretilmiştir. Üretilen filmler 400 °C’de tavlansmıştır. Tavlama PbS ince filmlerin karakterizasyonu taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. XRD verilerinden, tavladıktan sonra pik şiddetlerinin arttığı gözlenmiştir. Tavlama ile filmlerin yüzey yapılarının tamamen değiştiği ve deliklerin kaybolduğu gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Tavlama, PbS, kimyasal banyo depolama yöntemi, ince film.

The Effects of Annealing on PbS Thin Films Produced by Chemical Bath Deposition Method

Abstract: In this study, two films were produced by both using sodium sulphide and without sodium sulphide. The produced films were annealed at 400 °C. From the XRD data, it was observed that the intensity of the peaks increased after the annealing. The surface structures of the films were examined with a SEM instrument. With annealing it was understood that the surface structures of the films were completely changed and the holes were disappeared.

Key words: Annealing, PbS, chemical bath deposition, thin film.

1. Giriş

PbS, 300 K’de 0,41 eV’lik dar bant aralığı ve 18 nm’lik yeterli büyüklükte bir Bohr yarıçapına sahip olan en önemli IV-VI yarı iletkenlerden biridir. Böylece, kristalit büyüklüğünü kontrol ederek bant aralığı değerini düzenleyen güçlü kuantum ve elektron hapsi sağlar [1]. Absorpsiyon katsayısı 105cm⁻¹’den büyüktür ve katkılama ile hem p tipi hem de n tipi olarak üretilebilir.

PbS uygun maliyetli fotovoltaikler için, sürdürülebilir bir materyal olarak da önerilmiştir [2]. Bu materyal, kızılötesi detektör uygulamaları için çok önemlidir. PbS ayrıca iyonik sensör, güneş emilimi, güneş kontrol kaplamaları ve diyot lazerleri gibi çeşitli uygulamalarda da kullanılmaktadır [3].

Değişen büyüklükteki PbS nanoparçacıklı ince filmlerin kontrolü üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Hem fiziksel hem de kimyasal biriktirme yöntemleri kullanılmıştır. Vakumla buharlaşma [4], sıcak duvar epitaksi [5], moleküler ışın epitaksi [5] ve darbeli lazer birikimi [6], PbS sentezi için en başarılı fiziksel yöntemler arasındadır. En yaygın olarak kullanılan kimyasal biriktirme yöntemleri arasında spreyl piroliz [7,8], kimyasal banyo depolama yöntemi (CBD) [9-17], ardışık iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) [18], elektrokimyasal depozisyon [19-21] ve hidrotermal yöntem sayılabilir [22].

Daha önceki yıllarda yapılan bir çalışmada, Pb(NO₃)₂, NaOH, SC(NH₂)₂ ve H₂O kullanılarak sabit oda sıcaklığında farklı konsantrasyon ve daldırma sürelerinde PbS ince filmlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Büyütme parametrelerinin değişiminin ve ısı işlemin PbS ince filmlerinin yapısını, morfolojisini ve optik özelliklerini etkilediği gözlenmiştir [23]. Yapılan başka bir çalışmada, PbS ince filmler 50 °C ve 80 °C kimyasal banyo depolama sıcaklığında cam alt taban üzerine büyütülmüştür. XRD, SEM ve EDAX gibi çeşitli teknikler kullanılarak PbS ince filmlerin karakterizasyonu yapılmıştır. SEM analizi üretilen ince filmlerin yüzeyinin pürüzsüz olduğunu ve cam yüzeyini tamamen kapladığını göstermiştir. Ayrıca EDAX sonuçları ince filmlerin Pb açısından zengin olduğunu göstermiştir [24]. Önceki çalışmaların bir diğerinde, PbS ince filmler 35 °C kimyasal banyo depolama sıcaklığında ve farklı daldırma sürelerinde büyütülmüştür. Üretilen filmlerin yüzey analizleri incelendiğinde daldırma süreleri arttıkça tanecik büyüklüğünün ve yüzey homojenliğinin arttığı belirlenmiştir

* Ayça Kıyak Yıldırım: ayca.kiyak@bilecik.edu.tr ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-8339-947X

[25]. Kimyasal banyo depolama yöntemi pratik olarak basittir, geniş alana uygundur ve hatta plastik alt tabakaları oda sıcaklığında kaplayabilir [2].

PbS'nin kimyasal çöktürme reaksiyonları aşağıda verilmiştir [26]:



2016 yılında Ramírez-Ceja ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada da, PbS ince filmler üzerine tavlamanın etkileri araştırılmıştır. Fakat bahsedilen bu çalışmada 200 °C ve 300 °C de filmler tavlansmıştır [27]. Bu çalışmada ise, PbS ince filmler üzerine 400°C'de tavlamanın etkileri ilk defa araştırıldı. Filmlerin XRD sonuçları tavlama ile kristallenmenin arttığını gösterdi. Ek olarak, literatürde kimyasal banyo depozisyon yöntemi ile sodyum sülfid (Na_2SO_3) bileşiği kullanılarak PbS üretimi ile ilgili çalışmalar incelendi [28]. Na_2SO_3 kullanıldığında daha kompakt ve iyi kristallenmiş filmler elde edildiği gözlemlendi için, yapılan bu çalışmada Na_2SO_3 bileşiği tercih edildi. Ayrıca, üretilen filmlerin SEM görüntülerinden filmlerin yüzey yapılarının tamamen değiştiği ve deliklerin kaybolduğu gözlemlendi.

2. Materyal ve Yöntem

PbS ince filmler kimyasal olarak temizlenmiş alt taban üzerine depolandı. Hazırlık aşamasında, alt taban olarak seçilen cam yüzeyler nitrik asit ve izopropil alkol kullanılarak temizlendi. Bu işlemten sonra cam yüzeyler damıtılmış su ile yıkandı. PbS ince filmlerinin üretilmesi için kimyasal banyo çözeltisi 100mL deiyonize su kullanılarak hazırlandı. İlk olarak 0,0089 M kurşun nitrat ($Pb(NO_3)_2$) ve 0,15 M sodyum hidroksit (NaOH) bileşikler birbirine karıştırıldı. Kimyasal banyo çözeltisinin önce süt beyazı renge döndüğü gözlemlendi. Daha sonra NaOH'ın tamamen çözünmesiyle banyo çözeltisinin berraklaştığı görüldü. Berrak olan bu çözeltiye 0,051 M tiyüüre ($CS(NH_2)_2$) bileşiği karıştırıldı. Bu karışım kullanılarak üretilen film Set1 olarak isimlendirildi. Bir diğer deneyde ise, Set1 için hazırlanan çözeltiye 0,00023 M sodyum sülfid (Na_2SO_3) bileşiği eklendi. Yeni karışım kullanılarak üretilen filme ise Set2 adı verildi.

Tüm üretimler, 25°C'de gerçekleştirildi. Na_2SO_3 kullanılmadan yapılan film üretimi 35 dakika ve kullanılarak yapılan film üretimi ise 90 dakika sürdü. Çünkü Na_2SO_3 inhibitördür ve kimyasal banyo çözeltisinde gerçekleşecek olan reaksiyonun yavaşlamasına neden olmaktadır. Kimyasal banyo depolama işlemi sırasında banyo duvarına bakan alt tabaka yüzeyi incelemek için kullanıldı ve damıtılmış suyla iyice yıkanarak hava ortamında kurutuldu. Ancak diğer yüzey, %10 seyreltik hidroklorik asit ile temizlendi.

Üretilen PbS ince filmlerin yapısal özelliklerini analiz etmek için PANalytical Empyrean XRD (X-ışını kırınım ölçeri) kullanıldı. PbS ince filmlerinin kalınlıkları, gravimetrik yöntem kullanılarak hesaplandı. PbS ince filmlerin yüzey morfolojisini analiz etmek için ise, Zeiss SUPRA 40VP SEM (taramalı elektron mikroskopu) kullanıldı. Elde edilen filmlerin XRD ve SEM sonuçları incelendi. Daha sonra aynı filmler 400°C'de bir kül fırınında atmosfer altında tavlandı ve ardından tekrar XRD ve SEM sonuçlarına bakıldı.

3. Sonuçlar

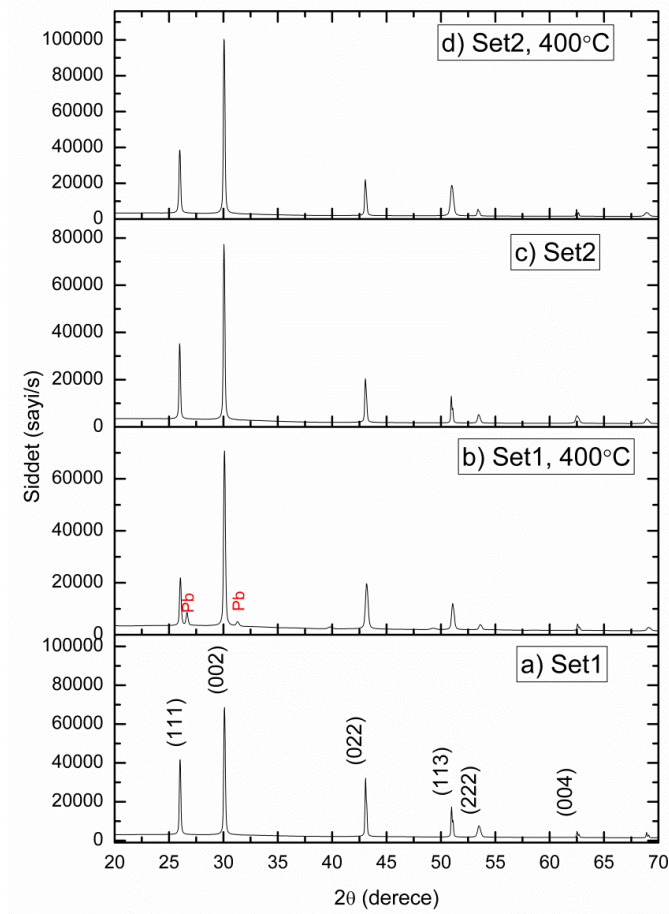
3.1 Elde edilen PbS ince filmlerinin yapısal özellikleri

XRD tekniği ile üretilen PbS ince filmlerin kristal yapısı, tane büyüklüğü, tercihli yönelimi, deformasyonu (strain) ve birim yüzeye etki eden kuvvet gerilimi (stres) gibi özellikleri belirlendi.

Şekil 1'de üretilen PbS ince filmlerin XRD analizleri verildi. Üretilen filmlerde 25,9° ; 30°; 43°; 50,9°; 53,4°; 62,5° ve 68,9°'de gözüken pikler sırasıyla PbS'nin (111), (002), (022) (113), (222) (004) ve (133)

düzlemlerine aittir. Bu pikler incelenerek (98-060-0243) numaralı ASTM kartı ile uyumlu oldukları tespit edildi. XRD analizlerinde, bütün filmlerin kübik yapıda oldukları bulundu.

Üretilen PbS ince filmleri için film kalınlıkları gravimetrik yöntemle hesaplandı. Tavlama işleminden önceki film kalınlığı ile tavlama işleminden sonraki film kalınlıklarının çok az değiştiği görüldü ve bu değişim ihmal edildi. Bütün filmlerin yaklaşık 650 nm kalınlığında oldukları belirlenerek Tablo 1’de verildi. Elde edilen filmlerin XRD desenleri incelendiğinde, tavlama işleminden sonra XRD pik şiddetlerinin arttığı görüldü. Filmler tavlandığında tanecikler arası boşluklar neredeyse kapanacağı için bu durumun tavlama sonrası film kalınlıklarında azalmaya neden olduğu, fakat XRD de daha yüksek pik şiddeti görülmesine sebep olduğu düşünülmektedir. Ancak bu çalışmada, film kalınlıkları yaklaşık olarak aynı kabul edildiği için, XRD pik şiddetlerin artmasının filmlerdeki kristallenmenin artmasıyla sonuçlandığı düşünülmektedir.



Şekil 1. Üretilen PbS ince filmlerin XRD analizleri

Üretilen PbS ince filmlerin tercihli yönelimini belirlenmesi için yapılanma katsayısı TC (Texturecoefficient) kullanıldı. Eğer yapılanma katsayısı değeri 1’den büyük bir den fazla yansıma düzlemi mevcut ise, tek bir tercihli yönelimden bahsedilemez [29]. Üretilen PbS ince filmlerin yapılanma katsayısı değeri, herhangi bir (hkl) yansıma düzlemi için Denklem 7 kullanılarak

$$TC = \frac{I_{(hkl)}/I_{0(hkl)}}{\frac{1}{N} \sum_N \left(\frac{I_{(hkl)}}{I_{0(hkl)}} \right)} \quad (7)$$

hesaplandı. Hesaplanan değerler Tablo 1’de verildi. Burada $I_{(hkl)}$; (hkl) düzlemlerinin ölçülen göreceli yoğunluğu, $I_{0(hkl)}$; ASTM kartında verilen (hkl) düzlemlerinin standart yoğunluğudur. Tablo 1 incelendiğinde tavlama

işleminde sonra yapılanma katsayısı değeri 1’den büyük tek bir yansıma düzleminin mevcut olduğu görüldü. Bu düzlem, 30°’de gözükten PbS pikine karşılık gelen (002) düzlemidir.

Tablo 1. Elde edilen PbS ince filmlerin XRD şiddetleri, hesaplanan yapılanma katsayısı değerleri ve gravimetrik analiz kullanarak hesaplanan film kalınlıkları

Deney	2θ	Şiddet (Sayı/Saniye)	I/I ₀	TC	(hkl)	Film Kalınlığı
Set1	25,993	41291,2	56,71	1,54	(111)	645
	30,078	66868,49	100	2,71	(002)	
	43,065	32087,6	53,41	1,45	(022)	
	50,978	17347,38	28,46	0,78	(113)	
	53,467	7584,869	8,6	0,23	(222)	
	62,523	4817,229	5,97	0,16	(004)	
	68,91	4234,824	5,27	0,14	(133)	
Set1-400	26,022	18653,51	26,27	0,71	(111)	634
	30,077	69016,71	100	2,71	(002)	
	43,144	16521,76	25,48	0,69	(022)	
	51,058	8023,417	16,08	0,44	(113)	
	53,589	2855,856	3,14	0,09	(222)	
	62,567	4130,623	4,49	0,12	(004)	
	69,067	2556,682	2,11	0,06	(133)	
Set2	25,961	34175,9	41,08	1,11	(111)	650
	30,040	73546,52	100	2,71	(002)	
	43,049	19548,21	28,01	0,76	(022)	
	50,954	13051,41	18,79	0,51	(113)	
	53,448	5214,493	5,11	0,14	(222)	
	62,490	4731,507	4,5	0,12	(004)	
	68,900	3439,045	2,92	0,08	(133)	
Set2-400	25,965	38498,3	32,77	0,89	(111)	641
	30,047	99564,87	100	2,71	(002)	
	43,042	20397,5	22,37	0,61	(022)	
	50,974	18668,71	16,56	0,45	(113)	
	53,406	5500,098	4,3	0,12	(222)	
	62,476	4004,106	4,93	0,13	(004)	
	68,871	3660,829	2,13	0,06	(133)	

Elde edilen ince filmlerin tane büyüklüğü Denklem 8’de verilen Scherrer formülü ile hesaplandı ve Tablo 2’de verildi.

$$D = \frac{0,9\lambda}{B(\text{radyan})\cos(\theta_B)} \quad (8)$$

burada D tane büyüklüğü, λ kırınımında kullanılan X-ışınının dalga boyu, B dikkate alınan pikin yarı maksimumundaki genişliği, θ_B dikkate alınan pikin Bragg yansıma açısıdır [30]. Tane büyüklüğü arttıkça, elde edilen X-ışınlarının kırınım deseninde yansıyan ışınların şiddetini gösteren piklerin de daraldığı görüldü.

Kübik kaya tuzu yapısının örgü parametresi Denklem 9 kullanılarak hesaplandı ve Tablo 2 de verildi.

$$a = d\sqrt{(h^2 + k^2 + l^2)} \quad (9)$$

burada h, k ve l Miller indisleri, d ise düzlemler arası mesafedir [31].

Ayrıca tüm düzlemler için ortalama stres (gerilme) ve mikro strain (gerginlik) ve sırasıyla Denklem 10 ve Denklem 11 kullanılarak

$$S = \varepsilon Y / (2\sigma) \quad (10)$$

$$\varepsilon = (a_0 - a) / a_0 \quad (11)$$

hesaplandı ve Tablo 2'de verildi. Burada; σ bulk kristalinin Poisson oranı, a_0 bulk örneğinin örgü parametresi, a ince film numunelerinin örgü parametresinin düzeltilmiş değeri ve Y ise Young modülüdür. PbS için Y 'nin değeri 70,2GPa ve σ değeri ise 0,28 olarak alınmaktadır.

Tablo 2. Üretilen PbS ince filmlerin tane büyüklükleri, dislokasyon yoğunlukları, doğrulanan örgü parametreleri, mikro strain değerleri ve ortalama gerilme değerleri

Deney	2 θ	Tane Büyüklüğü (nm)	Örgü Parametresi a (Doğrulan) (Å)	Mikro Strain *10 ⁻³	Dislokasyon Yoğunluğu (çizgi/m ²)*10 ¹⁴	Ortalama Stres(10 ⁸ N/m ²)
Set1	25,993	63,01	5,94038	0,738	2,52	0,93
	30,078	63,58	5,94538	1,580	2,47	1,98
	43,065	82,52	5,94261	1,114	1,47	1,4
	50,978	85,04	5,93954	0,597	1,38	0,75
	53,467	34,37	5,94055	0,767	8,46	0,96
	62,523	89,80	5,94336	1,24	1,24	1,55
	68,91	93,10	5,94035	0,733	1,15	0,92
Set1-400	26,022	52,51	5,93099	-0,844	3,63	-1,06
	30,077	52,97	5,94254	1,102	3,56	1,38
	43,144	20,63	5,93065	-0,902	23,49	-1,13
	51,058	37,79	5,93298	-0,509	7,00	-0,64
	53,589	42,98	5,92431	-1,970	5,41	-2,47
	62,567	39,90	5,9386	0,4380	6,28	0,55
	69,067	74,53	5,92784	-1,374	1,80	-1,72
Set2	25,961	63,01	5,94481	1,485	2,52	1,86
	30,040	63,57	5,94966	2,301	2,47	2,88
	43,049	66,00	5,94315	1,204	2,30	1,51
	50,954	85,03	5,94429	1,396	1,38	1,75
	53,448	42,95	5,93879	0,4694	5,42	0,59
	62,490	35,91	5,94512	1,536	7,76	1,93
	68,900	37,37	5,94044	0,748	7,16	0,94
Set2-400	25,965	52,50	5,94364	1,286	3,63	1,61
	30,047	63,57	5,94832	2,075	2,47	2,60
	43,042	66,00	5,94405	1,357	2,30	1,70
	50,974	34,01	5,94210	1,027	8,65	1,29
	53,406	57,27	5,94301	1,181	3,05	1,48
	62,476	89,78	5,9464	1,752	1,24	2,20
	68,871	26,58	5,94266	1,122	14,2	1,41

Nelson-Riley grafikleri kullanılarak, örgü parametresinin düzeltilmiş değerleri hesaplandı. Üretilen ince filmlerin hesaplanan örgü parametreleri Denklem 12'de verilen $F(\theta)$ 'ya karşılık çizildi. Şekil 2 ve Şekil 3'de verildi

$$F(\theta) = (\cos^2 \theta / 2) * (\frac{1}{\sin^2 \theta} + \frac{1}{\theta}) \quad (12)$$

ve doğrusal çizgiyi kestiği nokta olan Denklem 13

$$(\cos^2 \theta / 2) * (\frac{1}{\sin^2 \theta} + \frac{1}{\theta}) = 0 \quad (13)$$

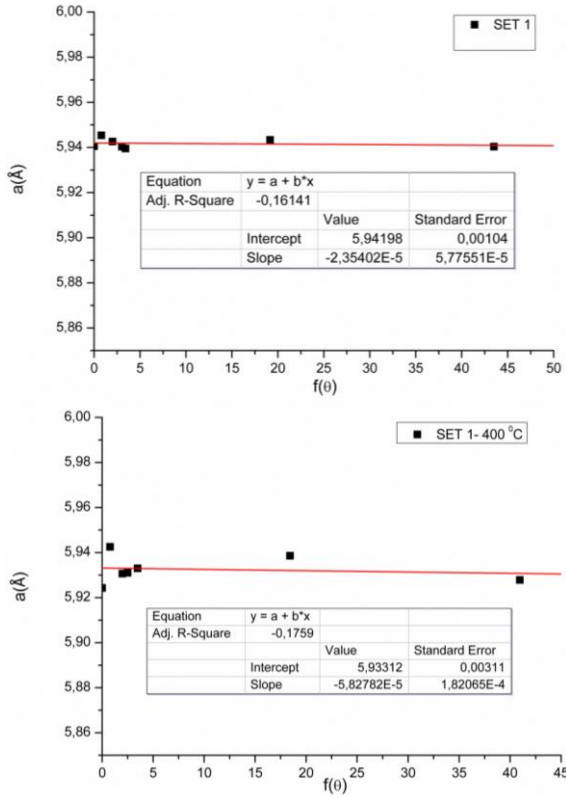
düzeltilmiş örgü parametresinin bulunmasını sağladı [32] ve Tablo 2'de verildi.

Üretilen filmlerin dislokasyon yoğunluğu, Denklem 14 verildiği gibi

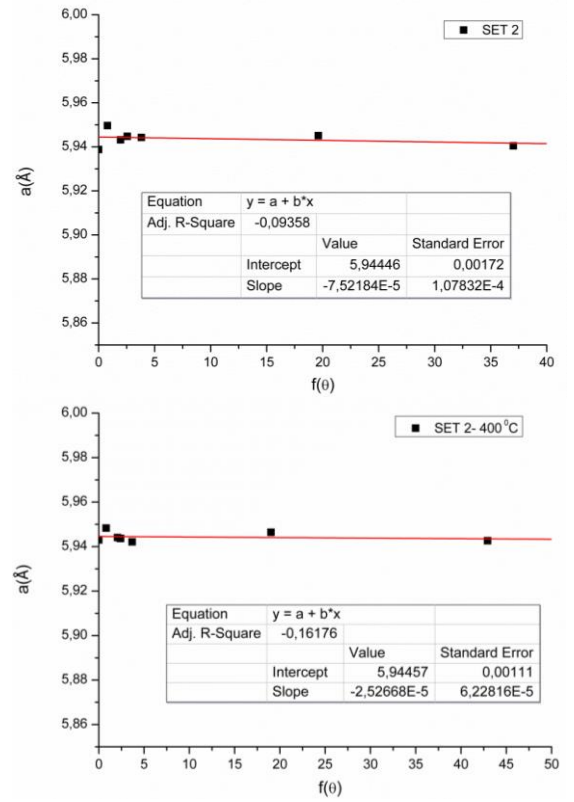
$$\delta = \frac{1}{(cs)^2} \quad (14)$$

tane boyutundan türetildi [32]ve Tablo 2'de verildi.

Tablo 2 incelendiğinde, Set1 ve Set2'den elde edilen ince filmlerin ortalama stres değerlerinin sırasıyla $0,75 \times 10^{14}$ - $1,98 \times 10^{14}$ (çizgi/m²) ile $0,59 \times 10^{14}$ - $2,88 \times 10^{14}$ (çizgi/m²) arasında değişti. Set1'den elde edilen filme tavlama işlemi uygulandıktan sonra, negatif stres değerleri hesaplandı. Bunun hesaplanan negatif mikro straine [33] bağlı olarak PbS ince film üretimi esnasında meydana gelen baskı ve sıkışma gerginliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Set1'den elde edilen filme tavlama işlemi uygulandıktan sonra ise, ortalama stres değerlerinin $1,29 \times 10^{14}$ - $2,60 \times 10^{14}$ (çizgi/m²) arasında değiştiği hesaplandı.



Şekil 2. Set 1 kullanılarak üretilen PbS ince filmlerin Nelson-Riley grafikleri



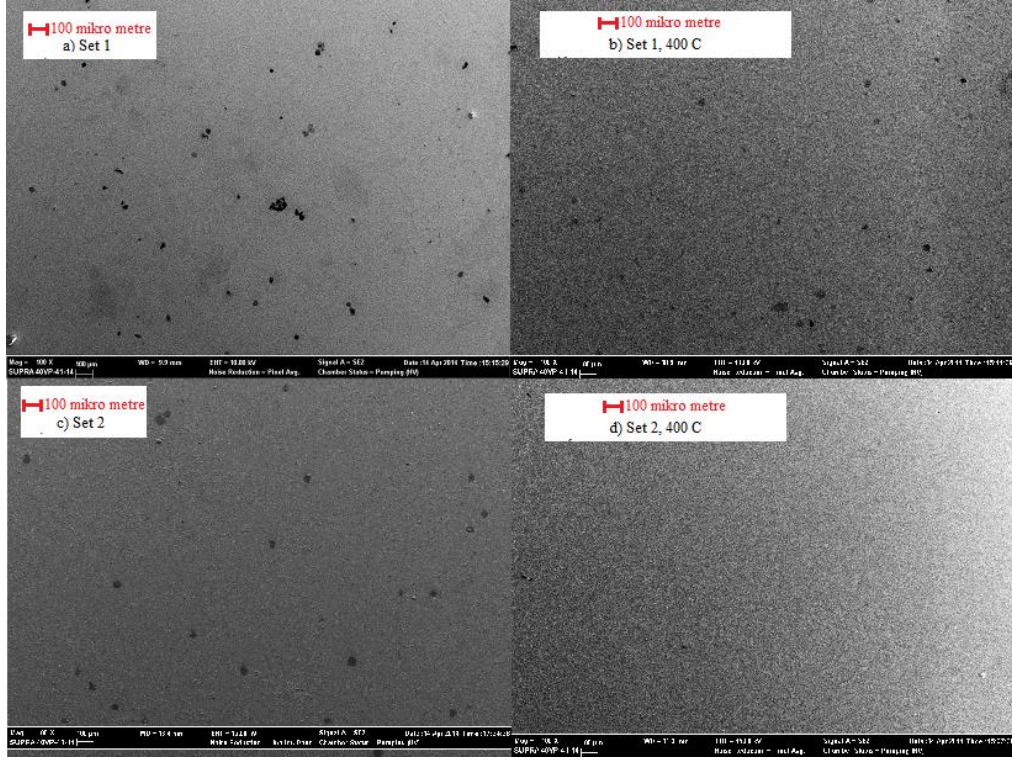
Şekil 3. Set 2 kullanılarak üretilen PbS ince filmlerin Nelson-Riley grafikleri

3.2. Elde edilen PbS ince filmlerinin SEM analizleri

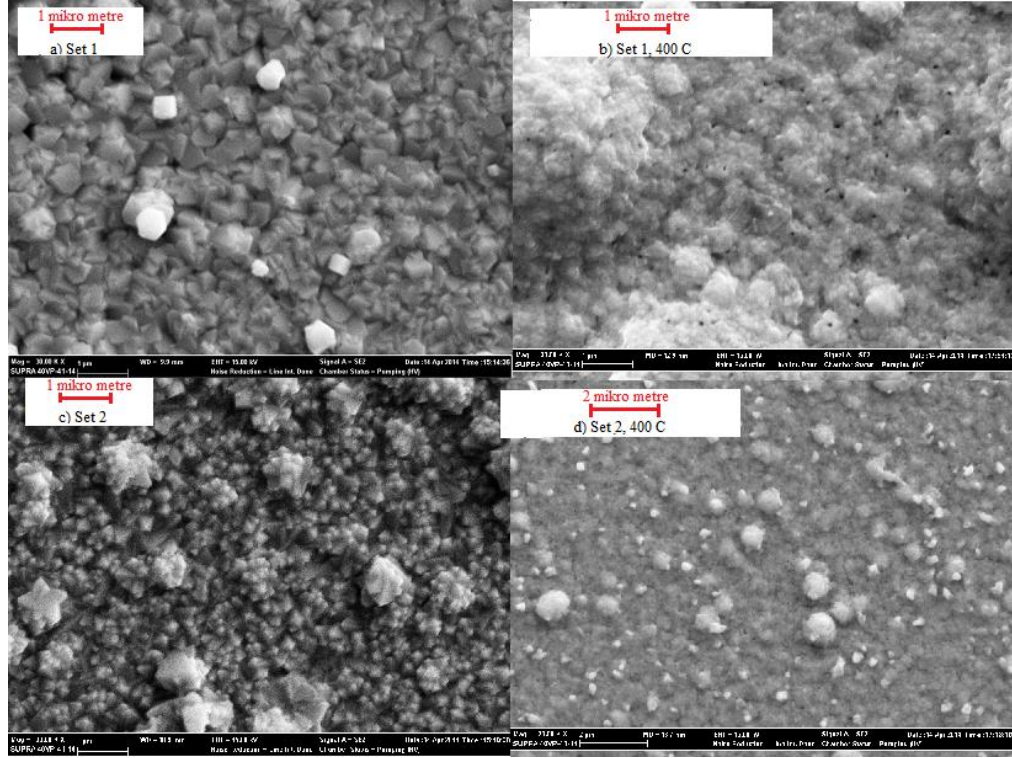
Elde edilen PbS ince filmlerinin 100 büyütmedeki ve 30000 büyütmedeki SEM görüntüleri Şekil 4 ve Şekil 5'de sırasıyla verilmektedir.

Şekil 4'de yer alan bütün PbS ince filmlerinin 100 kat büyütmeleri incelendiğinde Set1 ve Set2'den elde edilen PbS ince filmlerinin yüzeylerinde delikler olduğu görülmektedir. Ancak Set2'den elde edilen filmin yüzeyindeki delikler Set1'den elde edilen filme göre daha azdır.

Set1'den elde edilen filme 400 °C'deki tavlama işlemi uygulandıktan sonra, ince filmin yüzeyindeki deliklerin kaybolmadığı görülmektedir. Na₂SO₃ inhibitör eklenerek üretilen Set2 isimli ince filme 400 °C'de tavlama işlemi uygulandıktan sonra, ince filmin yüzeyindeki deliklerin kaybolduğu gözlemlendi. Bu filmin kompakt, deliksiz ve çatlaksız bir ince film olduğu görüldü.



Şekil 4. Üretilen PbS ince filmlerin 100 büyütmedeki SEM görüntüleri



Şekil 5. Üretilen PbS ince filmlerin 30000 büyütmedeki SEM görüntüleri

Şekil 5’de yer alan bütün PbS ince filmlerinin 30000 kat büyütme incelenildiğinde, Set1’den elde edilen PbS ince filminin polimorfik formda PbS kristallerinden oluştuğu görüldü. Ancak Set2’den elde edilen filmde Na_2SO_3 inhibitör eklenmesiyle yüzeydeki yapının değiştiği filmin pramit formunda PbS kristallerinden oluştuğu gözlemlendi.

Set1’den elde edilen filme 400 °C’deki tavlama işlemi uygulandıktan sonra, ince filmin yüzeyindeki polimorfik PbS kristallerinin formu bozuldu ve bu filmin yüzeyinde pinhollerin var olduğu gözlemlendi.

Set2’den elde edilen filme 400 °C’deki tavlama işlemi uygulandıktan sonra, ince filmin yüzeyi form değiştirdi. Piramidal yapıdaki bütün PbS kristalleri eriyip film yüzeyini kapladı. Söz konusu olan, bu pramit şeklindeki kristaller arasındaki boşluklar tavlamadan sonra tamamen kapandı.

4. Tartışma

Bu çalışmada üretilen bütün filmlerin tavlama işleminden sonra pik şiddetlerinin arttığı görüldü. Film kalınlıkları yaklaşık olarak aynı olmasına rağmen XRD pik şiddetlerin artması bu filmlerde kristallenmenin arttığını göstermektedir. Üretilen PbS ince filmlerin tavlama işleminden sonra yapılanma katsayısı değeri 1’den büyük tek bir yansıma düzleminin bulunduğu tespit edilmiştir. Bu düzlem, 30°’de gözüken PbS pikine karşılık gelen (002) düzlemdir. Ayrıca, tane büyüklüğü arttıkça, elde edilen X-ışınlarının kırınım deseninde yansıyan ışınların şiddetini gösteren piklerin de daraldığı görülmektedir. Set1’den elde edilen filme tavlama işlemi uygulandıktan sonra ise, negatif stres değerleri tespit edildi. Bunun nedeninin, hesaplanan negatif mikro straine bağlı olarak PbS ince film üretimi esnasında meydana gelen baskı ve sıkışma gerginliği olduğu düşünülmektedir.

Üretilen PbS ince filmlerin SEM görüntüleri incelendiğinde ise, tavlama ile filmlerin yüzey yapılarının tamamen değiştiği ve deliklerin kaybolduğu görülmektedir. Ek olarak, Na_2SO_3 inhibitör eklenmesiyle PbS film yüzeyindeki yapının polimorfik formdan pramit formuna dönüştüğü gözlenmektedir.

Kaynaklar

- [1] Fouda A, Marzook M, Abd El-Khalek H, Ahmed S, Eid E, El Basaty A. Structural and optical characterization of chemically deposited PbS thin films. *Silicon* 2016; 9(6), 809-816.
- [2] Kotadiya N, Kothari A, Tiwari D, Chaudhuri T. Photoconducting nanocrystalline lead sulphide thin films obtained by chemical bath deposition. *Applied Physics A* 2012; 108(4), 819-824.
- [3] Rajathi S, Kirubavathi K, Selvaraju K. Structural, morphological, optical and photoluminescence properties of nanocrystalline PbS thin films grown by chemical bath deposition. *Arabian Journal of Chemistry* 2017; 10(8), 1167-1174.
- [4] Kumar S, Sharma TP, Zulfequar M, Husain M. Characterization of vacuum evaporated PbS thin films. *Phys.B:Condens. Matter* 2003; 325, 8–16.
- [5] Partin DL, Heremans J, in: Moss TS, Mahajan S. (Eds.) *Handbook on semiconductors*. Elsevier 1994; 3, 369–380.
- [6] Atwa DMM, Azzouz IM, Badr Y. Optical, structural and optoelectronic properties of pulsed laser deposition PbS Thin film. *Appl.Phys.B* 2011; 103, 161–164.
- [7] Thangaraju B, Kaliannan P. Spray pyrolytically deposited PbS thin films. *Semicond.Sci.Technol.* 2000; 15, 849–853.
- [8] Agarwal RC, Pillai PKC. Chemically sprayed PbS coatings for photothermal solar energy conversion. *Applied Energy* 1982; 11(1), 61-68.
- [9] Hodes G, Semiconductor and ceramic nanoparticle films deposited by chemical bath deposition. *Phys.Chem.Chem.Phys.* 2007; 9, 2181–2196.
- [10] Hodes G. Chemical solution deposition of semiconductor films. *Marcel Dekker* 2003; 125 (22), 6386-6837.
- [11] Pawar SM, Pawar BS, Kim JH, Oh-Shim J, Lokhande C.D., Recent status of chemical bath deposited metal chalcogenide and metal oxide thin films. *Cur. Appl. Phys. Rev.* 2011; 11, 117–161.
- [12] Enriquez JP, Mathew X. Influence of the thickness on structural, optical and electrical properties of chemical bath deposited CdS thin films. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2003; 76(3), 313-322.
- [13] Popa, A, Lisca M, Stancu V, Buda M, Pentia E, Botila T. J. *Optoelectron. Adv. Mater.* 2006; 8, 43–45.
- [14] Seghaier S, Kamoun N, Brini R, Amara AB. Structural and optical properties of PbS thin films deposited by chemical bath deposition. *Mater. Chem. Phys.* 2006; 97, 71–80.
- [15] Abbas MM, Shehab AAb-M, Hassan, NA, Al-Samuraee AK. Effect of temperature and deposition time on the optical properties of chemically deposited nanostructure PbS thin films. *Thin Solid Films* 2011; 519, 4917–4922.
- [16] Obaid AS, Mahdi MA, Hassan Z. Nanocrystal PbS thin film growth by solid-vapor deposition. *Optoelectron. Adv. Mater. – Rapid Commun* 2012; 6, 422–426.
- [17] Obaid AS, Mahdi MA, Ramizy Asmiet, Hassan Z. Structural properties of nanocrystalline PbS thin films prepared by chemical bath deposition method. *Adv. Mater. Res.* 2012; 364, 60–64.
- [18] Preetha KC, Murali KV, Ragina AJ, Deepa K, Remadevi TL. Effect of cationic precursor ph on optical and transport properties of SILAR deposited nano crystalline PbS thin films. *Curr. Appl. Phys.* 2012; 12, 53–59.

- [19] Mathews N.R., Ángeles-Chávez C., Cortés-Jácome M.A., Toledo Antonio J.A., Physical properties of pulse electrodeposited lead sulfide thin films. *Electrochim.Acta.* 2013; 99, 76–84.
- [20] Sharan M, Ramaiah KS, Kumar M, Neumann-Spallart M, Levy Clement C. Electrodeposition of lead sulphide in Acidic medium. *J. Electroanal. Chem* 1997; 436, 49–52.
- [21] Takahashi M, Ohshima Y, Nagata K, Furcita S. Electrodeposition of PbS films from acidic solution. *J. Electroanal. Chem.* 1993; 359, 281–286.
- [22] Salavati-Niasari M, Ghanbari D, Loghman-Estarki MR, Star-shaped PbS nanocrystals prepared by hydrothermal process in the presence of thioglycolic acid. *Polyhedron* 2012; 35, 149–153.
- [23] Seghaier S, Kamoun N, Brini R, Amara AB. Structural and optical properties of PbS thin films deposited by chemical bath deposition. *Materials Chemistry and Physics* 2006; 97,71-80.
- [24] Sonavane DK, Jare SK, Kathare RV, Bulakhe RN, Shim JJ. Chemical synthesis of PbS thin films and its physicochemical properties. *Materials Today: Proceedings* 2018; 5, 7743-7747.
- [25] Seghaier S, Kamoun N, Guasch C, Zellama K, Structural and optical properties of PbS thin films grown by chemical bath deposition. *AIP Conference Proceedings* 2007; 935(1), 143-148
- [26] Pentia E, Pintilie L, Botila T, Pintilie I, Chaparro A, Maffiotte C. Bi Influence on growth and physical properties of chemical deposited PbS films. *Thin Solid Films* 2003; 434(1-2),162-170.
- [27] Ramírez-Ceja D, González L, Escorcia-García J, Martínez-Enríquez A. Characterization of PbS thin films obtained by chemical bath at low temperature using sodium citrate as complexing agent. *MRS Advances* 2016; 1(37), 2623-2628.
- [28] Altioikka B., Baykul MC., Altioikka MR., Some physical effects of reaction rate on PbS thin films obtained by chemical bath deposition. *Journal of crystal growth* 2013;38, 50-54.
- [29] Soetedjo H, Siswanto B, Aziz I, Sudjatmoko. Deposition of Cu-doped PbS thin films with low resistivity using DC sputtering. *Results in Physics* 2018; 8, 903-907.
- [30] Bhowmik R, Murty M, Srinadhu E. Magnetic modulation in mechanical alloyed $\text{Cr}_{1.4}\text{Fe}_{0.6}\text{O}_3$ oxide. *PMC Physics B* 2008; 1(1), 20.
- [31] Hussain A, Begum A, Rahman A. Characterization of nanocrystalline lead sulphide thin films prepared by chemical bath deposition technique. *Arabian Journal for Science and Engineering* 2012; 38(1), 169-174.
- [32] Obaid A, Mahdi M, Hassan Z, Bououdina M. PbS nanocrystal solar cells fabricated using microwave-assisted chemical bath deposition. *International Journal of Hydrogen Energy* 2013; 38(2), 807-815.
- [33] Kumbhakar P, Kole AK. Cubic-to-hexagonal phase transition and optical properties of chemically synthesized ZnS nanocrystals. *Results in Physics* 2012; 2, 150–155.

Kitosan/κ-Karragenan/Kitosan Üç Tabakalı Mikrokürelerinden İndometazin Kontrolü Salımı

Murat İNAL^{1*}

¹Biyomühendislik Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye

^{1*}inalmrt@yahoo.com, minal@kku.edu.tr

(Geliş/Received: 27/11/2019;

Kabul/Accepted: 29/05/2020)

Öz: Bu çalışmada, modifiye edilmemiş kitosan mikrokürelerinin pH dayanıklılığını arttırmak için κ-karragenan ve kitosan ile kaplanmış kitosan mikroküreleri sentezlenmiştir. Çalışmanın çıkış noktası tripolifosfat ile çapraz bağlanmış kitosan ve κ-karragenan kaplanmış kitosan mikrokürelerinin pH 1,2 HCl-KCl tamponu içerisinde 30 dakika içinde parçalanmalarıdır. Bunu önlemek ve yeni bir kontrollü salım sistemi geliştirmek için kitosan/κ-karragenan/kitosan üç tabakalı mikroküreleri sentezlenmiştir. Model ilaç olarak indometazin (IM) kullanılmıştır. Mikrokürelerin yüzey yapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Mikrokürelerdeki κ-karragenanın ve ilacın varlığı, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) kullanılarak tespit edilmiştir. Mikrokürelerin içine hapsedildikten sonra ilacın kimyasal dayanıklılığı diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile belirlenmiştir. Hazırlanan mikroküreler ilaç hapsedme etkinliği, denge şişme derecesi, parçacık boyutu ve kontrollü salım verileri ile karakterize edilmiştir. Kontrollü salım çalışmaları pH 1,2 HCl-KCl tamponu ve peşinden pH 7,4 fosfat tamponu içerisinde gerçekleştirilmiştir. IM salımı üzerine çapraz bağlayıcı derişimi ve kitosan/ilacın oranının etkileri incelenmiştir. Mikrokürelerde κ-karragenanın ve IM varlığı FTIR analizi ile doğrulanmıştır. İlacın mikrokürelere hapsedildikten sonra yapısını koruduğu DSC ölçümleri ile kanıtlanmıştır. Çapraz bağlayıcı derişiminin ve ilaç miktarının artması ile kürelerden ilaç salımının azaldığı bulunmuştur. Yeni elde edilen sistemin özellikle midede tahrişe sebep olan ilaçlar için uygun bir kontrollü salım sistemi olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kitosan, κ-karragenan, indometazin, mikroküre, kontrollü salım sistemi.

Controlled Release of Indomethacin from Chitosan / κ-Carrageenan / Chitosan Three Layer Microspheres

Abstract: In this study, κ-carrageenan and chitosan coated chitosan microspheres were synthesized to increase the pH resistance of unmodified chitosan microspheres. The starting point of the study was the disintegration of chitosan and κ-carrageenan coated chitosan microspheres cross-linked with tripolyphosphate in pH 1.2 HCl-KCl buffer within 30 minutes. Three-layer microspheres of chitosan/κ-carrageenan/chitosan were synthesized to prevent this condition and develop a new controlled release system. Indomethacin (IM) was used as a model drug. The surface structure of the microspheres was examined by scanning electron microscopy (SEM). The presence of carrageenan and drug in the microspheres was determined using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). After being entrapped into the microspheres, the chemical resistance of the drug was determined by differential scanning calorimetry (DSC) measurements. The prepared microspheres were characterized by drug entrapment efficiency, degree of equilibrium swelling, particle size, and controlled release data. Controlled release studies were carried out in pH 1.2 HCl-KCl buffer followed by pH 7.4 phosphate buffer. The effects of crosslinker concentration and chitosan/drug ratio on IM release were investigated. The presence of κ-carrageenan and IM in the microspheres was confirmed by FTIR analysis. With DSC measurements, the drug has been proven to retain its structure after capturing microspheres. It was found that as the crosslinker concentration and drug amount increased, drug release from the spheres decreased. It has been determined that the newly obtained system is a controlled release system suitable for drugs that cause irritation especially in the stomach.

Key words: Chitosan, κ-carrageenan, indomethacin, microsphere, controlled release system.

1. Giriş

Alışılmış dozaj şekillerinde kandaki ilaç seviyesi bir süre artmakta, sonra istenilen plazma düzeyine ulaşarak kısa bir süre sabit kalarak, hızla azalmaktadır. Klasik ilaç şekillerinin kullanımında görülen bu tür aksaklıkların giderilmesine yönelik yapılan araştırmalara en iyi yanıt veren sistemler kontrollü ilaç salım sistemleridir. Organizma için gerekli olan etkin maddenin salım hızını kontrol ederek hedef hücreye, dokuya veya organa ulaştıran sistemlere kontrollü salım sistemleri adı verilir. Kontrollü salım sistemleri, ilaçların dozunun

* Sorumlu yazar: inalmrt@yahoo.com.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹0000-0003-3384-5627

azaltılabilmesi, alımının daha uzun aralıklara yayılabilmesi, yan ve zararlı etkilerinden arındırabilmesi ve hedef bölgeye gönderilebilmesi gibi üstünlükleri dolayısıyla son yıllarda klasik ilaç kullanım yöntemlerinin yerini almaktadır. Kontrollü salım sistemlerinde belirli bir doz alındıktan sonra etkin madde plazma düzeyi istenilen süre (10-12 saat, bir gün, bir hafta veya bir yıl) sabit kalır ve böylece hasta sık sık ilaç almaktan kurtularak, plazmanın etkin madde düzeyi değişmediği için başarılı bir tedavi oldukça düşük doz ile sağlanabilir [1].

Kitin doğada selülozdan sonra ikinci en çok bulunan polisakkarittir ve ticari olarak ıstakoz, karides ve yengeçlerin atık kabuklarından elde edilmektedir [2-4]. Kitosan (KTS), kitinin bazik ortamda asetil grubunun yapıdan uzaklaştırılması ile elde edilmektedir. KTS N-asetil-D-glikoz amin ve D-glikoz aminin β -1,4 glikozit bağları ile bağlanmasıyla oluşan bir kopolimerdir. [2,4-6]. KTS serbest amino grupları içerdiği için nötr ve bazik pH'larda nötr bir polisakkarittir ve bu yüzden suda çözünmez. Fakat asidik pH'larda amino grupları protonlandığı için suda çözünmektedir. Çözünürlüğü serbest amino ve N-asetil gruplarının dağılımına bağlıdır [7]. Genellikle %1-3 asetik asit içerisinde çözünmektedir. KTS alerjik reaksiyonlara ve vücutta reddedilmeye yol açmadığı için yaşayan dokular ile biyouyumludur. Amino şekerleri vücutta yavaş yavaş zararsız ürünlere parçalandığı için insan vücudu tarafından tamamen emilir ve vücutta bölgesel yan etkilere sebep olmadan organizmadan kolayca atılabilir. Ayrıca bunlara ek olarak iyi antimikrobiyal, adezyon ve koagülasyon özelliklerine de sahiptir [8]. KTS'nin birincil amino gruplarının bulunması onu eczacılık uygulamalarında çok kullanışlı bir hale getirmektedir. Birçok doğal polimerler ile karşılaştırıldığında KTS pozitif yüklü ve mukozaya yapışabilen bir yapıya sahiptir. Bu yüzden, ilaç salım sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [9-11]. İlacın salımı, çok değerli anyonlarla (sülfat, sitrat veya tripolifosfat) KTS'nin iyonik çapraz bağlanması sayesinde veya anyonik polimerlerle (poliakrilatlar, hyalüronik asit, aljinat, pektin veya karragenan) dayanıklı kompleksler oluşturularak kontrol edilebilmektedir.

Karragenan (KRG), *Chondrus*, *Eucheuma*, *Gigartina*, and *Hypnea* gibi kırmızı deniz yosunlarının belirli türlerinin ekstraksiyonu ile elde edilen yüksek molekül ağırlıklı sülfat grubu içeren polisakkaritlerin bir ailesi için genel bir isimdir. Bu, glikozidik bağlar ile bağlanmış galaktoz ve anhidrogalaktoz birimlerinden oluşmaktadır. Gıda endüstrisinde, KRG yaygın olarak jelleştirici, kıvam arttırıcı, emülsifiye edici ve dengeleyici olması gibi mükemmel fiziksel fonksiyonel özelliklerini nedeniyle kullanılmaktadır. [12-14]. Bunlar esas olarak dönüşümlü olarak bağlanmış 3-bağlı- β -D-galaktopiranoz ve 4-bağlı- α -D-galaktopiranoz birimlerinden oluşmaktadır ve bunlar serbest hidroksil gruplarının süstitüsyon derecesine göre sınıflara ayrılmaktadır. Süstitüsyon genellikle sülfat esterinin bağlanması ya da 4-bağlı artıkların 3,6 birimlerinin anhidrid oluşturması ile gerçekleşmektedir [14,15]. Bu polisakkaritler geleneksel olarak 6 temel formdan oluşmaktadır; Kappa (κ)-, Iota (ι)-, Lambda (λ)-, Mu (μ)-, Nu (ν)- ve Theta (θ)-KRG. Bu adlandırma, kimyasal yapıları ve ticari üretimleri ile alakalıdır, çünkü farklı KRG alt tipleri farklı yosun kaynaklarından elde edilmektedir. KRG çeşitlerinin özelliklerini etkileyen temel farklılıklar ester sülfat gruplarının konumu ve sayısı ve 3,6-anhidro-galaktoz içeriğidir. Örneğin, ester sülfat içeriği yüksek seviyelerde olduğunda düşük çözünürlük sıcaklığı ve düşük jel kuvveti ile sonuçlandığı bildirilmiştir [14,16]. Özellikle sülfat gruplarından dolayı anyonik bir polimer olan κ -KRG katyonik polimerlerle (KTS v.b...) etkileşerek son yıllarda ilaç formülasyonlarının hazırlanmasında ve özellikle doku iskelelerinin oluşturulmasında kullanımı artmıştır. Tapia ve ark. [17] KTS-aljinat ve KTS-KRG kompleks polimerleri hazırlamışlardır. Hazırlanan kompleks polimerler FTIR ve şişme davranışları ile karakterize edilmişlerdir. Ayrıca kompleks polimerlerle diltiazem hidroklorür içeren tabletler oluşturularak, bu tabletlerin çözünme testlerini gerçekleştirmişlerdir. Long ve ark. [18] KTS-KRG-Fe₃O₄ nanopartiküllerini sentezlemişlerdir. Daha sonra bunların içine sıgır serum albümini adsorbe ederek nanopartiküllerden proteinin salım davranışlarını incelemişlerdir.

İndometazin (IM) ateş düşürücü, ağrı kesici özelliklerinden dolayı kullanılan steroid yapıda olmayan, iltihabi reaksiyonu önleyici bir ilaçtır. IM genellikle oral yoldan kullanılır. Sindirim kanalında hızla emilir ve maksimum kan plazma düzeyine 2 saatte ulaşır. IM diğer iltihabi reaksiyonu önleyici ilaçlar gibi mide mukozası ile uzun süreli teması halinde insanlarda kullanımından sonra gastrointestinal kanalda bölgesel tahrişlere, kanamalara hatta peptik ülsera sebep olmaktadır ve bu gibi etkileri uzun süreli kullanımını sınırlamaktadır [19,20]. IM gastrointestinal sistemdeki çözünürlüğü çok düşük olduğu için düşük oral biyoyararlanım gösterir, ayrıca suda hemen hemen pratik olarak hiç çözünmez (0,02 mg/mL) [21].

Bu çalışmanın amacı, IM'nin yukarıda sayılan zararlarını ve ilacın kan seviyesinde görülen dalgalanmaları önleyebilmek için bir kontrollü salım sistemi geliştirebilmektir. Bu amaçla ilk olarak IM, KTS içine sodyum tripolifosfat (TPP) çapraz bağlayıcısı yardımıyla hapsedilmiştir. Daha sonra hazırlanan mikroküreler salım hızını azaltmak ve salım zamanını kontrol altına alabilmek amacıyla ilk olarak κ -KRG çözeltisine aktararak yüzeyinin bu polimerle kaplanması sağlanmıştır. Bu aşamada kitosan üzerindeki pozitif yüklü amino grupları ile κ -KRG üzerindeki negatif yüklü sülfonat grupları etkileşerek κ -KRG'nin mikrokürelerin yüzeyine tutunması sağlanmıştır. Tutunan polimer potasyum klorür ile çapraz bağlanarak yapıdan ayrılmaması sağlanmıştır. Benzer şekilde κ -KRG

ile kaplanan küreler bu sefer KTS çözeltisine aktararak yüzeyinin bu polimerle kaplanması sağlanmıştır. Daha sonra KTS, TPP yardımıyla çapraz bağlanarak yüzeyden uzaklaşması engellenmiştir. Yine bu kaplama işlemi de ilacın salım hızını azaltacağı ve salım zamanını kontrol altına alacağı için yapılmıştır. Mikrokürelerin yüzeyi anlatıldığı şekilde modifiye edilerek tek başına KTS'nin kullanıldığı sistemlere oranla özellikle asidik şartlara karşı son derece dayanıklı ve çok daha uzun süreli salım sağlayan bir kontrollü ilaç salım sistemi geliştirilmiş olacaktır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kullanılan kimyasal maddeler

KTS (orta viskozitede) Sigma–Aldrich (İzlanda) ve dipotasyum monohidrojen fosfat Merck (Almanya) firmalarından temin edilmiştir. İndometazin, κ-KRG, hidroklorik asit, sodyum hidroksit, sodyum tripolifosfat ve potasyum klorür Sigma–Aldrich (Amerika) firmasından temin edilmiştir. Bütün kimyasallar alındığı şekliyle kullanılmıştır.

2.2. IM yüklü kitosan mikrokürelerinin hazırlanması

%0,5 (h/h) asetik asit çözeltisi içerisinde kütlece %2 (k/h) olacak şekilde KTS çözölmüştür. Sonra bundan 20 mL alınarak içerisinde KTS'ye oranla %20,40 ve 60 (k/k) olacak şekilde IM ilave edilmiştir. Sonra polimer–ilaç çözeltisi iğne ucu ile (0,9 mm et kalınlığı olan) 1000 µL/dakika akış hızında şırınga pompası ile (New Era EN–300, Amerika) TPP içeren sulu çözelti içerisinde damlatılmıştır. Oluşan küreler 15 dakika olgunlaştırılmıştır. Oluşan küreler KRG ile kaplanması amacıyla distile su ile bir kere yıkanıp KRG çözeltisi içerisinde aktarılmıştır. Burada 15 dakika karıştırıldıktan sonra yine su ile bir kez yıkanıp bu sefer KRG'yi çapraz bağlamak amacıyla potasyum klorür (KCl) çözeltisi içine aktarılmıştır. 15 dakikada burada çapraz bağlanma gerçekleştirilmiştir. Daha sonra KRG kaplı küreler üzerine KTS kaplamak amacıyla KTS çözeltisi içerisinde ilave edilmiştir. Burada 15 dakika karıştırıldıktan sonra küreler alınarak yine su ile bir kez yıkanıp bu sefer TPP'nin sulu çözeltisi içerisinde aktarılmıştır. Yine burada 15 dakika olgunlaştırılan küreler yıkanmıştır. Boş kürelerde aynı şekilde elde edilmiştir. Daha sonra küreler 35 °C'de etüvde (Nüve FN–120, Türkiye) kurutulmuştur. Her bir formülasyona ait olan sabit tartıma gelmiş ilaç yüklü ve kuru kürelerden 10'ar tane örnek alınarak dijital mikrometre (Mitutoyo IP.65, Japonya) ile kürelerin ortalama çapları belirlenmiştir. Kürelerin formülasyonları Tablo1'de verilmiştir.

Tablo 1. Boş ve ilaç yüklü mikrokürelerin hazırlanma koşulları

Küre No	TPP (M)	IM (%k/k)	KRG (%k/h)	KCl (M)	KTS (%k/h)	TPP (M)
1	0,012	20	0,2	0,5	0,5	0,012
2	0,024	20	0,2	0,5	0,5	0,024
3	0,036	20	0,2	0,5	0,5	0,036
4	0,024	40	0,2	0,5	0,5	0,024
5	0,024	60	0,2	0,5	0,5	0,024
6	0,012	–	0,2	0,5	0,5	0,012
7	0,024	–	0,2	0,5	0,5	0,024
8	0,036	–	0,2	0,5	0,5	0,036

2.3. IM yüklü mikrokürelerin tutuklama verimi (%TV)

Kürelerdeki ilaç miktarının belirlenmesi için yapılan bir işlemdir. İlacın kürelere gerçekte ne kadar yüklendiğinin bir ölçüsüdür. Tutuklanma verimi hesabı için IM yüklü kürelerden 20 mg alınarak havanda toz haline gelene kadar ezilmiştir, elde edilen toz hacimce %30–70 (h/h) olacak şekilde etanol–pH 7,4 fosfat tamponu ile bir balona alınmıştır ve geri soğutucu altında bir manyetik karıştırıcı yardımıyla ilacın ekstrakte olması sağlanmıştır. Daha sonra çözelti süzölmüş ve IM içeriği UV spektrofotometresi (Biochrom Libra S–70, İngiltere) ile 262 nm'de belirlenmiştir. Tutuklanma yüzdesi Denklem 1'e göre hesaplanmıştır.

$$\%TV = \frac{\text{Küre içindeki deneysel IM miktarı}}{\text{Küre içindeki teorik IM miktarı}} \times 100 \quad (1)$$

2.4. IM yüklü mikrokürelerin hücre dışı salım çalışmaları

Hücre dışı ilaç salım çalışması için belirli miktarda küre alınmış ve küreler pH 1,2 HCl-KCl tamponu çözeltisi içeren balona ilave edilmiş ve 37 °C ve 100 devir/dakika çalkalama hızındaki su banyosuna (JeioTech BS-21, Kore) yerleştirilmiştir. IM salımı, 2 saat süre ile pH 1,2 HCl-KCl tamponu çözeltisinde, daha sonra bu çözeltiden alınarak pH 7,4 fosfat tamponunda gerçekleştirilmiştir. Her 30 dakikada balonlardan örnekler alınarak, UV spektrofotometresin de kürelerden salınan IM miktarı 262 nm’de dalga boyunda belirlenmiştir. Balonlara, salım ortamına göre, alınan örnek hacmi kadar yeni hazırlanmış HCl-KCl veya fosfat tamponu çözeltileri eklenmiştir.

2.5. Mikrokürelerin denge su içeriklerinin tayini

Boş kürelerin şişme yeteneklerini belirlemek amacıyla belirli miktarda küre alınmıştır. Küreler pH 1,2 HCl-KCl tamponu ve pH 7,4 fosfat tamponu çözeltilerinin içinde 24 saat süre ile şişme dengesine gelene kadar 25 °C’de bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda kürelerin yüzeyindeki çözelti kalıntıları uzaklaştırılarak şişen küreler tartılmış ve kürelerin şişme derecesi Denklem 2 kullanılarak belirlenmiştir.

$$\% \text{Denge şişme derecesi} = \frac{\text{Şişmiş küre kütlesi} - \text{kuru küre kütlesi}}{\text{kuru küre kütlesi}} \times 100 \quad (2)$$

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. IM yüklü mikrokürelerin karakterizasyonu

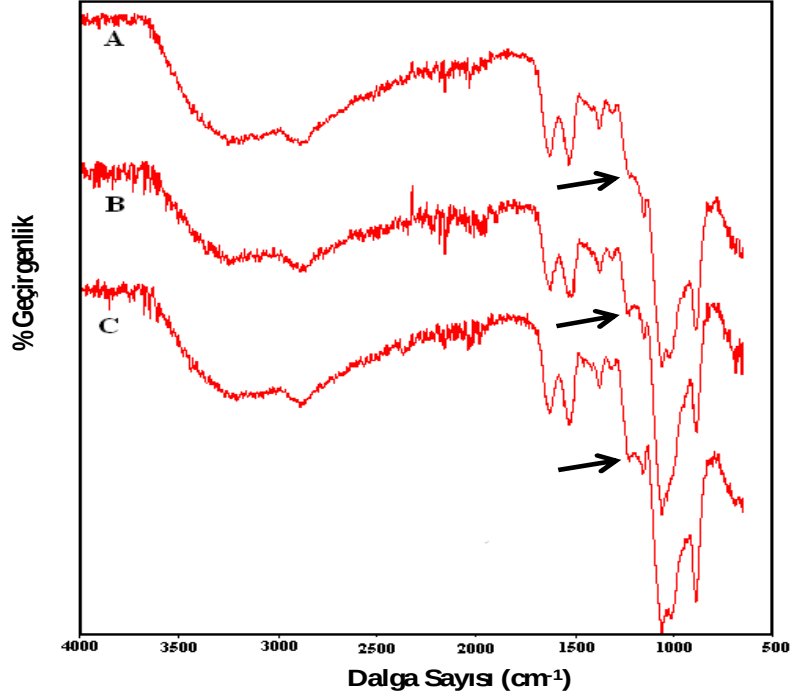
IM yüklü kürelerin tutuklanma verimi (%TV) ve çapları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. IM yüklü mikrokürelerin tutuklanma verimi (%TV) ve çapları

Küre No	Tutuklanma Verimi (%)	Küre çapları (µm)
1	65,57	710,91
2	73,46	698,25
3	69,36	681,27
4	79,18	912,80
5	84,16	1015,30

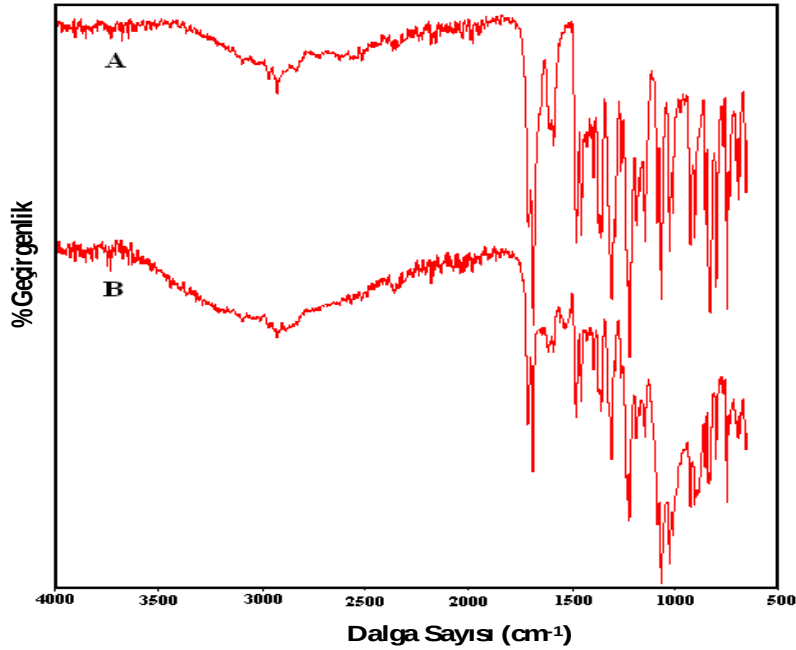
Tablo 2 incelendiğinde mikrokürelerin tutuklanma verimlerinin oldukça yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Buda KTS mikrokürelerin kaplanması tutuklanma verimine oldukça olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir. Mikroküre çaplarına bakıldığında ise TPP derişiminin artması ile kürelerin çaplarının azaldığı, ilaç miktarının artması ile çaplarının arttığı gözlemlenmiştir. TPP derişiminin artması ile kürelerin daha sağlam bir üç boyutlu ağ yapısı oluşturduğu, bunun da mikrokürelerin çaplarını azalttığı düşünülmüştür. Benzer sonuçlar Piyakulawat ve arkadaşlarının yaptığı çalışma da gösterilmiştir [22].

Sırasıyla boş ve ilaç yüklü mikrokürelerin FTIR ölçümleri (Bruker Vartex 70-V, Amerika) Şekil 1 ve Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Boş KTS (A), KRG kaplı KTS (B), KRG ve KTS kaplı KTS (C) mikrokürelerinin FTIR spektrumları

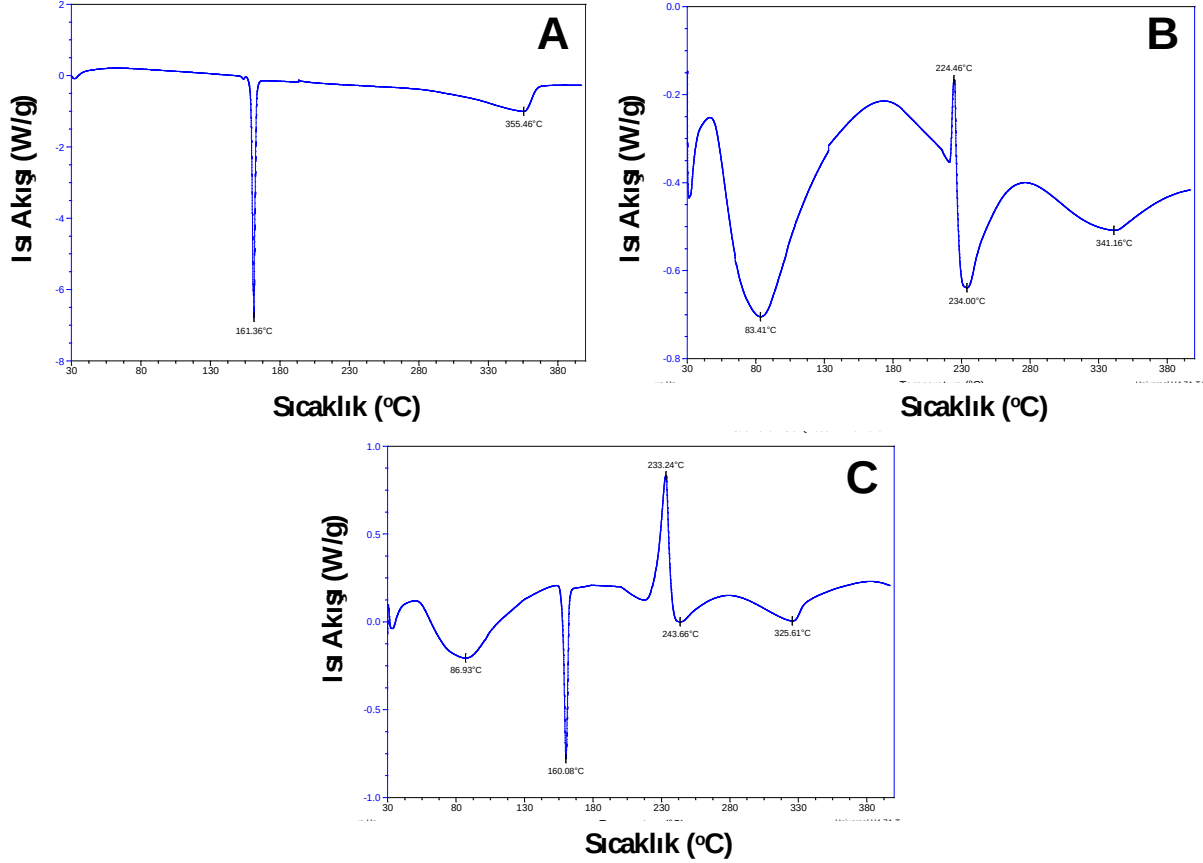
Şekil 1’de Boş KTS mikrokürelerinin spektrumu incelendiğinde 1630 , 1550 ve 1380 cm^{-1} ’de sırasıyla amid 1, amid 2 ve C–N bağı ile ilgili gerilme titreşimine ait bantlar görülmektedir. 1150 ve 900 cm^{-1} ’de kitosanın polisakkarit yapısı ile ilgili karakteristik bantlar görülmektedir. Kaplanmış mikrokürelerin FTIR spektrumların da KRG tipik absorpsiyon bantları görülmektedir. Bu sonuç bize kitosan mikrokürelerinin KRG ile kaplandığını doğrulamaktadır. Bu bant, 1229 cm^{-1} ’de KRG’in sülfonat grupların da bulunan S–O yapısı için asimetrik gerilme titreşimi olarak görülmektedir [23,24].



Şekil 2. IM (A) ve %60 IM yüklü KRG ve KTS kaplı KTS mikrokürelerinin (B) FTIR spektrumları

Şekil 2’de IM’nin spektrumunda 3000 cm^{-1} civarında gözlenen bandın molekülün benzen halkalarındaki aromatik (C–H) gerilmelerine, 2950 cm^{-1} civarındaki bantların alifatik (C–H) gerilmelerine, 1716 ve 1691 cm^{-1} ’de gözlenen bantların (C=O) gerilmelerine, 1591 ve 1480 cm^{-1} ’deki bantların aromatik (C=C) gerilmelerine, 1454 cm^{-1} ’deki bandın (O–CH₃) gerilmesine, 1230 cm^{-1} ’deki bandın (C–O) gerilmelerine ve 752 cm^{-1} ’de gözlenen bandın (C–Cl) gerilmesine karşılık gelebileceği düşünülmüştür. IM yüklü kürelerin spektrumları incelendiğinde ilacın karakteristik bantlarını koruduğu gözlemlenmiştir. Buda bize ilacın polimerler ile hiçbir etkileşime girmeden yapısını koruduğunun bir kanıtıdır [25].

DSC analizi (TA Instrument Q–2000, Amerika) ilaç yüklü mikrokürelerin ve hapsedilen ilacın termal davranışını anlamak için yapılmıştır ve sonuçlar Şekil 3’te gösterilmiştir.

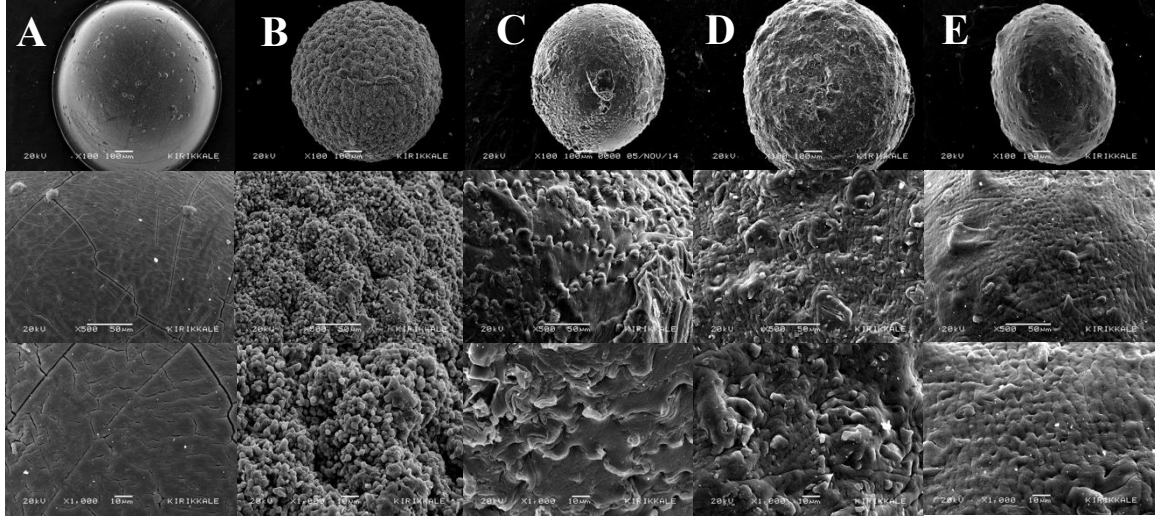


Şekil 3. IM (A), KRG ve KTS kaplı boş KTS (B) ve KRG ve KTS kaplı %60 IM yüklü KTS mikrokürelerinin DSC termogramları

Boş ve ilaç yüklü mikroküreler yaklaşık 85 ve 230 °C’de birbirine benzer T_g ve parçalanma sıcaklıkları göstermişlerdir. Aynı şekilde saf IM ve IM yüklü kürelerin termogramları incelendiğinde IM’nin erime noktası her iki termogramda da yaklaşık 160 °C olarak belirlenmiştir. Bu da bize ilacın polimerik matris içinde kristal yapısını koruyarak dağıldığının bir kanıtıdır.

Boş ve ilaç yüklü mikrokürelerin SEM görüntüleri Şekil 4’te verilmiştir. Boş ve ilaç yüklü kürelerin son derece küresel şekilli oldukları açıkça gözlemlenmektedir. Boş KTS mikrokürelerin SEM sonuçları incelendiğinde kürelerin oldukça pürüzsüz bir yüzeye sahip oldukları görülmektedir. Küreler KRG ile kaplandığında yüzeylerinin oldukça pürüzlü bir hale geldiği görülmüştür. Bu sonuç bize KRG üzerindeki –OSO₃ grupları ile KTS üzerindeki –NH₃⁺ gruplarının elektrostatik etkileşim sergileyerek KRG moleküllerinin KTS mikrokürelerinin yüzeyine bağlandığının bir kanıtıdır. KRG kaplı mikroküreler tekrar KTS ile kaplandığında boş KTS mikrokürelerin de olduğu gibi yüzeyin yine pürüzsüz hale geldiği, fakat KRG’den dolayı yine bir miktar yüzeyin girintili çıkıntılı halde olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar KTS mikrokürelerinin yüzeyinin KRG ve KTS ile kaplandığının oldukça sağlam kanıtlarını göstermektedir.

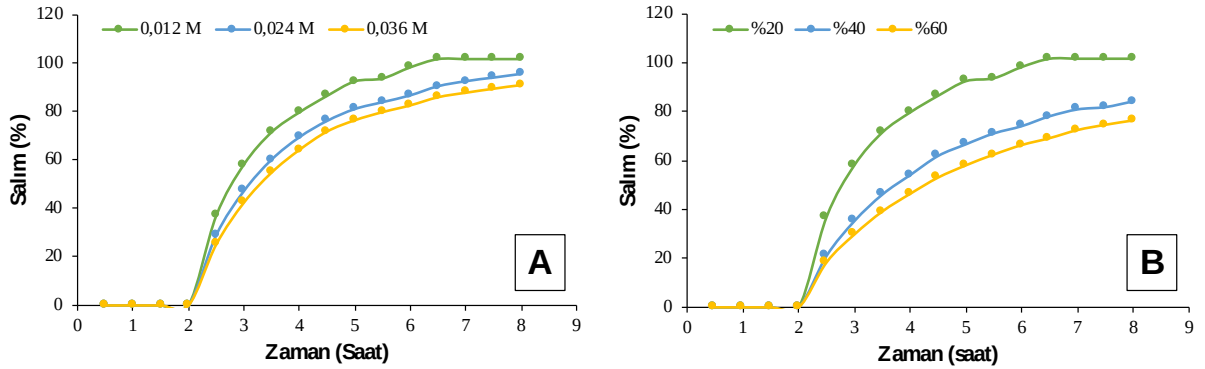
İlaç yüklü mikrokürelerin SEM fotoğrafları incelendiğinde özellikle %20 IM içeren kürelerin yüzeyindeki porlar açık bir şekilde gözlemlenmektedir. %60 IM içeren mikroküre de ise ilaç moleküllerinin kristal halde yüzeye dağılmış olarak durduğu görülmektedir.



Şekil 4. Boş KTS(A), boş KRG kaplı KTS(B), boş KRG ve KTS kaplı KTS (C), %60 IM yüklü (D) ve %20 IM yüklü (E) KRG ve KTS kaplı KTS mikrokürelerinin SEM görüntüleri

3.2. IM yüklü mikrokürelerden ilacın salım çalışmaları

Mikrokürelerden IM salımına çapraz bağlayıcı TPP derişiminin ve mikrokürelerdeki IM içeriğinin etkisi incelenmiş ve sonuçlar Şekil 5.A ve 5.B’de gösterilmiştir.



Şekil 5. KRG ve KTS kaplı KTS mikrokürelerinden IM salımı üzerine TPP derişiminin (A) ve ilaç yüzdesinin (B) etkisi

Şekil 5.A incelendiğinde TPP derişiminin artması ile kürelerden ilaç salımı azalmaktadır. Salımın azalmasının, TPP derişiminin artması ile mikrokürelerdeki çapraz bağ yoğunluğunun artmasına ve buna bağlı olarak polimerik matrisin daha rijit bir ağ yapısı meydana getirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Polimerik matris daha sağlam bir ağ yapısı oluşturduğunda su moleküllerinin kürelerin içine difüzyonu azalmakta ve buna bağlı olarak ilaç moleküllerinin çözünerek kürelerden dışarı difüzyonu azalmaktadır. Benzer sonuçlar çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir [26].

Şekil 5.B incelendiğinde mikroküreler içindeki ilaç yüzdesinin artması ile salım 8 saat sonun da %100’den %76’ya belirgin bir şekilde azalmıştır. Düşük ilaç yüzdesinde sıvı moleküllerinin kürelerin içine difüzyonu kolay

olmaktadır ve buda kürelerden ilacın difüzyonunu hızlandırmaktadır. Benzer gözlemler de literatür de bulunmuştur [27].

3.3. Hazırlanan boş mikrokürelerin denge şişme derecelerinin belirlenmesi

Hazırlanan boş mikrokürelerin % denge şişme dereceleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Hazırlanan boş mikrokürelerin % denge şişme dereceleri

	HCl-KCl Tamponu	Fosfat Tamponu
Küre No	% Denge Şişme Derecesi	
6	1097,91	106,60
7	1009,70	96,50
8	922,32	92,54

Boş kürelerin şişme davranışları incelendiğinde pH 1,2'de şişme derecelerinin 7,4'e göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bunun, düşük pH'da iyonlaşmış olan amino gruplarının birbirini itmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sayede su molekülleri mikrokürelerin içine çok daha kolay difüzelebilmektedir. pH'nın artması ile beraber amino gruplarının protonunu kaybetmesine bağlı olarak su moleküllerinin kürelerin içine difüzyonu zorlaşmaktadır [28].

Boş kürelerin fosfat tamponundaki şişme değerleri salım verileri ile uyumluluk göstermektedir. Çapraz bağlayıcı derişiminin artması ile şişme değerleri azalmaktadır. Bunun çapraz bağlayıcı derişiminin artmasıyla polimerik malzemede ki çapraz bağ yoğunluğunun artmasına, çapraz bağlanmanın artmasıyla da polimerin hareketliliğinin azalmasına ve kürelerin yüzeyindeki porların daralmasına bağlı olarak suyun kürelerin içine difüzyonunun zorlaşmasından kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Benzer sonuçlar literatürde verilmiştir [29].

4. Sonuçlar

TPP ile çapraz bağlanmış geleneksel olarak hazırlanan kitosan mikrokürelerinin ard arda KRG ve KTS ile kaplanması ile KTS kürelerinin düşük pH'lara olan dayanıklılığı artmıştır. Mikrokürelerin içinde hapsedilen IM'nin kimyasal kararlılığını koruduğu FTIR ve DSC ölçümleri ile kanıtlanmıştır. SEM çalışmaları ile mikrokürelerin küresel şekilli oldukları, KRG ile kaplandıktan sonra pürüzlü bir yüzeye sahip oldukları ve ilaç miktarının artması ile IM kristallerinin kürelerin yüzeyinde biriktikleri gözlemlenmiştir. Kontrollü salım testleri çapraz bağlayıcı TPP ve ilaç miktarının artması ile ilaç salımının azaldığını göstermiştir. Bu şekilde hazırlanacak KTS mikrokürelerin kontrollü ilaç salım sistemi olarak kullanıma olasılıklarının önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2013/45 proje numarası ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Gürsoy AZ. Kontrollü Salım Sistemleri. İstanbul, Türkiye: Kontrollü Salım Sistemleri Derneği, 2002.
- [2] Roberts GAF. Structure of chitin and chitosan. In: Roberts GAF, editors, Chitin Chemistry. London: MacMillan, 1992. pp. 1–53.
- [3] Rha CK, Rodriguez-Sanchez D, Kienle-Sterzer C. Novel applications of chitosan. In: Colwell RR, Pariser ER, Sinskey AJ, editors. Biotechnology of Marine Polysaccharides. Washington: Hemisphere, 1984. pp. 284–311.
- [4] Struszczyk H, Wawro D, Niekraszewicz A. Biodegradability of chitosan fibres. In: Brine CJ, Sandford PA, Zikakis JP, editors. Advances in Chitin and Chitosan. Londra, İngiltere: Elsevier Applied Science, 1991. pp. 580–585
- [5] Roberts GAF. Solubility and solution behaviour of chitin and chitosan. In: Roberts GAF, editors. Chitin Chemistry. Londra, İngiltere: MacMillan, 1992. pp. 274–329.
- [6] Domard A, Cartier N. Glucosamine oligomers: 4.solid state-crystallization and sustained dissolution. Int J Biol Macromol 1992; 14: 100–106.
- [7] Sannan T, Kurita K, Iwakura Y. Studies on chitin, 2. Effect of deacetylation on solubility. Macromol Chem Phys 1976; 177: 3589– 3600.

- [8] Domínguez-Delgado CL, Rodríguez-Cruz IM, Fuentes-Prado E, Escobar-Chávez JJ, Vidal- Romero G, García-González L, Puente-Lee RI. Drug Carrier Systems Using Chitosan for Non Parenteral Routes. In: Gowder SJT, editor. *Pharmacology and Therapeutics*. Londra, İngiltere: Intech Open Limited, 2014. pp. 273-325
- [9] Berscht PC, Nies B, Liebendorfer A, Kreuter J. Incorporation of basic fibroblast growth factor into methylpyrrolidinone chitosan fleeces and determination of the in vitro release characteristics. *Biomaterials* 1994; 15: 593–600.
- [10] Ilium L. Chitosan and Its Use as a Pharmaceutical Excipient. *Pharm Res* 1998; 15: 1326–1331.
- [11] Dodane V, Vilivalam VD. Pharmaceutical applications of chitosan. *Pharm Sci Technol Today* 1998; 1, 246–253.
- [12] Coviello T, Matricardi P, Marianecci C, Alhaique F. Polysaccharide hydrogels for modified release formulations. *J Cont Rel* 2007; 119: 5–24.
- [13] Jiao G, Yu G, Zhang J, Ewart HS. Chemical structures and bioactivities of sulfated polysaccharides from marine algae. *Mar Drugs* 2011; 9: 196–223.
- [14] Campo VL, Kawano DF, Silva DB, Carvalho DI. Carrageenans: Biological properties, chemical modifications and structural analysis-A review. *Carbohydr Polym* 2009; 77: 167–180.
- [15] Nanaki S, Karavas E, Kalantzi L, Bikiaris D. Miscibility study of carrageenan blends and evaluation of their effectiveness as sustained release carriers. *Carbohydr Polym* 2010; 79: 1157–1167.
- [16] Necas J, Bartosikova L. Carrageenan: A review. *Vet Med Czech* 2013; 58: 187–205.
- [17] Tapiia C, Escobar Z, Costa E, Sapag-Hagar J, Valenzuela F, Basualto C, Gai MN, Yazdani-Pedram M. Comparative studies on polyelectrolyte complexes and mixtures of chitosan–alginate and chitosan–carrageenan as prolonged diltiazem clorhydrate release systems. *Eur J Pharm Biopharm* 2004; 57: 65–75.
- [18] Long J, Yu X, Xu E, Wu Z, Xu X, Jin Z, Jiao A. In situ synthesis of new magnetite chitosan/carrageenan nanocomposites by electrostatic interactions for protein delivery applications. *Carbohydr Polym* 2015; 131: 98–107.
- [19] Eis MJ, Watkins BM, Philip A, Welling RE. Nonsteroidal-induced benign strictures of the colon: a case report and review of the literature. *Am J Gastroenterol* 1998; 93, 120–121.
- [20] Bogdanova S, Bontcheva E, Avramova N. Phase characterization of indomethacin in adsorbates onto hydroxyethylcellulose. *Drug Dev Ind Pharm* 2007; 33: 900–906.
- [21] Jain AK. Solubilization of indomethacin using hydrotropes for aqueous injection. *Eur J Pharm Biopharm* 2008; 68: 701–714.
- [22] Piyakulawat P, Praphairaksit N, Chantarasiri N, Muangsin N. Preparation and evaluation of chitosan/carrageenan beads for controlled release of sodium diclofenac. *AAPS Pharm Sci Tech* 2007; 8(4), E1–E11.
- [23] Salgueiro AM, Daniel-da-Silva AL, Girão AV, Pinheiro PC, Trindade T. Unusual dye adsorption behavior of κ-carrageenan coated superparamagnetic nanoparticles. *Chem Eng J* 2013; 229, 276–284.
- [24] Angadi SC, Manjeshwar LS, Aminabhavi TM. Stearic acid-coated chitosan-based interpenetrating polymer network microspheres: controlled release characteristics. *Ind Eng Chem Res* 2011; 50, 4504–4514.
- [25] O'Brien M, McCauley J, Cohen E. Indomethacin. In: Florey K, editor, *Analytical Profiles of Drug Substances*. New York: Academic Press, 1984. pp. 211-238.
- [26] Işıklı N, İnal M, Kurşun F, Ercan G. pH responsive itaconic acid grafted alginate microspheres for the controlled release of nifedipine. *Carbohydr Polym* 2011; 84: 933–943.
- [27] Debrassi A, Bürger C, Rodrigues CA, Nedelko N, Waniewska AS, Dłuzewski P, Sobczak K, Greneche JM. Synthesis, characterization and in vitro drug release of magnetic N-benzyl-O-carboxymethylchitosan nanoparticles loaded with indomethacin. *Acta Biomater* 2011; 7, 3078–3085.
- [28] Qu X, Wirsén A, Albertsson AC. Novel pH-sensitive chitosan hydrogels: swelling behavior and states of water. *Polymer* 2000; 41: 4589–4598.
- [29] Iman M, Maji TK. Effect of crosslinker and nanoclay on starch and jute fabric based green nanocomposites. *Carbohydr Polym* 2012; 89, 290–297.

V-REP Robotik Simülatör ile Robot Kol Simülasyonu

Emin AĞRALI^{1*}, Mehmet ÇAVAS²

¹ Elektrik ve Enerji, Teknik Bilimler MYO, Muş Alparslan Üniversitesi, Muş, TÜRKİYE

² Mekatronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, TÜRKİYE

*¹ e.agrali@alparslan.edu.tr, ² mcavas@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 11/02/2020;

Kabul/Accepted: 23/07/2020)

Öz: Robotik sistemlerde gerçek zamanlı uygulamaların hatasız bir şekilde çalışabilmesi için tasarımı yapılan robot veya robotik sistemler bilgisayar ortamında simüle edilerek test edilmektedir. Bu durum farklı uygulamalar için olası ortaya çıkabilecek aksaklıkların giderilmesi açısından önemlidir. Bu kapsamda yapılan çalışmada, robotik sistemlerde kullanılan MATLAB ve V-REP simülatörü senkronize edilerek, V-REP simülatör bünyesinde bulunan ve referans alınan robot kol eklemleri yüklü ve yüksüz durumda PID kontrolör ile kontrol edilmiş, ileri kinematik ve ters kinematik yöntemlerle yol planlama, yörünge takibi ve konum belirlemesi yapılarak simüle edilmiştir. V-REP simülatör programı özellikle robotik sistemlerin bilgisayar ortamında gerçek zamanlı simüle edilmesini sağlayan önemli bir simülasyon programıdır. Bu program kullanılarak tasarlanan robot veya robotik sistemler simüle edilerek başka sistemler ile konfigüre edilebilmektedir. Ayrıca bu programın MATLAB ile senkronize çalışması da robotik sistemlerin simülasyonunda önemli avantajlar sağlamakta ve istenilen özelliklerde robot veya robotik sistemler tasarlanarak simüle edilmektedir. Bu çalışmada V-REP simülatör bünyesinde bulunan ABB IRB140 robot kol konfigüre edilerek yüklü ve yüksüz durumda robot kolun izleyeceği yörünge planlanarak konumlar belirlenmiş ve belirlenen konumlara göre yörünge takibi yapılarak MATLAB ile senkronize edilen robot kolun kontrol simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Robotik, V-REP, Kontrol, Simülasyon, PID

Robot Arm Simulation with V-REP Robotic Simulator

Abstract: Robotic or robotic systems designed for real-time applications to work flawlessly in robotic systems are simulated in a short time and cost-effectively in the computer environment. This is important for eliminating potential malfunctions for different applications. In this context, MATLAB and V-REP simulator used in robotic systems were synchronized. Robot arm joints were controlled using PID controller. The robot arm was simulated using planning, trajectory tracking with inverse kinematic methods. V-REP simulator program is an important program that enables real-time simulation of robotic systems in a computer environment. Robot or robotic systems designed using this program can be simulated and configured with other systems. In addition, synchronization of this program with MATLAB provides important advantages in the simulation of robotic systems and robotic or robotic systems with desired features can be designed and simulated.

In this study, 7 DOF robot arms and ABB IRB140 robot arms are configured via the V-REP simulator. Later, the path to be followed by the robot arm was planned, the locations were determined, the path follow-up was performed according to the specified locations. Finally, the V-REP was synchronized with MATLAB and the simulation of robotic arm was performed.

Key words: Robotics, V-REP, Control, Simulation, PID

1. Giriş

Modern endüstriler başta olmak üzere malzemelerin taşınması, üretimi, montajı, tıbbi tedaviler, uzay araştırmaları vb. birçok alanda farklı işlemlerin yapılmasında farklı tip ve farklı model robot veya robotik sistemler kullanılmaktadır [1]. Teknolojik gelişmelere bağlı olarak endüstriyel otomasyonun gelişimi ile birlikte robotik sistemler hayatımıza girmiş ve üretimin her aşamasında kullanılır hale gelmiştir [2]. Robotik sistemlerin tasarımı, modellenmesi ve üretimi, bilgisayar, elektronik, mekanik, kontrol sistemleri vb. alanları içeren disiplinler arası çalışmaların ürünü olarak görülmektedir. Bu kapsamda farklı alanlarda farklı uygulamalar için geliştirilen robotik sistemlerin laboratuvar ortamında yapılan deneyleri dikkate alındığında bazı problemleri beraberinde getirdiği de görülmektedir. Bu problemlerin aşılabilmesi için geliştirilen robotik simülatörler robotik sistemlerin tasarımı, modellenmesi ve üretimi için gerekli testlerin sanal ortamda yapılmasını sağlamakla birlikte aynı zamanda robotik eğitimi için de önemli avantajlar sunmaktadır [3]. Geliştirilen bu simülatörler, robotik sistemlerin araştırılmasında, yeni stratejilerin ve algoritmaların hızlı ve etkin bir şekilde geliştirilmesinde, test edilmesinde vb. birçok süreçte önemli bir rol oynamaktadırlar [4]. Bu simülatörlerin sahip olduğu çeşitli kinematik, fizik ve grafik kütüphanelerindeki elementler kullanılarak tasarımın yapıp simüle edilmesinin yanı sıra mimarlık ve kontrol

* Sorumlu yazar: e.agrali@alparslan.edu.tr Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-0513-402X, ² 0000-0002-0130-1644

metodolojisi açısından da bu elementlerin nasıl etkileşime gireceği ve tasarlanan sistemin performansı ile doğruluğunun ne olacağının belirlenmesinde de önem arz etmektedirler [5]. Simülâtörlerin teorik olarak tasarlanmış bir robot veya robotik sistemin sanal bir ortamda görsel olarak gerekli testlerinin yapılması için uygun bir ortam sağlamalarından dolayı günümüzde Gazebo [6], Webots [7], V-REP vb. çok sayıda robot simülâtörü geliştirilmiştir. Bu platformlar içerisinde V-REP (Sanal Robot Simüle Platformu) simülâtörünün daha kısa bir süre içerisinde 3B simülasyonunu oluşturması, her sahne nesnesi ve hepsi aynı anda çalışan dişli veya dişli olmayan bir biçimde eklenmiş gömülü bir komut dosyasına sahip olması, sanal bir dünya oluşturmak ve çalışma zamanında etkileşimde bulunmak için çok sayıda örnek robotik model ile beraber sensörler ve aktüatörlere sahip olması [8] vb. özelliklerinden dolayı bu çalışmada tercih edilmiştir. V-REP simülâtör ve MATLAB (matrix laboratory) gerçek zamanlı uygulamalardaki kullanımlara da imkân sunmaktadır. Robotik Sistemlerde simülasyon yapılan sistemin gerçek zamanlı uygulamaları için geliştirilen robotik platformu olan Robot İşletim Sistemi (ROS) kullanılmaktadır. ROS robot yazılımı yazmak için esnek bir çerçevedir. Çok çeşitli robotik platformlarda karmaşık ve sağlam robot davranışı yaratma görevini basitleştirmeyi amaçlayan araçlar, kütüphaneler ve sözleşmeler koleksiyonudur. MATLAB ve V-REP'in, ROS ile bağlantı sağlayan bir alt yapısı bulunmak ile birlikte literatürde birçok çalışmanın yapıldığı da görülmektedir [9-10].

Günümüzde V-REP simülâtör ve MATLAB tabanlı Robotik sistemlerle ilgili birçok çalışmanın yapıldığı, ancak çoğu çalışmaların sistem entegrasyonu, sistem iyileştirme, sistem geliştirme vb. amaçlar kapsamında olduğu görülmektedir. Robot kol tasarımı ve modellenmesi ile ilgili çok fazla çalışmanın yapılmadığı görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, V-REP ve MATLAB'ın senkronizasyonu ile gerçekleştirilen çok amaçlı robotik manipülâtör kontrolünde sanal bir platform oluşturulmuş, V-REP ve MATLAB ile önerilen planın geçerliliğini ve uygulanabilirliğini göstermek için V-REP'in ana noktaları, manipülâtör eklemlerinin özellikleri, gömülü komut dosyalarının komut dosyası türleri ve V-REP'in uzak API (Application Programming Interface) dahil olmak üzere bütün tanıtlar yapılarak referans alınan robot konfigüre edilerek simüle edilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada MATLAB ve V-REP robot simülâtörü senkronize edilerek PID kontrolör ile robot kolun eklemleri kontrol edilmiş, ileri ve ters kinematik yöntemler kullanılarak yol planlama, yörünge takibi ve konum belirleme işlemleri yapılarak V-REP ABB IRB140 robot kol simüle edilmiştir. Çalışmada, kendi sanal platformumuzu oluşturmak için kullanılan V-REP'in genel görünüşü Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. V-REP simülâtörün genel görünüşü ve farklı tip robot modelleri.

2.1. İleri ve Ters Kinematik

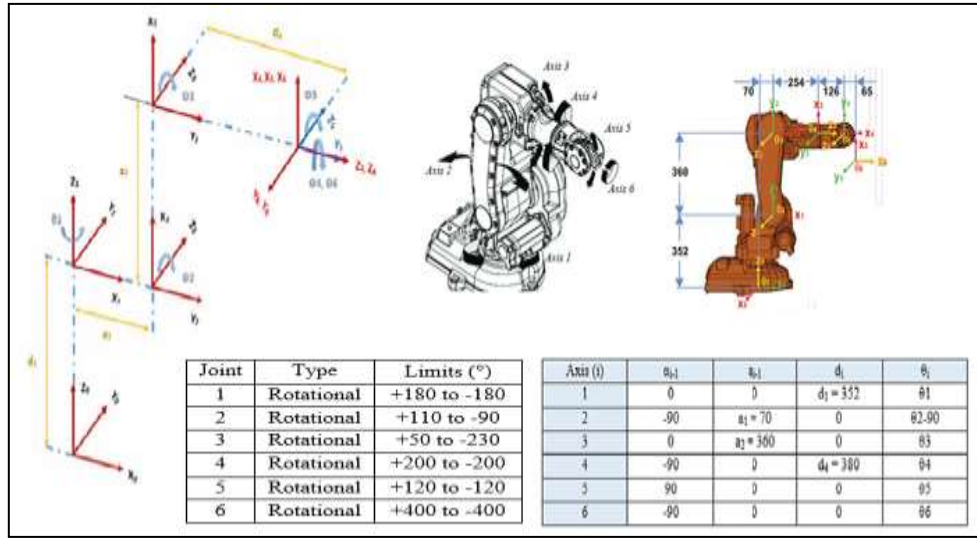
Robot kolun kinematiği, çalışma uzayında matematiksel ifadeler ile konum vektörü ve yönelim matrisinden faydalanılarak nesnelerin konumu ve yönelimi belirlenmektedir. Bunun için üç boyutlu uzayda bir robot kolunun ucuna bağlı bir tutucunun yönelimini ve konumunu tanımlamak için, o robot kolunun merkezine koordinat sistemi yerleştirilmekte ve bu koordinat sistemi sayesinde robot kolu ve bileşenleri arasında bir yönelim ile konum ilişkisi tanımlanarak robot kolun hız, ivme ya da kuvvet analizleri yapılmaktadır [11].

Robot kolun kinematiği merkez nokta ile eklemler ve uç işlevci arasındaki ilişkiyi tanımlarken her bir eklemler kinematik ilişkisi ile kendinden önceki ya da sonraki ekleme göre konumunu ifade etmektedir. Bu durum robot

kolunun konum ve yönelim bilgisi içeren 4x4 dönüşüm matrisleri ile gösterilmektedir. Bu nedenle her bir ekleme bir dönüşüm matrisine sahip olmasından dolayı dönüşüm matrislerinin sayısı robot kolunun serbestlik derecesi ile doğru orantılı olmaktadır. Bu şekilde kullanılan ileri kinematik ile bir robot koluna hedef açı değerleri verilerek robot kol o açı değerlerine ulaştığında aynı zamanda uç noktanın hangi koordinatlarda olacağı bilgisine de ulaşılmış olacaktır ki robot kolun merkezi nokta ile uç nokta arasındaki ilişkiyi elde etmesine ileri kinematik denilmektedir. Ters kinematik ise, robot koluna hedef bir son nokta verildiğinde, robot kolun o noktaya gidebilmesi için o hedef noktanın koordinatlarını kullanarak eklemlerin açılarını hesaplaması olarak ifade edilmektedir [12].

2.2. İleri kinematik ile tork kontrolü

İleri kinematik ile tork kontrolünde D-H (Denavit-Hartenberg) yöntemi kullanılmıştır. D-H parametreleri robotik alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. D-H parametreleri kullanılarak uç efektörün dönüşü ve pozisyon vektörleri bulunabilmektedir. Seri kinematik zincirdeki her bir ekleme bir koordinat çerçevesi atanarak D-H değişkenleri bulunmaktadır [13]. Referans alınan ABB IRB140 robotunun kinematik yapısı, çerçeve atamaları, DH tablosu ve eklemlerin hareket açı limitleri Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. Referans alınan ABB IRB140 robotunun kinematik yapısı, çerçeve atamaları, DH tablosu ve hareket açı limitleri [13-14].

Oluşturulan D-H parametre tablosundan yararlanılarak Denklem 1 de verilen genel rotasyon matrisi her bir ekleme uygulanmış ve bu denklemler Denklem 2, Denklem 3, Denklem 4 ‘de verilmiştir.

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & \alpha_{i-1} \\ \sin(\theta_i)\cos(\alpha_{i-1}) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1})d_i \\ \sin(\theta_i)\sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\theta_i)\sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1})d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & \alpha_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_2) & -\cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & \alpha_2 \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ -\sin(\theta_4) & -\cos(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & -\sin(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(\theta_5) & \cos(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^5_6T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_6) & -\sin(\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_6) & -\cos(\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Denklem 5’de dönüşüm matrislerinin çarpımı ile işlevcisinin konumu ve yönelimini içeren ve eklem değişkenlerinin birer fonksiyonu olan genel bir dönüşüm matrisi elde edilmiştir.

$${}^0_6T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Kinematik hesaplamalar MATLAB programında yapıldıktan sonra V-REP programıyla da simülasyon yapılmaktadır. Burada V-REP simülatör programı simüle edilen sistemin harici bir uygulamadan kontrol edilmesini sağlayan uzak bir API sunmaktadır. V-REP uzak API’si MATLAB programından çağrılabilir ve yaklaşık yüz fonksiyondan oluşmaktadır [15]. Bu şekilde MATLAB ve V-REP simülatörü senkronize edilerek referans alınan birçok model üzerinden çeşitli simülasyonlar da yapılabilmektedir [16]. Bu çalışmada ilkönce V-REP simülatörde referans model manipülatör alınarak gerekli konfigürasyonlar yapılmış ve daha sonra MATLAB ile V-REP simülatörün iletişimini sağlayan ve manipülatörün referans konumlarını belirleyen program oluşturularak MATLAB üzerinden V-REP simülatörü ile ABB IRB140 manipülatörün ileri kinematik yönteminde belirlenen referans açıları hedef konumlara ulaşması sağlanmıştır. Burada eklemlerin ileri kinematik yöntemi kullanılarak tork kontrolünün gerçekleştirilmesi için tork modunda ayarlanması gerekmektedir. Daha sonra robot kolun her bir linki için dinamik modun pasif edilmesi gerekmektedir. Yukarıda belirtilen işlemler tamamlandıktan sonra MATLAB ile V-REP programı arasındaki iletişimi sağlayacak bir çalışma klasörü oluşturularak bu klasöre MATLAB ile V-REP bağlantısını sağlayan V-REP uzak API dosyaları kopyalanarak iletişim sağlanmıştır. Bu işlemler tamamlandıktan sonra robot kolun ileri kinematik yöntem ile tork kontrolünü sağlayacak program kodları MATLAB’ta yazılmış olup bu kodlar Şekil 3’de görülmektedir.

```
clear all
close all
clc
a1=70;a2=360;d1=352;d4=380;
vrep=remApi('remoteApi'); %prototip dosyasını kullanma (remoteApiProto.m)
vrep.simxFinish(-1); % Her ihtimale karşı, tüm açılmış bağlantıları kapatmak
clientID=vrep.simxStart('127.0.0.1',19999,true,true,5000,5);

if (clientID>-1)
    disp('Uzak API sunucusuna bağlandı');
    % eklem açılarını oluşturma

    teta1=input('Birinci eklem açısını giriniz= ');
    teta2=input('İkinci eklem açısını giriniz= ');
    teta3=input('Üçüncü eklem açısını giriniz= ');
    teta4=input('Dördüncü eklem açısını giriniz= ');
    teta5=input('Beşinci eklem açısını giriniz= ');
    teta6=input('Altıncı eklem açısını giriniz= ');
    %MATLAB İTİLERİ KİNEMATİK HESAPLAMA %%%%%%%%%%
    T01=[cosd(teta1) -sind(teta1) 0 0;...
        sind(teta1) cosd(teta1) 0 0;...
        0 0 1 d1;...
        0 0 0 1];
    T12=[cosd(teta2-90) -sind(teta2-90) 0 a1;...
        0 0 1 0;...
        -sind(teta2-90) -cosd(teta2-90) 0 0;...
        0 0 0 1];
    T23=[cosd(teta3) -sind(teta3) 0 a2;...
        sind(teta3) cosd(teta3) 0 0;...
        0 0 1 0;...
        0 0 0 1];
    T34=[cosd(teta4) -sind(teta4) 0 0;...
        0 0 1 d4;...
        -sind(teta4) -cosd(teta4) 0 0;...
        0 0 0 1];
    T45=[cosd(teta5) -sind(teta5) 0 0;...
        0 0 -1 0;...
        sind(teta5) cosd(teta5) 0 0;...
        0 0 0 1];
    T56=[cosd(teta6) -sind(teta6) 0 0;...
        0 0 1 0;...
        -sind(teta6) -cosd(teta6) 1 0;...
        0 0 0 1];
    T06=T01*T12*T23*T34*T45*T56;
    Px=T06(1,4);
    Py=T06(2,4);
    Pz=T06(3,4);
```



```

%% %% %% %% %% V-REP İLERİ KİNEMATİK HESAPLAMA %% %% %% %% %% %% %% %%
teta1=teta1*(pi / 180);teta2=teta2*(pi / 180);teta3=teta3*(pi / 180);
teta4=teta4*(pi / 180);teta5=teta5*(pi / 180);teta6=teta6*(pi / 180);
eklem_acilar1=[teta1 teta2 teta3 teta4 teta5 teta6];
% eklemler
h=[0 0 0 0 0 0];
[r,h(1)]=vrep.simxGetObjectHandle( clientID,'base_joint1',vrep.simx_opmode_blocking);
[r,h(2)]=vrep.simxGetObjectHandle( clientID,'joint2',vrep.simx_opmode_blocking);
[r,h(3)]=vrep.simxGetObjectHandle( clientID,'joint3',vrep.simx_opmode_blocking);
[r,h(4)]=vrep.simxGetObjectHandle( clientID,'joint4',vrep.simx_opmode_blocking);
[r,h(5)]=vrep.simxGetObjectHandle( clientID,'joint5',vrep.simx_opmode_blocking);
[r,h(6)]=vrep.simxGetObjectHandle( clientID,'joint6',vrep.simx_opmode_blocking);
while true
    for i=1:1:6
        vrep.simxSetJointTargetPosition( clientID,h(i), eklem_acilar1(i),vrep.simx_opmode_streaming)
        and
        pause(2);
    end
    vrep.simxSetJointTargetPosition( clientID,h(1), eklem_acilar1(1),vrep.simx_opmode_streaming)
    vrep.simxSetJointTargetPosition( clientID,h(2), eklem_acilar1(2),vrep.simx_opmode_streaming)
    vrep.simxSetJointTargetPosition( clientID,h(3), eklem_acilar1(3),vrep.simx_opmode_streaming)
    vrep.simxSetJointTargetPosition( clientID,h(4), eklem_acilar1(4),vrep.simx_opmode_streaming)
    vrep.simxSetJointTargetPosition( clientID,h(5), eklem_acilar1(5),vrep.simx_opmode_streaming)
    vrep.simxSetJointTargetPosition( clientID,h(6), eklem_acilar1(6),vrep.simx_opmode_streaming)
else
    disp('Uzak API sunucusuna bağlanılamadı');
end
vrep.delete();
disp('Program sona erdi');

```

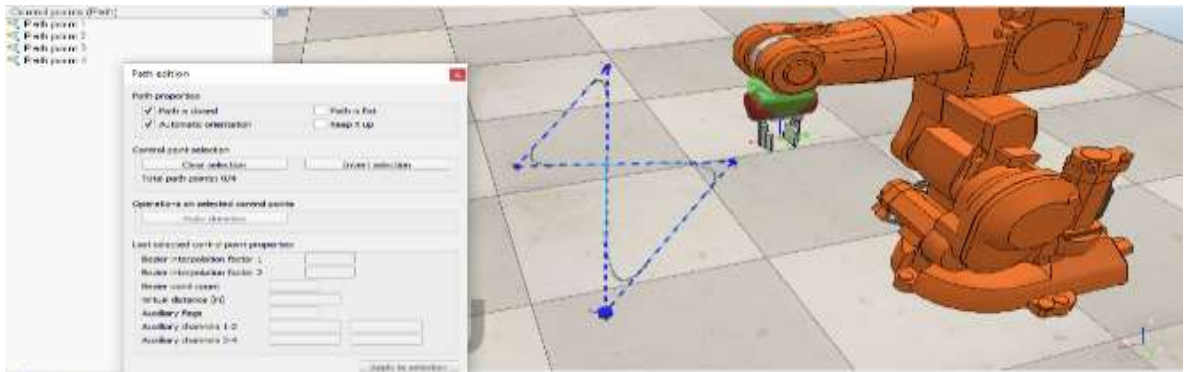
Şekil 3. MATLAB ileri kinematik hesaplama program kodları.

Bu işlemler tamamlandıktan sonra ileri kinematik ile yapılan tork kontrolünde PID kontrolör kullanılarak istenilen referans konumlara daha yakın bir değere ulaşmasını sağlamak için robot eklemlerinin her birinin PID kontrolörü aktif hale getirilmiştir. Burada robot kolun eklemlerinin hareketini sağlamak için motor modu aktif edilmiş ve eklemin maksimum torku ile PID kontrolörün parametreleri birlikte belirlenmiştir.

2.3. Ters kinematik ile yörünge kontrolü

V-REP simülâtörün ters kinematik (İK) hesaplama modülü çok güçlü ve esnek bir yapıya sahip olup hemen hemen her türlü mekanizmanın ters kinematik modunda (İK modu) veya ileri kinematik modunda (FK modu) kullanılmasına imkan sunmaktadır [17]. Bu modül sayesinde bir elemanın belirli bir pozisyona karşılık gelen eklem değerleri bulunmakta ve aynı zamanda görev alanı koordinatlarından ortak uzay koordinatlarına dönüşüm sağlanmaktadır [18]. Bu çalışmada V-REP simülâtör bünyesinde bulunan ABB IRB140 robot kolun ters kinematik yöntem ile belirlenen referans notalarından oluşturulan yörüngeyi takip etmesi için V-REP'in içerisindeki ters kinematik mod aktif edilerek hareketi sağlanmıştır.

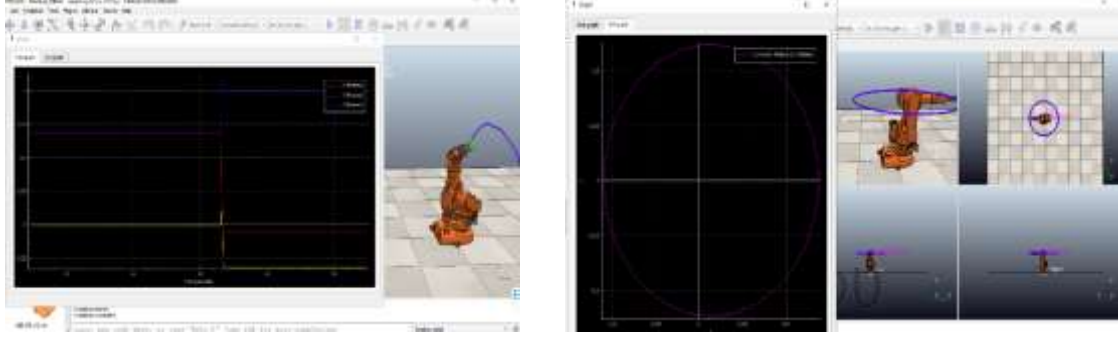
Robot kolun ters kinematik modu aktif edildikten sonra robot kolun uzuvlarına etki eden iç ve dış kuvvetlerin etkisini ortadan kaldırmak için robotu oluşturan her bir uzvun dinamik modu pasif edilmelidir. Robotun dinamik modu pasif, ters kinematik modu ise aktif edildikten sonra robot kolun referans yörünge modeli yörünge noktalarının konumları birbiriyle ilişkilendirilerek oluşturulmaktadır. Yörüngeyi oluşturan noktalar ardışıl bir bağlantı ile açık veya kapalı bir yol şeklinde tamamlanmaktadır. Bu durum Şekil 4'de gösterilmiştir. Bu işlemlerden sonra robot kolun belirlenen referans yörüngeyi ters kinematik yöntem ile takip edebilmesi için uç manipülâtörün merkezine referans hareket noktası ile hedef nokta yerleştirilerek yazılan kod ile birlikte robot kolun hareketi sağlanmaktadır.



Şekil 4. V-REP simülâtörde ters kinematik modun aktif edilmesi ve referans yörünge modeli.

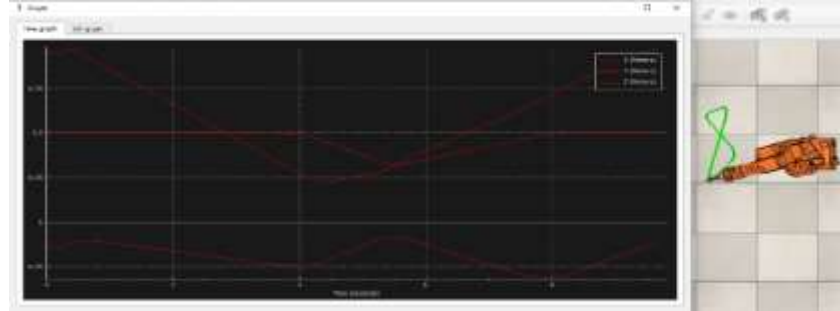
3. Bulgular

Bu çalışmada MATLAB ve V-REP simülâtör arasında iletişim sağlanarak robot kol simülasyonu gerçekleştirilmiş ve MATLAB ortamından girilen açı değerlerine göre robot kolun uç işlevcisinin hedef açı değerlerine göre hangi koordinatlarda olduğu bilgisine ulaşılmıştır. MATLAB programında girilen farklı açı değerlerine göre robotun uç efektörünün farklı konum ve açı değerlerine göre hareket grafikleri Şekil 5'te görülmektedir.



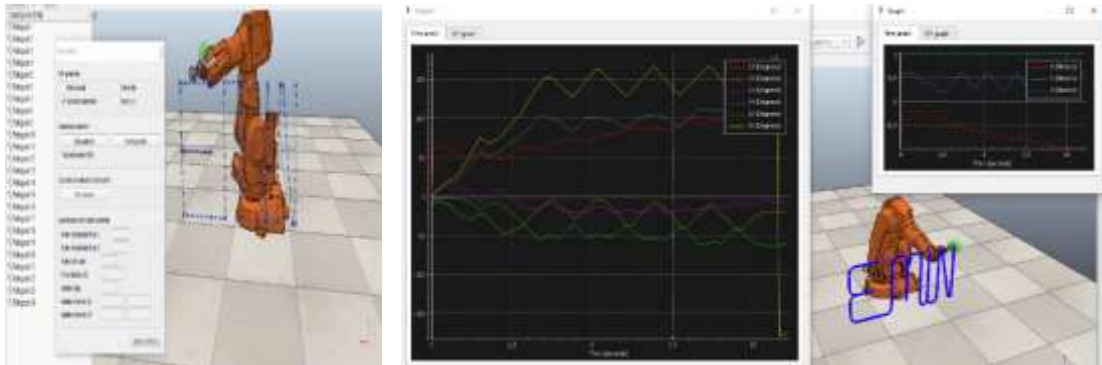
Şekil 5. MATLAB ortamında girilen farklı açı değerlerine göre V-REP simülâtörde robotun uç efektörünün konumu ve eklemlerin açı grafikleri

Ayrıca ABB IRB140 robot kolun ters kinematik yöntemle belirlenen referans yörüngeyi takip ederek hareket etmesi sağlanmış ve bu durum Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Robot kolun ters kinematik yöntemle belirlenen referans yörüngeyi takibi.

Öte yandan ters kinematik yöntem kullanılarak alfabetik karakterler ile bir yörünge oluşturulmuş ve robot kolun bu yörüngeyi takip etmesi sağlanarak elde edilen sonuçlar Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Robot kolun alfabetik yörüngeyi takibi sonucu eklemlerin hareket açı değerlerinin grafikleri.

ABB IRB140 manipulatörün ileri kinematik yöntemle, yüklü durumdaki tork kontrolü simülasyonu için manipulatöre 2 kg ağırlığındaki dikdörtgen biçiminde bir yük bağlanmış ve parametre düzenlemesi yapılmıştır. Bu durum Şekil 8’de görülmektedir.



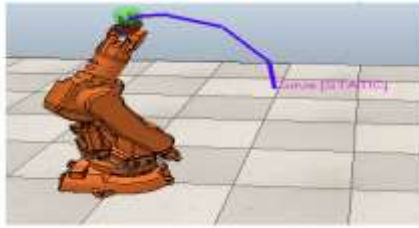
Şekil 8. Manipulatöre bağlanan 2 kg yük ve parametre ayarlaması.

ABB IRB140 manipulatörün ileri kinematik yöntem ile yüklü durumdaki tork kontrolü ve yüksüz durumdaki tork kontrolünde meydana gelen değişimleri tespit etmek için V-REP simülator ve MATLAB ile yapılan simülasyon sonucu elde edilen koordinatlar Tablo 1’de görülmektedir.

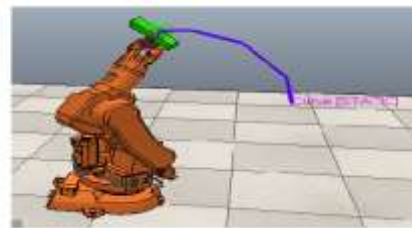
Tablo 1. ABB IRB140 manipulatörün yüklü ve yüksüz durumunda elde edilen koordinatlar.

Yüklü			Yüksüz			Fark		
X (Meters)	Y (Meters)	Z (Meters)	X (Meters)	Y (Meters)	Z (Meters)	X (Meters)	Y (Meters)	Z (Meters)
0,686980	-0,006158	0,7094	0,687030	-0,006157	0,709339	0,000050	0,000001	-0,000061
0,686987	-0,006158	0,709386	0,687041	-0,006157	0,709327	0,000054	0,000001	-0,000059
0,687011	-0,006158	0,709373	0,687067	-0,006156	0,709313	0,000056	0,000002	-0,000060
0,687015	-0,006157	0,709359	0,687073	-0,006155	0,7093	0,000058	0,000002	-0,000059
0,687026	-0,006156	0,709345	0,687086	-0,006155	0,709286	0,000060	0,000001	-0,000059
0,687030	-0,006156	0,709332	0,687092	-0,006154	0,709272	0,000062	0,000002	-0,000060
0,687048	-0,006155	0,709322	0,687112	-0,006153	0,709259	0,000064	0,000002	-0,000063
0,687058	-0,006154	0,709312	0,687124	-0,006152	0,709245	0,000066	0,000002	-0,000067
0,687067	-0,006153	0,709302	0,687134	-0,006152	0,709231	0,000067	0,000001	-0,000071
0,687077	-0,006153	0,709292	0,687147	-0,006151	0,709217	0,000070	0,000002	-0,000075
0,201583	-0,027486	1,093983	0,201684	-0,027269	1,093548	-0,000101	-0,002452	-0,000435
0,201604	-0,028489	1,093562	0,201684	-0,027345	1,093548	0,000080	0,001144	-0,000014
0,201701	-0,028771	1,094862	0,202703	-0,027493	1,094788	0,000102	0,001278	-0,000074

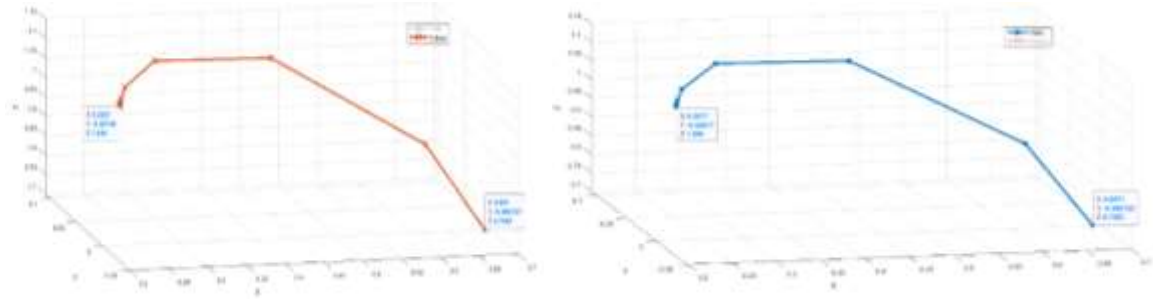
Ayrıca V-REP simülator ile yapılan simülasyon görüntüleri ve MATLAB grafikleri Şekil 9’da görülmektedir.



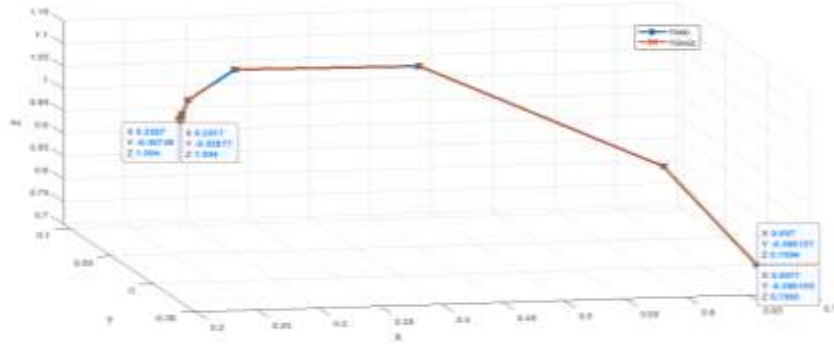
a)



V-REP Robotik Simülâtör ile Robot Kol Simülasyonu



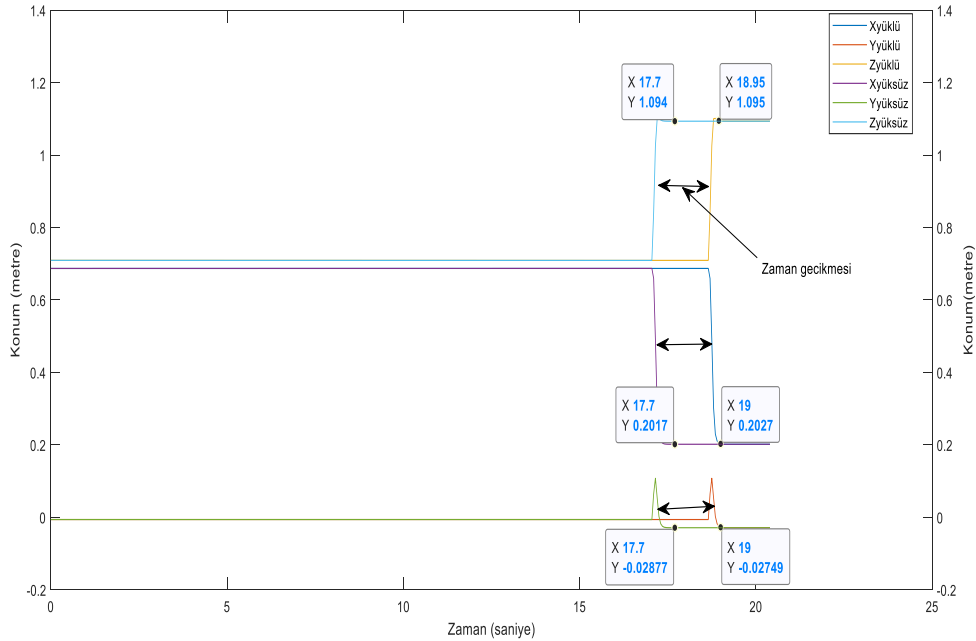
b)



c)

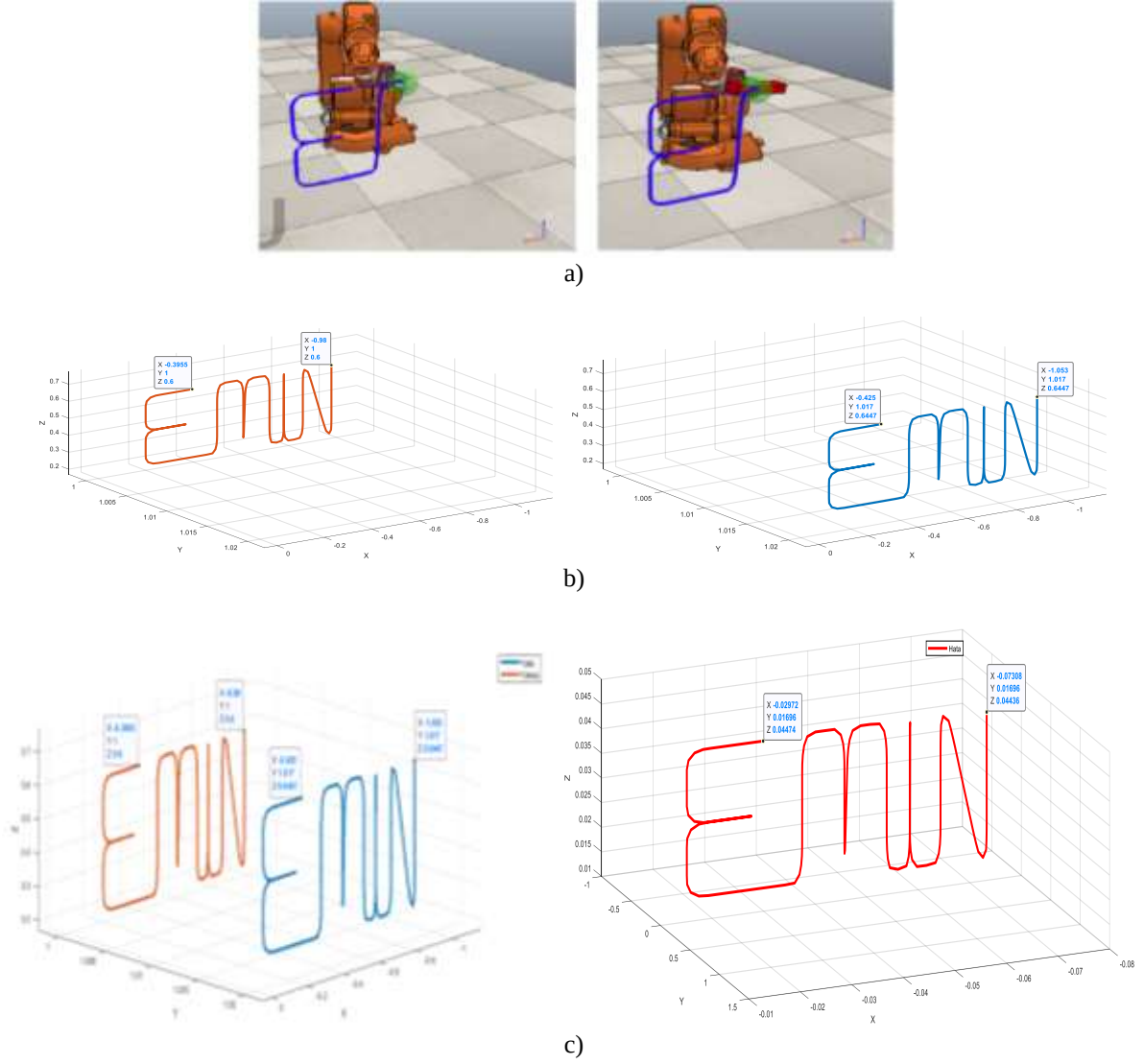
Şekil 9. MATLAB ortamında girilen farklı açı değerlerine göre; a) V-REP simülâtörde robot kolun yüklü ve yüksüz durumdaki konumu, b-c) MATLAB programında elde edilen konum grafikleri.

Uç manipülâtörün yüklü durumunun yüksüz duruma göre konumunun koordinatlarını oluşturan MATLAB grafiği Şekil 10'de görülmektedir.



Şekil 10. Manipülâtörün yüklü durumunun yüksüz duruma göre konumunun MATLAB grafiği.

ABB IRB140 manipülâtörün ters kinematik yöntemle yörünge kontrolünün yüklü ve yüksüz durumlarda analizini yapmak için V-REP manipülâtör ile simülasyon yapılmış ve MATLAB ortamında grafikler elde edilmiştir. V-REP simülasyon görüntüleri ve MATLAB grafikleri Şekil 11'de görülmektedir.



Şekil 11. Robot kolun, a) alfabetik yörüngeyi yüklü ve yüksüz durumlardaki takibi simülasyonu b) alfabetik yörünge grafikleri c) yörünge hatası

4. Sonuç

Bu çalışmada MATLAB ve V-REP simülator arasındaki iletişim sağlanarak ABB IRB140 robot kol ileri ve ters kinematik yöntemler kullanılarak PID kontrolör ile tork ve yörünge kontrolü simüle edilmiştir. İleri kinematik yöntemle tork kontrolünde yüksüz durumda MATLAB programından girilen açı değerlerine göre başarılı bir kontrol sağlandığı Şekil 5’de görülmektedir. Ayrıca manipülatör, şekil 9-a-b ve c’de görüldüğü gibi yüklü ve yüksüz durumları simüle edilmiştir. Bu simülasyon sonuçlarında Tablo 1’de, Şekil 9-c’de ve Şekil 10’da görüldüğü gibi hata oranının çok düşük olduğu görülmektedir. Şekil 10’da yüklü durumun yüksüz duruma göre 1.3 saniyelik bir zaman gecikmesinin ve uç efektör konumunun X-Y-Z eksenlerinde yaklaşık 10 mm’lik bir sapma gerçekleştiği görülmektedir. Çalışmanın diğer bir amacı olan, ABB IRB140 manipülatörün ters kinematik yöntemle yörünge takibi başarılı bir şekilde yapıldığı Şekil 7’de görülmektedir. Ters kinematik yöntemle yörünge kontrolünde yüklü ve yüksüz durumlar için simülasyon başarılı bir şekilde yapıldığı Şekil 11-a’da görülmektedir. Burada yine yüklü durumun yüksüz duruma göre X eksenindeki konumunda ortalama 32 mm, Y eksenindeki konumunda 17 mm, Z eksenindeki konumunda ortalama 44 mm sapma gerçekleştiği şekil 11-b-c’de görülmektedir.

Simülasyon sonucunda elde edilen veriler değerlendirildiğinde MATLAB ve V-REP simülâtör arasındaki iletişimin başarılı bir şekilde yapıldığı, yüklü ve yüksüz durumlara göre robot kolun simülasyonu yapılmış ve robot kolun ileri ve ters kinematik yöntemlerle tork ve yörünge kontrolü PID kontrolör ile düşük bir sapmayla başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ve alınan sonuçlar değerlendirildiğinde V-REP simülâtör ve MATLAB programı kullanılarak farklı robot veya robotik sistemlerin tasarlanabileceği gibi mevcut robotik sistemlerin yeni sistemler için geliştirilebileceğini de göstermektedir.

Kaynaklar

- [1] He XJ, Chen YH. Haptic-aided robot path planning based on virtual tele-operation. J Robot and Comput Integr Manuf. 2009; 25, 792–803
- [2] Huang S, Wang M ve Zou Y. V-REP-based virtual platform on multi-pattern neural control of robotic manipulator. Chinese Control and Decision Conference. 2019; 1570-1575
- [3] Fabregas E, Farias G, Peralta E, Vargas H ve Dormido S. Teaching control in mobile robotics with V-REP and a Khepera IV library. In 2016 IEEE Conference on Control Applications. 2016; (pp. 821-826).
- [4] Koenig N & Howard A. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)(IEEE Cat. No. 04CH37566). 2004;(Vol. 3, pp. 2149-2154).
- [5] Peralta E, Fabregas E, Farias G, Vargas H ve Dormido S. Development of a Khepera IV Library for the V-REP Simulator. IFAC-PapersOnLine. 2016;49(6), 81-86.
- [6] Koenig N & Howard A. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. In 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No. 04CH37566). IEEE. 2004; (Vol. 3, pp. 2149-2154).
- [7] Michel O. Cyberbotics Ltd. Webots™: professional mobile robot simulation. International Journal of Advanced Robotic Systems.2004; 1(1), 5.
- [8] Rohmer E, Singh SP & Freese M. V-REP: A versatile and scalable robot simulation framework. International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE. 2013; (pp. 1321-1326).
- [9] Olivares-Mendez MA, Kannan S & Voos H. Setting up a testbed for UAV vision based control using V-REP & ROS: a case study on aerial visual inspection. In 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE.2014; (pp. 447-458).
- [10] Corke P. Integrating ros and matlab [ros topics]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2015;22(2), 18-20.
- [11] Kucuk S, Bingul Z. The inverse kinematics solutions of industrial robot manipulators. In Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics, ICM'04. IEEE. 2004;(pp. 274-279).
- [12] Zhao J, Yang F, Liu W, Liu F, Li F, Wang H & Zhang H. An Approximation Model Based on Kernel Ridge Regression for Robot Kinematics Simulation. 23rd International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design. IEEE. 2019; (pp. 313-318).
- [13] Arfaq M, Dewanto RS, & Pramadihanto D. Fall Detection in T-FLoW Humanoid Robot: V-REP Simulation. International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA). IEEE. 2018 ;(pp. 224-228).
- [14] Hidayatullah JF, Pramadihanto D, Dewanto RS & Khalilullah AS. Kinematic analysis of 7 DoF head humanoid FLoW: V-REP simulation. International Electronics Symposium (IES). IEEE, 2016 (pp. 13-18).
- [15] Azak S, Erdogan E. Performance evaluation of the grid-based FastSLAM in V-REP using MATLAB. 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering. IEEE. 2018; (pp. 276-281).
- [16] Tongtong L, Tao Y, Zelin Y, Shuxuan L ve Jianming L. Development of Hardware-in-Loop Simulation Platform for Collaborative Robots Based on LinuxCNC and V-rep. International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA) . IEEE. 2018; (pp. 1323-1328).
- [17] Gudla AG. A methodology to determine the functional workspace of a 6R robot using forward kinematics and geometrical methods.2012
- [18] Almagd M. Forward and inverse kinematic analysis and validation of the ABB IRB 140 industrial robot. Journal of Mechanical Engineering and Technology (JMET). 2017; 9(2), 1-20.

Öngerilmeli T Kesitli Köprü Kirişlerinin Seçimi ve Doğrusal Programlama ile Optimizasyonu

Berrin Nevra KATİ EKER^{1*}, Ömer KELEŞOĞLU², Sedat SAVAS³

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

³İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*berrinnevrakati@gmail.com, okelesoglu@hotmail.com, ssavas@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 15/01/2020;

Kabul/Accepted: 09/08/2020)

Öz: Bu makale kapsamında, Elazığ-Diyarbakır Devlet Yolu işi dahilinde bulunan 38 m açıklıklı Maden Viyadüğü tasarımı emniyet ve ekonomik açıdan değerlendirilmiş, öngerilmeli kiriş boyut optimizasyonu yapılmıştır. Bu doğrultuda Maden Viyadüğü'nün tüm hesap parametreleri, Ulaştırma Bakanlığı Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü tarafından yapılan hesap raporundan alınmıştır. Viyadükte kullanılmış olan öngerilmeli kirişler yerine optimum bir yapı elemanı kullanmak için AASHTO 8.1'den (American Association of State Highway and Transportation) altı farklı tip T kesitli kiriş alınmış ve bu kirişler arasındaki en emniyetli kiriş optimize edilmiştir. Kiriş seçimi için özel bir algoritma geliştirilmiş ve kiriş optimizasyonu yapılırken “doğrusal programlama” yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde gerilme, boyut ve maliyet kısıtlayıcıları kullanılmıştır. Elde edilen veriler hesap raporundaki sonuçlarla karşılaştırılmış ve AASHTO 8.1'den seçilen kiriş tipinin, mevcut yapıda kullanılan kiriş tipinden daha ekonomik ve emniyetli olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışma, bu kapsamdaki tasarımlarda optimizasyon tekniğinin pratik olarak kullanılmasının güvenlik ve ekonomik açıdan gerekliliğini açıklamaktadır.

Anahtar kelimeler: Doğrusal programlama, ms solver, optimizasyon, öngerilmeli kiriş, visual basic

Selection of Prestressed T Section Bridge Beams and Their Optimization with Linear Programming

Abstract: Within the scope of this article, the design of the 38 m span Maden Viaduct within Elazığ-Diyarbakır State Highway work was evaluated in terms of safety and economy and prestressed beam dimension optimization was performed. Accordingly, all account parameters of the Maden Viaduct are taken from the account report prepared by the 8th Regional Directorate of the Ministry of Transportation. Six types of T-section beams have been taken from AASHTO 8.1 (American Association of State Highway and Transportation) to use an optimum structural element instead of the prestressed beams used on the viaduct and the safest beam between these beams has been optimized. A special algorithm was developed for beam selection and “linear programming” method was used for beam optimization. Stress, size and cost constraints were used in this method. The data obtained were compared with the results in the account report and it was concluded that the type of beam chosen from AASHTO 8.1 was more economical and safer than the type of beam used in the present structure. The study explains the security and economic necessity of using the optimization technique practically in the designs in this scope.

Key words: Linear programming, ms solver, optimization, prestressed beam, visual basic

1. Giriş

Karar verme sürecinde çok farklı etken olmasına rağmen, inşaat mühendisliğinde yapıların ekonomik ve emniyetli olarak tasarlanması önemlidir. Genellikle yapısal optimizasyon ifadesi topoloji, boyut ve şekil parametrelerini temel almaktadır. Bu bağlamda Cohn ve Lounis (1994) betonarme köprü sistemlerinin optimum tasarımı üzerine çalışmışlar ve yapı maliyeti, gerekli ön germe donatısı ve beton miktarı gibi amaç fonksiyonlarını göz önüne almışlardır [1]. Ahsan, Rana ve Ghani (2012) çalışmasında, I en kesitli, ard çekimli beton köprü kirişlerini ele alarak maliyet optimizasyonu yapmışlardır [2].

Yapı tasarım optimizasyonu aşamasında çeşitli metodolojiler kullanılmaktadır. Örneğin; doğrusal programlama, ulaştırma modelleri, Leontief modeli, şebeke analizi, stok modelleri, oyun kuramı, bekleme hattı modelleri, dinamik programlama vb. gibi. İster sayısal analiz, ister yön-eylem araştırması adı altında olsun bütün model ve teknikler, aslında işletme sorunlarının matematik olarak programlanması ve çözülmesi anlamına gelmektedir. Tüm bu tekniklerle bulunan sonuçlar gerçeğe uygunluk derecelerinin araştırılması, gerekli kontrollerin yapılması, stratejilerinin saptanması ile tanımlanabilir ve bu süreç matematiksel programlama

* Sorumlu yazar: berrinnevrakati@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-4647-5568, ² 0000-0001-8967-5976, ³0000-0003-2466-3514

kapsamında değerlendirilir. Karar verme aşamasında problemleri sayısal verilerle ifade edebilen ve anlatımına en basit şekilde olanak sağlayan metotlardan biri doğrusal programlama yöntemidir. Seçme (2005)'ye göre, doğrusal programlama, belirli bir amacı maksimize ederek, sınırlı kaynakların nasıl kullanılması gerektiğine çözüm sunan bir karar verme aracıdır [3]. Doğrusal programlamanın temel konusu ise sınırlı kaynakların yarışan faaliyetler arasında optimum biçimde dağıtımını sağlamak olduğundan, bu teknik yapısal optimizasyonlarda sıkça kullanılmaktadır [4]. Bu yöntemde, amaçların önem derecesine göre sıralanması ve hedeflerin belirlenmesi gerekmekte ve amaçlarla tanımlanmış kısıtların önem sırasına göre hedeflerden sapmaları minimize edilmektedir [5].

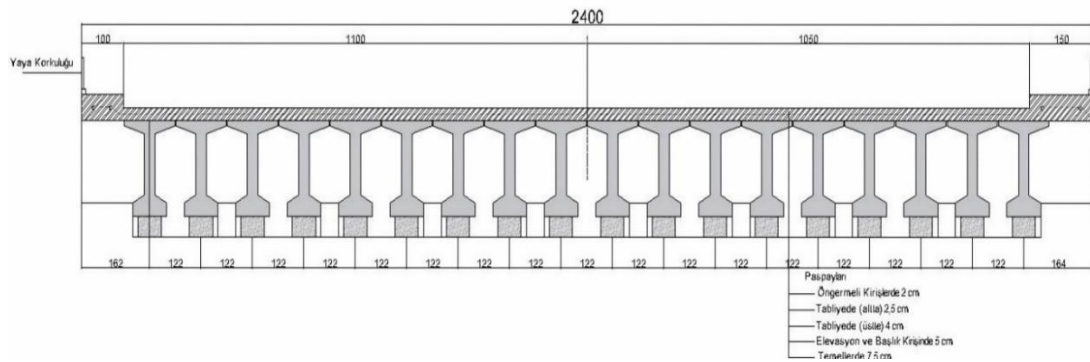
Hedef programlama ilk defa doğrusal hedef programlama olarak Charnes ve Cooper (1961) tarafından önerilmiştir [6]. George Dantzig'in geliştirmiş olduğu Simpleks Algoritması, işletme konusundaki problemlere uygulanmış ve bu alandaki uygulama bu yolla gerçekleştirilmiştir [7]. Simpleks algoritmasının gelişiminden bu yana, doğrusal programlama; bankacılık, eğitim, ormancılık, petrol ve taşımacılık gibi farklı alanlarda olduğu kadar endüstrilerde de optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmıştır [8]. Chen ve Wang (1997) Kanada'da faaliyet gösteren entegre bir çelik üretim işletmesinde, üretim ve dağıtım planlaması için doğrusal programlamayı kullanmışlardır [9]. Bu uygulamada doğrusal programlama yaklaşımıyla kurulan modelin çözümüyle, işletmeye büyük finansal fayda sağlamışlardır. Ergülen ve Gürbüz (2006), enerji ve inşaat sektöründe faaliyet gösteren betonarme aydınlatma direği üreten bir işletmede: üretim kapasitesi, kalıp sayısı, tonaj ve işgücü kısıtları altında kapasitenin maksimum kullanılmasını mümkün kılan bir doğrusal programlama modeli ile üretim planlamasını gerçekleştirmişlerdir [10].

Bu makale kapsamında, Elazığ ilinin Maden ilçesinde bulunan Maden Viyadüğü tasarımı için önerilmeli kirişlerin boyut optimizasyonu, doğrusal programlama yöntemi ile yapılmış olup, mevcut tasarımda kullanılan kiriş yerine daha ekonomik başka bir kiriş tipinin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla AASHTO 8.1'den yararlanılarak farklı altı tip T kesitli kiriş seçilmiş ve bunlardan hangi tipin kullanımının uygun olacağı belirlenmiştir. Kullanılacak tip seçimi yapılırken, tarafımızca hazırlanan özel bir algoritma ile gerçekleştirilmiştir. Kiriş seçimi yapıldıktan sonra seçilen kirişin boyut optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Boyut optimizasyonu yapılırken doğrusal programlama yöntemi kullanılmıştır. Doğrusal programlamanın bir gereği olarak belirlenmesi gereken tüm gerilme kısıtlayıcılar AASHTO 9.15'den alınmıştır. Ayrıca gerilme kısıtlayıcılarına ek olarak boyut kısıtlayıcıları da kullanılmıştır. Enkesit alanı en küçük kirişi kullanarak emniyetli bir çözüm amaçlanmıştır, böylece daha ekonomik bir yapı elde edilmiştir. Optimizasyon yapılırken genel amaçlı optimizasyon makrosu olan Solver kullanılmış olup, elde edilen bulgular önceki hesap raporlarıyla karşılaştırılmış ve mevcut tasarımdan daha güvenli ve ekonomik bir çözümlemenin optimizasyon metotları kullanılarak mümkün olduğu sonucuna varılmıştır.

2. Materyal ve Yöntemler

2.1. Maden Viyadüğü'nde kullanılan kirişlerin geometrik ve mukavemet özellikleri

Maden Viyadüğü'nde 108 adet 38 m uzunluğunda prefabrike kiriş kullanılmıştır. Maden Viyadüğüne ait enkesit tasarımı Şekil 1'de gösterilmiş olup sistem basit kiriş olarak tasarlanmıştır.



Şekil 1. Maden Viyadüğü'nün enkesit tasarımı

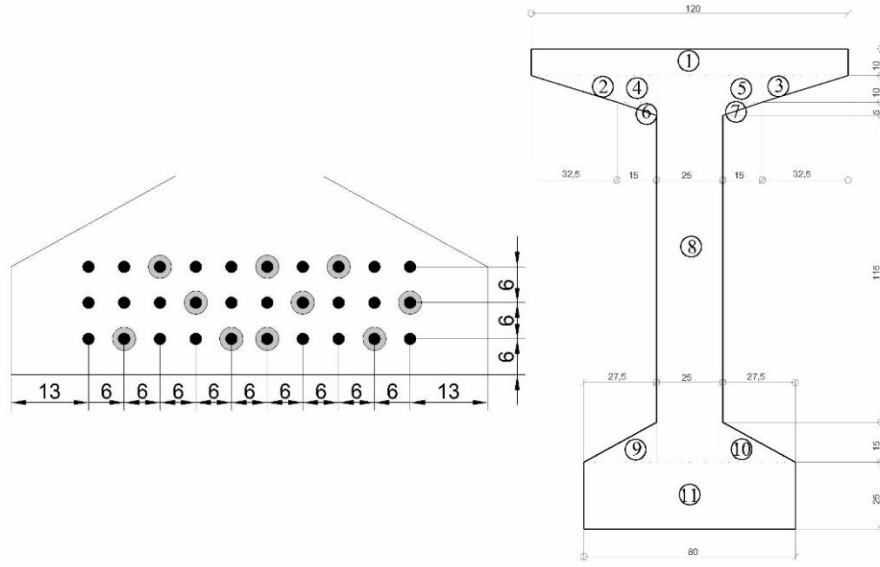
Maden Viyadüğü'nün tasarımında kullanılan kirişlerin geometrik özellikleri ve kiriş en kesitinde ki öngerme halatları Şekil 2'de, kirişlere ait mukavemet özelliklerinin değerleri Tablo 1'de verilmiş olup, veriler Karayolları

genel Müdürlüğü'nün Maden Viyadüğü Hesap Raporu'ndan alınmıştır [11]. Y ile gösterilen değerler kirişin ağırlık merkezini, A ifadesi kirişin enkesit alanını, S mukavemet momentini ve I ise kirişlerin atalet momentlerini ifade etmektedir.

Tablo 1. Maden Viyadüğü 'nün tasarımında prefabrike ve kompozit kirişe ait mukavemet özellikleri

Mukavemet Özelliği	Y_{bb} (m)	Y_{bt} (m)	A_b (m ²)	I_{xb} (m ⁴)	S_{bb} (m ³)	S_{bt} (m ³)	X_{bb} (m)	I_{yb} (m ⁴)
Prefabrike	0,902493	0,897507	0,793750	0,327939	0,363370	0,365389	0,600000	0,035526
Kompozit	1,130079	0,919921	1,021000	0,513834	0,454689	0,767007	0,600000	0,051174

Tasarımda kullanılan 38m uzunluğundaki öngerilmeli kirişlerin geometrik özellikleri ve enkesiti Şekil 2.'de verilmiş olup, kirişlerde kullanılan öngerme halatları ve kılıflanan öngerme halatları gösterilmiştir.



Şekil 2. Maden Viyadüğü'nün tasarımında kullanılan kirişlerin geometrik özellikleri ve kiriş enkesitindeki öngerme halatları

2.2. Tasarım kirişinin malzeme özellikleri

Geometrik ve dayanım özellikleri bilinen köprü kirişinin optimizasyonu yapılırken hesaplamalarda kullanılacak değerleri belirlemek amacıyla kirişlerde kullanılan malzeme özelliklerinin bilinmesi gerekir. Tasarımda kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Tasarımda kullanılan malzeme özellikleri

Beton Özellikleri	
Prefabrike Kirişlerde	:C45 ($f_{ck} = 45 \text{ MPa}$)
Temellerde	:C25 ($f_{ck} = 25 \text{ MPa}$)
Döşemelerde	:C25 ($f_{ck} = 25 \text{ MPa}$)
Yaya Bordürlerinde	:C25 ($f_{ck} = 25 \text{ MPa}$)
Grobeton	:C16 ($f_{ck} = 16 \text{ MPa}$)
Tabliyede	:C25 ($f_{ck} = 25 \text{ MPa}$)
Çelik Özellikleri	
Betonarme Çeliği	:S420
Öngerme Çeliği	: 0,6'' 270 K Düşük Gevşemeli ASTM A 416-80

2.3. Köprü tasarımına etki eden yükler

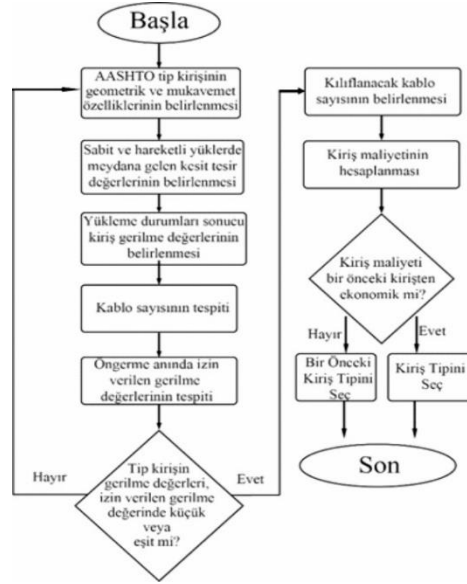
Bir köprü tasarımında üstyapı elemanlarına etkiyen yüklerin öncelikli olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmaya konu olan yükler, sabit ve hareketli yükler kapsamında ele alınmış olup Tablo 3’de sunulmuştur. İlave yük olarak ilave zati kiriş ağırlığı, korkuluk ve yaya yükleri alınmış olup, hareketli yük olarak kullanılan H30-S24 kamyon yükü ise 1,20 m tork aralığına ve 79,855 kN dingil ağırlığına sahiptir.

Tablo 3. Hareketli ve sabit yük parametreleri

Hareketli Yükler	
Standart kamyon yükü	H30 – S24
Sabit Yükler	
Kiriş zati ağırlığı	$G_k = 15,794 \text{ kN/m}$
Asfalt + tecrit	$G_a = 1,684 \text{ kN/m}$
İlave yükler	$G_l = 0,250 \text{ kN/m}$
Toplam yükler	$G_T = 1,934 \text{ kN/m}$

2.4. Köprüde kullanılacak öngerilmeli kiriş seçimi

Maden Viyadüğü ’nün tasarımında kullanılan öngerilmeli T kesitli kirişlere alternatif olarak kullanılacak kirişleri belirlemek amacıyla AASHTO 8.1’den T kesitli altı tip kiriş seçilmiştir. Kiriş seçimi yapılırken özel olarak geliştirilen yazılım kullanılmıştır. Tip kirişlerinin seçimleri için yazılan algoritmanın akış şeması Şekil 3’de verilmektedir.



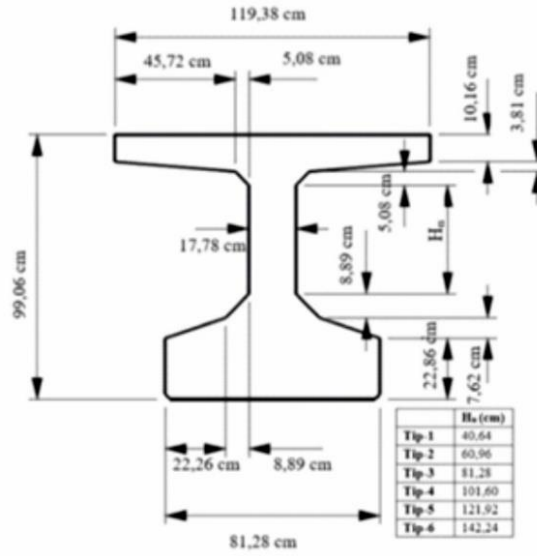
Şekil 3. Kiriş seçimi için geliştirilen algoritmanın akış şeması

Kiriş seçimi yapılmadan önce öncelikle kullanılması planlanan kiriş tiplerinin kullanıma uygun olup olmadığı değerlendirilmiştir. Bu çalışma gerçekleştirilirken ASSHTO 8.1’den farklı geometrik boyutlara sahip T kesitli kiriş tipleri arasından seçim yapılmıştır. Öncelikle her kiriş tipinin mukavemet özellikleri teker teker belirlenmiş ve her bir kiriş için kiriş zati yüklerinden meydana gelen sabit yük parametrelerine göre kesit tesir değerleri hesaplanmıştır. Hareketli ve sabit yüklerden dolayı meydana gelen gerilme değerlerine bakılarak kirişlerde kullanılması gereken öngerilmeli halat adedi belirlemiştir. Halat sayısının tespitiyle ön germe anında izin verilen gerilme değerleri hesaplanmıştır. Yapılan bu hesaplamalar sonucunda sınır değerlerini aşmayan üç tip kiriş olduğu görülmüştür. Fakat köprü tasarımında tek tip kiriş kullanılacağı için ekstra bir seçim parametresi oluşturmaya gerek duyulmuştur.

Seçimi uygun olan kirişler arasında en iyi seçimi yapabilmek amacıyla, kirişlerin hangisinin kullanımının daha ekonomik olduğuna bakılmaya karar verilmiştir. Bu amaçla öncelikle kirişte kılıflanması gereken öngerilmeli halat adetleri hesaplanmıştır. Ve maliyet hesabı çıkarılmıştır. Hesaplama sonucunda en ekonomik ve emniyetli tarafta kalan kiriş tipinin seçilmesine karar verilmiştir. Bu çalışmada seçilen kiriş tipi Tip-5 olarak belirlenmiştir.

2.5. AASHTO tip kirişlerin mukavemet özellikleri

Kiriş seçimi yapılırken ilk adım olarak tip kirişlerin mukavemet özelliklerini belirlemek uygun olacağından bu amaçla her tipin geometrisi incelenmiştir. Şekil 4’de AASHTO tip kirişlerinin geometrik özellikleri görülmektedir [12]. Kirişlerin zati ağırlıkları altında meydana gelen gerilme değerleri ve öngerilmeli kirişlerde kullanılması gereken ön germe halat adedinin belirlenmesi amacıyla gerekli olan kiriş mukavemet değerleri Tablo 4’de sunulmuştur. Bu değerler ayrıca ön germe anında izin verilen gerilme değerlerini hesaplamak için de kullanılmıştır.



Şekil 4. AASHTO 8.1 Tip kirişlerinin geometrik özellikleri

Tablo 4. AASHTO Tip kirişlerinin mukavemet özellikleri

	Tip-1	Tip-2	Tip-3	Tip-4	Tip-5	Tip-6	Birim
Y_{bb}	0,476761	0,568588	0,661678	0,755800	0,850777	0,946470	m
Y_{bt}	0,513839	0,625212	0,735322	0,844400	0,952523	1,060130	m
A_b	0,487257	0,523386	0,559515	0,595644	0,631773	0,667902	m ²
I_{xb}	0,061742	0,099631	0,148239	0,208327	0,280654	0,365973	m ⁴
S_{bb}	0,129502	0,175226	0,224035	0,275638	0,329879	0,386672	m ³
S_{bt}	0,120157	0,159356	0,201598	0,246716	0,294611	0,345216	m ³
X_{bb}	0,596900	0,596900	0,596900	0,596900	0,596900	0,596900	m
I_{yb}	0,028302	0,028397	0,028492	0,028588	0,028683	0,028778	m ⁴

2.6. ASSHTO tip kirişlerine etki eden kiriş zati yükleri

Kullanılan kiriş tipi değiştirildiği zaman hareketli yükler sabit kalırken, sabit yüklerin değişkenlik göstermesinden dolayı kiriş zati ağırlığı da tiplere göre değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmada her tip kiriş için kullanılan betonun özellikleri benzer olarak alınmıştır. AASHTO 8.1. tip kirişlerde meydana gelen sabit yüklerin gösterdiği bu değişkenlik kirişlerin alt ve üst liflerinde meydana gelen gerilme değerlerini değiştirmektedir. Kiriş tiplerinden dolayı meydana gelen kiriş zati ağırlıkları Tablo 5’de sunulmuştur.

Tablo 5. AASHTO 8.1 tip kirişlerinden meydana gelen kiriş zati ağırlıkları

Kiriş tipleri	Tip-1	Tip-2	Tip-3	Tip-4	Tip-5	Tip-6
G_k (kN/m)	12,181	13,085	13,988	14,891	15,794	16,698

2.7. ASSHTO 8.1 tip kirişlerinde meydana gelen kesit tesir değerleri

Kirişlere etki eden hareketli ve sabit yüklerden dolayı her bir kirişte farklı kiriş tesir kuvvetleri meydana gelmektedir. Mesnetlenme ekseninde ve kiriş ortasında meydana gelen kesme ve moment değerleri belirlenmiştir. Bu çalışmada kiriş ortasındaki maksimum moment değerleri bir değişken olarak kullanılmıştır. Her tip kiriş için hesaplanan açıklık ortası moment değerleri Tablo 6’da sunulmuştur.

Tablo 6. AASHTO tip kirişlerde meydana gelen açıklık ortası maksimum moment değerleri

	Tip-1	Tip-2	Tip-3	Tip-4	Tip-5	Tip-6
M_1 (kNm)	2198,18	2361,32	2524,27	2687,23	2850,19	3013,32
M_2 (kNm)	1375,70	1375,70	1375,70	375,70	1375,70	1375,70
M_3 (kNm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M_4 (kNm)	348,93	348,93	348,93	348,93	348,93	348,93
M_H (kNm)	1993,04	1993,04	1993,04	1993,04	1993,04	1993,04

2.8. Doğrusal programlamanın matematiksel yapısı

Doğrusal programlama modeli değişkenler arasındaki ilişkilerin doğrusal olduğu varsayımına dayanmaktadır. Bu varsayım, bütün ilişkilerin birinci dereceden fonksiyonlar ile ifade edilmesinden kaynaklanır [13]. Doğrusallık varsayımı aslında temel olarak orantılı olma ve katkı olmak üzere iki özellik ile ilgilidir [14]. Orantılı olma özelliği, her bir karar değişkeninin gerek amaç fonksiyonuna gerekse de tüm kısıtlara etkisinin, söz konusu değişkenin değeriyle doğru orantılı olması gerektiğini ifade etmektedir. Kısıtlardaki ve amaç fonksiyonundaki tüm değişkenlerin toplam katkısının bu değişkenlerin bireysel katkılarının toplamından oluşması şartına dayanır [4].

Doğrusal programlama modelinin dayandığı bir diğer varsayıma göre ise her bir amacın sonsuz derecede bölünebilir olmasıdır. Bu varsayım çerçevesinde, karar değişkenleri tamsayı değerlerin yanında kesirli değerler de alabilmektedir ve kısıt kaynakları kesirli miktarlarda kullanılabilir [14]. Doğrusal programlamanın üç önemli bileşeni vardır. Bunlar;

- Amaç fonksiyonu
- Sınırlayıcı fonksiyonlar
- Pozitif sınırlama [15].

Amaç fonksiyonu; kontrol edilebilir değişkenler x_j ($j=1,2,3,...,n$) ve sabit katsayılarından oluşan bir ifadedir. Amaç fonksiyonu maksimizasyon, minimizasyon veya belirli bir değere eşitleme şeklinde olur [16]. Amaç fonksiyonu Z olmak üzere, $Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$ olarak gösterilebilir. Sınırlayıcı fonksiyonlar; karar oluşturma sürecinde, kararımızı sınırlayan dış veya iç etkenlerin matematiksel ifadesidir [16]. Sınırlayıcı fonksiyonlar karar oluşturulacak probleme göre farklılık göstermekte olup, deplasman sınırlayıcıları, boyut sınırlayıcıları, gerilme sınırlayıcıları vb. olabilirler. Sınırlayıcı fonksiyonlar maksimizasyon problemlerinde; $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i$ ($i = 1,2,3,...,n$), minimizasyon problemlerinde ise; $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i$ ($i = 1,2,3,...,n$) fonksiyonlarıyla ifade edilebilir. Üretim, maliyet, alan, ağırlık, kuvvet, boyut vb. değişkenler negatif olmayacağından karar değişkenleri pozitifdir. Pozitif sınırlamanın gösterimi ise, $x_j \geq 0$, $j = 1,2,3,...,n$ şeklindedir.

3. Bulgular

3.1. AAASHTO 8.1. tip kirişlerde meydana gelen toplam gerilme değerleri

Kirişlerde meydana gelen gerilme değerlerini elde edebilmek amacıyla üç yükleme durumu ele alınmış olup, bunlardan birinci yükleme durumunda kirişin zati ağırlığı altında, kirişin ortasında alt ve üst liflerde meydana gelen aşağıda sunulan gerilme ifadeleri kullanılmıştır.

$$\sigma_{b1} = (M_1 + M_2 + M_3) / S_{bb} \quad (1)$$

$$\sigma_{t1} = (M_1 + M_2 + M_3) / S_{bt} \quad (2)$$

İkinci durumda ise ilave yüklerin etkisiyle meydana gelen gerilme durumlarını yansıtan aşağıdaki ifadeler temel alınmıştır.

$$\sigma_{b2} = M_4 / S_{cb} \quad (3)$$

$$\sigma_{t2} = M_4 / S_{ct} \quad (4)$$

Üçüncü durumda ise hareketli yükler altında kesitte meydana gelen gerilme değerleri göz önüne alınmıştır.

$$\sigma_{b4} = M_H / S_{cb} \quad (5)$$

$$\sigma_{t4} = M_H / S_{ct} \quad (6)$$

Burada;

M_1 : kiriş zati ağırlığından meydana gelen kesit tesir momenti,

M_2 : tabliye ağırlığından meydana gelen kesit tesir momenti,

M_3 : enleme kiriş ağırlığından meydana gelen kesit tesir momenti,

M_4 : kompozit kesitte ilave yüklerden meydana gelen kesit tesir momenti

M_H : standart kamyon yükünden meydana gelen kesit tesir momenti olarak gösterilmiştir. Kullanılan tüm moment değerleri, açıklık ortasında meydana gelen moment değerleridir. Kirişlerde meydana gelen toplam gerilme ise

$$\sigma_{bp} = \sigma_{b1} + \sigma_{b2} + \sigma_{b4} - 3341 \text{ kN/m}^2 \quad (7)$$

$$\sigma_{tp} = \sigma_{t1} + \sigma_{t2} + \sigma_{t4} - 1409 \text{ kN/m}^2 \quad (8)$$

Formülleri ile hesaplanmıştır. Bu ifadelerdeki “-3341 kN/m²” ve “-1409 kN/m²” değerleri servis aşamasında kirişin alt ve üst liflerinde izin verilen öngerme gerilme değerleri olarak tanımlanmıştır. Bu değerler Tablo 7’de sunulmuştur.

Tablo 7. AASHTO 8.1. Tip Kirişlerin Alt Ve Üst Liflerinde Meydana Gelen Öngerme Gerilme Değerleri

	Tip-1	Tip-2	Tip-3	Tip-4	Tip-5	Tip-6
$\sigma_{bp} \text{ (kN/m}^2\text{)}$	36880,1	27801,1	26708,5	17986,8	15062,3	12838,7
$\sigma_{tp} \text{ (kN/m}^2\text{)}$	-19704,9	-16226,9	-19168,4	-12300,9	-11083,4	-10137,8

3.2. AASHTO 8.1 tip kirişlerde kullanılan halat sayıları

Optimizasyon sürecinde kiriş seçiminde, öngerme anında izin verilen emniyet gerilme değerleri ile birlikte, kullanılacak olan ön germe halat sayısı da göz önünde bulundurulmuştur. Kullanılan halat sayısını belirlemek kayıplardan sonra etkili ön germe kuvvetini (P_{se}) tespit etmekle mümkündür. P_{se} aşağıdaki ifadeden elde edilir;

$$\sigma_{bp} = (P_{se} / A_b) + (P_{se} \times e / S_{bb}) \quad (9)$$

Burada e halat eksantirisitesini ifade etmektedir. Kullanılacak halat sayısını belirlemek amacıyla kayıplardan sonra etkili öngerme kuvvet değerinin, bir halat için bütün kayıplardan sonra izin verilen öngerme kuvvetine oranı alınmıştır. Buna göre her tip için gerekli öngerme halat adet değeri Tablo 8’de sunulmuştur. Kirişlerde kullanılan halat maliyeti toplam maliyetin neredeyse %45~50’sini teşkil etmektedir.

Tablo 8. Tip kirişlerde kullanılacak halat adedi

	Tip-1	Tip-2	Tip-3	Tip-4	Tip-5	Tip-6
N' (Adet)	45	39	39	27	24	21

3.3. Öngerme anında izin verilen gerilme değerlerinin tespiti

Optimizasyon için seçilecek olan kiriş tipini belirlemek amacıyla iki aşama gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada öncelikle olarak izin verilen gerilme değerleri aşağıdaki ifadeleri temel almaktadır;

•Açıklık ortasında kiriş üstünde;

$$\sigma_t(0,5L) = (P_i / A_b) - (P_i \times e_p / S_{bt}) + (M_1 / S_{bt}) \leq 0,6 \times f_{ci} \quad (10)$$

•Açıklık ortasında kiriş altında;

$$\sigma_b(0,5L) = (P_i / A_b) + (P_i \times e_p / S_{bb}) + (M_1 / S_{bb}) \leq 0,6 \times f_{ci} \quad (11)$$

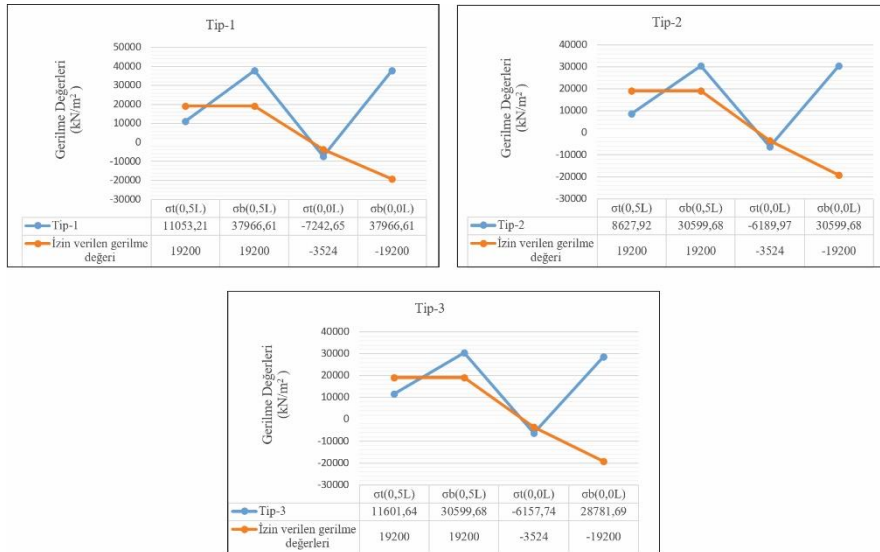
•Mesnetlenme ekseninde kiriş üstünde;

$$\sigma_t(0,0L) = (P_i / A_b) - (P_i \times e_p / S_{bt}) \leq 0,623 \times \sqrt{f_{ci}} \quad (12)$$

•Mesnetlenme ekseninde kiriş altında;

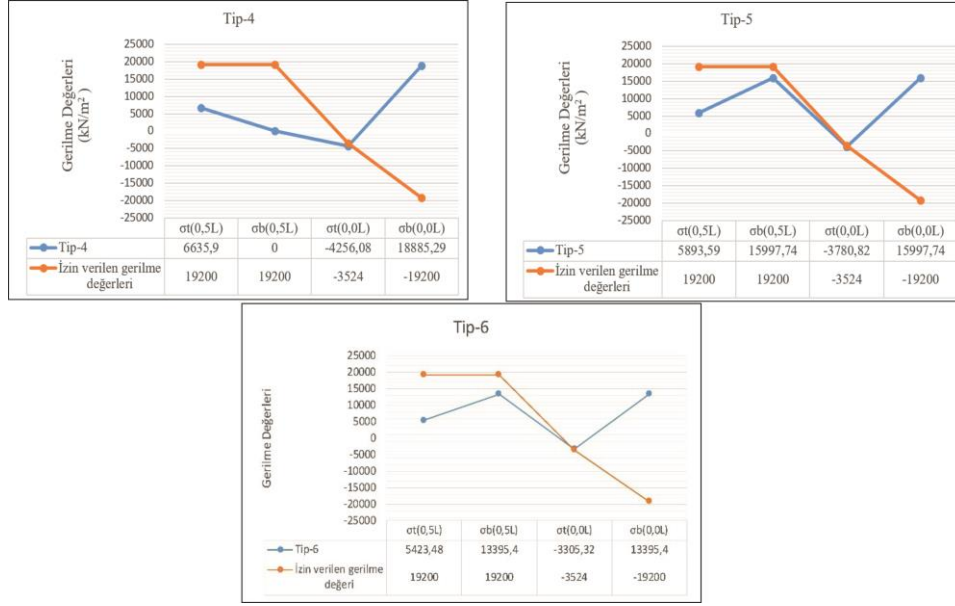
$$\sigma_b(0,0L) = (P_i / A_b) + (P_i \times e_p / S_{bb}) \leq 0,6 \times f_{ci} \quad (13)$$

Tip-1 Tip-2 ve Tip-3 için elde edilen gerilme değerleri ve izin verilen gerilme değerleri Şekil 5’de verilmiştir. Şekil 5’de Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 gerilme değer grafiklerinde görüldüğü gibi kirişlerin açıklık ortasında ve mesnetlenme ekseninde meydana gelen gerilme değerleri, izin verilen gerilme değerlerini aşmıştır. Eğer gerilme değerleri sınırlayıcı değerleri aşar ise, bu bölgelerde kılıflamaya gerek duyulur. Bu durum maliyeti arttırmakta olup, ekonomiden uzak bir tasarım anlamına gelecektir. Bu sebeple bu üç tipin seçilmesinin uygun olmadığı açıkça görülmektedir.



Şekil 5. Tip-1 ve Tip-2 için elde edilen gerilme değerleri ve izin verilen gerilme değerleri

Tip-4, Tip-5 ve Tip-6 için meydana gelen gerilme değerleri Şekil 6'da sunulmuştur. Elde edilen bu veriler temel alındığında gerilme değerleri, izin verilen sınır gerilme durumlarını sadece mesnetlenme ekseninde, kiriş üstünde aşmaktadır. Bu durumlar için kılıflama yapmak gerekli olacağı açıktır. Fakat yapılacak olan kılıflama adedi her bir kiriş için meydana gelecek maliyeti değiştirmektedir. Bu çalışmada maliyet hesabı yapılırken, her kiriş için kullanılan toplam beton hacimi, kullanılan toplam öngerme halatı sayısı ve kılıflanması gereken öngerme halat adedi göz önüne alınmıştır. Tüm bu maliyet hesaplarına göre Tip-5 kirişinin seçimi uygun görülmüştür.

**Şekil 6.** Tip-4, Tip-5 ve Tip-6 için elde edilen gerilme değerleri ve izin verilen gerilme değerleri

3.4. Tip-5 kirişinin optimizasyonu

Tip-5 öngerilmeli kirişinin boyut optimizasyonunu gerçekleştirmek açısından, amaç fonksiyonu, kompozit kirişe ait minimum alan ifadesi olarak aşağıdaki gibi seçilmiştir.

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n A_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

Sınırlayıcı fonksiyonlar ilk ön germe anındaki beton gerilme sınırlayıcıları, kılıflamadan sonra ilk ön germe anındaki beton gerilme sınırlayıcıları, kılıflamadan sonra kritik kesitlerde ilk germe halinde beton gerilme sınırlayıcıları ve tüm kayıplardan sonra beton gerilmeleri olarak aşağıda ifade edildiği gibi belirlenmiştir.

• Açıklık ortasında kiriş üstünde;

$$\sigma_t(0,5L) = (P_i / A_b) - (P_i \times e_p / S_{bt}) + (M_1 / S_{bt}) \leq 0,6 \times f_{ci} \quad (15)$$

• Açıklık ortasında kiriş altında;

$$\sigma_b(0,5L) = (P_i / A_b) + (P_i \times e_p / S_{bb}) + (M_1 / S_{bb}) \leq 0,6 \times f_{ci} \quad (16)$$

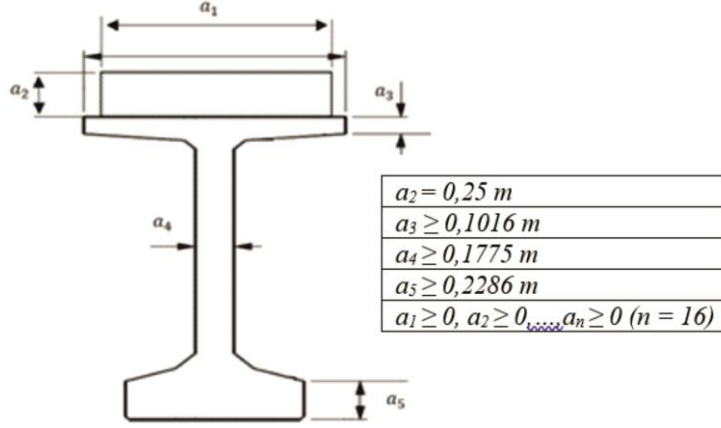
• Mesnetlenme ekseninde kiriş üstünde;

$$\sigma_t(0,0L) = (P_i / A_b) - (P_i \times e_p / S_{bt}) \leq 0,623 \times \sqrt{f_{ci}} \quad (17)$$

•Mesnetlenme ekseninde kiriş altında;

$$\sigma_b (0,0L) = (P_i / A_b) + (P_i \times e_p / S_{bb}) \leq 0,6 \times f_{ci} \quad (18)$$

Kirişlere ait boyut isimlendirmeleri Şekil 6'daki gibi verilmiş olup boyut sınırlayıcıları aşağıdaki gibi ele alınmıştır. Bu durumda kompozit kirişte tabliye boyutları ve boyut değerleri negatif olamayacağı için kirişin tüm boyut ölçüleri aşağıda belirtildiği gibi pozitif sınırlamaya tabi tutulmuştur.



Şekil 7. Kiriş boyut isimlendirmeleri

Seçilen Tip-5 kirişinin boyut optimizasyonu yapılırken doğrusal programlama yönteminin karmaşık matematiksel yapısını daha kolay çözmek amacıyla Microsoft Excel'in Solver makrosu kullanılmıştır. Amaç fonksiyonları ve sınırlayıcıların kolayca kontrol edilme özelliğine sahip olan Solver makrosuna gerekli parametreler tanıtarak çözüme ulaşılmıştır. Optimizasyon işlemi sonucunda boyutlar gerekli gerilme sınırlayıcılarını aşmadan, minimize edilerek ekonomik boyutlar elde edilmiştir. Tip-5 kirişine ait optimize edilmiş mukavemet özellikleri Tablo 9'da sunulmuştur.

Tablo 9. Tasarımda kullanılan mevcut kiriş, Tip-5 kirişi ve optimize edilmiş kiriş mukavemet değerlerinin karşılaştırılması

	Mevcut Kiriş Değerleri	Tasarım Değerleri	Optimize Edilmiş Değerler	Birim
A_b	0,793739	0,631773	0,618294	m^2
Y_{bb}	0,902493	0,850777	0,828607	m
Y_{bt}	0,897507	0,952623	0,926201	m
I_{xb}	0,327939	0,280654	0,259422	m^4
X_{bb}	0,600000	0,596900	0,589430	m
I_{yb}	0,035526	0,028683	0,027630	m^4
S_{bb}	0,363370	0,329879	0,313082	m^3
S_{bt}	0,365389	0,294611	0,280093	m^3

4.Sonuç

Bu çalışmada Maden Viyadüğü'nde kullanılan kirişlerin yerine, boyutları daha ekonomik olarak seçilebilen kirişlerin kullanılabileceği sonucuna varılmıştır ve bu konu için özel bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmaya göre hareketli ve sabit yükler altında, belirli kesitteki tip kirişlerin seçimi yapılmıştır. Kiriş tip seçimi yapılırken, kirişlerin geometrik ve mukavemet özellikleri, kirişlere etkiyen hareketli-sabit yük parametreleri ve halat sayıları ile servis aşamasındaki izin verilen gerilme değerleri dikkate alınmıştır.

Doğrusal programlama yönteminin kiriş boyut optimizasyonunda kullanılabileceği görülmüştür. Burada optimizasyon için en elverişli kesitin Tip-5 olduğu sonucu çıkmaktadır (Tip-4 kirişi 'de ona oldukça yakındır.). Bu, bir anlamda optimizasyon tekniğini de doğrulaması bakımından ilginçtir. Doğrusal programlama ile yapılan

boyut optimizasyonu sonucunda Tip-5 kirişinin boyutları optimize edilmiştir. Seçimi yapılan optimize edilmiş Tip-5 kirişi ile viyadükte kullanılan kiriş boyutlarında en belirgin farklılığın gövde kalınlığında meydana geldiği görülmüştür. Elde edilen verilere göre gerilme ve boyut sınırlayıcıları kullanılarak aynı hareketli yükler ve hesap açıklığına sahip önerilmeli bir köprü kirişinin ekonomik bir şekilde tasarlanabileceği görülmüş olup pratik uygulamalarda hem kiriş seçiminde hem de boyut tespitinde optimum tasarımın kullanılabileceği görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Cohn MZ, Lounis Z. Optimal Design of Structural Concrete Bridge Systems. Journal of Structural Engineering. 1994;120(9):2653-74.
- [2] Ahsan R, Rana S, Ghani SN. Cost Optimum Design of Posttensioned I-Girder Bridge Using Global Optimization Algorithm. Journal of Structural Engineering. 2012;138(2):273-84.
- [3] Seçme NY. Klasik Doğrusal Programlama ve Bulanık Doğrusal Programlamanın Karşılaştırmalı Bir Analizi: Üretim Planlama Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kayseri, 2005.
- [4] Öztürk A. Yöneylem Araştırması, 10. Basım, Ankara: Ekin Kitapevi, Eylül 2005.
- [5] Turalı M ve Köse A. Doğrusal Hedef Programlama Yöntemi İle Türkiye'deki Sigorta Şirketlerinin Performans Değerlendirmesi. İstanbul Ticaret Üniversitesi Dergisi 2005; 7: 19-39.
- [6] Charnes A ve Chooper WW. Management Models and Industrial Application of Linear Programming Vol. 1. New York: John Wiley and Sons, 1967.
- [7] Metin S ve Türkoğlu İ. Doğrusal Programlama Yöntemleri Kullanılarak Küçük İşletmelerdeki Kar Paylarının Artırılması: Mert Cam Örneği. Munzur Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, ISSN: 2636-7815, 2018; 6(12) : 107-118.
- [8] Winston, Wayne L. Operations Research: Application and Algorithms Third Edition. California: International Thomson Publishing, 1994.
- [9] Chen M, Wang W. A Linear Programming for Integrated Steel Production and Distribution Planning. International Journal of Operations & Production Management 1997;17(6): 592-610.
- [10] Ergülen A, Gürbüz E. İnşaat ve Enerji Sektöründe Beton Direk Üretimi Planlamasına Örnek Bir Model Önerisi. Tam Sayılı Doğrusal Programlama. Yönetim ve Ekonomi Dergisi 2006; 13(1): 1-15.
- [11] KGM, 2014, Maden Viyadüğü Hesap Raporu Km: 73+500.00-75+700.00, Dosya No:1710, 113p
- [12] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO, "Standart Specifications for Highway Bridges", 17, 2002.
- [13] Özgüven C. Doğrusal Programlama Ve Uzantıları. Ankara: Detay Yayıncılık, 2003.
- [14] Taha HA. Yöneylem Araştırması, (Çev: Ş. Alp Baray, Ş. Esnaf). İstanbul: Literatür Yayıncılık, 2000.
- [15] Alan MA. ve Yeşilyurt, C. Doğrusal Programlama Problemleri'nin Excel İle Çözümü. C.Ü. İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi, 2012, 5(1): 151-162.
- [16] Eker BNK. Maden Viyadüğü'nün Öngerilmeli Prekast ve Kompozit T kesitli Köprü Kirişlerinin Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2018.

Sinirsel Bulanık Ağlarla Asenkron Motorların Algılayıcısız Denetimi

Cafer BAL^{1*}, Muammer GÖKBULUT², Fikret ATA³

¹Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ

²Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ

³Bingöl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bingöl
cbal@firat.edu.tr

(Geliş/Received:05/03/2020;

Kabul/Accepted: 30/07/2020)

Öz: Bu çalışmada, akım gözlemleyici olarak kullanılan sinirsel bulanık ağlarla asenkron motorun (ASM) algılayıcısız hız denetimi gerçekleştirilmiştir. Önerilen sinirsel bulanık akım gözlemleyici, akı ve hız tahmini yapmak yerine doğrudan denetleyici olarak kullanılmıştır. Sinirsel bulanık akım gözlemleyici, deneysel verilerle gerçek zamanlı eğitilmiş ve eğitilmiş ağ yapısı kullanarak farklı çalışma koşullarında denetim sisteminin başarımı test edilmiştir. Sinirsel bulanık ağın eğitimi ve denetim algoritması MATLAB/Simulink ortamında programlanmış ve DSPACE-DS1104 sayısal işaret işlemcisi (Sİİ) ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, değişkenlere gerçek zamanlı erişimi sağlayabilen Control Desk Developer yazılımı kullanılarak oluşturulan bir arayüzden elde edilmiştir. Farklı hız ve yük koşullarında elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlarla, önerilen algılayıcısız denetim yönteminin başarımı gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Asenkron motor, sinirsel bulanık ağlar, algılayıcısız denetim.

Speed Sensorless Control of Induction Motor Using Fuzzy-Neural Networks

Abstract: In this paper, a fuzzy neural network current observer is proposed for the sensorless speed control of induction motor. The proposed neural fuzzy current observer is used as a direct controller rather than flux and speed estimation. Fuzzy neural network current observer is trained online with the experimental data. Performance of the control system including the trained fuzzy neural network current observer is tested for various operating conditions of the motor. Training algorithm of fuzzy neural network and the control algorithm are prepared at the MATLAB/Simulink environment and it is implemented using the digital signal processor (DSP) dSPACE-DS1104. Experimental results are acquired from the developed interface using Control Desk Developer software which allows online access to the variables. The performance of proposed sensorless control method is verified with the simulation and experimental results under different speed and load conditions.

Keywords: Induction motor, fuzzy neural network, sensorless control.

1. Giriş

Güç elektroniği ve mikroişlemci teknolojilerindeki gelişmeler, ASM'lerin vektör denetimi veya doğrudan tork denetimi gibi etkin denetim algoritmalarının geliştirilmesine yol açmıştır. Vektör denetim yöntemi, motorun akı ve tork değişkenlerinin birbirinden bağımsız olarak denetlenmesine imkân vermektedir. ASM sürücülerinin vektör denetiminde doğru bir hız algılaması gereklidir ve ASM'ler doğrudan hızı ölçmek amacı ile kullanılabilecek hiçbir elektriksel stator değişkenine sahip değildir. Bu nedenle denetim algoritmalarında, rotor akı açısını tahmin etmek için bir hız veya konum algılayıcısına ihtiyaç duyulur. Mekanik kodlayıcılar genellikle motorun kendisinden daha az dayanıklı ve daha pahalıdır. Hız algılayıcısı bütün sürücü güvenilirliğini bozar, tamir veya bakımının zor olabileceği belirli ortamlarda kullanımını sınırlar. Bu sınırlamalar, algılayıcısız hız denetimi olarak bilinen ve ölçülebilen elektriksel veya mekaniksel büyüklüklerle dolaylı olarak akıdan motor hızını ya da konumunu gözlemlemeye amaçlayan çalışmalara yol açmıştır. Genellikle bu gözlemleyiciler, fiziksel sistem ile aynı girişleri alan ve ölçülen durumları izleyebilen, denetlenen sistemin gerçek zamanlı modelleridir. Algılayıcısız ASM sürücülerini için literatürde önerilen üç temel gözlemleyici algoritması vardır: Genişletilmiş Kalman Filtre (GKF) ile rotor hız ve durum tahmincileri, Model Referans Uyarlamalı Sistem (MRUS) ve uyarlamalı akı gözlemleyiciler.

Genişletilmiş kalman filtreler model belirsizlikleri ve gürültülü koşullar altında yüksek doğrulukla durum tahmini yapmasına karşın fazla hesaplama zamanı gerektirir. Ayrıca düşük hızlarda sürekli durum hatası meydana gelirken, parametre değişimleri gözlemleyici başarımını azaltır [1-4]. MRUS ve uyarlamalı akı gözlemleyici algoritmaları algılayıcısız ASM uygulamalarında geniş ölçüde kullanılmaktadır [5-7]. Gerçek zamanda stator ve rotor dirençlerinin tahmininde de kullanılabilmesi bu gözlemleyicilerin avantajıdır [8,9]. MRUS yönteminin gerçekleştirilmesi basit ve daima kararlı iken, düşük hız aralığındaki başarımı ve yapısındaki açık integrasyon kararsızlığa neden olabileceği için verimsizdir [1]. Kayma kip (KK) tekniği ile gerçekleştirilen kayma kipli

* Sorumlu yazar: cbal@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹0000-0002-1199-2637, ²0000-0003-1870-1772, ³0000-0003-1100-6179

gözlemleyicilerin (KKG) en büyük avantajı motorun parametre değişimlerine ve belirsiz yük değişimlerine duyarlılığının daha az olmasıdır [10]. Yüksek frekanslı anahtarlardan kaynaklanan çatırdama (titreşim) ise KK'nin büyük bir dezavantajını oluşturur [11].

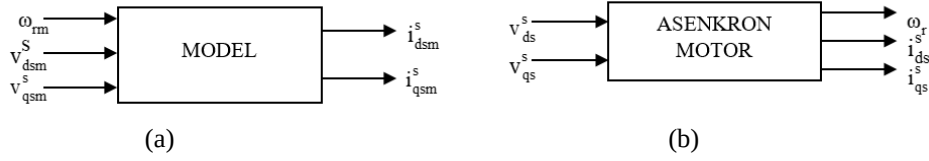
ASM'nin algılayıcısız vektör denetiminde, farklı denetleyicilerle birlikte yapay sinir ağları (YSA) motorun hız, akı, akım ve moment gibi büyüklüklerinin gözlemlenmesinde veya motor parametrelerinin tahmininde ve MRUS yapılarında yaygın olarak incelenmiştir [12-23]. [12-16]'te MRUS yönteminde yer alan ASM akım denklemleri yerine doğrusal hücreli YSA kullanılmış ve referans model çıkışına göre geriye yayılım algoritması ile gerçek zamanlı olarak eğitilen YSA'nın uygun ağırlığı motor hızı olarak kullanılmıştır. [20]'da dönen referans çatıda, gerçek zamanda eğitilen doğrusal hücreli YSA'nın uygun bir ağırlığı hıza bağlıdır. Böylelikle YSA çıkışı referans akıya yakınsadığında ilgili ağırlık motor hızına yakınsayacağı varsayılmıştır. [21]'de, motorun rotor akılarını ve hızını ayrı ayrı tanılayan iki YSA kullanılmıştır. İlk YSA yapısı ile modele göre rotor akıları öğretilmiş; daha sonra bu YSA çıkışı ve motor akımları kullanılarak ikinci YSA motor hızını tanılamak üzere eğitilmiştir. Eğitim sonunda motorun algılayıcısız denetiminde kullanılmıştır. [22]'de YSA sadece MRUS ile algılayıcısız denetim yapısında yer alan referans modeldeki stator direncinin uyarlanması amacıyla kullanılmıştır. YSA'nın kullanıldığı yöntemlerin hemen hepsinde, kullanılan referans model sabit parametrelili motor dinamik denklemlerinden oluşturulmuştur. Bu nedenle motor çalışma koşullarının etkisi ile parametre değişimlerine açık iken, model parametrelerinin motor parametre değişimlerinden etkilenmesi söz konusu değildir. Bu nedenle, motor parametreleri değiştiğinde, model artık farklı parametrelere sahip bir motorun referansı olacaktır. Yani referans modelin ürettiği büyüklükler motorun gerçek nicelikleri olmayacaktır. Bu durumda, YSA her ne kadar referans modeli başarılı bir şekilde takip etse de, referans model çıkışları gerçek motor sistemi büyüklüklerini yansıtmadığından gözlemlenen hız gerçek motor hızından farklı olacaktır.

Sinirsel bulanık ağı (SBA), ASM'nin algılayıcısız denetiminde gözlemleyici olarak fazla bir kullanımına rastlanmamıştır. [24]'de iki adet SBA kullanılarak ASM algılayıcısız denetimi için benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, [25] ile gerçekleştirilen YSA ile denetim yapısının aynısı SBA ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda YSA ve SBA yapıları birleştirilerek motor hızını öğrenecek şekilde eğitilmiş ve daha sonra hız gözlemleyici olarak algılayıcısız denetim sisteminde kullanılmıştır. Böyle bir yapı için, motor parametre değişimlerini karşılayabilecek tek güvence YSA ve SBA yapılarının kendi dayanıklılığı ile sınırlanır. Yani, bu gözlemleyici modeller kullandıkları esnada uyarlama olmadığından, sabit parametrelili doğrusal olmayan bir model olarak işlev göreceklerdir.

Bu çalışmada, akım gözlemleyici olarak kullanılan sinirsel bulanık ağlarla asenkron motorun algılayıcısız hız denetimi gerçekleştirilmiştir. Önerilen sinirsel bulanık akım gözlemleyici, akı ve hız tahmini yapmak yerine doğrudan denetleyici olarak kullanıldığından farklı bir yaklaşım sunmaktadır. Böylece motor parametrelerinden bağımsız ve SBA tabanlı bir akım gözlemleyici modeli ile algılayıcısız denetim yapısı geliştirilmiştir. Sinirsel bulanık akım gözlemleyici, deneysel verilerle gerçek zamanlı eğitilmiştir. Eğitilmiş ağ yapısı kullanılarak farklı çalışma koşullarında denetim sisteminin başarımlı test edilmiştir. Sinirsel bulanık ağın eğitimi ve denetim algoritması MATLAB/Simulink ortamında programlanmış ve dSPACE-DS1104 Sİİ ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, değişkenlere gerçek zamanlı erişimi sağlayabilen Control Desk Developer yazılımı kullanılarak oluşturulan bir arayüzden elde edilmiştir. Farklı hız ve yük koşullarında elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlarla, önerilen algılayıcısız denetim yönteminin başarımlı gösterilmiştir.

2. Akım Gözlemleyicili Algılayıcısız Denetim Yöntemi

Bir asenkron motorun senkron hızla dönen referans çatıdaki matematiksel modeli Şekil 1'de görüldüğü gibi, giriş değişkenleri stator gerilimleri, çıkış değişkenleri ise stator akımları ve motor hızı olmak üzere çok girişli-çok çıkışlı bir sistemdir. Şekil 2'de, motor hızı, sistem girişi olarak alınmak suretiyle giriş ve çıkış değişkenleri yeniden oluşturulan akım gözlemleyici modeli verilmiştir. Bu iki modelden, stator gerilimleri aynı olmak şartıyla, motor ve modelin stator akımları aynı olmaya zorlanırsa, motor hızı da model hızına (aynı zamanda referans) yaklaşmaya zorlanacaktır [26, 27]. Yani $v_{ds}^s = v_{dsm}^s$ ve $v_{qs}^s = v_{qsm}^s$ olması durumunda, $i_{ds}^s = i_{dsm}^s$ ve $i_{qs}^s = i_{qsm}^s$ olursa, o zaman $\omega_r = \omega_{rm}$ olacaktır. Dolayısıyla akım gözlemleyicili algılayıcısız denetim yöntemi, akı ve hız tahminine gerek duymadığından mevcut yöntemlerden farklı bir yaklaşım sunmaktadır.



Şekil 1. Model giriş çıkışları diyagramı, a) ASM akım gözlemleyici modeli b) ASM modeli

Akım gözlemleyicili algılayıcısız denetim yöntemi, asenkron motorun senkron hızla dönen referans çatıdaki matematiksel modeli kullanılarak açıklanabilir. Senkron referans çatı motor denklemleri ve elektromanyetik moment ifadeleri aşağıdaki gibi verilebilir.

$$v_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + \frac{d\psi_{ds}^e}{dt} - \omega_e \psi_{qs}^e \quad (1)$$

$$v_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + \frac{d\psi_{qs}^e}{dt} - \omega_e \psi_{ds}^e \quad (2)$$

$$0 = R_r i_{dr}^e + \frac{d\psi_{dr}^e}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr}^e \quad (3)$$

$$0 = R_r i_{qr}^e + \frac{d\psi_{qr}^e}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr}^e \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (i_{qs}^e \psi_{dr}^e - i_{ds}^e \psi_{qr}^e) \quad (5)$$

Burada ω_e senkron hız, ω_r rotor hızıdır. Stator ve rotor akı denklemleri aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\psi_{ds}^e = L_s i_{ds}^e + L_m i_{dr}^e \quad (6)$$

$$\psi_{qs}^e = L_s i_{qs}^e + L_m i_{qr}^e \quad (7)$$

$$\psi_{dr}^e = L_r i_{dr}^e + L_m i_{ds}^e \quad (8)$$

$$\psi_{qr}^e = L_r i_{qr}^e + L_m i_{qs}^e \quad (9)$$

Denklem 8 ve 9'dan rotor akımları,

$$i_{dr}^e = \frac{1}{L_r} (\psi_{dr}^e - L_m i_{ds}^e) \quad (10)$$

$$i_{qr}^e = \frac{1}{L_r} (\psi_{qr}^e - L_m i_{qs}^e) \quad (11)$$

elde edilerek Denklem 3 ve 4'de yerine yazılırsa,

$$\frac{d\psi_{dr}^e}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \psi_{dr}^e - \frac{L_m}{L_r} R_r i_{ds}^e - \omega_{sl} \psi_{qr}^e = 0 \quad (12)$$

$$\frac{d\psi_{qr}^e}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \psi_{qr}^e - \frac{L_m}{L_r} R_r i_{qs}^e - \omega_{sl} \psi_{dr}^e = 0 \quad (13)$$

rotor gerilim denklemleri elde edilir. Burada ω_{sl} kayma hızıdır. Eğer vektör denetimi ile, q eksen akısı sıfır ($\psi_{qr}^e = 0$) yapılabilir, ve d eksen akısı sabit ($\frac{d\psi_{dr}^e}{dt} = 0$) tutulabilirse, Denklem 5'e göre, elektromanyetik moment sadece stator akımlarının q eksen akımı ile denetlenebilir.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr}^e i_{qs}^e \quad (14)$$

ve ayrıca bu akılar, Denklem 3 ve 11 – 13 de yerine yazılırsa,

$$i_{dr}^e = 0 \quad (15)$$

$$i_{qr}^e = -\frac{L_m}{L_r} i_{qs}^e \quad (16)$$

$$\psi_{dr}^e = L_m i_{ds}^e \quad (17)$$

$$\omega_{sl} = \frac{L_m}{T_r} \frac{i_{qs}^e}{\psi_{dr}^e} = \frac{1}{T_r} \frac{i_{qs}^e}{i_{ds}^e} \quad (18)$$

elde edilir. Buradan Denklem 6 – 7 ve Denklem 15 – 8, Denklem 1 ve 2’de yerine yazılırsa motorun ve model stator gerilim denklemleri,

$$v_{ds}^e = R_s i_{ds}^e - \omega_e \sigma L_s i_{qs}^e \quad (19)$$

$$v_{dsm}^e = R_s i_{dsm}^e - \omega_{em} \sigma L_s i_{qsm}^e \quad (20)$$

$$v_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + \sigma L_s \frac{di_{qs}^e}{dt} + \omega_e L_s i_{ds}^e = R_s i_{qs}^e + \sigma L_s \frac{di_{qs}^e}{dt} + L_s i_{ds}^e \left(\omega_r + \frac{1}{T_r} \frac{i_{qs}^e}{i_{ds}^e} \right) \quad (21)$$

$$v_{qsm}^e = R_s i_{qsm}^e + \sigma L_s \frac{di_{qsm}^e}{dt} + \omega_e L_s i_{dsm}^e = R_s i_{qsm}^e + \sigma L_s \frac{di_{qsm}^e}{dt} + L_s i_{dsm}^e \left(\omega_r + \frac{1}{T_r} \frac{i_{qsm}^e}{i_{dsm}^e} \right) \quad (22)$$

olarak bulunur. Burada motor ve modele aynı gerilimler uygulanırsa, yani $v_{ds}^e = v_{dsm}^e$ ve $v_{qs}^e = v_{qsm}^e$ olursa Denklem 19 – 22 den,

$$\sigma L_s (\omega_e i_{qs}^e - \omega_{em} i_{qsm}^e) = R_s (i_{ds}^e - i_{dsm}^e) \quad (23)$$

$$L_s (\omega_e i_{dsm}^e - \omega_e i_{ds}^e) = R_s (i_{qs}^e - i_{qsm}^e) + \sigma L_s \frac{d}{dt} (i_{qs}^e - i_{qsm}^e) \quad (24)$$

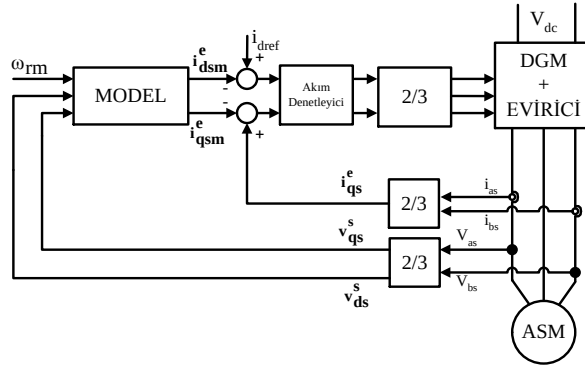
$$L_s (\omega_{rm} i_{dsm}^e - \omega_r i_{ds}^e) = \left(R_s + \frac{L_s}{T_r} \right) (i_{qs}^e - i_{qsm}^e) + \sigma L_s \frac{d}{dt} (i_{qs}^e - i_{qsm}^e) \quad (25)$$

elde edilir. Denklem 23 – 25’den görüldüğü gibi, $i_{ds} = i_{dsm}$ ve $i_{qs} = i_{qsm}$ olursa o zaman $\omega_e = \omega_{em}$ ve olur. Bu nedenle modelin ve motorun moment üreten akımları ve akı üreten akımları aynı olacak şekilde denetlenirse motor hızı ile model hızı, yani referans hız ile aynı olmaya zorlanır. Ayrıca Denklem 23 ve 24’ten görüldüğü gibi akı üreten akımın denetimi gerekmez. Çünkü moment üreten iki akım aynı olacak şekilde denetlenirse, akı üreten akımlarında aynı olması gerekir. Denklem 18’den,

$$\omega_r + \frac{1}{T_r} \frac{i_{qs}^e}{i_{ds}^e} = \omega_{rm} + \frac{1}{T_r} \frac{i_{qsm}^e}{i_{dsm}^e} \quad (26)$$

olması gerekir. Buna göre Denklem 23 ve Denklem 26’dan, eğer $\omega_r > \omega_{rm}$ olursa o zaman, $i_{qs} < i_{qsm}$ ve eğer $\omega_r < \omega_{rm}$ olursa o zaman $i_{qs} > i_{qsm}$ olması gerektiği bulunabilir.

Akım gözlemleyicili algılayıcısız hız denetim sisteminin blok diyagramı Şekil 2’de verilmiştir. Model duran referans çatıda seçildiğinden model bloğu içerisinde akımların senkron referans çatıya dönüşümü de yer almaktadır.



Şekil 2. ASM'un akım gözlemleyicili algılayıcısız denetimi

3. SBA ile Akım Gözlemleyicili Algılayıcısız Denetim

Denetim yapısı Şekil 2 de verilen akım gözlemleyicili algılayıcısız denetimin başarısı, asenkron motorun dinamik modeli kullanılarak oluşturulan akım gözlemleyici modelin, asenkron motoru doğru olarak temsil etmesine bağlıdır. Dolayısıyla, oluşturulan modelin parametreleri, motor parametreleri ölçülerek belirlenmelidir. Motorun akım gözlemleyici modeli olarak adlandırılan bu sabit parametrelili model, parametre ölçümündeki hatayı belirli oranda tolere edebilmekle birlikte farklı bir motor için en azından yeni bir parametre ölçüm süreci gerektirecektir. Bunun yanında motorun çalışma koşullarının parametreler üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, motor parametrelerinin değişmesiyle akım gözlemleyici model ile motor arasındaki modelleme hatası artacaktır. Ayrıca pratikte denetim sisteminde yer alması zorunlu olan eviricinin akım gözlemleyici modelde yer almaması nedene ile de modelleme hatası oluşacaktır. Bu durumda motor parametrelerindeki değişimin modele yansıtılması için ek olarak parametre uyarılama algoritması gerektirebilir. Kaynak [26,27]'de, motor modelinden yararlanarak oluşturulan akım gözlemleyici modeli ile algılayıcısız denetimin başarısı, rotor direnci küçük sınırlar arasında değiştirilerek incelenmiş ve motora yük momenti uygulanması durumunda meydana gelen sürekli durum hatası gösterilmiştir.

Akım gözlemleyicili algılayıcısız denetim yönteminin akı ve hız tahmini gerektirmemesi önemli bir avantajını oluştururken motor parametrelerine duyarlı olması da önemli bir sakıncasını oluşturmaktadır. Bu nedenle, akım gözlemleyicinin motor parametrelerinden bağımsız ve dayanıklı hale getirilmesi yöntemin başarısını artıracaktır. Bu amaçla, bu çalışmada akım gözlemleyici olarak SBA kullanılarak motor parametrelerinden bağımsız bir gözlemleyici elde edilmiştir. Önerilen SBA akım gözlemleyici ile birlikte dolaylı vektör denetimli asenkron motorun hız denetim sisteminin blok diyagramı Şekil 3'de verilmiştir. Önerilen SBA'nın parametreleri gerçek zamanlı olarak uyarıldığı için, motor parametrelerindeki değişimler motor akım ve gerilimleri vasıtası ile SBA'ya aktarılmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi motorun dq akımları için ayrı ayrı SBA akım gözlemleyicisi kullanılmış ve böylece SBA'nın hesaplama yükü de hafifletilmiştir. Çünkü SBA'daki üyelik fonksiyonlarının sayısı, girişlerin sayısına göre artan üstel bir ilişkidir.

Dolaylı vektör denetim yapısında, çok düşük hızlarda bile çok iyi sonuçlar elde edilebildiğinden asenkron motorların yüksek başarılı uygulamalarında daha çok dolaylı vektör denetim yöntemi ve kompanzasyon işlemlerine gereksinim duymadan alan yönlendirmesinin sağlanabildiği rotor alan yönlendirmesi tercih edilmektedir. Denklem 18 kullanılarak referans açısal kayma hızı (ω_{sl}^*),

$$\omega_{sl}^* = \frac{R_r}{L_r} \frac{i_{qs}^{e*}}{i_{ds}^{e*}} \quad (27)$$

olarak yazılabilir. Burada i_{qs}^{e*} - hız denetleyiciden elde edilen referans moment akım bileşeni, i_{ds}^{e*} -stator akımının referans akı bileşenidir. Anma akımlarının altındaki hız denetimleri için i_{ds}^{e*} akımı, anma değerinde sabit olarak alınabilir. Motor hızının (ω) ölçüldüğünü kabul edersek vektör dönüşümü için gerekli referans açısal hız (ω_e^*),

$$\omega_e^* = \omega_{sl}^* + \frac{p}{2} \omega \quad (28)$$

$$u_j^2 = \left| \frac{x_i^2 - m_{ij}}{\sigma_{ij}} \right|^{2b_i}, \quad v_j^2 = f_j^2(u_j^2) = \frac{1}{1 + u_j^2}, \{j=2\} \quad (32)$$

Burada σ_{ij} , m_{ij} ve b_i üyelik fonksiyonlarının uyarlanacak parametreleridir ve giriş parametreleri olarak da adlandırılır. x_i^2 , 2. katmanın i. hücresinin girişidir. Kural tabanının oluşturulduğu üçüncü katman Π sembolüyle gösterilen düğümlerden oluşmuştur ve her düğüm kendine gelen işaretlerin çarpımını çıkışına verir. Burada VE bulanık işlemi gerçekleştirilmekle birlikte diğer T-norm işlemleri de kullanılabilir. VE bulanık işleminin gerçekleştirilmesiyle k. hücrenin çıkışı,

$$u_k^3 = \prod_j x_j^3, \quad v_k^3 = f_k^3(u_k^3) = u_k^3 \quad (33)$$

olarak yazılır. Burada x_j^3 , 3. katmanın j. hücresinin girişidir. Dördüncü katmandaki her bir hücre N ile gösterilmiştir ve her bir hücre, bir kuralın normalleştirilmiş ateşleme kuvvetini hesaplar. m. düğüm çıkışı, m. kuralın ateşleme derecesinin bütün kuralların ateşleme derecelerinin toplamına oranından aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_k^4 = \sum_k x_k^4, \quad v_k^4 = f_k^4(u_k^4) = \frac{x_k^4}{u_k^4} \quad (34)$$

x_k^4 , 4. katmanın k. hücresinin girişidir. Beşinci katmandaki her bir n düğümünde, ağırlıklandırılmış $v_k^4(p x_1 + q x_2 + r)$ sonuç değeri hesaplanır. Burada v_k^4 4. katmanın çıkışı, $\{p, q, r\}$ ise uyarlanacak parametre kümesidir. Bu katmandaki parametreler sonuç parametreleri olarak adlandırılırlar.

$$u_k^5 = x_k^5, \quad v_k^5 = f_o^6(u_o^6) = u_k^5 g_k = u_k^5 (p_k x_1^1 + q_k x_2^1 + r_k) \quad (35)$$

x_k^5 , 5. katmanın k. hücresinin girişidir. Altıncı katmanda $\sum$ sembolüyle gösterilen tek bir düğüm vardır ve girişine gelen işaretlerin toplamını çıkışına verir.

$$u_o^6 = \sum_k x_k^6, \quad v_o^6 = i_{dsm}^s = f_o^6(u_o^6) = u_o^6 \quad (36)$$

3.2. Sugeno Tipi Akım Gözlemleyici SBA

Bir SBA, BM işlevlerini YSA ile gerçekleştirerek, YSA'nın öğrenme ve uyarlama yeteneğini kazanır. Böylece SBA'nın tasarımında, BM'nin tasarımında karşılaşılan üyelik fonksiyonlarının şeklinin belirlenmesi ve kural tabanının oluşturulması gibi zorluklar, YSA tarafından kazandırılan öğrenme ve uyarlama yeteneği ile aşılabılır. Bu nedenle SBA'nın da tıpkı YSA gibi çeşitli öğrenme algoritmaları ile eğitilerek parametrelerinin uyarlanması gereklidir. Literatürde SBA için pek çok öğrenme algoritması önerilmekle birlikte, uygulamada daha çok geriye yayılım algoritması veya geriye yayılım algoritması ile en küçük kareler yönteminin birlikte kullanıldığı melez öğrenme yöntemleri kullanılır. Melez öğrenme yönteminde çıkış parametreleri doğrusal bir fonksiyonun parametreleri olması nedeniyle en küçük kareler yöntemine göre belirlenirken, giriş parametreleri geriye yayılım algoritmasıyla belirlenir. Ancak en küçük kareler yöntemi gerçek zamanlı uygulamalarda gerçekleştirilemediğinden, genelde çıkış parametrelerinin de geriye yayılımla uyarlanması tercih edilmektedir. Geriye yayılım algoritması ile örneksel öğrenme yöntemi kullanılarak giriş ve çıkış parametrelerinin güncellenmesi için, izleme hatası (e) minimize edilecek karesel hata (E) aşağıdaki gibi belirlenir.

$$e(k) = i_{ds}^s(t) - i_{dsm}^s(t), \quad E = \frac{1}{2} e^2(t) \quad (37)$$

SBA'nın uyarlanacak herhangi bir giriş ve çıkış parametresi ϕ olarak alınırsa, geriye yayılım algoritmasını kullanarak herhangi bir ϕ parametresinin güncellenmesi,

$$\phi(k) = \phi(k-1) + \Delta\phi(k) = \phi(k-1) + \left(-\alpha \frac{\partial E(k)}{\partial \phi(k)} \right) \quad (38)$$

olarak bulunur. Burada α -öğrenme oranıdır ve $\frac{\partial E}{\partial \phi}$ kısmi türevinin elde edilebilmesi için, E fonksiyonundan ilgili parametreye kadar kısmi türev zinciri kullanılır. Buna göre sonuç parametreleri aşağıdaki gibi güncellenebilir.

$$\frac{\partial E}{\partial p_k} = \delta^1 \frac{\partial v^6}{\partial u^6} \frac{\partial u^6}{\partial v_k^5} \frac{\partial v_k^5}{\partial p_k} = \delta^1 u_k^5 x_1^1 = \delta^1 \frac{x_k^4}{\sum_k x_k^4} x_1^1 \quad (39)$$

Burada δ^1 -yöresel gradyandır.

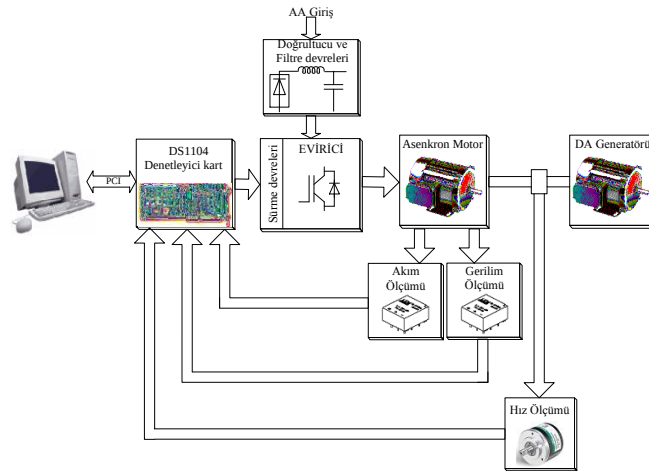
$$\delta^1 = \frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial i_{dsm}^s} \frac{\partial i_{dsm}^s}{\partial v^6} \quad (40)$$

Benzer şekilde SBA'nın önkoşul parametreleri de güncellenebilir. Genelleştirilmiş bell fonksiyonu için σ önkoşul parametresinin güncellemesi aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial E}{\partial \sigma_{i,2}} = \delta^1 \frac{\partial v^6}{\partial u^6} \frac{\partial u^6}{\partial v_k^5} \frac{\partial v_k^5}{\partial u_k^5} \frac{\partial u_k^5}{\partial v_k^4} \frac{\partial v_k^4}{\partial u_k^4} \frac{\partial u_k^4}{\partial v_k^3} \frac{\partial v_k^3}{\partial u_k^3} \frac{\partial u_k^3}{\partial v_j^2} \frac{\partial v_j^2}{\partial \sigma_{i,2}} = \delta^1 g_k \frac{\sum_k x_k^4 - x_k^4}{\left(\sum_k x_k^4 \right)^2} \prod_j x_j^3 \left(\frac{2b_i}{x_i^1 - m_{i,2}} \right) v_j^2 (1 - v_j^2) \quad (41)$$

4. Algılayıcısız Denetim Sisteminin Sİİ ile Gerçekleşmesi

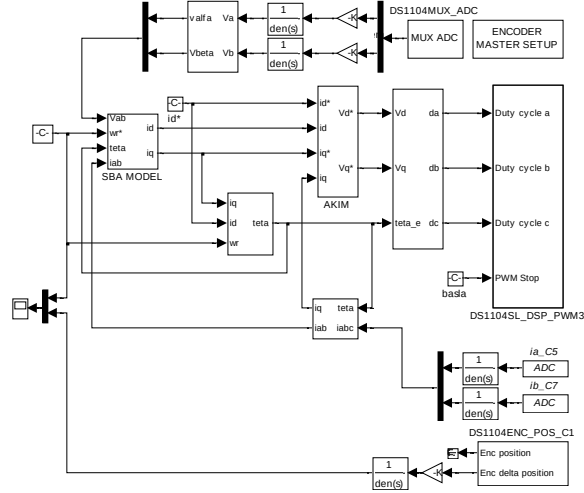
SBA akım gözlemleyicili algılayıcısız denetim sisteminin Şekil 3'te verilen diyagramın deneysel gerçekleştirilmesi Şekil 5'te verilmiştir. SBA ile algılayıcısız denetim algoritmasının gerçekleştirilmesi ve gerçek zamanlı eğitimi, vektör dönüşümleri ve evirici için gerekli anahtarlama işaretlerinin elde edilmesi oldukça yoğun hesaplamalar gerektirmektedir. Ayrıca, eviricinin anahtarlama frekansının yeterince yüksek tutulması da iyi bir vektör denetimi için gereklidir. Bu nedenle, SBA'nın kullanıldığı denetim sistemlerinin gerçekleştirilmesi, hızlı ve işlem yetenekleri güçlü Sİİ gerektirir. Bu çalışmada, dSPACE firmasının DS1104 denetleyici kartı kullanılmıştır.



Şekil 5. Deney düzeneğinin blok diyagramı

Deney düzeneğine ait Şekil 5'te görülen motorun gerçek hız bilgisi, algılayıcısız denetim algoritmasında kullanılmamaktadır ve sadece referans hız ile karşılaştırmak maksadı ile ölçülmüştür. Motordan ölçülen konum bilgisi DS1104 denetleyici kartının sayısal girişlerine, akım bilgileri ise kartın ADC girişlerine uygulanmaktadır. Denetleyici kart, asenkron motorun algılayıcısız denetim algoritmasını gerçek zamanlı olarak işleyerek evirici devresinin anahtarlama işaretleri üretir. DS1104 denetleyici kartının sayısal çıkışlarında bu işaretler alınarak evirici devresine uygulanır ve böylece motorun istenilen hızda dönebilmesi için üretilen anahtarlama işaretlerine göre elde edilen üç faz gerilimleri motora uygulanır.

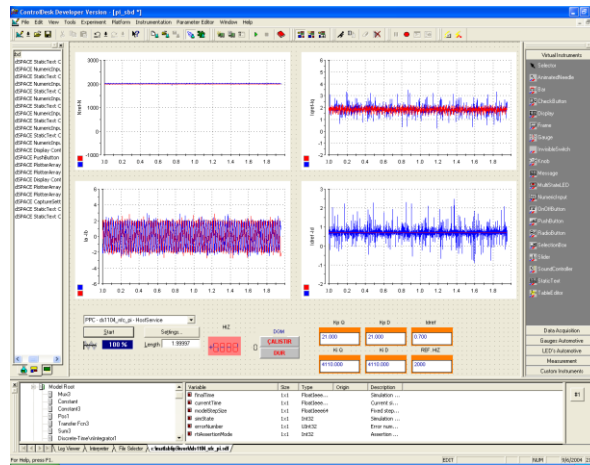
Matlab/Simulink uyumlu DS1104 denetleyici kartı ile algılayıcısız denetimin deneysel gerçekleştirilmesi için hazırlanan Simulink model dosyası Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. DS1104 ile deneysel çalışma için MATLAB/Simulikte oluşturulan denetim algoritması

Denetim yapısında örnekleme zamanı 2 ms ve eviricinin anahtarlama frekansı 5 kHz olarak seçilmiştir. Motor milinin açılal konumu bir mil kodlayıcı ile algılanarak denetleyici kartın sayısal girişlerine uygulanır. Sayısal girişlere uygulanan bu bilgiler enkoder blokları yardımı ile açılal hız bilgisine dönüştürülür ve köşe frekansı 100Hz olan sayısal bir alçak geçiren filtreden geçirilerek arzu edilen açılal hız ile karşılaştırılmak üzere çoklayıcı girişine uygulanır. Mil kodlayıcı ile ölçülen hız, sistemde herhangi bir geri besleme amacı ile kullanılmaz. Hız denetimi anma hızının altında gerçekleştirildiğinden referans d-eksen akımı sabit olarak seçilmiştir.

Simulinkte oluşturulan model dosyası derlenerek Sİİ'ye yüklenir. Şekil 7'de verilen *ControlDesk Developper* yazılımı ile hazırlanan arayüz sayesinde denetim yapısındaki bütün işaretler gerçek zamanlı olarak izlenebilir ve denetim yapısındaki parametreler gerçek zamanlı olarak değiştirilebilir.

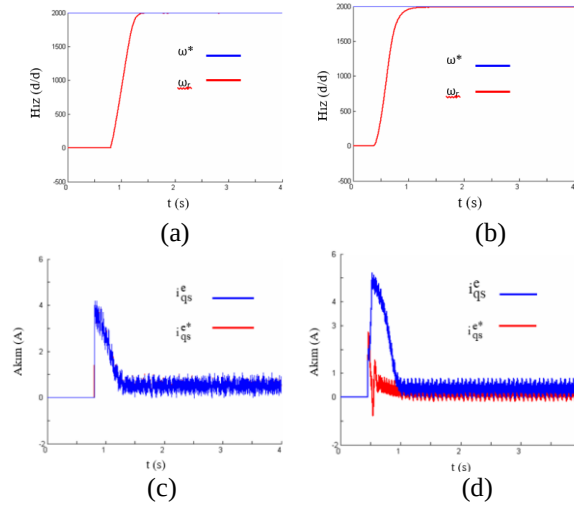


Şekil 7. Oluşturulan ara yüzün görünümü

5. Benzetim ve Deneysel Sonuçlar

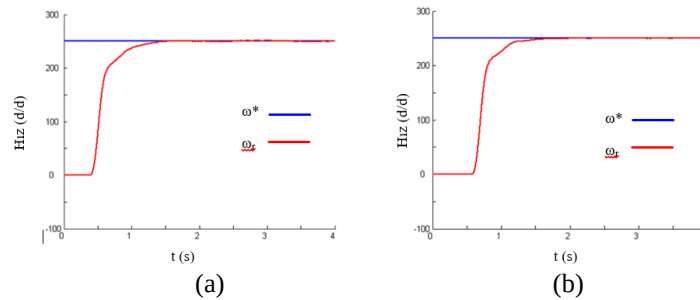
Asenkron motorların akım gözlemleyicili algılayıcısız hız denetim performansı, sabit parametrelili model ile SBA model kullanılarak benzetim ve deneysel çalışmalarla test edilmiştir. Benzetim ve deneysel çalışmalarda akım gözlemleyici olarak kullanılan SBA'nın ön koşul parametreleri eğitilmemiş, sonuç parametreleri ise gerçek zamanlı olarak geriye yayılım öğrenme algoritması ile eğitilmiştir.

SBA ve sabit parametrelili akım gözlemleyicili algılayıcısız denetimden elde edilen benzetim sonuçları 2000 d/dak. referans hız için Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8(a)'da SBA ile Şekil 8(b) de ise sabit parametrelili model ile algılayıcısız denetimin hız izleme performansı verilmiştir. Şekil 8(c)' ve (d) de ise tork akımlarının (i_{qs}^{e*} ve i_{qs}^e) değişimi verilmiştir. Şekil 8' den, sabit parametrelili model ile motor modeli aynı parametreler sahip olduğundan benzetim sonucunun SBA ile denetim kadar tatmin edici olduğu görülmektedir.



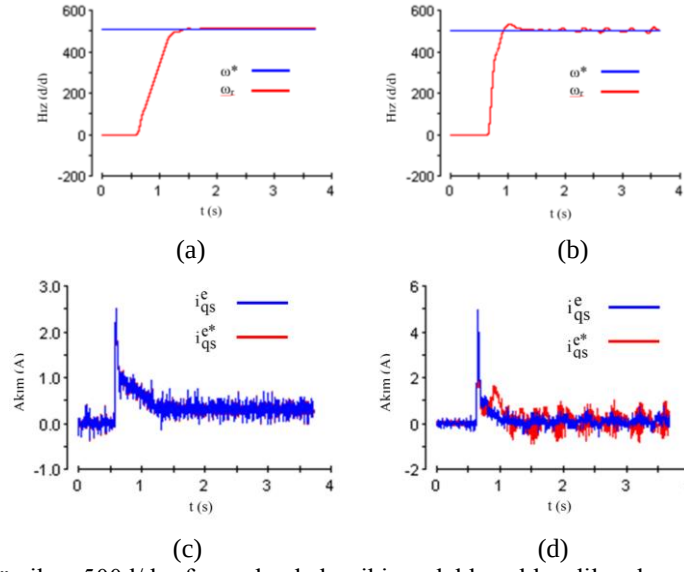
Şekil 8. 2000d/d referans hızda her iki modelden elde edilen benzetim sonuçları, (a) SBA'lı model için referans hızın ve motor hızının değişimi, (b) Motor denklem modeli için referans hızın ve motor hızının değişimi, (c) SBA için i_{qs}^{e*} ve i_{qs}^e akımlarının değişimi, (d) Dinamik model için i_{qs}^{e*} ve i_{qs}^e akımlarının değişimi

Düşük hızlarda da (250 d/d) SBA ve sabit parametrelili model ile algılayıcısız denetimden iyi bir denetim performansının elde edildiği Şekil 9'da verilen benzetim sonucundan görülmektedir.



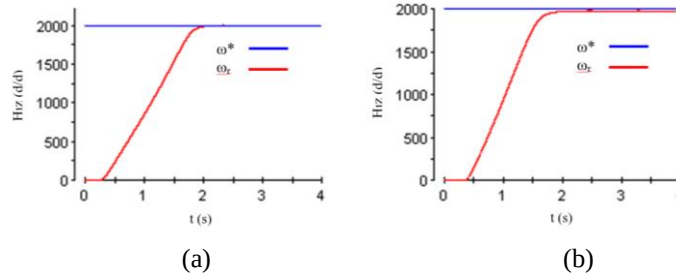
Şekil 9. (a) 250 d/d basamak referans hız için SBA akım gözlemleyicili sistemin hız izleme performansı, (b) 250 d/d basamak referans hız için sabit parametrelili model ile hız izleme performansı

Şekil 10'da, düşük hız referansında (500 d/d) SBA ve sabit parametrelili algılayıcısız denetimin deneysel performansı verilmiştir. Deneysel çalışmada, motor modelinden belirlenen akım gözlemleyicinin parametreleri, motorun gerçek parametreleri ile aynı olmadığından sabit parametrelili algılayıcısız denetimin performansında bozulmalar görülmektedir.



Şekil 10. Motor yüksüz iken 500d/d referans hızda her iki modelden elde edilen deneysel sonuçlar, **(a)** SBA'lı model için referans hızın ve motor hızının değişimi, **(b)** Motor denklem modeli için referans hızın ve motor hızının değişimi, **(c)** SBA için i_{qs}^{e*} ve i_{qs}^e akımlarının değişimi, **(d)** Dinamik model için i_{qs}^{e*} ve i_{qs}^e akımlarının değişimi

Şekil 11'de, yüksek hızlarda (2000 d/d) ve motor yüklü durumda iken SBA ve sabit parametrelili algılayıcısız denetimden elde edilen deneysel hız izleme performansı verilmiştir. SBA ile denetimin performansı tatmin edici iken sabit parametrelili denetim sisteminde motor yüküne de bağlı olarak kalıcı durum hatası görülmektedir.



Şekil 11. Motor yüklü iken 2000d/d referans hızda her iki modelden elde edilen deneysel sonuçlar, **(a)** SBA'lı model için referans hızın ve motor hızının değişimi, **(b)** Motor denklem modeli için referans hızın ve motor hızının değişimi.

6. Sonuç

Bu çalışmada, motorun dinamik modeline göre tasarlanan sabit parametrelili akım gözlemleyici ve SBA akım gözlemleyici kullanılarak, vektör denetimli bir ASM'nin algılayıcısız hız denetimi gerçekleştirilmiştir. Denetim algoritması MATLAB/Simulink ile programlanmış ve dSPACE DS1104 denetleyici kart ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, değişkenlere gerçek zamanlı ulaşmayı sağlayabilen ve denetleyici kart için hazırlanan ControlDesk Developer yazılım ile oluşturulan arayüz sayesinde doğrudan elektronik ortamda elde edilmiştir. Akım gözlemleyici SBA modelinin sonuç parametreleri gerçek zamanlı ve örneksel olarak geriye yayılım öğrenme algoritması ile eğitilmiştir. Algılayıcısız denetim yöntemlerine göre farklı bir yaklaşım sunan akım gözlemleyicili algılayıcısız denetimde, sabit parametrelili model yerine SBA kullanılarak algılayıcısız denetimin başarımının iyileştiği deneysel sonuçlarla gösterilmiştir. Bu bölümde, çalışmanın amacı ve dikkat çekici sonuçları somut bir şekilde kısaca verilmelidir ayrıca çalışmanın sonuçları ile ilgili okuyuculara iletilmesi istenen öneri ve görüşler belirtilebilir.

Kaynaklar

- [1] Kojabadi HM, Chang L, Doriaswami R. Recent progress in sensorless vector controlled induction motor drives. 2002 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering; June 2002; 80-85.
- [2] Kim YR, Sul SK, Park MH. Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor Using Extended Kalman Filter. IEEE Trans. Ind. Appl. 1994; 30 (5): 1225-1233.
- [3] Du T, Vas P, Stronach F. Design and Application of Extended Observers for Joint State and Parameter Estimation in High-Performance AC Drives. IEE Proc. Electr. Power Appl. 1995; 142 (2): 71-77.
- [4] Al-Tayie J, Acamley P. Estimation of Speed Stator Temperature and Rotor Temperature in Cage Induction Motor Drive Using Extended Kalman Filter Algorithm. Proc. IEE-Elec. Power Appl. 1997; 144: 301-309.
- [5] Schauder C. Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors without Rotational Transducers. IEEE Trans. Indus. Appl. 1992; 28: 1054-1061.
- [6] Lin YN, Chen CL. Adaptive Pseudoreduced-Order Flux Observe for Speed Sensorless Field Oriented Control of IM. IEEE Trans. Ind. Electron. 1999; 46: 1042-1045.
- [7] Yang G, Chin TH. Adaptive-Speed Identification Scheme for Vector-Controlled Speed Sensorless Inverter-Induction Motor Drive. IEEE Trans. Ind. Appl. 1993; 29 (4): 820-825.
- [8] Peng FZ, Fukao T. Robust Speed Identification for Speed Sensorless Vector Control of Induction Motors. IEEE Trans. Ind. Appl. 1994; 30 (5): 1234-1240.
- [9] Kojabadi HM, Chang L. Model Reference Adaptive System Pseudoreduced-Order Flux Observer for Very Low-Speed and Zero-Speed Estimation in Sensorless Induction Motor Drives. in Proc. of Power Elec. Specialist Conf. PESC; 2002: 301-305.
- [10] Derdiyok A. Speed-sensorless control of induction motor using a continuous control approach of sliding-mode and flux observer. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2005; 52 (4): 1170-1176.
- [11] Reman H, Derdiyok A, Güven M K. A New Current Model Flux Observer for Wide Speed Range Sensorless Control of an Induction Machine. IEEE Trans. Power Elec. 2002; 17 (6): 1041-1048.
- [12] Ben-Brahim L. Motor Speed Identification via Neural Networks. Industry Applications Magazine, IEEE. 1995; 1: 28-32.
- [13] Xianmin M, Zhi N. Neural Network Speed Identification Scheme for speed Sensor-less DTC Induction Motor Drive System. Power Electronics and Motion Control Conference; 2000; 1242-1245.
- [14] Ben-Brahim L, Tadakuma S. Speed Control of Induction Motor without Rotational Transducers. Industry Applications Conference, IEEE; 1998; 625-632.
- [15] Cirrincione M, Pucci M. An MRAS Based Speed Estimation Method with a Linear Neuron for High Performance Induction Motor Drives and Its Experimentation. Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'03, IEEE; 2003; 617-623.
- [16] Karanayil B, Rahman MF, Grantham C. Speed Sensorless Vector Controlled Induction Motor Drive with Rotor Time Constant Identification Using Artificial Neural Networks. Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium; 2002; 715-720.
- [17] Kim SH, Park TS, Yoo JY, Park GT. Speed-Sensorless Vector Control of an Induction Motor Using Neural Network Speed Estimation. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2001; 48: 609-614.
- [18] Orłowska-Kowalska T, Kowalski CT. Neural Network Application for Flux and Speed Estimation in the Sensorless Induction Motor Drive. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics; 1997; 1253-1258.
- [19] Lu HC, Hung TH, Tsai CH. Sensorless Vector Control of Induction Motor Using Artificial Neural Network. ISCAS 2000-IEEE Int. Sym. On Circuits and Systems Geneva; 2000; Switzerland. 489-492.
- [20] Jalili K, Farhangi S, Iranizad ES. Sensorless Vector Control of Induction Motors in Fuel Cell Vehicle Using a Neuro-Fuzzy Speed Controller and an On-Line Artificial Neural Network Speed Estimator. Proc. IEEE Int. Conf. Control Appl.; 2001; 259-264.
- [21] Leksono E, Prihatin R, Kadiman K. Fuzzy Auto Reset Controller for Speed Sensorless Induction Motor Drive. Industrial Electronics Society 26th Annual Conference of the IEEE; 2000; 2321-2326.
- [22] Campbell J, Summer M. Practical Sensorless Induction Motor Drive Employing an Artificial Neural Network for Online Parameter Adaptation. IEE Proc-Elect. Power Appl. 2002; 149 (4): 255-260.
- [23] Montanari M, Peresada SM, Rossi C, Tilli A. Speed sensorless control of induction motors based on a reduced-order adaptive observer. IEEE Transactions On Control Systems Technology 2007; 15 (6): 1049-1064.
- [24] Purwanto E, Arifin S, Bian-Sioe S. Application of Adaptive Neuro Fuzzy Inference System on the Development of the Observer for Speed Sensorless Induction Motor. Electrical and Electronic Technology 10 International Conference; 2001; 409-414.
- [25] Zhang J, Morris A J. Fuzzy Neural Networks for Nonlinear Systems Modeling. Proc. Inst. Elect. Eng. Contr. Theory Appl. 1995; 142: 551-556.
- [26] Kwon YA, Kim SH. A New Scheme for Speed-Sensorless Control of Induction Motor. IEEE Trans. Ind. Elect. 2004; 51 (3): 545-550.
- [27] Kwon YA, Kim SH, Oh SH. Speed Sensorless Control of Induction Motor by Current Error Compensation. IECON Control and Enst. Conf.; 1997; 966-970.

Sürtünmeli Delme İşleminde Geometrik Kovan Yüksekliği Denkleminin DeneySEL Sonuçlar ile Doğrulanması

Muhammet BAL¹, Cebeli ÖZEK², Zülküf DEMİR^{3*}

¹ Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Teknik Eğitim Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye

¹ mbal023@gmail.com, ² cozek@firat.edu.tr, ^{3*} zulkuf.demir@batman.edu.tr

(Geliş/Received: 09/01/2020;

Kabul/Accepted: 10/05/2020)

Öz: Sürtünmeli delme, kendi eksenini etrafında dönen konik bir takım ile iş parçası arasında, sürtünme sonucu oluşan ısının etkisiyle, delinen malzemenin yumuşaması ve takımın dalması şeklinde uygulanan, geleneksel olmayan bir delik delme yöntemidir. Literatür çalışmalarında, deneysel olarak elde edilmiş kovanların dış kenar eğrilerinin biçimi, geometrik olarak, bir parabol eğrisi şeklinde analiz edilerek kovan yüksekliğinin denklemi, matematiksel olarak elde edilmiştir. Analiz işleminde, parabol eğrisinin denklem katsayısının (k) değer aralığı tespit edilmiştir. Literatür çalışmalarından elde edilmiş ve deneysel olarak ölçülmüş kovan yüksekliği değerlerine göre kovan yüksekliğinin denklemi, delik çapına, malzeme kalınlığına, koniklik açısına, ilerleme hızına ve ayrıca, k denklem sabitine bağlı olarak elde edilmiş ve tüm sabitleri içeren yeni denklem katsayısı ise mü (μ) ile ifade edilmiştir. Ayrıca, mü (μ) katsayısının değeri, malzeme kalınlığına, delik çapına, koniklik açısına ve ilerleme hızına bağlı olarak alabileceği değer aralığı, grafikler yardımıyla gösterilmiştir. Böylece, μ katsayısının 0 ile 1,21 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, literatür çalışmalarından elde edilen matematiksel kovan yüksekliği denkleminin doğruluğu, deneysel kovan yüksekliği sonuçlarına bağlı olarak, araştırılmıştır. Literatür çalışmalarına göre matematiksel olarak elde edilmiş kovan yüksekliği denkleminin ve mü (μ) denklem katsayısının değer aralığının, deneysel kovan yüksekliği değerlerine göre, yaklaşık olarak %95 oranında, doğru olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sürtünmeli delme, kovan yüksekliği, kovan yüksekliği analizi, mü denklem kat sayısı (μ).

Confirmation of the Geometric Bushing Height Equation with Experimental Results in Friction Drilling

Abstract: Friction drilling is an unconventional method of drilling between a conical tool, rotating around its axis, and the workpiece in the form of softening of the drilled material and sink of the tool by the effect of heat, generated by friction. In the literature studies, the shape of the outer edge curves of experimentally obtained bushings is analyzed geometrically, as a parabola curve and the equation of bushing height is obtained mathematically. In the analysis process, the value range of the equation coefficient (k) of the parabola curve was determined. According to experimentally measured bushing height values, obtained from literature studies, the equation of bushing height is obtained, according to hole diameter, material thickness, conical angle, feed rate, and also equation coefficient k, and the new equation coefficient mü (μ), including all constants, is expressed. Besides, the value of the coefficient mu (μ), the range of values it can take depending on the material thickness, hole diameter, conical angle and feed rate are shown with the help of graphs. Therefore, the coefficient (μ) was found to be between 0 and 1,21. In the present paper, the accuracy of the mathematical bushing height equation, obtained from literature studies, was investigated, depending on experimental bushing height results. According to the literature studies, it was found that the value range of the mathematically obtained bushing height equation and mu (μ) coefficient were correct according to experimental bushing height values.

Key words: Friction drilling, bushing height, bushing height analysis, mu (μ) equation constant.

1. Giriş

Sürtünmeli delme yönteminin amacı, ince cidarlı malzemelerde, elde edilen kovan yardımıyla bağlantı uzunluğunu arttırmaktır. Sürtünmeli delme işlemi, kendi eksenini etrafında dönen konik bir takım ile iş parçası arasındaki sürtünme sonucu meydana gelen ısı ile iş parçasının yumuşaması ve takımın dalması biçiminde meydana gelir. Takım, yumuşamış malzemeyi ilerleme hareketi doğrultusunda iterek ve radyal doğrultuda ise merkezkaç etkisi yayarak deliğin alt kısmında bağlantı uzunluğunu arttıran kovani oluşturur. İşlem sırasında, delinen numuneden boşalan malzemenin bir kısmı yukarıya akar ve pul olarak adlandırılan sızdırmazlık halkasını

* Sorumlu yazar: fenbilimleri@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-7138-8979, ² 0000-0001-7603-415X ^{3*} 0000-0002-0685-3712

oluştururken ihmal edilebilecek kadar az miktarda malzeme ise konik takımın dönme ve ilerleme hareketlerinin etkisi ile çevreye yayılır [1-4].

Sünek malzemelerin sürtünmeli delinmesinde silindirik, üzerinde çatlakların az olduğu kovan biçimleri elde edilirken, gevrek malzemelerde ise bağlantı uzunluğunu artırmayan, çatlakların yoğun olduğu ve taç yaprağı biçiminde kovanlar elde edilir. İşlem sırasında meydana gelen maksimum ısı miktarı, yaklaşık olarak iş parçası malzemesinin ergime sıcaklığının $1/3 - 2/3$ katı kadardır. Malzeme kalınlığının delik çapına oranı (t/d), oluşan kovanın biçimini ve yüksekliğini etkileyen önemli bir parametredir. Bu oranın artmasıyla kovan oluşumunu sağlayan malzeme miktarı da artar [5-8].

Sürtünmeli delme işlemi genellikle beş aşamada tamamlanır. Birinci aşamada, takım iş parçasına yaklaşır, temas eder ve itme kuvveti maksimuma ulaşır. İkinci aşamada, takımın konik bölgesinin iş parçasına dalmasıyla temas bölgesindeki ısı miktarı, dönme momentinin etkisiyle hızlı bir şekilde yükselir. Üçüncü aşamada, takımın silindirik bölgesi iş parçasına dalar ve konik takım yumuşamış malzemeyi aşağıya doğru iter ve kovan oluşmaya başlar. Dördüncü aşamada, takımın omuz kısmı takımın ilerleme hareketinin tersi doğrultuda akan malzemeyi iş parçasının yüzeyine bastırarak sızdırmazlık halkası olarak adlandırılan pulu oluştururken itme kuvveti tekrar yükselir ve maksimum seviyesine ulaşır. Beşinci aşamada ise delik delme işlemi tamamlanır ve konik takım geri çekilir [11].

Kovanın biçimi, takımın ilerleme hareketinin doğrultusunda ilerlemesi ile meydana gelir. İşlemin başlangıcında ısı etkisiyle yumuşamış ve akıcı hale gelmiş malzeme, takımın ilerleme hareketinin tersi yönünde akar. Yukarı doğrultuda akan malzeme, deliğin giriş kısmında yığılır ve pul şeklini alır. Meydana gelen kovanın yüksekliği, iş parçası kalınlığının yaklaşık 2-3 katı kadar olmaktadır [9-11]. Ayrıca, Sürtünmeli delme işleminde meydana gelen kovanın biçimi bulanık mantık yöntemi ile de incelenebilir [12]. İşlem sırasında sürtünme etkisi ile oluşan ısı delinen deliğin çevresindeki mikro yapı yeniden kristalleşerek ince taneli ve kararlı bir yapı meydana getirir. Delinen malzemenin mikro yapısı, yüksek sıcaklık, ısıl dönüşüm ve normal deformasyon etkisiyle değişir. İşlem sırasında, ısıdan etkilenmiş bölgede büyük ve uzun tane yapıları arasında bölgesel bir plastik akış meydana gelir ve yeniden kristalleşmiş tabakalar oluşur [13].

Sürtünmeli delme işleminde, seçilen parametrelere bağlı olarak meydana gelen moment, eksenel kuvvet ve ısı transferi sayısal olarak sonlu elemanlar metodu, analitik model ve 3D yazılımlar yardımıyla da analize edilebilir. Modelleme yöntemleri ile iş milinin devir sayısının artması ile meydana gelen sıcaklık değerlerinin deneysel çalışmalarda ölçülen değerler ile benzerlik gösterebilir [8, 12, 14]. İşlem sırasında sürtünme kaynaklı oluşan sıcaklığın miktarı işlemi, özellikle kovanın geometrik boyutlarını ve böylece işlemin kalitesini etkileyen en önemli parametredir. Ayrıca, işlem sırasında meydana gelen kovanın geometrik boyutları: çeper kalınlığı ve yüksekliği, malzeme kalınlığının artması ile düzenli bir şekilde artar [15].

Sürtünmeli delme işlemi ile ilgili literatürde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilmiş kovanların dış çeper eğrileri geometrik olarak bir parabol şeklinde analize edilebilir. Sürtünmeli delinen malzemeden boşalan toplam malzemenin hacmi, kovani ve pulu oluşturan malzemelerin toplam hacmine eşitlenerek kovan yüksekliğini, malzeme kalınlığına, delik çapına, koniklik açısına ve ilerleme hızına bağlı olarak, matematiksel bir şekilde, deneysel çalışma yapılmadan hesaplanabilir. Ayrıca, kovan yüksekliği denklemi μ , denklem katsayısı 0 ile 1,21 aralığında değerler alır.

Sürtünmeli delme işleminin temel amacı ince cidarlı malzemelerde, elde edilen kovan yardımıyla bağlantı uzunluğunu ve mukavemetini arttırmaktır. Bu amaçla, işlemde oluşan kovanın, çeper kalınlığı ve yüksekliği gibi geometrik boyutları işlemin temel amacını oluşturur. Kovanın geometrik boyutları üzerinde en etkili olan parametreler: delik çapı, numune malzemenin çeper kalınlığı, takımın koniklik açısı ve seçilen ilerleme hızıdır. Literatür çalışmalarında, bu parametrelere bağlı olarak, deneysel herhangi bir uygulama yapmadan, seçilen herhangi bir malzemenin sürtünmeli delme işleminde elde edilebilecek kovanın yüksekliği yaklaşık olarak hesaplanabilir [16]. Bu çalışmada ise deneysel olarak elde edilmiş ve yüksekliği ölçülmüş kovanların boyutları, literatür çalışmalarından elde edilmiş denkleme uygunluğu analiz edilmiştir. Ayrıca, literatür çalışmalarından elde edilmiş kovan yüksekliği denkleminin, bu çalışmadan elde edilmiş kovan yüksekliği değerlerine göre, doğruluğu incelenmiştir.

2. Deneysel Çalışma

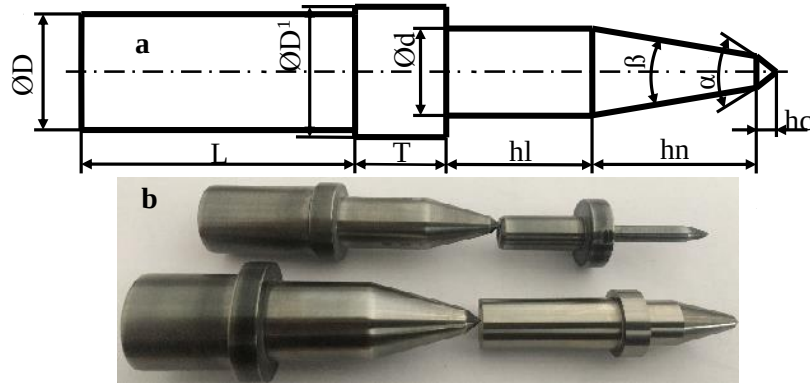
Yapılan çalışmada 2, 4, 6, 8 ve 10 mm kalınlıklarında, 70x500 mm boyutlarında hazırlanmış A7075 ile St37 levhalar 5,10,15 ve 20 mm çaplarında, sırasıyla, HSS ve WC konik takımlar ile 1120 dev/dak devir sayısında ve 25 mm/dev ilerleme hızında sürtünmeli delinmiştir. Deneyler, Şekil 1 a, b ve c’de gösterildiği gibi Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği CNC atölyesinde, TAKSAN APU II 400 tipi konvansiyonel freze tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri, bağlama kalıbı (Şekil 1.b) yardımıyla tezgâha

bağlanmış. Şekil 2’de ise deneysel çalışmada kullanılan hem HSS hem de WC takımların geometrik boyutları gösterilmiştir.



Şekil 1. a) Freze tezgâhı, b) bağlama kalıbı, c) deney seti.

İşlemede kullanılan, Şekil 2 a’da geometrik boyutları ve Şekil 2 b’de ise fotoğrafları gösterilmiş olan konik takımların geometrik boyutları Tablo 1’de belirtilmiştir. Bu geometrik boyutlar: $\varnothing d$ delinecek delik çapı veya takımın delinecek delik çapına eşit olan boyuttur. $\varnothing D$ konik takımın tezgaha bağlanmasını sağlayan sap kısmının çapıdır. Bu çapın değeri standart pens çaplarına uygun olması istenir. Böylece, konik takımla pensler yardımıyla tezgaha bağlanabilirler. $\varnothing D_1$ çapı takımın omuz bölgesinin çapıdır. Bu boyutun değeri takımın hem delik çapından ($\varnothing d$) hem de sapın çapından ($\varnothing D$) daha büyük seçilir. Böylece, işlem sırasında ergiyerek yumuşamış, fakat delinen levhanın üst yüzeyine doğru akan malzemeyi, işlem sonunda, levhanın yüzeyine bastırır ve pul olarak adlandırılan sızdırmazlık halkasını oluşturur. T, konik takımın omuz bölgesinin kalınlığıdır. Bu kalınlık, takımın işlem sırasında maruz kaldığı gerilmeleri taşıyabilecek boyutlarda olması tercih edilir. Özellikle çentik etkisi de göz önünde bulundurulur. L, konik takımın sap bölgesinin uzunluğudur. Bu uzunluk penslerin ölçülerine göre ayarlanır.

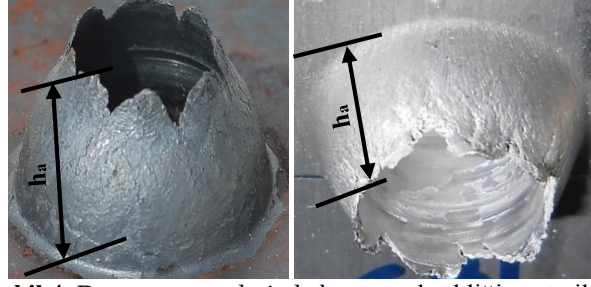


Şekil 2. Sürtünmeli delme işleminde kullanılan a) takımların geometrik boyutları, b) takımların fotoğrafları.



Şekil 3. Sürtünmeli delme işlemi sonucunda elde edilen numuneler.

Deneysel çalışma sırasında oluşan ısının bir sonraki deliğe etkisini önlemek amacıyla Şekil 3’de gösterildiği gibi art arda delinmiş delikler birbirlerinden uzakta sabit mesafelerde delinmiştir. Ayrıca, her bir delik için farklı bir takım kullanıldığından takım değiştirme sürecinde ısınmış iş parçası soğumuştur. Delme işlemi 2 mm kalınlıktaki deney numunesi ile başlanmış, her numuneye dört farklı çapta üçer adet olmak üzere toplam on iki adet delik delinmiştir. Delme işlemi sırasıyla 2, 4, 6, 8 ve 10 mm kalınlıklardaki deney numuneleriyle devam edilmiştir. Deney numuneleri, özel hazırlanmış bağlama aparatı yardımıyla, rijit şekilde sabitlendikten sonra konik takımlar değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Şekil 4’te deney numunelerinden elde edilmiş kovanların geometrik boyutlarından biri olan yüksekliğinin boyut sınırları gösterilmiştir.



Şekil 4. Deney numunelerinde kovan yüksekliği gösterilişi.

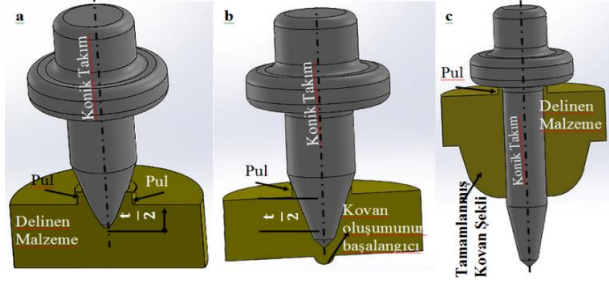
Tablo 1. Konik takımların geometrik boyutları.

Takım No:	Ød mm	ØD mm	ØD ⁱ mm	T mm	L mm	β (°)	α (°)	hl mm
1	5	10	18	5	25	36	90	24
2	10	15	12	5	25	36	90	24
3	15	20	18	5	25	36	90	24
4	20	25	24	5	25	36	90	24
5	5	10	18	5	25	36	90	24
6	10	15	12	5	25	36	90	24
7	15	20	18	5	25	36	90	24
8	20	25	24	5	25	36	90	24
9	5	10	18	5	25	36	90	24
10	10	15	12	5	25	36	90	24
11	15	20	18	5	25	36	90	24
12	20	25	24	5	25	36	90	24
13	5	10	18	5	25	36	90	24
14	10	15	12	5	25	36	90	24
15	15	20	18	5	25	36	90	24
16	20	25	24	5	25	36	90	24
17	5	10	18	5	25	36	90	24
18	10	15	12	5	25	36	90	24
19	15	20	18	5	25	36	90	24
20	20	25	24	5	25	36	90	24

3. Kovan Biçiminin Geometrik Analizi ve Kovan Yüksekliği

3.1. Kovan Biçiminin Geometrik Analizi

Sürtünmeli delme işleminde elde edilen kovanın geometrik boyutları yüksekliği ve çeper kalınlığıdır. Şekil 4’ de kovan yüksekliğinin boyut sınırları gösterilmiştir. Sürtünmeli delme işleminde, kovanın oluşumu, konik takımın ilerleme doğrultusunun tersi doğrultuda hareket etmesi ile tamamlanır. İşlemin başlangıcında takım iş parçasına temas eder etmez sürtünme ısısı hızlı bir şekilde yükselir. Böylece, delinen malzeme ısı etkisiyle yumuşayarak üst tarafa doğru akar ve pul olarak adlandırılan sızdırmazlık halkasını oluşturur. Konik takımın ucu, yaklaşık olarak iş parçası çeper kalınlığının yarısı derinliğe ulaşıncaya kadar pul oluşumu, takımın ucu iş parçası çeper kalınlığının yaklaşık olarak yarısı derinliği geçinceye kadar devam eder ve daha sonra kovan oluşmaya başlar. Takımın ucu yaklaşık olarak iş parçasının kalınlığının yarısına ulaştığı konumdan itibaren kovan oluşumu da başlar. Şekil 5’de kovan oluşumu aşamaları belirtildiği gibi takımın omuz kısmı yukarıya akan ve pulu oluşturan malzemeyi delinen malzeme yüzeyine bastırarak kovan oluşumu tamamlanır ve takım geri çekilir.

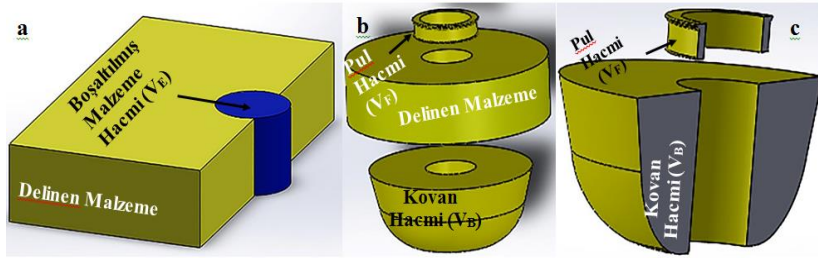


Şekil 5. Kovan oluşumunun adımları, a) Pul Oluşumu, b) Kovan Şeklinin Oluşumu, c) Kovan Şeklinin Tamamlanması [16].

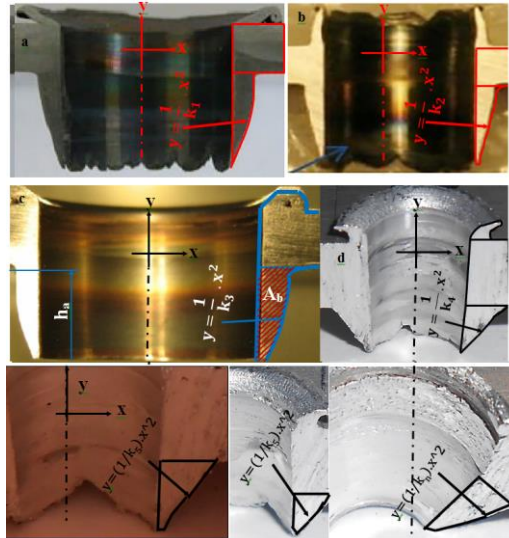
3.2.Sürtünmeli Delme İşleminde Meydana Gelen Kovanın Hacmi

Sürtünmeli delme işleminde ısı etkisiyle yumuşayarak boşalan toplam malzemenin hacmi V_E olarak alınmıştır. İşlem sırasında çevreye yayılan malzemenin hacmi ihmal edildiği kabul edilirse boşalan toplam malzeme hacmi (V_E) pulun (V_F) ve kovanın (V_B) hacimlerinin toplamının eşit olduğu Şekil 6'da görülmektedir [16].

$$V_E = V_F + V_B \quad (1)$$



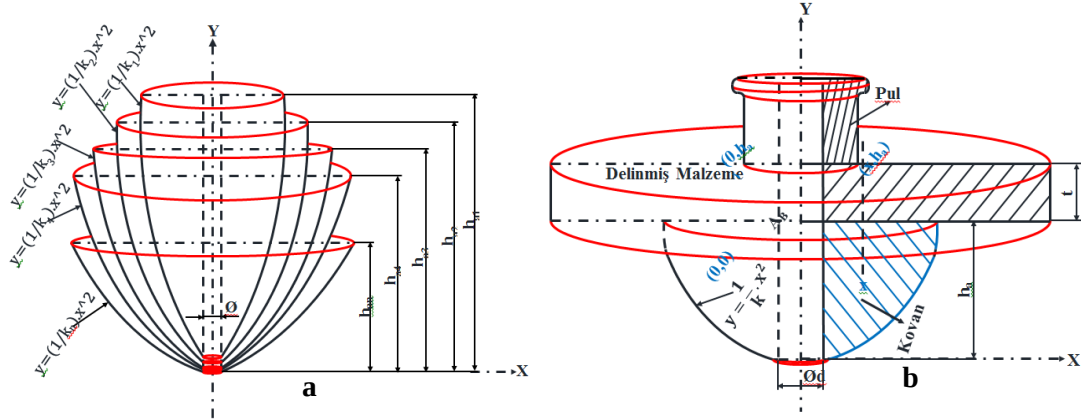
Şekil 6. Boşaltılan malzemenin hacmi, a) boşaltılan malzeme, b) pul ve kovan, c) pul ve kovanın kesit görünüşü [16].



Şekil 7. Farklı Deneysel Çalışmalarda Elde Edilen Kovan Biçimlerinin Kesit Görünüşleri.

Sürtünmeli delme yöntemiyle elde edilmiş kovanların kesit biçimleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi kovanın dış çeper eğrisi bir parabol eğrisine benzemektedir.

Kovan biçimi, özellikle kovanın yüksekliği ve çeper kalınlığı gibi geometrik boyutları, bağlantı uzunluğunu ve mukavemetini artıran önemli değerlerdir. Kovan biçimlerinin dış eğrisi geometrik olarak parabol eğrisine benzer. Bu benzerlik yardımı ile kovanın yüksekliği malzemenin boşalan toplam malzemenin ve kovanın hacimlerine bağlı olarak hesaplanabilir. Parabol eğrisinin eğimi farklılık gösterir. Eğrinin eğimindeki bu farklılık (k) sabiti ile belirtilirse kovanın biçimini oluşturan eğrinin eğimi delik çapına, malzeme kalınlığına, devir sayısına, ilerleme hızına, konik takımın ve delinen malzemenin özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterir. Eğrinin eğimindeki bu farklılığa bağlı olarak kovanın yüksekliği değişir.



Şekil 8. a) Kovan dış eğrisinin biçimi, b) sürtüneli delmede kovan denkleminin eğri biçiminde elde edilmesi [16].

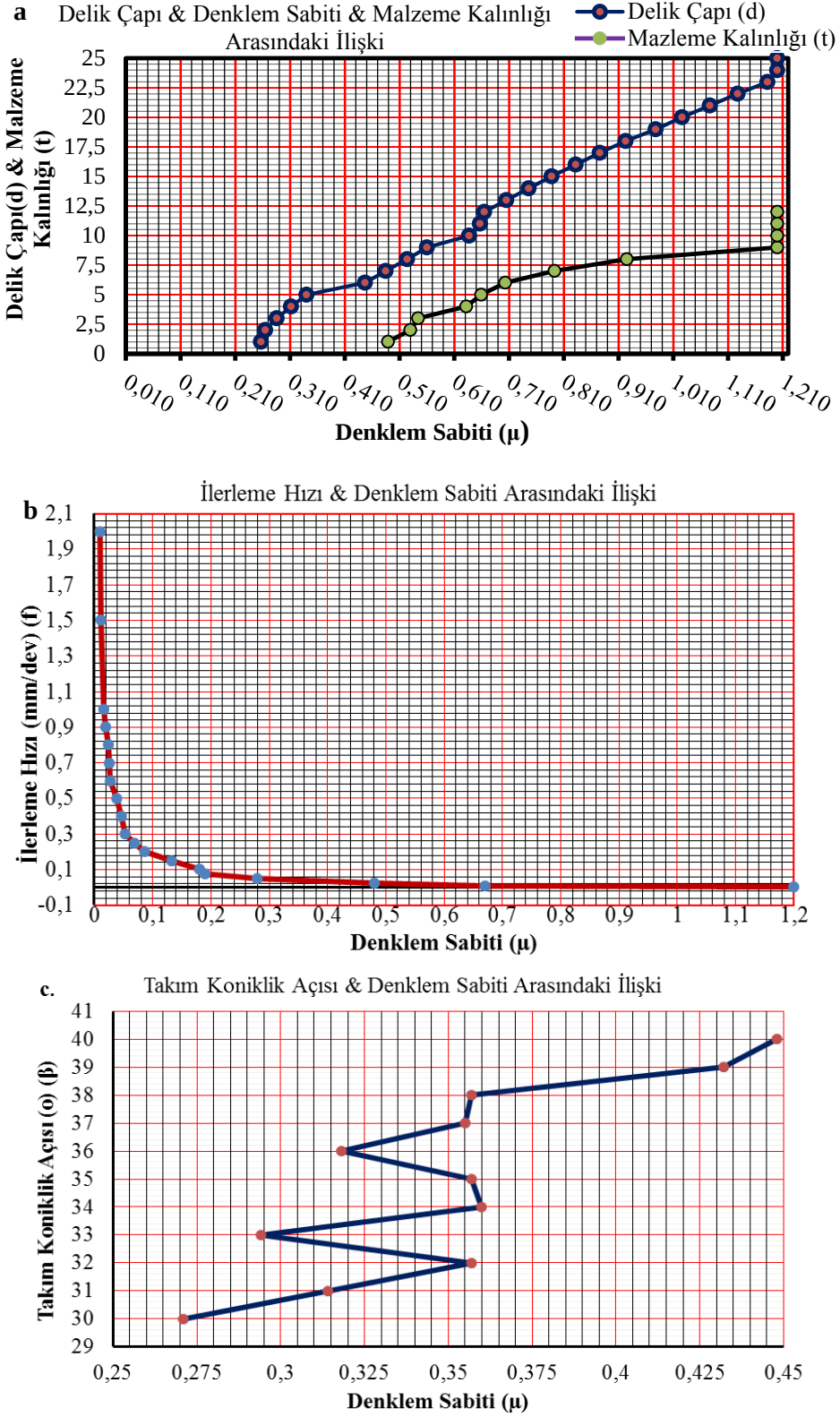
Parabol'un eğri denklemi, denklem 2'de gösterilmiştir. Bu eğrinin eğimi kovan yüksekliğini doğrudan etkileyen bir parametredir. Kovanın dış çeper eğrisinin eğimi kovan yüksekliğini etkileyen parametre olduğunu geometrik olarak Şekil 8a ve Şekil 8b'de gösterilmiştir [16].

$$y = \frac{1}{k} x^2 \quad (2)$$

Kovan yüksekliğinin denklemi, sürtüneli delinen delik çapına, malzemenin kalınlığına, takımın koniklik açısına, ilerleme hızına ve μ kat sayısına bağlı denklem 3'te gösterildiği gibi ifade edilebilir [16].

$$h_a = \frac{d}{4 \cdot \mu} + \sqrt{\left[\frac{d^2}{16 \cdot \mu^2} - \frac{t^3 \cdot \tan^2(\beta)}{12 \cdot d \cdot \mu} + \frac{500 \cdot t \cdot f}{d \cdot \mu^2} \right]} \quad (3)$$

Denklem 3'teki μ katsayısı delik çapına, malzeme kalınlığına bağlı olarak Şekil 9a da gösterilmiştir. Ayrıca μ katsayısının ilerleme hızına ve takımın koniklik açısına bağlı olarak sırasıyla Şekil 9b ve c deki grafiklerden seçilebilir. Ancak kovan yüksekliği üzerindeki en etkili parametreler, sırasıyla, delik çapı (konik takımın çapı (d)) ve sürtüneli delinen malzeme (t) kalınlığıdır. Bu nedenle μ katsayısı sadece delik çapına ve malzeme kalınlığına bağlı olarak seçilebilir. Belirlenen işlem parametrelerine göre deneysel çalışmadan önce elde edilebilecek kovan yüksekliği (h_a) denklem 3 yardımıyla teorik olarak, kabul edilebilir bir hata oranı ile hesaplanabilir. Bu çalışmamızda seçtiğimiz parametrelerin değerleri denklem 3'te yazılarak hesaplanan kovan yüksekliği değerleri deneysel olarak ölçülen kovan yüksekliği sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 9. Denklem 3'teki (μ) sabiti için a) delik çapına (d) malzeme kalınlığına (t), b) ilerleme hızına (f), c) koniklik açısına (β) bağlı olarak seçilebilecek değerler [16].

3.3. μ Denklem Katsayısının Delik Çapına Ve Malzeme Kalınlığına Göre Analizi

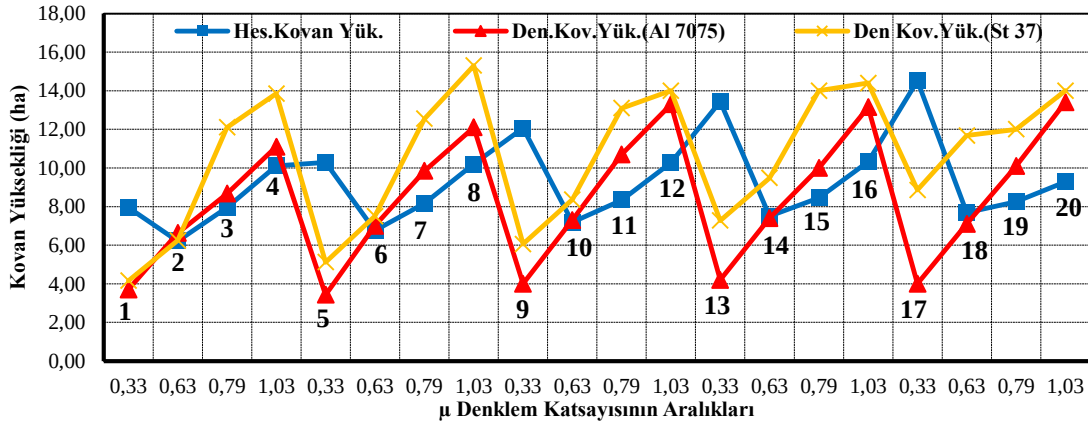
3.3.1 μ Denklem Katsayısının Al 7075 ve St37 Delik Çapına Göre Analizi

μ denklem katsayısının değeri, delik çapına, malzeme kalınlığına, ilerleme hızına ve koniklik açısına göre Şekil 9 a, b ve c'deki grafiklerden, sırasıyla, delik çapı ile malzeme kalınlığına, ilerleme hızına ve takım koniklik açısına bağlı olarak seçilebilir [16].

Yapılan çalışmaya göre μ denklem katsayısının delik çapına ve malzeme kalınlığına göre alabileceği değerlerin sınırları, ilerleme hızına ve koniklik açısına göre alacağı değerleri de kapsamaktadır. Bu nedenle μ denklem değerinin teorik olarak alabileceği değerleri delik çapına ve malzeme kalınlığına göre analiz edilmiştir.

Şekil 10'da μ denklem katsayısının Al7075 ve St37 delik çapının kovan yüksekliği göre etkisi gösterilmiştir. Bu grafikte kovan yüksekliğini belirlemek için literatürdeki çalışmadan elde edilen Şekil 9'daki grafikten seçilmiştir. Seçilen bu değerler delik çapları göz önüne alınarak belirlenmiştir.

Şekil 10'da denklem 3 yardımıyla hesaplanan kovan yüksekliği değerleri, delik çapına göre hem A7075 alüminyum alaşımı hem de St37 çelik malzemelerinin sürtünmeli delinmesinde elde edilen kovan yükseklikleri karşılaştırılmıştır. μ değeri, delik çapına bağlı olarak Şekil 8a'daki grafikten seçilmiştir. Seçilen μ değerlerine göre hesaplanan ve deneysel çalışmada ölçülen kovan yüksekliği değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 10'da 1-20 arası verilen değerler deney sırasıdır. Şekil 10'daki grafiğin üzerindeki noktalar, malzeme kalınlığı değerleri 2-10 mm aralığında ve delik çapının ise Ø5 mm - Ø20 mm aralığında değişmesi ile kovan yüksekliği denkleminin katsayısı μ 'nün değerleri 0.33 ile 1.03 arasında değişmiştir. 0.33 ile 1.03 aralığında değişen μ 'nün değerleri ile hesaplanan kovan yüksekliği değerleri ile hem A7075 alaşımının hem de St37 çelik levhaların sürtünmeli delinmesinde ölçülen kovan yüksekliği değerleri arasında uyumlu bir değişimin olduğu tespit edilmiştir. St37 çelik malzemenin sürtünmeli delinmesinde elde edilen kovanların yüksekliği değerleri hem teorik olarak hesaplanan hem de A7075 alaşımın sürtünmeli delinmesinde ölçülen kovan yüksekliği değerlerinden daha yüksek olmuştur. En küçük kovan yüksekliği değerleri 2 mm malzeme kalınlığında ve Ø5 mm delik çapında elde edilirken, en büyük değerler ise 10 mm malzeme kalınlığında ve 20 mm delik çapında elde edilmiştir. Teorik olarak hesaplanan ve deneysel olarak ölçülen kovan yüksekliği değerlerinin değişim grafikleri benzerlik gösterdiği, birbiriyle uyumlu bir değişim göstermiştir. Hem A7075 alaşımının hem de St37 çelik levhaların sürtünmeli delinmesinde elde edilen kovan yüksekliği değerlerinin teorik olarak hesaplanan değerler ile en iyi uyum gösterdiği noktalar 2, 6 ve 10 sıra numaralı deneyler olmuştur. Diğer bir ifade ile 2 mm malzeme kalınlığı, Ø5 mm delik çapı, 4 mm malzeme kalınlığı, Ø10 mm delik çapında ve 6 mm malzeme kalınlığı, Ø10 mm delik çapında hem teorik hem de deneysel kovan yüksekliği değerlerinin uyum göstermiştir.



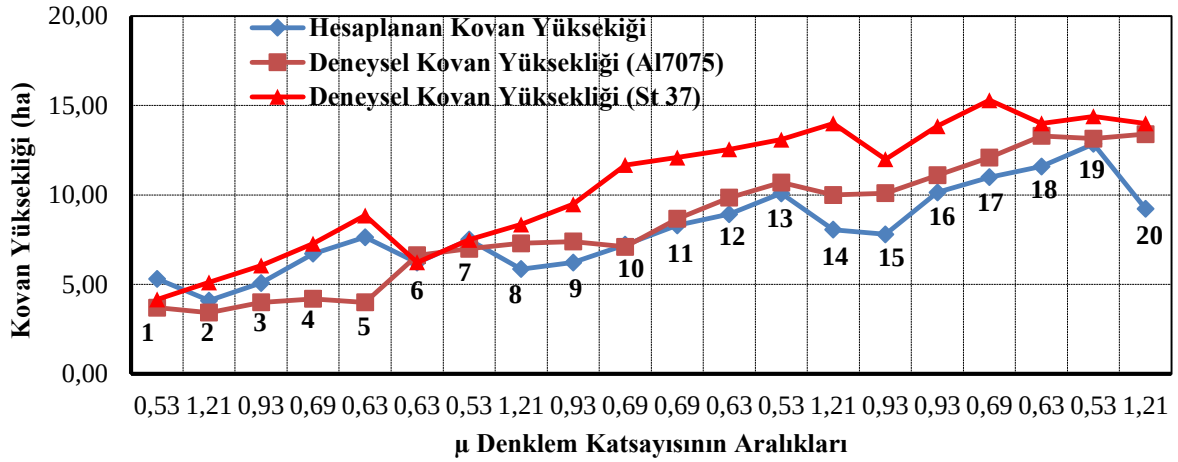
Şekil 10. A7075 ve St37 numunelerinin sürtünmeli delinmesinde delik çapının deneysel ve teorik μ denklem katsayılarına etkisi.

St37 çelik malzeme A7075-T651 alaşımına göre daha sünek olduğundan ve sünek malzemeler sürtünmeli delme işlemlerinde daha iyi sonuçlar verdiği için (μ) denklem katsayısı değerleri daha küçük olmuştur. Ayrıca, değişen malzeme kalınlığı ve delik çapına bağlı olarak meydana gelen değişim de A7075-T651 alaşımına göre daha az olmuştur. St37 çelik levhalarda elde edilen maksimum deneysel (μ) denklem katsayıları ile A7075-T651 alaşımından elde edilene göre yaklaşık olarak %25 saha büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca, St37 levhalarda artan malzeme kalınlığı ile (μ) denklem katsayısı yaklaşık olarak %25-30 oranında azalmıştır. Ancak, A7075-T651 alaşımında ise maksimum (μ) denklem katsayısı değerleri, 2 mm malzeme kalınlığı ve 5 mm delik çapında, 1.21

olarak kaydedilmiştir. Ayrıca, düzenli olarak artan malzeme kalınlığı ve delik çaplarında, 10 mm malzeme kalınlığında ve 20 mm delik çapında, da maksimum (μ) denklem katsayısı 1.21 olarak kaydedilmiştir.

3.3.2. μ Katsayısının Al 7075 ve St 37 Malzeme Kalınlıklarına Göre Analizi

Şekil 11'deki grafikte μ denklem katsayısının A7075 ve St37 malzeme kalınlığına göre etkisi gösterilmiştir. Bu grafikte kovan yüksekliğini belirlemek için gerekli olan denklem katsayısı değerleri malzeme kalınlığına bağlı olarak Z. Demir'in yapmış olduğu çalışmadan elde ettiği ve Şekil 9'da gösterildiği grafiklerden seçilmiştir[16]. Grafikte, malzeme kalınlığına bağlı olarak μ değerleri Şekil 9a'daki grafikten seçilerek kovan yüksekliği hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler deneysel kovan yükseklikleri ile karşılaştırılmıştır. Deneysel ölçülen kovan yüksekliği değerleri ile malzeme kalınlığına göre seçilen denklem katsayısına göre hesaplanmış kovan yüksekliği değerlerinin değişim grafikleri benzerlik göstermiştir.

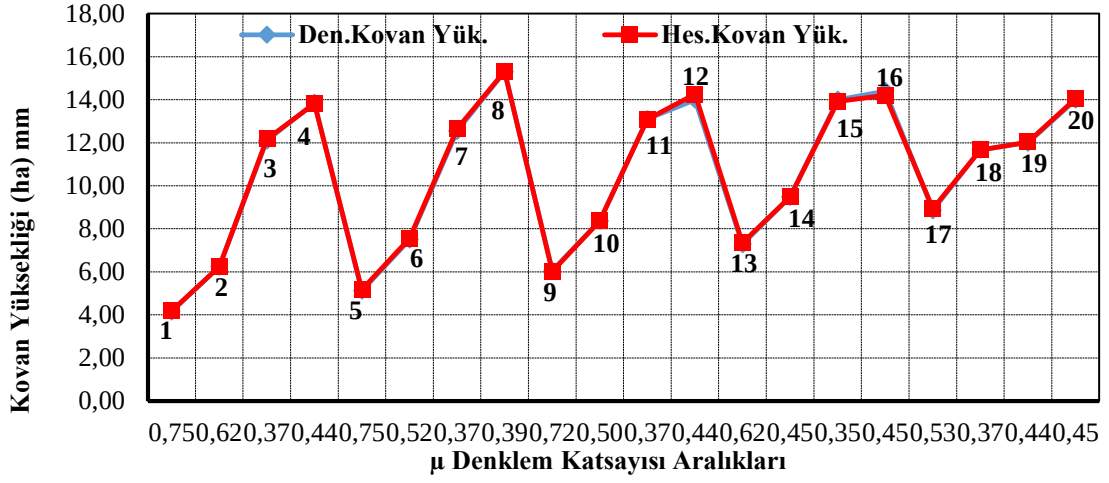


Şekil 11. μ Denklem Katsayısının A7075 ve St37 Malzeme Kalınlığına Göre Etkisi.

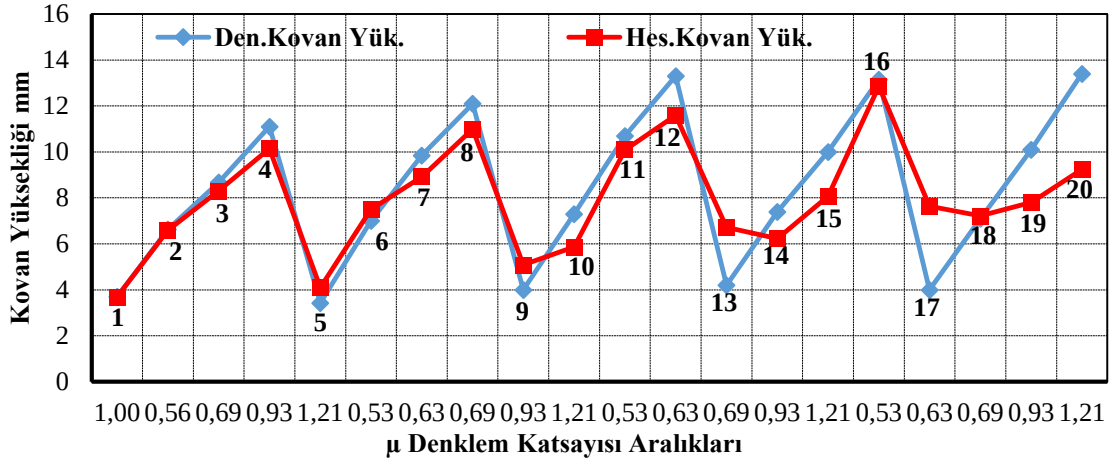
3.3.3. μ Denklem Katsayısının Kovan Yüksekliğine Göre A7075 ve St37 İçin En Uygun Seçimi

Kovan yüksekliğini teorik olarak hesaplamak için literatürde yapılan çalışmalarda μ değerinin seçimi önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle literatürde μ değerinin 0.25 ile 1.21 arasında seçilebileceği belirtilmiştir[16]. Ancak yapılan analizde deneysel kovan yükseklikleri ile hesaplanan kovan yükseklikleri arasında önemli farkların olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle μ denklem katsayısı değerinin tespit edilmesi ve sınırlarının yeniden belirlenmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Şekil 12'de St37 çelik malzemesi için μ denklem katsayısının değerlerinin sınırları, deneysel çalışmadan elde edilmiş kovan yüksekliği değerlerine bağlı olarak yeniden tespit edilmiştir.

Şekil 12'de St37 malzemesinin sürtünmeli delinmesinde delik çaplarına göre μ değerinin tespiti yapılmıştır. 1-4 sıra numaralı deneylerde $t=2$ mm kalınlığındaki malzemelerin $\varnothing 5$, $\varnothing 10$, $\varnothing 15$, $\varnothing 20$ mm çaplarında sürtünmeli delinmesinde μ değerleri 0.75 ile 0.44 aralığında değerler almıştır. Sırasıyla, 5-8 sıra numaralı deneylerde $t=4$ mm, 9-12'de $t=6$ mm, 13-16'de $t=8$ mm ve 17-20'de ise $t=10$ mm kalınlığındaki St37 çelik malzemelerin $\varnothing 5$, $\varnothing 10$, $\varnothing 15$, $\varnothing 20$ mm çaplarında sürtünmeli delinmesinde μ denklem katsayısı değerlerinin yine sırasıyla, 0.75-0.39, 0.72-0.44, 0.62-0.45 ve 0.53-0.45 aralıklarında değişmiştir. Ayrıca, yapılan analizde hesaplanan kovan yüksekliği ile deneysel kovan yüksekliği arasında büyük benzerlik olduğu görülmüştür. μ değerinin 6 mm kalınlıklardaki malzemelerde 0,75 ile 0,37 arasında değiştiği, 8 mm ve üstü kalınlıklar için ise 0,62 ile 0,35 arasında değiştiği tespit edilmiştir.



Şekil 12. St37 için kovan yüksekliğine göre en uygun (μ) değerinin seçilmesi.



Şekil 13. A7075-T651 için kovan yüksekliğine göre en uygun (μ) değerleri.

Şekil 13'te Al 7075 alaşımının sürtünmeli delinmesinde delik çaplarına göre μ değerleri tespiti edilmiştir. 1-4 sıra numaralı deneylerde $t = 2$ mm kalınlığındaki malzemelerin $\varnothing 5$, $\varnothing 10$, $\varnothing 15$, $\varnothing 20$ mm çaplarında sürtünmeli delinmesinde μ değerleri 1 ile 0.56 aralığında değerler almıştır. Sırasıyla, 5-8 sıra numaralı deneylerde $t = 4$ mm, 9-12'de $t = 6$ mm, 13-16'de $t = 8$ mm ve 17-20'de ise $t = 10$ mm kalınlığındaki St37 çelik malzemelerin $\varnothing 5$, $\varnothing 10$, $\varnothing 15$, $\varnothing 20$ mm çaplarında sürtünmeli delinmesinde μ denklem katsayısı değerlerinin yine sırasıyla, 1.21-0.53, 0.93-0.53, 0.6-0.45 ve 0.63-1.21 aralıklarında değişmiştir. Ayrıca yapılan analizde hesaplanan kovan yüksekliği ile deneysel kovan yüksekliği arasında 6 mm kalınlığına kadar büyük oranda benzerlik olduğu görülmüştür. A7075 için μ denklem katsayısı değerinin sınırları 0.53 ile 1.21 arasında değişmiştir.

4. Sonuçlar

A7075 alaşımının HSS ve St37 çelik levhaların ise WC takımlar ile sürtünmeli delinmesinde ölçülen kovan yüksekliği değerlerine bağlı olarak elde edilmiş sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Literatürde verilen (μ) mü denklem katsayısı değerlerinin 0.25 ile 1.21 aralığında değerler alacağı belirtilmiştir. Ancak, mevcut deneysel çalışmada, A7075-T651 alaşımının sürtünmeli delinmesinde (μ) mü denklem katsayısı değerlerinin 0.53 ile 1.21 arasında olduğu tespit edilmiştir. Malzeme kalınlığı arttıkça μ denklem katsayısı değeri azalmıştır. St37 çelik levhaların sürtünmeli delinmesinde ise (μ) mü denklem katsayısı değerlerinin 0.39 ile 0.75 arasında olduğu tespit edilmiştir. Malzeme kalınlığı arttıkça μ denklem katsayısının değeri yaklaşık olarak %40 oranında azalmıştır.

- St37 çelik levhaların sürtünmeli delinmesinde, A7075-T651 alaşımına göre daha küçük (μ) denklem katsayısı değerleri kaydedilmiştir. Ayrıca, 2mm St37 çelik levha kalınlığında, 5 mm delik çapında bu değer 0.75, 20 mm delik çapında ise 0.44 olarak kaydedilmiştir. Artan malzeme kalınlığı ile (μ) denklem katsayısının delik çapına bağlı olarak değişim bandı aralığı azalmıştır. Bu aralık 2 mm malzeme levha kalınlığında yaklaşık olarak % 50 iken 10 mm malzeme kalınlığında ise %20'e azalmıştır.
- A7075-T651 alaşımının sürtünmeli delinmesi işleminde kaydedilen (μ) denklem katsayısı değerleri St37 çelik levhalara göre, yaklaşık olarak %25 daha büyük olmuştur. Ayrıca, (μ) denklem katsayısı, delik çapına ve malzeme kalınlığına bağlı olarak, St37 çelik levhalara göre daha düzensiz bir değişim sergilemiştir. Bu da A7075-T651 alaşımının St37 çelik malzemeye göre oldukça gevrek olmasına atfedilir. Bu düzensiz değişime rağmen artan malzeme kalınlığı ile birlikte artan delik çapı şartlarında (μ) denklem katsayısı yaklaşık olarak %20 oranında artış göstermiştir.
- A7075-T651 alaşımında, 2 mm malzeme kalınlığında ve 5 mm delik çapında (μ) denklem katsayısı 1.21 olarak kaydedilirken 10 mm malzeme kalınlığında ve 20 mm delik çapında da en büyü (μ) denklem katsayısı, 1.21 olarak, elde edilmiştir. Böylece, sürtünmeli delinecek levhanın kalınlığına göre uygun delik çapının seçilmesi, uygun sonuçların elde edilmesi açısından oldukça önemlidir.
- St37 çelik levhalar A7075-T651 alaşımına göre daha sünek olduğundan, St37 çelik levhaların sürtünmeli delinmesinde daha büyük kovan yüksekliği değerleri elde edilmiştir.

5. Kaynaklar

- [1] Brinksmeier E. Prediction of tool fracture in drilling. Ann CIRP 1990; 39:97-100.
- [2] Cantero JL, Tard'io MM, Canteli JA, Marcos M, Migu' elez M H. Dry drilling of Ti – 6Al – 4V alloy. Int J Machine Tools & Manuf 2005; 45: 1246–1255.
- [3] Chow HM, Lee SM, Yang LD. Machining characteristics study of friction drilling on aisi 304 stainless steel. J Mater Process Technol 2008; 207: 180–186.
- [4] Lee SM, Chow HM, Huang FY, Yan BH. Friction drilling of austenitic stainless steel by uncoated and PVD AlCrN – TiAlN coated tungsten carbide tools. Int J Machine Tools an& Manuf 2009; 49: 81 – 88.
- [5] Van Geffen JA. Piercing tools. US Patent 1976; 3.939.683.
- [6] Van Geffen JA. methods and apparatuses for forming by frictional heat and pressure holes surrounded each by a boss in a metal plate or the wall of a metal tube. US Patent 1979; 4. 175. 413.
- [7] Van Geffen JA. Rotatable piercing tools for forming bossed holes. US Patent 1980; 4.185.486.
- [8] Miller SF, Tao J, Shih AJ. Friction drilling of cast metals. Int J Machine Tools & Manuf 2006; 46: 1526 – 1535.
- [9] Gopal Krichna PV, Kishore K, Satyanarayana VV. Some investigations in friction drilling AA6351 using high speed steel tools. ARPN J Engin Appl Sci 2010; 5: 1819–6608.
- [10] Miller SF, Blau PJ, Shih AJ. Tool wear in friction drilling. Int Machine Tools & Manuf 2007; 47: 1636–1645.
- [11] Doğru N. AISI 1010 çelik malzemenin sürtünmeli delme yöntemiyle delinmesinde işleme karakteristiklerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2010.
- [12] Sara AEB, Hazem EES, Ahmed MEB, Tawfik TEM. Experimental and thermo-mechanical modeling optimization of thermal friction drilling for aisi 304 stainless steel, CIRP J Manuf Sci Technol 2018;20: 84-92
- [13] Eliseev AA, Fortuna SV, Kolubaev EA, Kalashnikova TA. Microstructure modification of 2024 aluminum alloy produced by friction. Mater Sci &Engin A 2017; 691: 121-125
- [14] Bilgin MB, Gök K, Gök A. Three-dimensional finite element model of friction drilling process in hot forming processes. Proceed Inst Mech Engin Part E: J Process Mech Engin 2017; 231(3): 548-554, 2017.
- [15] Özek C, Demir Z. A7075-T651 alaşımının sürtünmeli delinmesinde kovan yüksekliğinin malzeme kalınlığına göre araştırılması. Dicle Ün Müh Fak Müh Der 2013; 4(2): 61-67.
- [16] Demir Z. A geometrical approach to deriving a bushing height equation for thermal friction drilling. Mater in Technol 2019; 53 (2): 215–224

Tek Fazlı Matris Dönüştürücünün Frekans Değiştirici Olarak Çalışması

Neslihan PİRİNÇÇİ^{1*}, Ahmet ORHAN²

¹ Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ n.pirincci@firat.edu.tr, ² aorhan@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 14/10/2019;

Kabul/Accepted: 10/05/2020)

Öz: Bu çalışmada, Tek Fazlı Matris Dönüştürücünün (TFMD) frekans değiştirici olarak çalışması incelenmiştir. TFMD'nin devre topolojisi ve çalışması ele alınmış ve frekans değiştirici olarak çalışması için güvenli komutasyon anahtarlama stratejisi verilmiştir. Bu çalışmanın modellenmesi ve simülasyonu MATLAB/Simulink de yapılarak belirtilen çıkış frekansı değerleri için çıkış gerilimi dalga şekilleri elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Tek Fazlı Matris Dönüştürücü, Güvenli Komutasyon, Frekans Değiştirici.

Single Phase Matrix Converter Operating as Frequency Changer

Abstract: This paper deals with Single Phase Matrix Converter (SPMC) operating as frequency changer. Circuit topology and operation of the SPMC are explained and safe commutation switching strategy is given for the SPMC operating as frequency changer. Modeling and simulation of this study is performed in MATLAB / Simulink and the output voltage waveforms are obtained for different specified output frequency values.

Key words: Single Phase Matrix Converter, Safe Commutation, Frequency Changer.

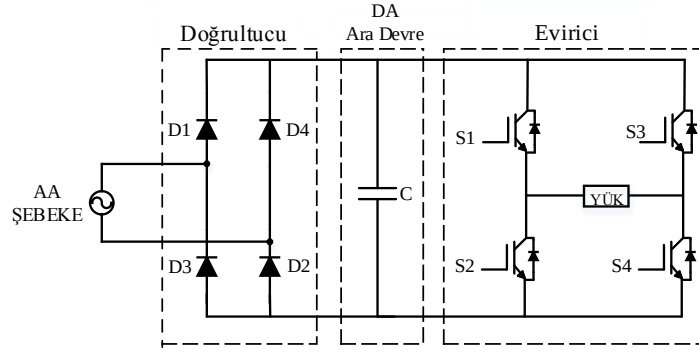
1. Giriş

Günümüzde iklim değişikliğinin en önemli nedenlerinden olan, sera etkisi yapan gazların azaltılması uluslararası toplumun ortak paydalarından biri haline gelmiştir. Çevre ve ekosistem üzerindeki bu zararlı emisyonları azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmak için fosil yakıt kullanan sistemler yerine, elektrik kullanan sistemlerin yaygınlaştırılması üzerine çalışılmaktadır. Bu amaçla elektrikli araçlar konusunda yapılan çalışmalarda bir yoğunlaşma görülmektedir. Son yıllarda sürekli mıknatıs pazarının Çin'in monopolüne geçmesi ve bu mıknatıslar elde edilirken kullanılan radyoaktif madde ve toksik asitlerin insan sağlığında oluşturduğu olumsuzluklar Dünya Sağlık Örgütü'nün, sürekli mıknatıslı motorların üretimine müdahil olma sonucunu ortaya çıkarmış ve kısıtlar gelmeye başlamıştır. Bu nedenlerle literatürde, sürekli mıknatıslı motorların yerini alabilecek alternatif motor ve sürücü düzenekleri araştırılmaya başlanmıştır. Alan sargılı senkron motorların kullanımının önündeki en önemli engellerden biri olan fırça bilezik sisteminin yerini alabilecek sistemler konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Bu bağlamda fırçasız sistemler için dönen trafolu fırçasız uyartım sistemleri ve bu trafoyu besleyen kaynak olarak da TFMD'ler incelenmeye başlanmıştır [1].

Yarı iletken teknolojisindeki hızlı gelişmeye paralel olarak transformatörler üzerine de pek çok çalışma yapılmaktadır. Literatürde TFMD'leri kullanan elektronik güç transformatörleri (PET, Power Electronic Transformer) ve indüksiyon ısıtma (IH, Induction Heating) konusu üzerinde çalışmaların yoğunlaştığı da görülmektedir [2,3].

Sabit gerilim ve frekanslı bir Alternatif Akım (AA) kaynaktan, değişken genlik ve frekanslı bir gerilim elde etmek için çeşitli güç elektroniği devre topolojileri kullanılmaktadır. Bu devre topolojilerine genel bir isim olarak AA-AA dönüştürücüler denilir [4,5]. Şekil 1'de gösterildiği gibi Doğru Akım (DA) ara devreli dönüştürücüler, AA kaynak geriliminin doğrultulduğu doğrultucu devre ve doğrultulan bu gerilimden, değişken gerilim ve frekansın elde edildiği evirici devresinden meydana gelirler [6]. Matris dönüştürücü bir tür zorlamalı komutasyonlu frekans dönüştürücüdür [7,8].

* Sorumlu yazar: n.pirincci@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-1071-8046, ² 0000-0003-1994-4661



Şekil 1. Tek fazlı DA ara devreli dönüştürücü

Matris dönüştürücülerde AA-AA enerji dönüşümü herhangi bir ara devre kullanılmadan tek bir adımda gerçekleşirken, DA ara devreli dönüştürücülerde bu dönüşüm AA-DA-AA şeklindedir. Bunun anlamı, DA ara devreli dönüştürücülerde giriş gücü iki kez dönüştürülerek çıkış gücü elde edilir. Bu durumda da DA ara devreli dönüştürücüdeki kayıp, matris dönüştürücülere göre daha fazla olur. Matris dönüştürücüler DA ara devreli dönüştürücülere göre hacim avantajına da sahiptirler. Matris dönüştürücülerin ara enerji depolama elemanına ihtiyaç duymadan tek bir adımda AA-AA enerji dönüşümünü gerçekleştirmeleri matris dönüştürücüler DA ara devreli dönüştürücülere üstün kılan en önemli özelliklerden biridir. Çünkü DA ara devreli dönüştürücülerde bulunan kondansatör ve indüktans elemanı dönüştürücünün yaklaşık 1/3 hacmini kapladığından, matris dönüştürücünün boyutu DA ara devreli dönüştürücülere göre oldukça küçüktür. Ayrıca kondansatörler; büyük, pahalı ve çalışma ömürlerinin sınırlı olması bakımından sistem açısından çok kritik elemanlardır. DA ara devreli dönüştürücülerde güç transferinin iki yönlü olması için girişte kullanılan doğrultucu devresinin kontrollü olması gerekir. Fakat matris dönüştürücüde kullanılan anahtarlar çift yönlü güç akışına izin verdiği için generatör çalışmada enerji kaynağına geri aktarılabilir. Matris dönüştürücüler dört bölge çalışmaya müsaittirler. Matris dönüştürücüler girişte yükten bağımsız olarak kontrol edilebilir güç faktörü sağlarlar ve birim güç faktöründe çalışabilirler. Geleneksel bir evirici AA giriş tarafında akım harmoniklerine sahiptir. Fakat matris dönüştürücü çift yönlü güç akışı ile birlikte birim güç faktörlü bir sinüzoidal giriş akımına sahiptir. Modülasyon tekniğine bağlı olarak giriş ve çıkış akım dalga şekilleri sinüzoidaldir. Harmonikler sadece anahtarlama frekansı civarındadır ve giriş filtre gereksinimleri minimumdur [4, 8-12].

Matris dönüştürücü topolojisi ilk olarak 1976'da Gyugyi ve Pelly tarafından önerilmiştir [13]. Bu çalışmayı Venturini ve Alessina tarafından yapılan çalışmalar takip etmiştir. Bu çalışmalar üç fazlı matris dönüştürücü üzerine yoğunlaşmıştır [7,8].

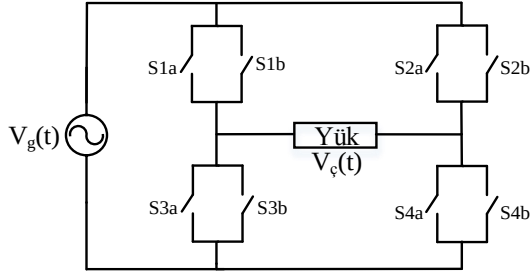
Tek fazlı dönüştürücü üzerine yapılan çalışmalar ise; ilk önce tek fazlı AA-AA dönüştürücü olarak A.Khoei ve S.Yuvarajan tarafından yapılmıştır [14,15]. İlk kez tek fazlı matris dönüştürücü topolojisi 1997'de A. Zuckerberger, tarafından yapılan 'Single-phase matrix converter' isimli çalışmayla ortaya çıkmıştır [16]. Bu çalışmayı 2001'de S.H. Hosseini [17] ve 2002'de S.Firdaus'un [18] yaptığı çalışmalar takip etmiştir. Sonraki dönemlerde yapılan çalışmalar TFMD'nin kullanımını kısıtlayan en büyük zorluklardan olan güvenli komutasyon anahtarlama örüntüsünü başarmak üzerinedir. Z.Idris [19,20]'de H.M.Hanafi [21] ve M.K. Hamzah [22] TFMD'de ki güvenli komutasyon anahtarlama stratejisi üzerine çalışmışlardır.

Bu çalışmada; TFMD'nin devre topoloji verilerek AA-AA frekans değiştirici olarak çalışma durumu için güvenli komutasyon anahtarlama stratejisi incelenmiştir.

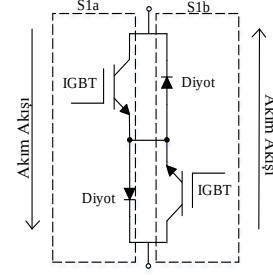
2. Tek Fazlı Matris Dönüştürücü

Matris dönüştürücü, giriş ve çıkış hatları arasında bağlanmış matris şeklinde düzenlenmiş çift yönlü anahtarlardan oluşmuştur. Bu anahtarlar ile giriş gerilimi farklı modülasyon algoritmaları ile anahtarlanarak çıkışta istenilen genlik ve frekans değerine sahip bir gerilim elde edilir [4].

TFMD'nin devre konfigürasyonu Şekil 2'de verilmiştir. Bu devrede dört tane çift yönlü anahtar kullanılır. Şekil 3'de ortak emiterli çift yönlü anahtarın gösterimi verilmiştir. Bu anahtarlar her iki yönde akımı ileten ve ters gerilimleri bloke etme özelliğine sahip olan anahtarlardır. Tek fazlı matris dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimi sırasıyla 1 ve 2 numaralı denklemlerle verilmiştir. Pasif R-L yük altında çıkış gerilimi ve çıkış akımı arasındaki ilişki ise Denklem 3'de verilmiştir [16].



Şekil 2. TFMD'nin devre konfigürasyonu



Şekil 3. Ortak emiterli çift yönlü anahtar yapısı

$$v_g(t) = \sqrt{2}V_g \sin \omega_g t \quad (1)$$

$$v_\chi(t) = \sqrt{2}V_\chi \sin \omega_\chi t \quad (2)$$

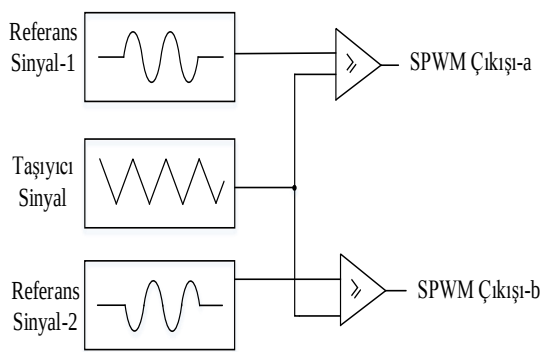
$$v_\chi(t) = R i_\chi(t) + L \frac{di_\chi(t)}{dt} \quad (3)$$

Denklemlerdeki g indisi girişi, χ indisi ise çıkışı ifade etmektedir

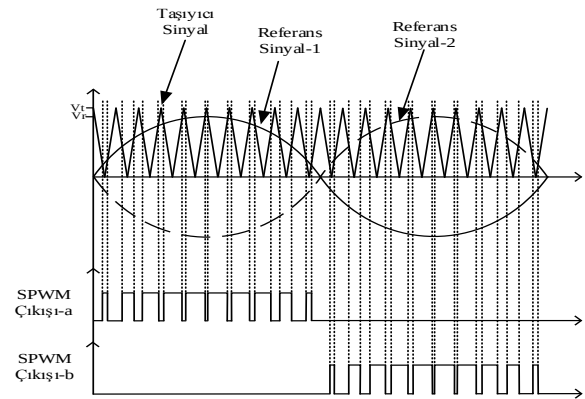
2.1 Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu

Bu çalışmada anahtarlara uygulanan sürme işaretlerini elde etmek için sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu (SPWM, Sinüsoidal Pulse Width Modulation) tekniği kullanılmıştır. SPWM yüksek frekanslı üçgen taşıyıcı dalga ile düşük frekansta sinüzoidal referans dalganın karşılaştırılması esasına dayanır. Bu iki dalganın kesişim noktaları anahtarlama anlarını belirler. Her yarım periyottaki darbe sayısı taşıyıcı dalganın frekansına bağlıdır. Sistemin anahtarlama frekansı taşıyıcı dalganın frekansındır. Burada, V_r referans sinyalin genliği ve V_t de taşıyıcı sinyalin genliğidir. Referans sinyalin genliğinin, taşıyıcı sinyalin genliğine oranı modülasyon indeksini (M_i) verir [10,19]. Modülasyon indeksi Denklem 4'de verilmiştir Şekil 4'de SPWM'in nasıl elde edildiği; Şekil 5'de ise anahtarlama anlarının nasıl belirlendiğini gösteren ve aynı zamanda modelde kullanılacak olan SPWM-a ve SPWM-b çıkış dalga şekilleri verilmiştir.

$$M_i = \frac{V_r}{V_t} \quad (4)$$



Şekil 4. SPWM'in elde edilmesini gösteren bağlantı şeması



Şekil 5. SPWM'in oluşumu

2.2 Komutasyon Problemi ve Anahtarlama Stratejisi

Teorik olarak tek fazlı bir matris dönüştürücüde, anahtarların anahtarlama sırası ani ve eş zamanlı olmalıdır. Fakat pratikte IGBT'nin kesim karakteristiğinden dolayı bunu gerçekleştirmek mümkün değildir. Çünkü kollektör akımının son bulması (tailing off), bir sonraki anahtarın iletme geçmesiyle tamamlanmamış olacağından bir kısa

devre oluşacaktır. Bu problem indüktif bir yük kullanıldığı zaman oluşur ve iki önemli olayla sonuçlanır. Bu olayların birincisi, akım piklerinin neden olduğu kısa devre yolu ve ikincisi de akımın yön değiştirmesinin sonucu olarak indüktansta indüklenen gerilim pikleridir. Bu iki durumda da anahtarlar çok fazla tahrip edici etkilere maruz kalacaktır. Bu sebeplerden dolayı sistematik bir anahtarlama stratejisine ihtiyaç duyulur. Bu strateji, iletim sırası gelen anahtar iletime geçirilmeden önce, kesime gidecek anahtarın kesim süresi için yeterli ölü zamanın 'td' sağlanmasıdır [19,23].

Bu konu üzerine; tek fazlı bir matris dönüştürücünün 50 Hz'lik bir giriş frekansı için, 12.5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 100 Hz ve 150 Hz'lik çıkış frekans durumları incelenmiştir [18-22].

3.Tek Fazlı Matris Dönüştürücünün Güvenli Komutasyon Anahtarlama Stratejisi

Tek Fazlı matris dönüştürücüde, çıkış frekansı anahtarlama örüntüsü ile belirlenir. Anahtarlama örüntüsü değiştirilerek istenilen çıkış frekansları elde edilebilir.

Bu çalışmada giriş frekansının katları ve askatlarında çıkış frekansı elde edilmiştir. 50 Hz'lik bir giriş frekansı için 12.5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 100 Hz ve 150 Hz çıkış frekanslarını elde etmek için kullanılan anahtarlama stratejisi verilmiştir. Tek fazlı matris dönüştürücünün anahtarlama stratejisi için kullanılacak devre konfigürasyonu Şekil 2'deki gibidir. Dört tane çift yönlü anahtar kullanılmıştır. Bu anahtarlar Şekil 3'de gösterildiği gibi ortak emiterli olacak şekilde bağlanmıştır. S1 ve S2 anahtarı komutasyon, S3 ve S4 anahtarı ise PWM anahtarıdır. Anahtarlar Sij olarak isimlendirilmiştir. 'i' indisi anahtar numarasını (i=1,2,3,4) ve 'j' indisi ise SPWM-a veya SPWM-b çıkış sinyallerini gösterir. Bunun manası, eğer PWM anahtarlarından j=a olan bir anahtarın o anda iletimde olması gerekiyorsa SPWM-a çıkışındaki sürme işareti, eğer j=b indisi olan bir anahtar iletime geçecekse SPWM-b çıkışındaki sürme işareti kullanılmalıdır.

İstenilen çıkış frekansını elde etmek için oluşturulacak anahtarlama stratejisi temelde dört durum üzerine dayandırılır. Bu stratejide, herhangi bir 't' anı için sadece iki anahtar iletimdedir [18,19].

Güvenli Komutasyon için durumlar şunlardır:

Durum-1: Şekil 6(a)'da gösterildiği gibi akım akışını sürdüren anahtarlar S1a ve S4a anahtarlarıdır. S2b anahtarı ise komutasyon amacıyla kullanılan anahtardır. S4a anahtarının kesimde olduğu durumlarda akım akışı S1a ve S2b üzerinden devam eder. Bu durum Şekil 6(b)'de gösterilmiştir. Bu durumda giriş gerilimi ve çıkış gerilimi pozitifdir.

Durum-2: Şekil 7(a)'da gösterildiği gibi akım akışını sürdüren anahtarlar S1b ve S4b anahtarlarıdır. S2a anahtarı ise komutasyon amacıyla kullanılan anahtardır. S4b anahtarının kesimde olduğu durumlarda akım akışı S1b ve S2a üzerinden devam eder. Bu durum Şekil 7(b)'de gösterilmiştir. Bu durumda giriş gerilimi ve çıkış gerilimi negatiftir.

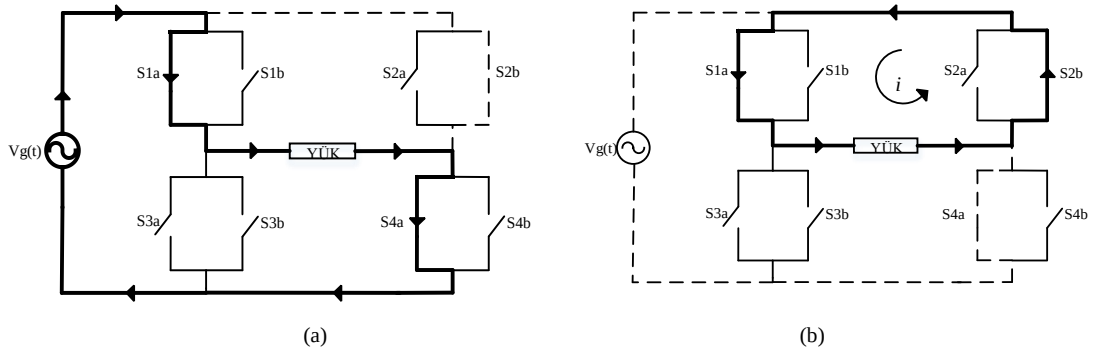
Durum-3: Şekil 8(a)'da gösterildiği gibi akım akışını sürdüren anahtarlar S3a ve S2a anahtarlarıdır. S1b anahtarı ise komutasyon amacıyla kullanılan anahtardır. S3a anahtarının kesimde olduğu durumlarda akım akışı S1b ve S2a üzerinden devam eder. Bu durum Şekil 8(b)'de gösterilmiştir. Bu durumda giriş gerilimi pozitif ve çıkış gerilimi negatiftir.

Durum-4: Şekil 9(a)'da gösterildiği gibi akım akışını sürdüren anahtarlar S3b ve S2b anahtarlarıdır. S1a anahtarı ise komutasyon amacıyla kullanılan anahtardır. S3b anahtarının kesimde olduğu durumlarda akım akışı S1a ve S2b üzerinden devam eder. Bu durum Şekil 9(b)'de gösterilmiştir. Bu durumda giriş gerilimi negatif ve çıkış gerilimi pozitifdir [20, 22].

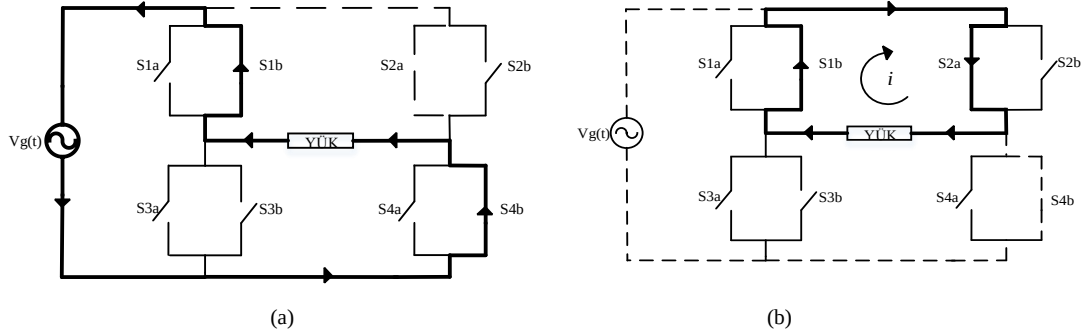
Tablo 1'de ise güvenli komutasyon için durumlar ve iletimde olan anahtarların gösterimi verilmiştir.

Tablo 1. Güvenli komutasyon anahtarlama stratejisi için durumlar ve iletimde olan anahtarların gösterimi

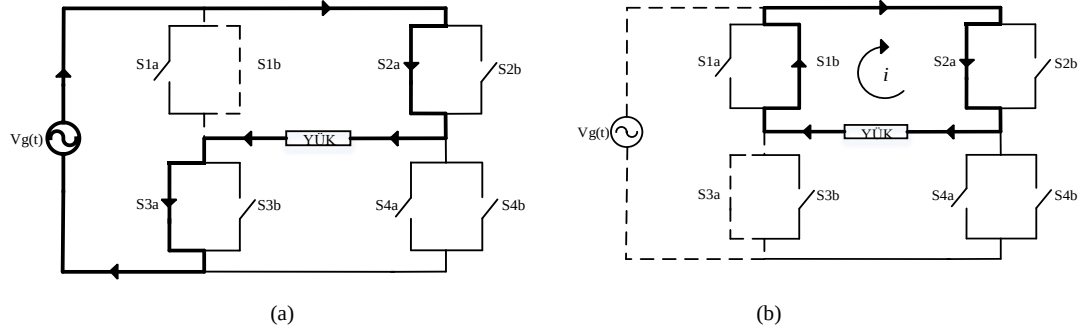
Giriş Gerilimi	Çıkış Gerilimi	Durumlar	PWM Anahtarı	Komutasyon Anahtarları
+	+	1	S4a	S1a-S2b
-	-	2	S4b	S1b-S2a
+	-	3	S3a	S1b-S2a
-	+	4	S3b	S1a-S2b



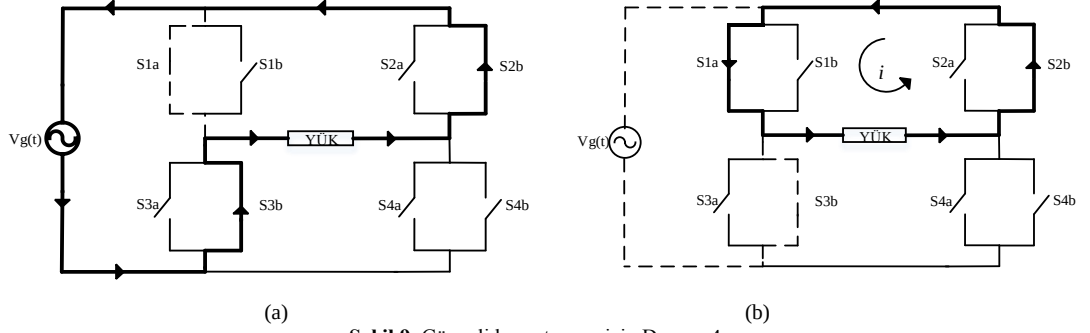
Şekil 6. Güvenli komutasyon için Durum-1



Şekil 7. Güvenli komutasyon için Durum-2

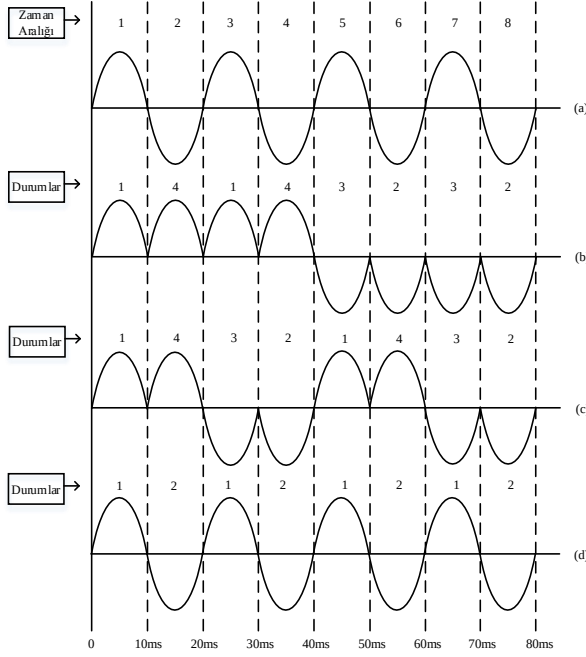


Şekil 8. Güvenli komutasyon için Durum-3

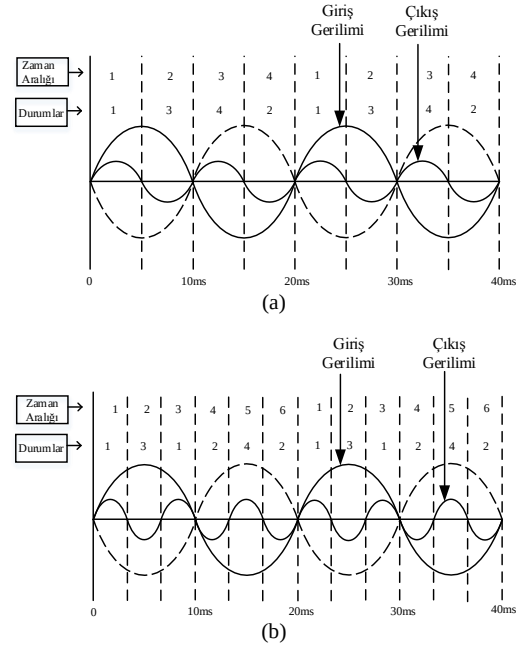


Şekil 9. Güvenli komutasyon için Durum-4

Bu çalışmadaki tek fazlı matris dönüştürücünün giriş geriliminin frekansı 50 Hz’dir. Çıkışta ise 12.5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 100 Hz ve 150 Hz frekanslarına sahip çıkış gerilimi elde edilmek istenmektedir. Şekil 10(a)’da giriş geriliminin, (b)’de ise 12.5 Hz, (c)’de 25 Hz ve (d)’de 50 Hz çıkış frekans değerine sahip çıkış gerilimi dalga şekilleri verilmiştir. Şekil 11(a) ve (b)’de 100 ve 150 Hz frekanslarına sahip çıkış geriliminin dalga şekilleri verilmiştir. Belirtilen çıkış frekansı değerine sahip gerilim dalga şekli elde etmek için hangi zaman aralığında hangi durumun gerçekleşmesi gerektiği şekiller üzerinde belirtilmiştir. Durumlar Tablo 1’de verilen anahtarlama stratejisine göre belirlenmiştir.



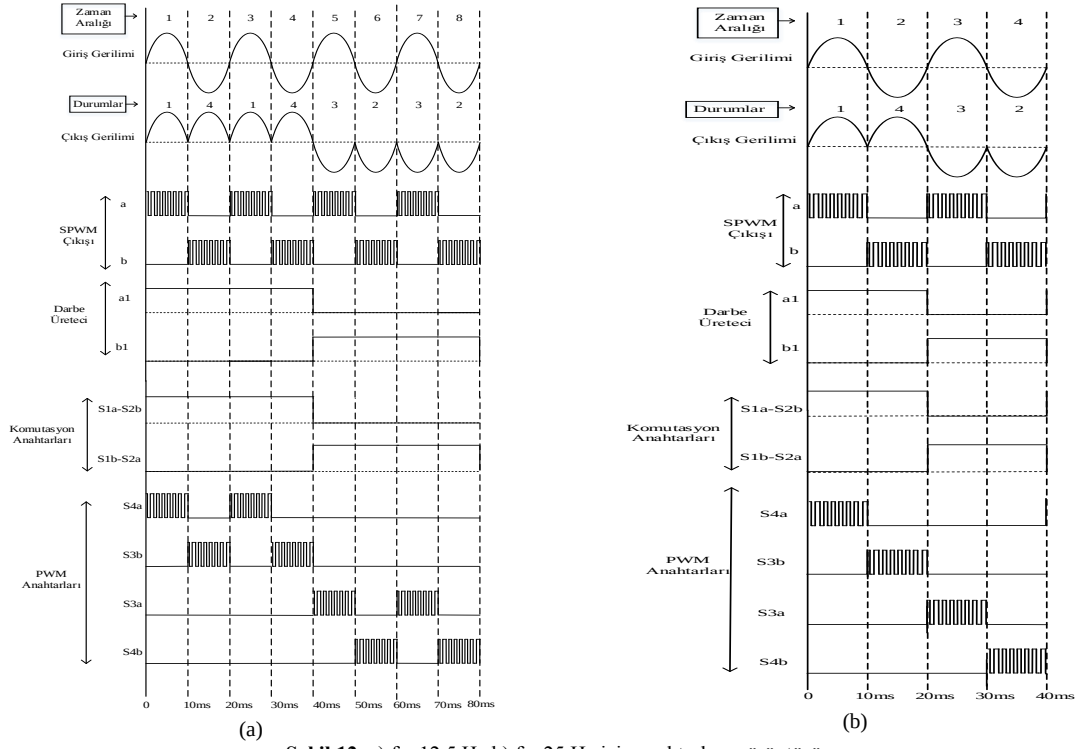
Şekil 10. a) 50 Hz frekansına sahip giriş gerilimi b) $f_c=12.5$ Hz c) $f_c=25$ Hz d) $f_c=50$ Hz için çıkış dalga şekilleri



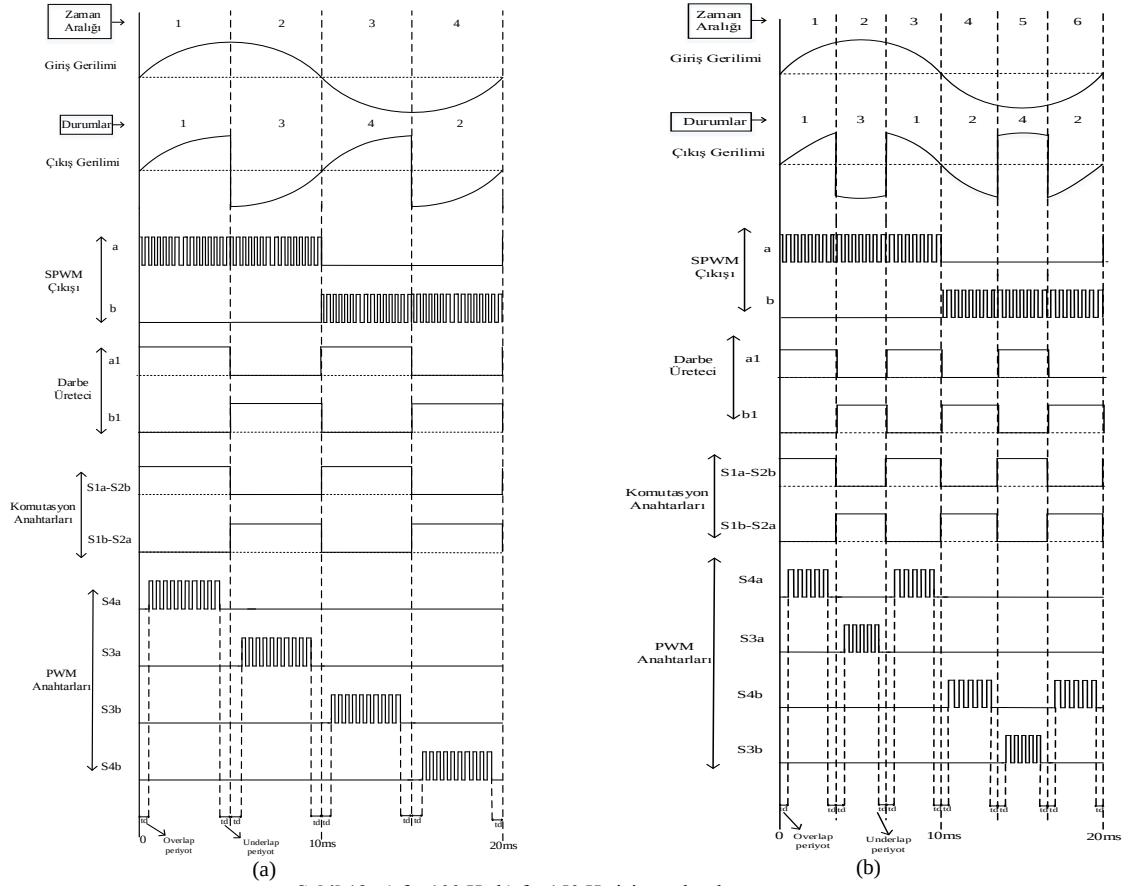
Şekil 11. a) $f_c=100$ Hz b) $f_c=150$ Hz için çıkış dalga şekilleri

Şekil 12(a)’da 12.5 Hz ve Şekil 12(b)’de 25 Hz frekansına sahip bir çıkış gerilimi elde etmek için anahtarlama örüntüsü verilmiştir. Şekil 12’de SPWM-a / b çıkış sinyali, darbe üretici çıkışları a1 ve b1 sinyalleri ile S1a-S1b, S2a-S2b, S3a-S3b ve S4a-S4b anahtarlarına uygulanması gereken sinyaller gösterilmiştir. Bu modelde darbe üreticinin frekansı sistemin çıkış frekansına eşittir. SPWM işaretinin frekansı ise tüm çıkış frekans değerleri için sabit 50 Hz’dir.

Çıkış frekansı 50 Hz üstü için olan anahtarlama stratejisi incelendiğinde görülmüştür ki; R-L yükü altında çıkıştan 100 Hz ve 150 Hz frekans değerleri elde edilmek istenirse çıkışta çok yüksek gerilim pikleri oluşur. Bu yüzden anahtarlama stratejisi üzerinde bir değişiklik yapılmıştır. Şekil 13 (a)’da çıkıştan 100 Hz ve Şekil 13 (b)’de ise 150 Hz frekans değeri elde etmek için anahtarlara uygulanması gereken sürme işaretleri ve giriş gerilimi ile çıkış gerilimi dalga şekilleri verilmiştir. PWM olarak kullanılan anahtarlara bir ölü zaman ‘td’ eklenerek çıkışta oluşan bu gerilim piklerinin önüne geçilmiş olur. Bu ölü zaman da overlap ve underlap periyodu olarak Şekil 13 üzerinde gösterilmiştir [19,22]. ‘td’ zamanı yapılan çalışmadaki anahtarlama frekansı, modülasyon indeksi ve yükün değerine bağlı olarak değişmektedir [24,25].

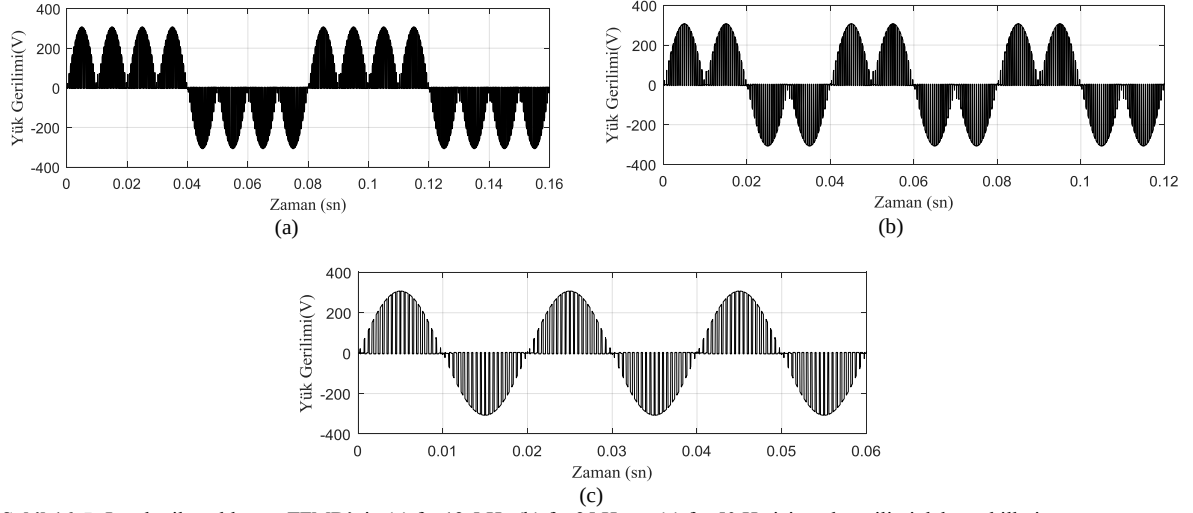


Şekil 12. a) $f_c = 12.5$ Hz b) $f_c = 25$ Hz için anahtarlama örüntüsü

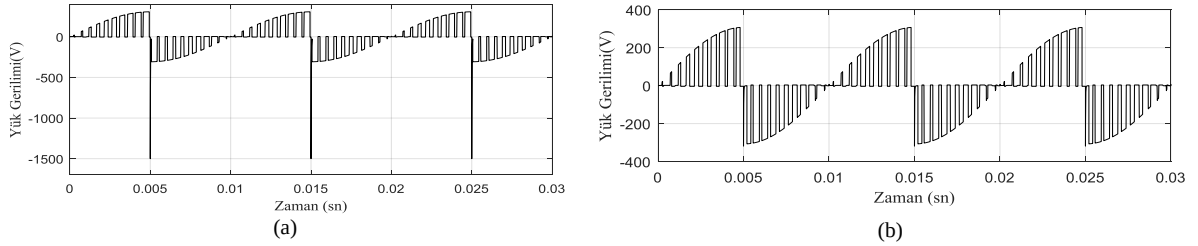


Şekil 13. a) $f_c = 100$ Hz b) $f_c = 150$ Hz için anahtarlama örüntüsü

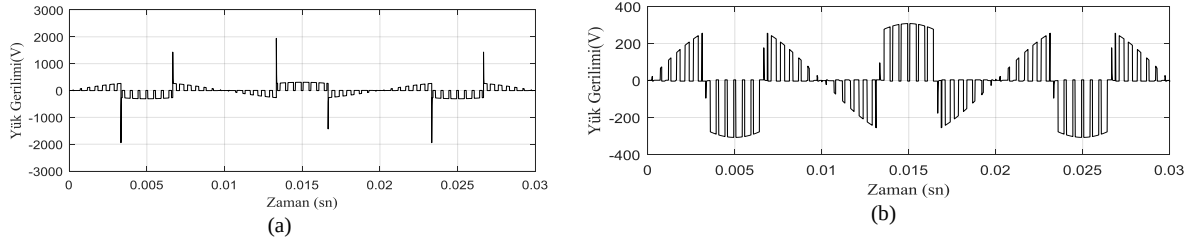
Şekil 16’da R-L yükü ile yüklenen tek fazlı matris dönüştürücünün (a)’da 12.5 Hz, (b)’de 25 Hz ve (c)’de 50 Hz frekans değerlerine sahip çıkış gerilimi dalga şekilleri verilmiştir. Şekil 17’de R-L yükü ile yüklenen tek fazlı matris dönüştürücünün 100 Hz, Şekil 18’de 150 Hz frekans değerlerine sahip çıkış gerilimi dalga şekli verilmiştir.



Şekil 16. R-L yükü ile yüklenen, TFMD’nin (a) $f_c=12.5$ Hz (b) $f_c=25$ Hz ve (c) $f_c=50$ Hz için yük gerilimi dalga şekilleri



Şekil 17. R-L yükü ile yüklenen, TFMD’nin $f_c=100$ Hz için (a) ‘td’ zamanı eklenmeden (b) ‘td’ zamanlı yük gerilimi dalga şekilleri



Şekil 18. R-L yükü ile yüklenen, TFMD’nin $f_c=150$ Hz için (a) ‘td’ zamanı eklenmeden (b) ‘td’ zamanlı yük gerilimi dalga şekilleri

5. Sonuç

Bu çalışmada, son yıllarda evirici uygulamalarına alternatif olmaya başlayan tek fazlı matris dönüştürücünün devre topolojisi verilerek, frekans değiştirici olarak çalışma durumu için güvenli komutasyon anahtarlama stratejisi incelenmiştir. 12.5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 100 Hz ve 150 Hz çıkış frekans değerlerini elde etmek için güvenli komutasyon anahtarlama stratejisindeki çalışma durumları ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu anahtarlama stratejisiyle, ölü zaman boyunca indüktif yükün akımı için bir yol oluşturularak yüksek genlikli gerilim piklerinin önüne geçilmiştir. Şekil 17’de 100 Hz ve Şekil 18’de 150 Hz çıkış frekans değeri için ölü zaman eklenmediğinde yüksek genliğe sahip gerilim piklerinin oluştuğu ve bunun eklenen ‘td’ zamanıyla ortadan kaldırıldığı gösterilmiştir.

Kaynaklar

- [1] Liu J, Lipo AT. Synchronous machine field excitation utilizing a single phase matrix converter excited rotary transformer. In: 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition; 1-5 Oct. 2017; Cincinnati, OH, USA: IEEE. pp. 1197–1204.
- [2] Hanafi HM, Hamzah MK, Hamzah NR. Electronic transformer design using Single-phase Matrix Converter. In: 2009 IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications; 4-6 Oct. 2009; Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE. pp. 413–418.
- [3] Nayak B, Misra B, Mishra R. Performance improvement of single phase matrix converter using band pass filter for induction heating. In: 2017 2nd International Conference on Communication Systems, Computing and IT Applications; 7-8 Apr. 2017; Mumbai, India: IEEE. pp. 263–268.
- [4] Sünter S. A Vector Controlled Matrix Converter Induction Motor Drive. PHD Thesis, University of Nottingham, U.K., 1995.
- [5] Külekçioglu A. Değişken Genlik ve Frekanslı Tek Fazlı AC-AC Çeviriciden Beslenen Asenkron Motor Sürücü Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2003.
- [6] Mohan WP, Undeland N, Robbins TM. Power Electronics Converter, Applications and Design. Canada, Wiley, 1995.
- [7] Venturini M. A new sine wave in, sine wave out conversion technique eliminates reactive elements. Proceeding of Powercon 7 1980; E3-1-E3-15.
- [8] Alesina A, Venturini M. Solid-state power conversion: A Fourier analysis approach to generalized transformer synthesis. IEEE Trans Circuits Syst 1981; 28(4): 319–330.
- [9] Sünter S, Clare JC. Feedforward indirect vector control of a matrix converter-fed induction motor drive. COMPEL Int Journal Comput Math Electr 2000; 19(4): 974–986.
- [10] Sünter S, Aydoğmuş O. Implementation of a single-phase matrix converter induction motor drive. Electr Eng 2008; 90(6): 425–433.
- [11] Aydogmus O, Deniz E. Design of a two-phase PMSM fed by an AC-AC converter. In: 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology; 17-19 March 2015; Sevilla, Spain: IEEE. pp. 690–695.
- [12] Aydogmus O, Deniz E. Design and implementation of two-phase permanent magnet synchronous motor fed by a matrix converter. IET Power Electron 2017; 10(9): 1054–1060.
- [13] Gyugyi L, Pelly BR. Static power frequency changers: theory, performance, and application. New York, Wiley, 1976.
- [14] Khoei S, Yuvarajan A. Single-phase AC-AC converters using power MOSFETs. IEEE Trans Ind Electron 1988; 35(3): 442–443.
- [15] Khoei A, Yuvarajan S. Steady state performance of a single phase induction motor fed by a direct ac-ac converter. In: Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting; 1-5 Oct. 1989; San Diego, USA: IEEE. pp. 128–132.
- [16] Zuckerberger A, Weinstock D, Alexandrovitz A. Single-phase matrix converter. IEE Proc Electric Power Appl 1997; 144(4): 235–240.
- [17] Hosseini SH, Babaei E. A new generalized direct matrix converter. In: 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings; 12-16 June 2001; Pusan, South Korea: IEEE. pp. 1071–1076.
- [18] Firdaus S, Hamzah MK. Modelling and simulation of a single-phase AC-AC matrix converter using SPWM. In: Student Conference on Research and Development; 17-17 July 2002; Shah Alam, Malaysia: IEEE. pp. 286–289.
- [19] Idris Z, Noor SZM, Hamzah MK. Safe Commutation Strategy in Single Phase Matrix Converter. In: 2005 International Conference Power Electronics and Drives Systems; 28 Nov - 1 Dec 2005; Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE. pp. 886–891.
- [20] Idris Z, Hamzah MK, Saparon A, Hamzah NR, Dahlan NY. FPGA design of single-phase matrix converter operating as Cycloconverter. In: 2007 7th International Conference on Power Electronics and Drives Systems; 27-30 Nov. 2007; Bangkok, Thailand: IEEE. pp. 301–307.
- [21] Hanafi HM, Hamzah NR, Saparon A, Hamzah MK. Improved switching strategy of single-phase matrix converter as a direct AC-AC converter. In: 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications; 3-5 June 2008; Singapore: IEEE. pp. 1157–1162.
- [22] Hamzah MK, Idris Z, Saparon A, Yunus MS. FPGA design of single-phase matrix converter operating as a frequency changer. In: 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference; 1-3 Dec. 2008; Johor Bahru, Malaysia: IEEE. pp. 1124–1129.
- [23] Kwon BH, Min BD, Kim JH. Novel Commutation Technique of AC-AC Converters. Electric Power Application IEE Proceedings 1988; 145(4): 295–300.
- [24] Pirinççi N. Tek Fazlı Matris Dönüştürücünün AA-AA Frekans Dönüştürücü ve AA-DA Doğrultucu Olarak Çalışmasının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2018.
- [25] Noor SZM, Hamzah MK, Rahman NFA, Hapani AF, Idris Z. XILINX FPGA Design for Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) control of Single phase Matrix Converter. In: 2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications; 25-28 Sept. 2011; Langkawi, Malaysia: IEEE pp. 714–719.

Transfer Öğrenme ve Çekişmeli Üretici Ağ Yaklaşımlarını Kullanarak Cilt Lezyonu Sınıflandırma Doğruluğunun İyileştirilmesi

Kazım FIRILDAK^{1*}, Gaffari ÇELİK², M. Fatih TALU³

¹ Bilgisayar Teknolojileri, Kovancılar Meslek Yüksek Okulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Bilgisayar Teknolojileri, Meslek Yüksek Okulu, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Ağrı, Türkiye

³ Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversite, Malatya, Türkiye

*¹ kfirildak@firat.edu.tr, ² gcelik@agri.edu.tr, ³ fatihaltu@gmail.com

(Geliş/Received: 06/10/2020;

Kabul/Accepted: 05/04/2020)

Öz: Bu çalışmada, en yaygın kanser türlerinden biri olan cilt kanseri imgelerinin sınıflandırılmasına odaklanılmıştır. Yapılan araştırma sonucunda cilt kanseriyle ilgili literatürdeki en kapsamlı etiketlenmiş veri kümesinin HAM10000 olduğu görülmüştür. 7 farklı lezyon türüne ait 10.000'den fazla etiketli imge içeren bu veri kümesinin klasik Evrişimsel Sinir Ağlarıyla (ESA) sınıflandırma doğruluğunun artırılması amaçlanmaktadır. Bu makalede, mevcut iki farklı tekniğin (transfer öğrenme ve imge üretimi) lezyon sınıflandırma doğruluğuna etkisi incelenmiştir. Birinci teknik, cilt lezyonu veri kümesini sınıflandırmak için tasarlanan yeni bir ESA'ya, ImageNet veri kümesiyle eğitilmiş AlexNET ağındaki parametrelerin kısmi ve tam transfer yoluyla aktarılmasıdır. İkinci teknik, gerçek lezyon imgelerinden imge üretilmesiyle veri kümesinin genişletilmesidir. Bu genişletme işleminde klasik üretme ve Çekişmeli Üretici Ağ (ÇÜA) tekniklerinin başarımları değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, kısmi parametre transferi ve Derin Evrişimsel Çekişmeli Üretici Ağ (DEÇÜA) temelli imge üretim tekniği kullanılarak veri kümesinin genişletilmesi yaklaşımlarının birlikte kullanılması en yüksek lezyon sınıflandırma doğruluğunu (%93) vermiştir. Yöntemler, literatürdeki güncel yöntemle kıyaslanarak toplam doğruluk başarımındaki üstünlüğü gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Çekişmeli Üretici Ağlar, Cilt Kanserinin Tanı ve Tespiti, Çekişmeli Üretici Ağlar ile Veri Üretimi, Evrişimsel Sinir Ağları

Improving Skin Lesion Classification Accuracy Using Transfer Learning And Generative Adversarial Network

Abstract: This study focuses on the classification of skin cancer images, one of the most common types of cancer. As a result of the research, it was found that the most comprehensive labeled data set in the literature related to skin cancer were HAM10000. This data set, which contains more than 10,000 tagged images of 7 different lesion types, is aim to increase accuracy in classification with Convolutional Neural Networks (CNNs). In this study, the effect of two different techniques (transfer learning and image production) on lesion classification accuracy was investigated. The first technique is the partial and full transfer of parameters in the ImageNet image set-trained AlexNET network to a new CNN designed to classify the skin lesion data set. The second technique is to expand the dataset by generating images from true lesion images. In this expansion process, the performances of classical production and Generative Adversarial Network (GAN) techniques were evaluated. As a result of the experimental studies, the use of partial parameter transfer and data set expansion approaches using Deep Convolutional Generative Adversarial Network (DCGAN) based image generation technique yielded the highest lesion classification accuracy (93%). The methods have been compared to the current method in the literature and total accuracy performance is demonstrated.

Key words: Generative Adversarial Network, Detection of Skin Cancer, Deep Convolutional Generative Adversarial Network Based Data Augmentation, Convolutional Neural Networks.

1. Giriş

Tıp alanındaki yapay öğrenme sistemlerinin temel problemleri arasında, yeterli veri sayısına sahip veri kümelerinin bulunmaması ve veri toplanmasında yaşanan zorluklar olarak özetlenmektedir [1]. Bunun yanında tıbbi verilerin etiketlenmesi ve sınıflanmasında uzman bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır [1]. İhtiyaçları karşılayacak bir veri kümesi oluşturmak insan gücü, zaman, uzman bilgisi ve verinin ön işlenmesi gibi aşamaları ile tıp alanındaki yapay öğrenme araştırmacılarının çözmeleri gereken bir problemdir. Literatürde tıp alanında çalışılan bilgisayar bilimciler için sunulan veri kümeleri bulunuyor olsa da yapay öğrenme algoritmaları bu veri

* Sorumlu yazar: kfirildak@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-1958-3627, ² 0000-0001-5658-9529, ³ 0000-0003-1166-8404

kümeleri için her zaman iyi sonuçlar vermemektedir. Tüm bu bilgiler ışığında etkili bir yapay öğrenme sistemine uygun bir veri kümesi oluşturmak için veri artırım yöntemleri önemli bir araştırma konusu haline gelmektedir.

Yapay öğrenme algoritmalarında eğitim ve test doğruluğu arttırmak için kullanılan iki temel veri artırım yöntemi bulunmaktadır. Bunların ilki klasik veri artırım yöntemleridir. Bu yöntemler Çevirme (Flipping), Döndürme (Rotation), Kırpma (Cropping), Kaydırma (Shifting) gibi verilerin geometrik özelliklerini ve renk özelliklerini değiştirerek yapay öğrenme yöntemlerinin doğruluk başarımını artırmaya çalışmaktadır [2]. Ayrıca veri üreten bir modelle, sentetik veri oluşturulması işlemi de klasik veri artırım yöntemleri arasında gösterilmektedir. Bu klasik veri artırım yöntemleri, yapay öğrenme uygulamalarında önemli başarılar sağlamaktadır [2]. İkinci bir veri artırımı yöntemi ise yapay öğrenme mimarilerinden olan ve oyun teorisinden ilham alınarak oluşturulan Çekişmeli Üretici Ağlardır (ÇÜA) [3]. Bu ağ modeli gerçek imgeler ile en benzer yeni gerçek imgeler oluşturması için eğitilen bir yapay öğrenme modelidir. Eğitim verisi kullanarak üretim yapan ÇÜA literatürde farklı modelleri önerilmiştir. Bunlar arasından stil transferi yapan [4], semantik boyama işlemi yapan [5] ve veri üretimi yaparak çeşitli problemlere çözüm ürettiği gösterilmiştir [1], [6].

Modern bir eğitimci öğrenme yaklaşımı olan ESA, medikal uygulamaların birçoğunda kullanılmıştır [1], [6]–[8]. Literatürde karaciğer lezyonlarının sınıflandırmasında ESA başarımını artırmak için ÇÜA kullanılmıştır. Böylelikle karaciğer lezyonların sınıflanmasında klasik veri artırım yöntemlerine göre duyarlılık (sensitivity) ve özgüllük (specificity) oranları %3 ila %5 arasında geliştirmişlerdir [1]. Xue ve diğ. Beyin tümörünün MRI imgeleri üzerinde bölütlenme yapmak için ÇÜA faydalanmışlardır [9].

Dünyada yaygın olarak görülen kanser türlerinden olan cilt kanseri ABD’de yılda yaklaşık 10000 insanın ölümüne neden olmaktadır [10]. Lezyonların görsel olarak muayene edilerek tespit edilmesi bir çok literatür çalışmasında detaylı olarak gösterilmiştir [11], [12]. Bunun yanında bilgisayarlı görü ve yapay öğrenme algoritmalarıyla cilt lezyonlarının tespiti ve sınıflanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır [12]–[14]. Cilt lezyon imgelerinin bölütlenmesi ve sınıflandırılmasında, ÇÜA kullanılarak veri artırımı yapılmış ve ESA’nın başarımı arttırılmıştır [12]. Ayrıca cilt lezyonlarındaki melanomu tanıyan ESA ile uzman tahminleri karşılaştırılmış ve öğrenme yönteminin tıp alanındaki başarımı detaylı olarak gösterilmiştir [13]. [14] nolu çalışmada, Res50 ve Res101 mimarileri kullanılarak cilt lezyonu imgelerinin öznetelikleri çıkarılmış ve Destek Vektör Makinesi (DVM) yöntemiyle %89.9 doğrulukta sınıflandırılmıştır.

Bu makale çalışmasında, ilk olarak kullanılan veri kümesi (HAM10000 [15]) hakkında detaylı bilgi verilmektedir. Daha sonra başarımı birçok veri kümesi üzerinde kanıtlanmış AlexNET [16] mimarisinin parametreleri transfer öğrenme yaklaşımıyla yeni bir ESA mimarisine aktarılmıştır. Sonraki aşamada, veri kümesindeki örnek sayısı ÇÜA yöntemiyle genişletilmiştir. Son aşamada ESA mimarisi üç farklı veri kümesiyle (HAM10000, HAM10000+klasik veri artırımı, HAM10000+ÇÜA) ayrı ayrı eğitilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğruluk ve zaman açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca HAM10000 veri seti için literatürde önerilen derin öğrenme modeli ile önerdiğimiz ÇÜA+ESA karşılaştırılarak detaylı sonuçlar tartışılmaktadır.

2. Cilt Lezyonlarının Sınıflandırılması

Bu bölümde kullanılan veri kümesi tanıtılmaktadır. Verinin sınıfları ve anlamları ve ayrıca verinin sınıfsal dağılımı detaylıca açıklanmaktadır. Daha sonra AlexNET mimarisinden bahsedilmektedir. Son olarak da AlexNET den veri transfer yaklaşımları detaylandırılmaktadır.

2.1. Cilt Lezyonlarının Sınıflandırılması

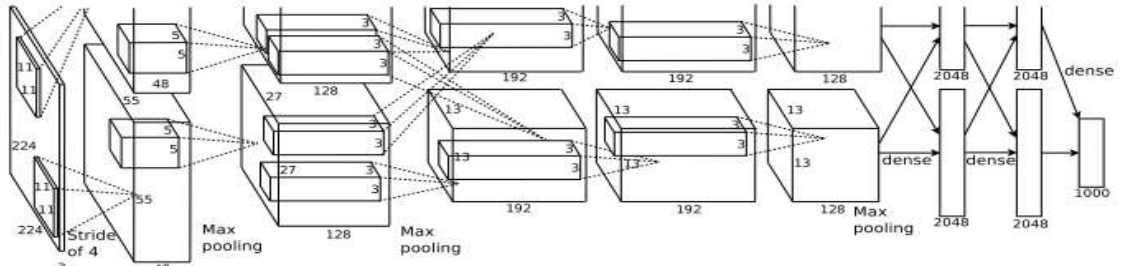
HAM10000 [15] veri kümesinde bulunan cilt lezyon imgeleri, farklı coğrafik bölgelerde yaşayan ve veri kümesindeki cilt hastalıklarına sahip insanlardan elde edilmiştir. Veri kümesi yedi farklı lezyon türüne (Akiec, Bcc, Bkl, Df, Nv, Mel ve Vasc) ait imgeler içermektedir. Her bir lezyon türünün anlamı ve veri kümesindeki adedi Tablo 1’de ifade edilmektedir. Veri kümesi toplamda 10015 adet 650x400x3 boyutunda RGB lezyon imgesini içermektedir. Bu veri kümesini diğer cilt kanseri veri kümelerinden ayıran en önemli özellik, her bir kategoride yer alan lezyon adedinin yüksek miktarda olmasıdır. Dahası bu veri kümesindeki imgelerde, lezyonlu bölge üzerinde bulunabilen kıl ve güneş yanığı gibi lezyon görselini bozan dış etkenler tanı ve sınıflandırmayı olumsuz yönde etkilediği not edilmiştir.

Tablo 1. HAM10000 cilt lezyonu imgeleri veri kümesi

NO	TÜR	AÇIKLAMA	ADET
1	Akiec	Ameliyat olmaya gerek kalmadan lokal tedavi yapılabilir	327
2	Bcc	Bazal hücreli karsinom nadiren metastaz yapan ancak tedavi edilmediğinde yıkıcı olarak büyüyen epitel cilt kanserinin yaygın bir çeşidi	514
3	Bkl	İyi huylu keratoz olarak bilinir. Görsel olarak ayırt edilmesi güçtür	1099
4	Df	Dermafibroma olarak bilinen iyi huylu bir cilt lezyonu	115
5	Nv	İyi huylu neoplazmalardır ve melanomun aksine renk ve yapı dağılımı bakımından genel olarak simetrik	6705
6	Mel	Melanom ile kötü huylu bir neoplazma	1113
7	Vasc	Vasküler cilt lezyonlarıdır. Kırmızı ve mor renkli lekeler olarak bilinirler. İyi huylu yapılar olarak not edilmiş	142
Toplam			10015

2.2. AlexNET

Sınıflandırma başta olmak üzere birçok bilgisayarlı görü alanında kullanılan ESA, klasik sinir ağlarından farklı olarak, özellik çıkarma ve sınıflandırma katmanlarını içermektedir. Evrişim katmanı konvolüsyon (convolution), aktivasyon fonksiyonu (ReLU) ve havuzlama (pooling) katmanlarını içermekte ve yüksek boyutlu veriden düşük boyutlu özniteliklerin çıkarılmasını sağlamaktadır. Probleme özgü olarak evrişim katmanının ardışıl bağlanma sayısı modelin derinliğini değiştirmektedir. Sınıflandırma katmanı ise düşük boyutlu öznitelikler ile kategorilerin eşleşmesini sağlar ve genellikle tam bağlı bir YSA mimarisine sahiptir. Krizhevsky ve diğerlerinin önerdiği ve AlexNET olarak bilinen mimari, 5 evrişim katmanına ve 3 tam bağlı sınırlandırıcıya (60 milyon ağırlıklı ve 650 000 hücreli) sahiptir. Şekil 1’de mimari detaylı olarak gösterilmektedir. Bu mimari ImageNET veri seti ile eğitildikten sonra öğrenilen bilgiler (ağırlıklar) farklı problem çözümlerinde transfer öğrenme teknikleri yardımıyla kullanılmış ve yüksek başarımlar elde edildiği gösterilmiştir [16], [17].

**Şekil 1.** AlexNET mimarisi [16].

Şekil 1’de gösterilen mimarinin giriş verisi 227x227 boyutunda 3 kanallı bir imgedir. Daha sonra beş katmanı özellik çıkarıcı evrişim katmanı bulunur. Son olarak bu evrişim katmanlarının bağlandığı modelin kullanım amacına göre sınıflama gibi işlemleri yürüten tam bağlı katmandan oluşmuştur.

AlexNET, ImageNET veri kümesini sınıflandırabilmek için önerilmiş bir mimaridir. ImageNET [18] (1.000 sınıf ve 1.000.000 imge) kedi, köpek, kuş ve bunun gibi veri sınıflarının bulunduğu veri kümesidir. AlexNET ağırlıklarının farklı problemlerde kullanabilmek için transfer öğrenme yaklaşımlarından faydalanmak gerekmektedir. Kısaca transfer öğrenme yapay öğrenme sistemlerinin eğitim aşamasıyla öğrendiği bilgiyi farklı veya benzer problem çözümlerinde kullanılmasını inceleyen öğrenme yaklaşımıdır. ESA için kullanılan 2 farklı transfer öğrenme yaklaşımı bulunmaktadır. Bunların ilki özellik çıkarıcı yöntemdir. Bu yaklaşım elimizdeki problem için tasarlanmış bir ESA’nın evrişim katman ağırlık değerlerinin eğitilmiş bir ESA’dan alınması ve eğitim işleminin sadece sınıflandırma katmanında yapılması şeklindeki kullanımdır. Sınıflandırma katmanı yapay sinir ağı olabildiği gibi farklı bir yöntem (örn. DVM) olabilir. Böylece eğitilmiş ESA’nın özellik çıkarma kabiliyeti yeni ESA’ya aktarılmaktadır. İkinci yaklaşım ise kısmi özellik çıkarıcı yöntemdir. Eğitilmiş ESA’nın evrişim katmanındaki ağırlıkların bütünü yerine belirli bir kısmının yeni ESA’ya aktarılması ve yeni ESA’daki kalan evrişim katmanı ile birlikte sınıflandırıcı katmanın yeni eğitim kümesi kullanılarak güncellenmesi şeklindeki kullanımdır. Bu iki transfer öğrenme yönteminin AlexNET üzerindeki performansı etkileyen en temel

kriterler, AlexNET'e uygulanacak yeni veri kümesinin veri sayısı ve yeni veri kümesinin ImageNET'e olan benzerliğidir [19].

AlexNET'den transfer edinilen ağ parametreleri iki farklı şekilde kullanılabilir: 1) özellik çıkarıcı yaklaşım: Yeni veri kümesindeki sınıf sayısına göre AlexNET mimarisindeki tam bağlı YSA katmanının güncellenmesi. Eğitim işlemi sadece yeni eklenen tam bağlı YSA üzerinde gerçekleştirilir (SGD, MiniBatch: 256, α : 0,001). Bu YSA, her bir eğitim döngüsünde 256 adet gruplara ayrılmış özellik vektörünün 0,001 değerli öğrenme sabitine göre geriye yayımlı olarak eğitilmesiyle sonuçlandırılır. 2) Kısmi özellik çıkarıcı yaklaşımda ise ilk 7 katmanın çıkışı vektörleştirilir (1x4096 boyut) ve DVM ile sınıflandırılır. DVM parametreleri veri kümesine göre değişkenlik göstermektedir. HAM10000 veri kümesi için çok sınıflı liner DVM kullanılmıştır.

3. Gerçek Cilt Lezyon İmgelerinden Veri Üretilmesi

Yapay öğrenmede eğitim işlemi yapan modellerin temel problemi her zaman yeterli sayıda etiketlenmiş veri bulunmamasıdır. Cilt lezyon veri kümesi HAM10000 için 7 farklı kategoride veri sayıları değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenlik sınıflama başarısını olumsuz yönde etkilemektedir. Tam ve sınıflama performansını artırmak için 2 farklı yaklaşım belirlenmektedir. İlki klasik veri artırımı yöntemi ve diğeri veri kümesi için önerilen ÇÜA yapısıdır.

3.1. Klasik Üretim

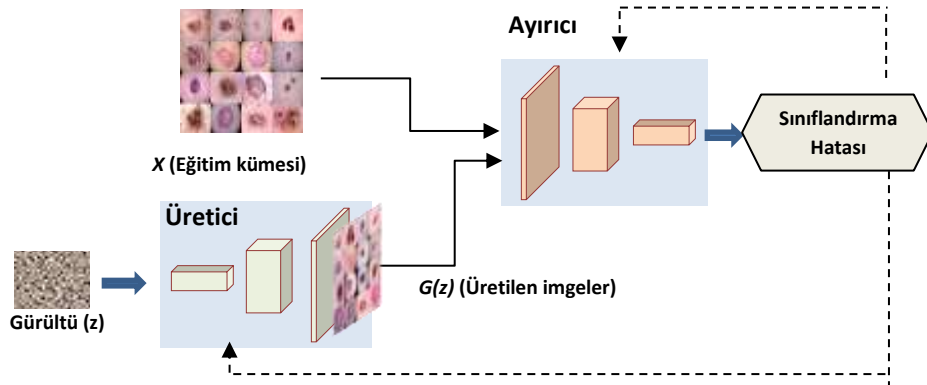
Eğitim kümesindeki imgeler üzerinde aşağıda listelenen geometrik/rek renk dönüşümleri bağımsız bir şekilde gerçekleştirilmekte ve eğitim kümesinde olmayan yeni imgeler üretilerek veri artırımı yapılmaktadır.

- Çevirme (Flipping): Yatay yönde çevirme
- Döndürme (Rotation): Rastgele bir merkezden döndürme
- Kırpma (Cropping): Belirlenen bir bölgenin kırılması ve yeniden boyutlandırılması
- Kaydırma (Shifting): Sağa sola kaydırılması
- Renk Seçirme (Color jittering): Rasgele parlaklık, doygunluk ve zıtlığın değiştirilmesi
- Gürültü Ekleme (Noise adding): Gürültünün eklenmesi

Klasik imge üretim işleminin en önemli faydalarından biri, hiç şüphesiz sistemin aşırı öğrenmesini ve ezberlemesini engellemesidir.

3.2. Derin Evrişimsel Sinir Ağı ile Üretim

ÇÜA, gerçek imgeler ile ayırt edilemeyecek sentetik imge üreten ilk başarılı yapay öğrenme tabanlı modellerdir. ÇÜA'lar sanat, moda, tıp gibi çeşitli alanlarda uygulanmaktadır [20]. 2014 yılında Goodfellow [3] tarafından geliştirilen bu teknik, üretici (generator, G), ayırıcı (discriminator, D) olmak üzere iki farklı ağıdan oluşur. Sistem mimarisi Şekil 2' gösterilmiştir. G, rastgele aldığı bir gürültü ile çeşitli işlemlerden sonra yeni imgeler üreterek bu imgelerr gerçekmiş gibi D'yi hatalı sınıflama yapmasına çalışırken, D ise giriş olarak aldığı gerçek ve yeni üretilmiş imgeleri sınıflandırmaya (gerçek(1)/yeniüretilmiş(0)) çalışır.



Şekil 2. Klasik ÇÜA mimarisi

Tablo 2. DEÇÜA'nın G ve D ağlarındaki katmanları

Ağ	Katman	Özellik Haritası	Çıkış Boyutu	Filtre Boyutu	Adım	Aktivasyon
Üretici(G)	Tam Bağlı Katman(Dense)	-	32768	-	-	ReLU
	Yeniden Boyutlandırma(Reshape)	-	16x16x128	-	-	-
	2B Evrişim Katmanı (Conv2D)	128	16x16x128	4x4	1	ReLU
	Normalizasyon(BatchNormalizasyon)	-	16x16x128	-	-	ReLU
	Büyütme(UpSampling2D)	-	32x32x128	2x2	-	-
	2B Evrişim Katmanı (Conv2D)	128	32x32x128	5x5	1	ReLU
	Normalizasyon(BatchNormalizasyon)	-	32x32x128	-	-	ReLU
	Büyütme(UpSampling2D)	-	64x64x128	2x2	-	-
	2B Evrişim Katmanı (Conv2D)	128	64x64x128	5x5	1	ReLU
	Normalizasyon(BatchNormalizasyon)	-	64x64x128	-	-	ReLU
	2B Evrişim Katmanı (Conv2D)	128	64x64x128	5x5	1	ReLU
	Normalizasyon(BatchNormalizasyon)	-	64x64x128	-	-	ReLU
Ayrıcı(D)	Giriş(İnput)	-	64x64x3	-	-	-
	2B Evrişim Katmanı (Conv2D)	128	64x64x128	3x3	1	LeakyReLU(alpha=0.1)
	Normalizasyon(BatchNormalizasyon)	-	64x64x128	-	-	LeakyReLU(alpha=0.1)
	2B Evrişim Katmanı (Conv2D)	128	32x32x128	4x4	2	LeakyReLU(alpha=0.1)
	Normalizasyon(BatchNormalizasyon)	-	32x32x128	-	-	LeakyReLU(alpha=0.1)
	2B Evrişim Katmanı (Conv2D)	128	16x16x128	4x4	2	LeakyReLU(alpha=0.1)
	Normalizasyon(BatchNormalizasyon)	-	16x16x128	-	-	LeakyReLU(alpha=0.1)
	2B Evrişim Katmanı (Conv2D)	128	8x8x128	4x4	2	LeakyReLU(alpha=0.1)
	Normalizasyon(BatchNormalizasyon)	-	8x8x128	-	-	LeakyReLU(alpha=0.1)
	Vektöre Dönüştürme(Flatten)	-	8192	-	-	-
	Tam Bağlı Katman(Dense)	-	512	-	-	ReLU
	Tam Bağlı Katman(Dense)	-	1	-	-	Sigmoid

Üretici eğitimi [20][21]:

1. G, giriş olarak rastgele gürültü (z) vektörünü alır ve G(z) yeni imgesini üretir.
2. G'nin eğitimi denklem 1'e göre yapılır [3]. G ağı D'nin hatasını maksimum düzeye çıkarmak X'e benzer imgeler üretir. Denklem 1'deki m değeri giriş imge sayısıdır.

$$\nabla_{\theta_g} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \log \left(1 - D \left(G(z^i) \right) \right) \quad (1)$$

Ayrıcı eğitimi [20][21]:

1. Giriş olarak X gerçek imgeyi ve G(z) yeni üretilmiş imgeyi alır. Denklem 2'deki m değeri giriş imge sayısıdır
2. D'nin eğitimi denklem 2'ye göre yapılır [3].

$$\nabla_{\theta_d} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\log D(x^i) + \log \left(1 - D \left(G(z^i) \right) \right) \right] \quad (2)$$

Radford ve arkadaşları [22] tarafından geliştirilen, DEÇÜA, üretici ve ayırıcı mimarilerine bazı kısıtlamalar eklemiş ve daha kaliteli imgelerin üretilmesini sağlamıştır. Bu kısıtlamalar:

- Havuzlama katmanı yerine D içerisinde sıçramalı konvolüsyon (strided convolutions), G içinde kademeli sıçramalı konvolüsyon (fractional-strided convolutions) işlemini kullanır.
- Hem D hem de G için normalleştirme (BatchNorm) kullanır.
- Daha derin mimariler için tam bağlı gizli katman kullanmaz.
- G ağının katmanlarında ReLU aktivasyon fonksiyonu kullanılır (çıkış katmanı tanh).
- D'nin tüm katmanlarında aktivasyon fonksiyonu olarak LeakyReLU kullanılır.

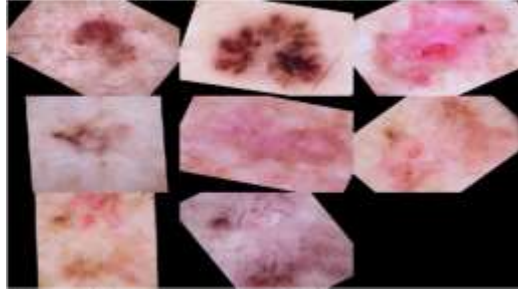
DEÇÜA yönteminin G ve D ağlarındaki katmanlar Tablo 2'de verilmektedir. G ağı, 1 tam bağlı YSA (128xİmgeBoyutu) ve 7 evrişim katmanı içermektedir. D ağı, 4 evrişim, 1 düzleştirme ve 2 tam bağlı YSA

katmanı içermektedir. D'deki ilk tam bağlı YSA katmanında 512 hücre, ikincisinde 1 hücre bulunmaktadır. DEÇÜA mimarisi her sınıf için 6.000 iterasyon eğitilmiştir. Eğitim süresi eğitim veri setine bağlı olarak ortalama 8-10 saat sürmüştür. Optimizasyon algoritması olarak Adam ($\alpha=0.0002$, $\beta=0.5$) [23] kullanılmıştır. Adagrad ve RMSprop optimizasyon algoritmalarının avantajlarını göz önünde bulundurularak geliştirilen bu algoritma aynı zamanda momentum değişikliklerini de hesaplar. α öğrenme katsayısını, β ise moment hesaplamaları için bozulma oranını ifade etmektedir. Uygulamasının basit, hesaplama maliyetinin ve bellek/parametre gereksiniminin düşük olması, DEÇÜA yöntemini büyük veri kümeleri ve gürültülü olan problemler için de uygundur [23].

4. Deneysel Sonuçlar

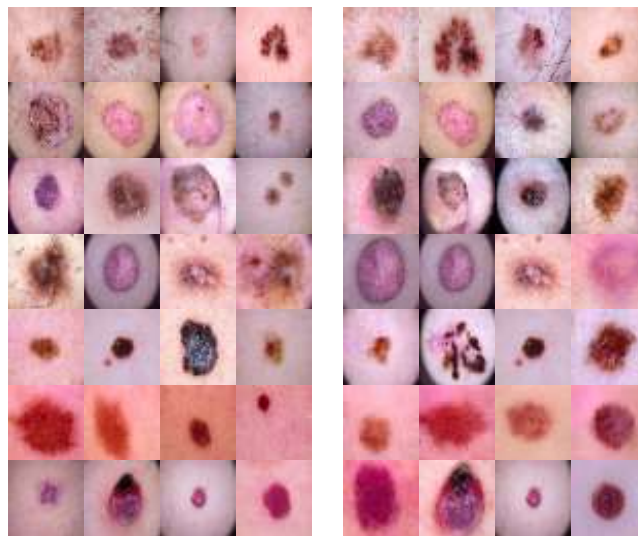
Deneysel uygulamalar Matlab (2018b) ortamında ve Python programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Python programlama dili ile Keras Kütüphanesi kullanılarak ÇÜA mimarisi tasarlanmıştır. Ayrıca Matlab 2018b uygulaması ile AlexNET mimarisinin ağırlıkları transfer öğrenme yoluyla alınarak cilt lezyonlarının sınıflama işlemi gerçekleştirilmiştir. Uygulamaların koştugu sunucu, 20 çekirdekli 2 işlemcili, Nvidia Quard 4000 GPU hızlandırıcı kartı bileşenlerine sahiptir.

Birinci deneysel çalışmada, HAM10000 veri kümesindeki imgeler kullanılarak klasik üretim tekniğiyle yeni imgeler üretilmiştir. İmgeler dikey eksende ± 30 piksel aralığında çevrilip, 0-360 derecede rasgele döndürülmekte ve %10 oranında ölçeklendirme yapılmaktadır. Şekli 3'te üretilen yeni imgeler gösterilmektedir.



Şekil 3. Klasik üretim tekniği ile üretilen imgeler

İkinci deneysel çalışmada, DEÇÜA algoritması kullanılarak HAM10000 veri kümesine yeni imgeler eklenmiştir. DEÇÜA mimarisinin eğitimi tamamlandıktan sonra her sınıftan 8.000 adet toplam imge olacak şekilde üretim yapılmıştır. Üretilen örnek imgeler Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. DEÇÜA ile üretilen yeni imgeler (sol) gerçek imgeler (sağ) üretilen yeni imgeler

Üçüncü deneysel çalışmanın amacı aşağıda ifade edilen etkileri ortaya çıkarmaktır:

1. İki farklı parametre transferi yaklaşımının (AlexNET'ten) ESA doğruluğuna ve sınıflandırma maliyetine etkisi
2. İki farklı imge üretim tekniğinin ESA doğruluğuna ve sınıflandırma maliyetine etkisi

İki farklı parametre transferi yaklaşımı (kısmi ve tam) sonucunda ortaya iki farklı sınıflandırıcı (ESA1 ve ESA2) çıkarmaktadır. Her iki sınıflandırıcı üç farklı veri kümesiyle (HAM10000, HAM10000+ Klasik Üretim ve HAM10000+ÇÜA) eğitilerek doğruluk ve harcanan zaman sonuçları gözlemlenmiştir. Her iki ESA'nın doğruluk değeri Denklem 3'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır:

$$\text{Doğruluk} = \frac{\sum TP}{\text{Toplam Lezyon Sayısı}} \quad (3)$$

TP değişkeni, sınıflardaki doğru tahmin edilen lezyon sayısını ifade etmektedir. Böylece doğruluk değeri, her bir sınıfta tahmin edilen doğru veri sayısının toplam lezyon sayısına oranıdır.

Tablo 3. Transfer öğrenme ve imge üretim yaklaşımlarının etkisi

Veri kümesi	ESA1 (kısmi parametre transferi)			
	Eğitim veri sayısı	Test veri sayısı	Doğruluk (%)	Zaman (dk)
HAM10000	7.000	3.000	76,55	13,58
HAM10000 + Klasik üretim	56.000	3.000	80,25	25,05
HAM10000 + ÇÜA	56.000	3.000	93,14	100
	ESA2 (tam parametre transferi)			
	Eğitim veri sayısı	Test veri sayısı	Doğruluk (%)	Zaman (dk)
HAM10000	7.000	3.000	73,5	3,55
HAM10000 + Klasik üretim	56.000	3.000	74,32	17,6
HAM10000 + ÇÜA	56.000	3.000	90	73,4

Tablo 3'te elde edilen sonuçlar incelendiğinde, imge üretim yöntemleri sonucu eğitim veri sayısı 7.000'den 56.000'e yükselmiştir. ESA1 ve ESA2 sınıflandırıcıların her ikisi de en yüksek doğruluğa HAM10000+ÇÜA veri kümesiyle ulaşabilmektedir. Ancak Ham10000+ÇÜA veri kümesinin eğitimi için harcanan süre diğer iki veri kümesinden fazla çıkmıştır. Çünkü Gan veri üretim adımının yürütme zamanı ESA ların sınıflama zamanlarına eklenerek sunulmuştur. Bununla birlikte ESA1'in doğruluk değeri ESA2'den daha yüksek çıkmıştır. Böylece kısmi parametre transferinin yeterli veri sayısı olduğunda daha makul olduğu görülmüştür.

Literatürde HAM10000 veri kümesindeki hastalıkların teşhisi için makine öğrenmesi temelli çeşitli çözüm önerileri sunulmuştur. Bunlardan HAM10000 veri kümesi için ÇÜA kullanarak ESA sınıflama performansını artırmaya çalışan yöntem [6] ile Res50 ve Res100 ağlarını kullanarak özellik çıkarımı yapan ve veri kümesini sınıflayan [14] nolu çalışmanın toplam doğruluk performansı Tablo 4'te önerilen yöntem ile kıyaslanmıştır.

Tablo 4. Önerilen yöntem ile [14] nolu referansın toplam doğruluk üzerine karşılaştırma sonucu

Yöntem	Doğruluk (%)
ESA1 (kısmi parametre transferi)	90
ESA2 (tam parametre transferi)	93,14
ESA3 ([14]'deki yöntem)	89,8
ESA4([6]'daki yöntem)	71,7

Tablo4'te DEÇÜA ile veri üretimi yapılmış AlexNET ağırlıklarıyla kısmi parametre transferi ile tam parametre transferi yapan önerilen yöntem literatürdeki [14] nolu yönteme göre toplam doğruluk üzerinde %1-%3 iyileşme sağladığı görülmüştür. Ayrıca ÇÜA kullanarak veri artırımı yapan [6] nolu referanstaki yönteme göre önerilen yöntemin yaklaşık %30 toplam doğrulukta başarımlı sağladığı görülmüştür.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada klasik veri artırımı ve ÇÜA tabanlı veri üretim yönteminin transfer öğrenmenin sınıflama başarımına etkisi HAM10000 veri kümesine uygulanarak detaylandırılmıştır. Önerilen DEÇÜA tabanlı veri üretim yönteminin iki farklı transfer öğrenme yaklaşımında, klasik veri artırımı yöntemine göre %15 ila %20

arasında sınıflama doğruluğunu arttırdığı gözlemlenmiştir. Çalışmada, HAM10000 veri kümesi, DEĞÜA tabanlı veri artırımından sonra kısmi parametre transferi ile en yüksek cilt lezyon sınıflama doğruluğu elde edilmiştir. Cilt lezyonları için önerilen bu yöntem ile HAM1000 veri kümesi için yaklaşık %93 lük sınıflama doğruluk başarımına ulaşılmıştır. HAM10000 veri kümesi için literatürde sunulan yöntemlerle kıyaslanarak önerilen yöntemin toplam doğruluk üzerinde önemli ölçüde üstünlük gösterdiği detaylandırılmıştır. Makalede özellikle bilgisayar bilimcilerin, tıp alanındaki veri sayısı kısıtlı problemlere ÇÜA ile veri üretimi yaparak çözüm üretebilecekleri gösterilmiştir. Gelecekteki çalışmamızda, cilt lezyonlarını giriş verisi olarak hastalık tespitini yapabilen karar destek sisteminin geliştirilmesi planlanmıştır.

Kaynaklar

- [1] Frid-Adar M, Diamant I, Klang E, Amitai M, Goldberger J, and Greenspan H. GAN-based synthetic medical image augmentation for increased CNN performance in liver lesion classification. *Neurocomputing* 2018; 321: 321–331.
- [2] Shijie J, Ping W, Peiyi J, and Siping H. Research on data augmentation for image classification based on convolution neural networks. *Chinese Autom. Congr. CAC*; 2016; China. 4165–4170.
- [3] Goodfellow I. J, Pouget-Abadie J, Mirza M, Xu B, Warde-Farley D, Ozair S, Courville A, Bengi Y. Generative Adversarial Networks. *arXiv:1406.2661v1* 2014; 1–9.
- [4] Isola P, Zhu J. Y, Zhou T, and Efros A. A. Image-to-image translation with conditional adversarial networks. *Proc. - 30th IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognition CVPR* 2017; USA: 5967–5976.
- [5] Yeh RA, Chen C, Yian Lim T, Schwing A. G, Hasegawa-Johnson M, and Do M. N. Semantic image inpainting with deep generative models. *Proc. - 30th IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognition CVPR*; 2017; USA: 6882–6890.
- [6] Bisla D, Choromanska A, Stein J. A, Polsky D, and Berman R. Skin Lesion Segmentation and Classification with Deep Learning System. *arXiv:1902.06061v1* 2019; 1–6.
- [7] Han C et al. GAN-based synthetic brain MR image generation. *Proc. - Int. Symp. Biomed. Imaging*; 2018; USA. 734–738.
- [8] Bi L, Feng D, and Kim J. Improving Automatic Skin Lesion Segmentation using Adversarial Learning based Data Augmentation. *arXiv:1807.08392* 2018; 1–6.
- [9] Xue Y, Xu T, Zhang H, Long L. R, and Huang X. SegAN: Adversarial Network with Multi-scale L 1 Loss for Medical Image Segmentation. *Neuroinformatics* 2018;16: 383–392.
- [10] Siegel RL, Miller KD, and Jemal A. Cancer statistics, CA. *Cancer J. Clin* 2019; 69: 7–34.
- [11] Vestergaard ME, Macaskill P, Holt PE, and Menzies SW. Dermoscopy compared with naked eye examination for the diagnosis of primary melanoma: A meta-analysis of studies performed in a clinical setting. *Br. J. Dermatol* 2008; 159: 669–676.
- [12] Codella NCF et al. Skin lesion analysis toward melanoma detection: A challenge at the 2017 International symposium on biomedical imaging (ISBI), hosted by the international skin imaging collaboration (ISIC). *Proc. - Int. Symp. Biomed. Imaging* 2018; USA: 168–172.
- [13] Brinker TJ et al. Deep learning outperformed 136 of 157 dermatologists in a head-to-head dermoscopic melanoma image classification task. *Eur. J. Cancer*; 2019; 113: 47–54.
- [14] Khan MA, Saba T, and Sharif M. Multi-Model Deep Neural Network based Features Extraction and Optimal Selection Approach for Skin Lesion Classification. *Int. Conf. Comput. Inf. Sci*; 2019; Saudi Arabia: 1–7.
- [15] Tschandl P, Rosendahl C, and Kittler H. Data descriptor: The HAM10000 dataset, a large collection of multi-source dermatoscopic images of common pigmented skin lesions *Sci. Data* 2018; 5:1–9.
- [16] Krizhevsky A. and Hinton G. E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 2012;1907(1105): 1–9.
- [17] Akçay M. E, Kundegorski Samet, Devereux M, and Breckon T. P. Transfer Learning Using Convolutional Neural Networks for Object Classification Within X-Ray Baggage Security Imagery. *International Conference on Image Processing (ICIP)* 2016; USA: 23: 1057 – 1061.
- [18] “Image.net.” Erişim Tarihi: 15/05/2019.
- [19] Yosinski J, Clune J, Bengio Y, and Lipson H. How transferable are features in deep neural networks ? *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 2014;2: 3320–3328.
- [20] Lange J, Bok V. GANs in Action, MEAP. Shelter Island, NY / USA: Manning Publications, 2018.
- [21] Goodfellow I. Tutorial: Generative Adversarial Networks. *arXiv:1701.00160v4* 2016;1–57.
- [22] Radford A, Metz L, and Chintala S. Unsupervised Representation Learning with Deep Convolutional Generative Adversarial Networks *International Conference on Image Processing (ICIP)* USA; 2015: 1–16.
- [23] Kingma DP and Adam JBa.: A Method for Stochastic Optimization 2014; 1–15.

Türkiye Yenilenebilir Enerji Kapasitesi Devreye Alma İşleminin Darboğaz Analizi

Muhammed Mustafa İZGEÇ^{1*}

¹ Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), Ankara, Türkiye

*¹ izgec.mustafa@gmail.com

(Geliş/Received: 09/10/2020;

Kabul/Accepted: 05/04/2020)

Öz: Son yıllarda Dünyada olduğu gibi Türkiye'de de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına yönelim ivme kazanmıştır. Bu kaynakların üretime geçme sürelerinin uzun olduğu bilinmektedir. Çalışmanın amacı, santrallerin devreye alma süresi verilerini kullanarak detaylı bir analiz yapmak ve süreçlerde gerçekten sorun olup olmadığını tespit etmektir. Sorunların neler olduğu, başka bir çalışma konusu olarak önerilmektedir. Devreye alma sürelerinin hızlanması konusunda ise saha tecrübeleri göz önünde bulundurularak genel çözüm önerileri yapılmıştır. İrdelenen süreçler, tesisin devreye alınmasına kadar olan süreçlerdir ve işletme koşulları ile ilgili bilgi içermemektedir. Ayrıca; çalışmada ticari bilgi kabul edilecek veriler gölgelenmiş ve yorumdan kaçınılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yenilenebilir enerji, yatırım süreçleri, enerji ekonomisi.

A Bottleneck Analysis of Turkish Renewable Energy Capacity Commissioning

Abstract: In recent years, the use of renewable energy sources has increased in the world and Turkey. Capacities using these resources are known to have a long turnaround time. The aim of the study is to make a detailed analysis using the commissioning time data of the power plants and to determine whether there are any problems in the processes. What the problems are is beyond the scope of this study and is proposed as another study topic. In order to prevent the delay in commissioning times, general solution suggestions were made considering the field experiences. The processes discussed are up to commissioning of the plant and do not contain information about operating conditions. Also; In this study, commercial data was shaded and interpretation was avoided.

Key words: Renewable energy, investment processes, energy economy.

1. Giriş

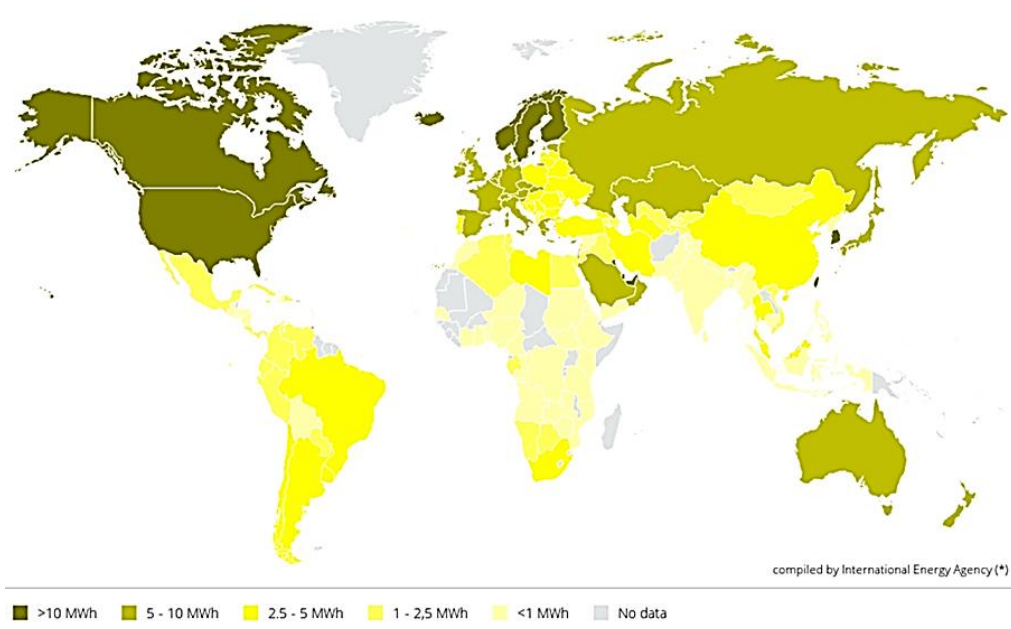
Enerji, yaşamsal kaliteyi belirleyen en büyük ihtiyaç olarak karşımıza çıkmaktadır. Öyle ki, artık yaşam standartlarının seviyesi, kişi başı enerji tüketimi ile doğru orantılı olarak değerlendirilebilmektedir [1]. Şekil 1'de Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency-IEA) verilerine göre ülkelerin kişi başı ortalama enerji tüketimleri verilmiştir [2]. Türkiye, gelişmekte olan bir ülke olarak giderek daha fazla enerji gereksinimi duymakta ve giderek daha fazla enerji üretimi yapmaktadır.

Enerji yatırımları yapılırken devletlerin Enerji Politikaları, finansman seçenekleri, vergi ve teşvik oranları, geri dönüş süreleri, istihdam miktarı vb. değerlendirilmesi gereken birçok sosyo-ekonomik kriterin yanı sıra kaynağa yakınlık, teknoloji mevcudiyeti, teknoloji transfer seçenekleri, teknik işletme kapasitesi vb. teknik kriter de bulunmaktadır. Enerji yatırımlarında başarı, bütün bu dinamiklerin yönetilme becerisinin bir göstergesi olmaktadır.

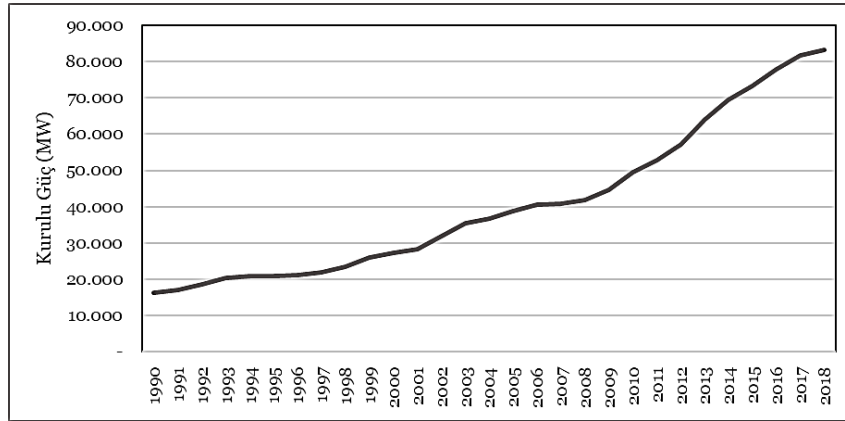
Türkiye'de enerji ihtiyacını gösteren en önemli gösterge olan elektrik tüketimi, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) verilerine göre özellikle 2000 yılı sonrasında ciddi bir artış göstermiştir [3]. Grafik incelendiğinde 2012 yılı sonrasındaki eğimin daha dik olduğu ve kapasitenin gelişim ivmesinin arttığı görülebilir (Şekil 2) . Bir diğer grafik 2000' li yılların başında itibaren yenilenebilir kurul gücündeki artış göstermektedir. Görüldüğü üzere toplam kapasitenin gelişime paralel olarak, rüzgar santralleri başta olmak üzere, yenilenebilir kaynaklı üretimde büyük bir kapasite artışı söz konusudur (Şekil 3) [4]. Bu da kapasitenin artışında, küresel fosil yakıt rezervlerin azalması ve çevresel kaygılar bu konuda ön plana çıkmaktadır [5]. Yenilenebilir kaynaklı üretimin sisteme dâhil olması süreci, 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun ile hız kazanmıştır. Bu kanun; "Yenilenebilir enerji kaynakları (YEK): Hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal, biyokütle, biyokütleden elde edilen gaz (çöp gazı dâhil), dalga, akıntı enerjisi

* Sorumlu yazar: izgec.mustafa@gmail.com Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-6317-9250

ve gel-git gibi fosil olmayan enerji kaynaklarını,” şeklinde tanımlayarak konuya bir açıklık getirmiştir [6]. Bu kanunda yer alan ve sektöre ivme kazandıran en önemli yaklaşım, kaynak bazlı sabit fiyat öngören Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM)’ dir.



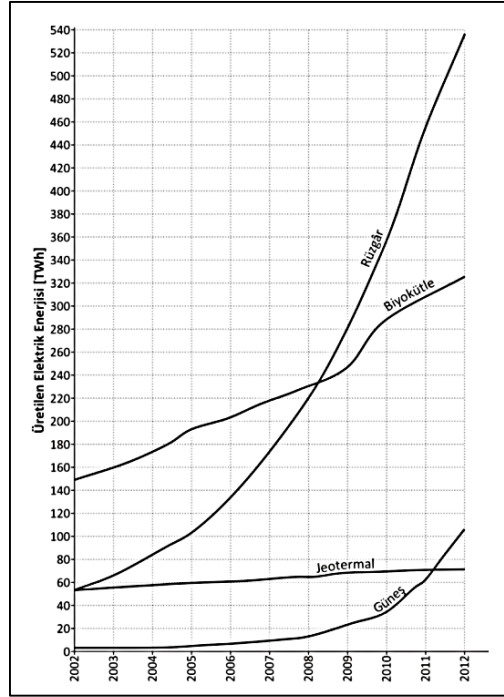
Şekil 1. Dünya kişi başı enerji tüketimi [2]



Şekil 2. Dünyada kişi başına düşen enerji tüketimi (Yıllık) (EPDK, 2019)

Yenilenebilir enerji yatırımlarının yönetimindeki önemli aşamalardan biri de Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik’tir. Bu yönetmelik ile 1MW altındaki kapasiteleri lisanstan muaf tutarak, daha az bürokratik işlemlerle, daha kısa sürede devreye alınması amaçlanmıştır [7].

Yenilenebilir kapasitenin ciddi şekilde artış gösterdiği yıllar içinde dahi izin süreçlerindeki atalet ve prosedür fazlalığı, bu konudaki talep ve şikâyetlerin dillendirilmesine ve çözüm önerilerine konu olmuştur. 7.Türkiye Rüzgâr Enerjisi Kongresi’nde özel bir oturum ile izin süreçlerinin sadeleştirilmesi üzerine öneriler değerlendirilmiştir [8]. Lisans ve izin prosedürünün sadeleştirilmesi çalışmaları, yeni bir yönetmelik ile şekil kazanmış ve daha hızlı devreye girecek daha büyük kapasitelerin önü açılmıştır. Çalışmanın amacı, devreye alma süresinde yaşanabilen aksaklıkların derecesini anlayabilmek, bu aksaklıkların etkilerini veriler üzerinden inceleyerek nedenlerini tespit etmek ve bu nedenlere ilişkin çözüm önerileri getirmektir.



Şekil 3. Yenilenebilir kaynaklardan elektrik enerjisi üretiminin değişimi (hidroelektrik hariç)

2. Literatürün Gelişimi

Yenilenebilir enerjinin desteklenmesi konusunda son on yılda ciddi gelişmeler yaşanmıştır. Özellikle teknolojinin gelişimi ile birlikte düşen maliyetler sonrasında bütün bu gelişmeler hızlı bir şekilde kapasiteyi yenilenebilir kaynakların lehine evriltecek gibi görünmektedir. Yine de yenilenebilir enerji kullanan üretim kaynaklarının desteklenmesi, bu sürecin daha hızlı şekilde hayata geçmesine yardımcı olabilir. Destekleme mekanizmaları ve sürdürülebilir yapılar hakkında birçok akademik yayın bulunmaktadır. Abdmouleh, Alammari ve Gastli, çalışmalarında [9] yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik enerjisi üretimindeki gelişimin pazardaki teknolojinin mevcut durumu, finansman için mevcut bütçe, yenilenebilir enerji ile ilgili hedef ve ülkenin çevresel koşullarının etkisi yönünden değerlendirilmesi gerektiğini savunmuşlardır. Onlara göre destekleme mekanizmalarını oluştururken kaynak tipi veya teknoloji bakımından tekel oluşturmamak önemlidir. Haas ve diğerleri çalışmalarında [10] AB ülkelerinde yenilenebilir enerji destekleme mekanizmalarını teker teker tanımlamışlar ve hangi destekleme mekanizmasının en etkin olduğunu tespit etmeye çalışmışlardır. Son derece ayrıntılı incelemelerin yapıldığı çalışmada destekleme çeşitleri bambaşka bir şekilde sınıflandırılmıştır. Buna göre:

- Fiyat desteklemesi düzenlemeleri: Bunlar kapasite veya enerjiye karşılık yapılır.
 - Yatırım odaklı: Kapasite başına yatırım teşviki, hibe ve vergi kredisi şeklindedir.
 - Üretim bazlı: Üretilen enerji başına olan tarifeli veya performanslı yaklaşımlarıdır.
 - Miktar desteklemesi düzenlemeleri: Yenilenebilir enerjinin istenilen hedefi tutturması amaçlı stratejilerdir.
- İhale sistemi: Hangi sürede ne kadar yatırımın geleceği kesindir.
 - Satılabilir sertifika sistemi: Piyasadaki faaliyetin kontrol altında olması anlamına gelir.
 - Gönüllü yaklaşımlar: Bu yaklaşımlarda tüketicilerin küresel ısınmaya duyarlılığı nedeniyle gönüllü destek vermesi beklenir.
 - Yatırım odaklı: Yatırıma hissedar, etik programlar vb.
 - Üretim bazlı: Yeşil enerji tarifeleridir.
- Dolaylı stratejiler:
 - Konvansiyonel olmayan üretim kaynaklarından alınan çevre vergileri
 - CO2 emisyon vergileri/cezalari
 - Fosil yakıt ve nükleere verilmeyen teşvikler.

Becker ve Fischer’a göre [11] yenilenebilir enerjinin maliyeti uzun dönemde daha fazla olmasına rağmen etki ettiği sosyal, ekonomik, çevresel ve sağlık alanlarındaki etkilerini matematiksel olarak tahmin etmenin güçlüğünden ötürü uzun dönemdeki karlılığını ispatlamak oldukça güçtür. Tarife ve ihale bazlı sistem temelde aynı olmasına rağmen yalnızca ödeme şeklinin nasıl hesaplandığı ile ilgili bir farklılık bulunmaktadır. Becker ve Fischer, teknoloji, destekleme periyodu, alım garantisi gibi birçok kriterin tarife bazlı yaklaşımı birçok farklı şekli varmış gibi gösterdiğini ancak hepsinin aslında en temel destekleme olduğunu savunmaktadır.

Schallenberg ve Rodriguez çalışmalarında [12] tarife bazlı destekleme mekanizmalarını en yaygın ve en etkin destekleme mekanizmaları olarak tanımlamıştır. Bu mekanizmaların dezavantajlarından biri, sisteme yüklediği maliyetlerdir. Bu maliyetleri azaltmak için uygulanan taban ve tavan fiyat uygulamalarının kullanıldığı görülmektedir. Bu uygulama ise iki avantaja sahiptir:

1-Sistemi yenilenebilir enerji santralleri açısından daha güvenli kılmaktadır.

2-Santralleri, piyasada faaliyet göstermek konusunda çekincelerden kurtarmaktadır.

Yaptıkları analizlere göre saatlik bazlı taban-tavan fiyat uygulamaları yerine aylık veya yıllık bazlı taban-tavan fiyat uygulamalarının daha verimli olduğunu değerlendirmişlerdir.

Uluslararası literatürde incelen konuya ışık tutabilecek çok sayıda çalışma olmakla birlikte ulusal literatürde konuya ilişkin kaynaklar oldukça sınırlıdır. İzgeç, çalışmada [13] yenilenebilir kaynak alanı senaryoları ve finansman modelleri üzerine senaryolar ortaya koymuştur. Bu çalışmaya göre kaynak alanları yaklaşımı, tutarlı ve yenilikçi bir destekleme senaryosudur. Şimşek, H.A ve Şimşek, N çalışmalarında [14] yenilenebilir enerjiye yönelimin ve bu konuda teşvik senaryoları üretmenin küresel bakışla aynı doğrultuda hareket etmek olduğuna değinmişlerdir. Ertürk çalışmada [15] YEKDEM fiyatları ve ortalama verimlilik parametreleri üzerinden rüzgâr potansiyelinin ekonomik analizini yapmış ve 13.600 MW değerindeki bir rüzgâr kapasiteyi ekonomik olarak gerçekleştirilebilir bulmuştur. Özcan ise çalışmada [16] katılımcıların teşvik mekanizmasına bakışını tespit etmeye çalışmıştır. Özcan’a göre yerli katkı teşviki oldukça önemli bir öneridir. Diğer taraftan yenilenebilir enerji kullanan santrallerin proje aşamasındaki devreye alma süresinin hafifletilmesi ve onay alınan taraf sayısının azaltılması veya tip projeler, önemli bir teşvik olarak görülebilecektir. Çalışma sonuçlarına göre katılımcılar, teşvik fiyatlarının sürdürülebilir olduğunu değerlendirmektedir.

3. Yöntem

Türkiye’deki yatırım çalışmalarının lisanslı projeler için önlisans tarih, lisanssız projeler içinse çağrı mektubunun alındığı tarihten işletmeye girene kadar olan sürecini değerlendirmek için verilerin analiz edilmesi, olası darboğazları gösterebilir. Bu amaçla 2012-2019 yılları arasında ön lisans veya çağrı mektubu almış ve devreye girmiş olan santraller kaynak bazına, kapasite büyüklüğüne, bağlı bulunduğu dağıtım şirketine göre analize tabi tutulacak ve normal dağılım grafikleri istatistiksel yöntemler kullanılarak analiz edilecektir. Bu çalışmada kaynak bazında tüm santraller kullanılmamış elde edilen veri havuzundaki santrallere ilişkin veriler kullanılmıştır. Analizde MS Excel, SPSS ve SQL Server özellikleri kullanılmıştır. Temin edilen veriler arasında çağrı mektubu tarihi belli olmayan santraller kullanılmamıştır. 6545 santral üzerinde incelemeler yapılmıştır. Santrallerin kurulu güçleri 1,5-12900 kW aralığındadır. Kaynak tipine göre Biyoenerji Santrali (BES), tri/kojenasyon santrali (3gen), Rüzgâr Enerjisi Santrali (RES) ve Güneş Enerjisi Santrali (GES) verileri kullanılmıştır. Çağrı mektubu tarihi ile kabul tarihi arasındaki süre “gün sayısı” olarak adlandırılmış ve analizler bu terim üzerinden yapılmıştır. Analizde ticari kaygılara neden olabileceği düşüncesi ile santral ismi ve dağıtım bölgesi isimleri gölgelenmiştir. Kaynak, dağıtım şirketi, kapasite bazlı analizlerde ortalama gün sayısı üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken; Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği’nde yer alan geçici kabul tamamlama tarihleri göz önüne alınmıştır. İlgili yönetmelik maddesi;

Üretim tesislerinin işletmeye girmesi ve sistem kullanımı

MADDE 19 – (1) Bu Yönetmelik hükümlerine göre şebekeye bağlanacak üretim tesislerinin geçici kabul işlemlerinin, bağlantı anlaşmasının imza tarihinden itibaren;

a) OG seviyesinden bağlanacak hidrolik kaynağa dayalı üretim tesislerinde üç yıl,

b) OG seviyesinden bağlanacak hidrolik kaynağa dayalı üretim tesisleri dışındaki üretim tesislerinde iki yıl,

c) AG seviyesinden bağlanacak tüm üretim tesislerinde bir yıl,

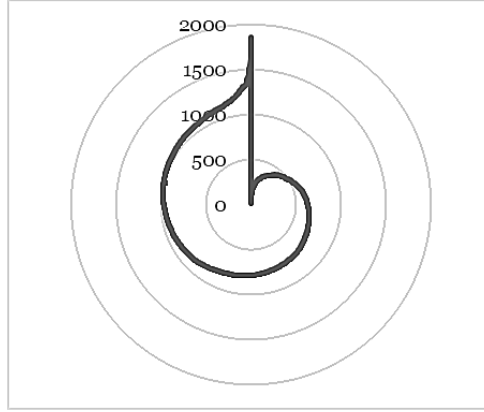
ç) İletim şebekesine bağlanacak üretim tesislerinde 2/11/2013 tarihli ve 28809 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği çerçevesinde aynı niteliklere sahip üretim tesisleri için öngörülen süre,

içerisinde tamamlanması zorunludur. Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliğinin 35 inci maddesinde belirtilen mücbir sebepler ve Kurul tarafından uygun bulunan haller dışında, bu sürelerin sonunda üretim tesisinin

tamamlanmaması halinde bağlantı anlaşması, tahsis edilen kapasite, teknik etkileşim izni ile su kullanım haklarına ilişkin izin belgeleri kendiliğinden hükümsüz hale gelir, hükümlerini içermektedir.

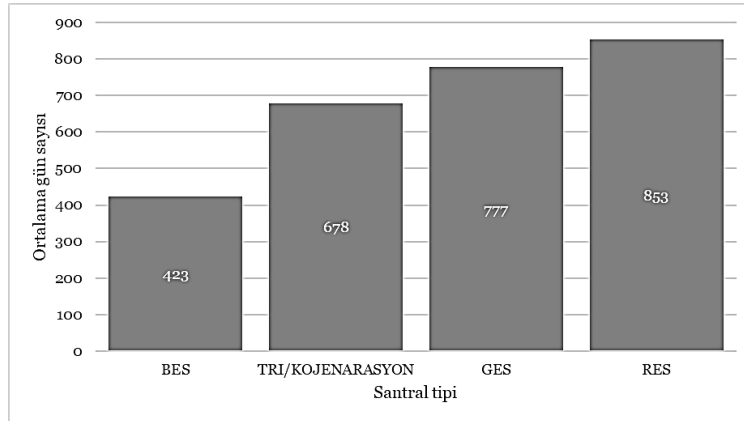
4. Analiz

Şekil 4'te yer alan radar grafikte görüleceği üzere 6545 santral üzerinde yapılan analizde örneklem içindeki en kısa gün sayısını 14, en uzun gün sayısının ise 1643 gün olduğu tespit edilmiştir. Ortalama kabul süresi 776 gün iken standart sapma, 254 olarak hesaplanmıştır. Kapasite büyüklüğü ile gün sayısı arasında korelasyon araştırılmış ve 0,13 katsayısı elde edilerek sıfıra çok yakın olduğundan ilişkisiz bulunmuştur.



Şekil 4. Santrallerin (6545) gün sayısına göre küçükten büyüğe sıralanışı

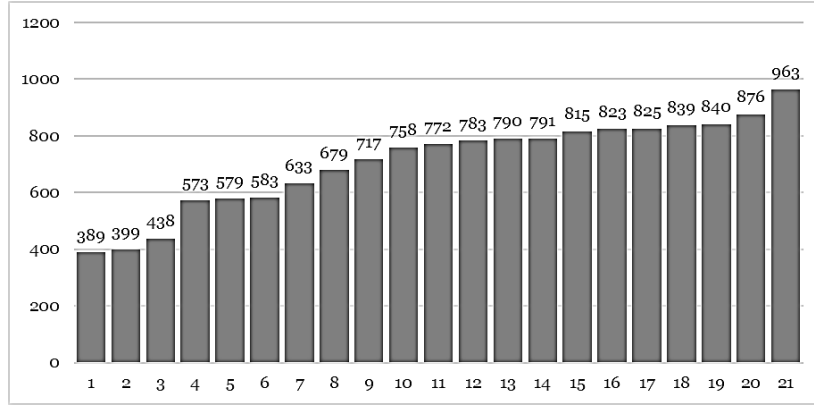
Kaynak tipine göre yapılan analizlerde ortalama değerler kullanılarak 4 tip santral (BES, 3gen, RES ve GES) incelenmiştir. Kaynak tipine göre en hızlı BES iken en yavaş RES olmuştur. Ortalama kabul süresi 682 gün ve standart sapması 187'dir. BES ve RES kurulum süreleri arasındaki bu fark, BES'lerin kurulduğu alanların kamulaştırma ve mülkiyet edinimi noktasında daha hızlı işlemlere tabi alanlar olması ve yakınlarında sisteme bağlantı noktası olarak daha fazla alternatif olmasından kaynaklı olduğu görülmüştür. Hızlı kamulaştırma ve daha kısa ve avantajlı bağlantı noktası ve hat tesisi bu kaynak tipinin daha çabuk üretime hazır hale gelmesi yönünde bir avantajdır. RES'lerde ise, her bir rüzgâr üretim türbinin saha içinde en uygun şekilde konumlandırılması gereklidir. Bu türbinlerin dağınık olması ve geniş bir alanı kaplaması sebebi ile kamulaştırma ve arazi edinim süreçleri uzamaktadır. Yerleşim yerlerinden uzaklığı nedeni ile sistem bağlantı noktası kısıtı ve hat uzunlukları gibi etkenlerle tesis tamamlama süreleri uzayabilmektedir. Genellikle yerleşim yerleri dışına tesis edilen bu tip santraller ormanlık arazide konuşlandırdıkları takdirde orman kesim ve kullanım izinleri çerçevesinde de zaman kaybı yaşanabilmektedir (Şekil 5).



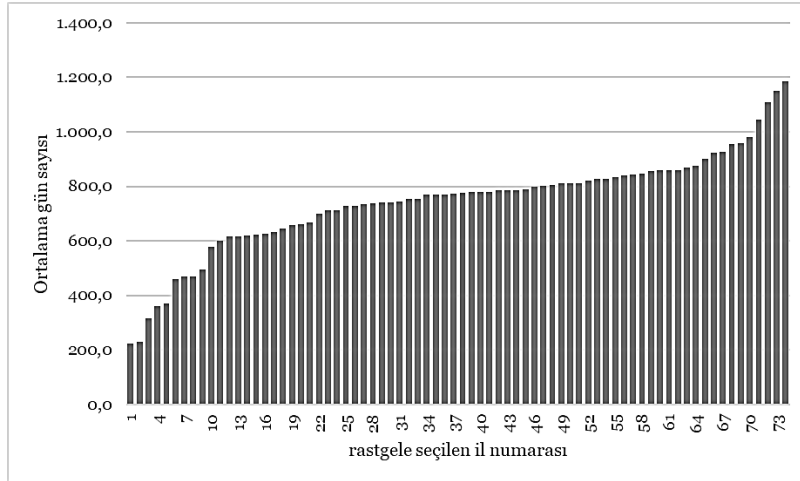
Şekil 5. Kaynak tipine göre ortalama gün sayısı

Dağıtım bölgelerine göre yapılan analizde 80 bölge analiz edilmiştir. Bölgeler arasında Organize Sanayi Bölgesi (OSB) ve Elektrik Dağıtım Şirketleri (EDAŞ) yer almıştır. En hızlı kabul ortalaması 49 gün; en yavaş olanı 963 gün olmuştur. Yalnızca EDAŞ'lar için yapılan analizde en düşük gün ortalaması 388, en yüksek 863, ortalama 708 gün olmuştur. İllere göre 74 il üzerinden analiz yapılmış, en hızlı kabul ortalaması 225, en yavaş 1184 gün olarak hesaplanmıştır. Ortalama gün sayısı 744 gün, standart sapma 183'tür. Bölgeler arasındaki değişkenlik gösteren bu sürelerle, ekipman ve teknik eleman yetersizliği, coğrafya ve iklim koşulları, yerel yönetimler arasındaki uygulama farklılıkları başlıca nedenler olarak gösterilebilir. Üretim tesisinin kurulacağı illerde, izin süreçlerinde yer alan kamu kurum ve kuruluşlarının teşkil yapısı da süreçlerin uzamasında etken olabilmektedir (Şekil 6 ve Şekil 7).

Kapasite büyüklüğüne göre 499 farklı kapasite analiz edilmiştir. En hızlı 80, en yavaş 301 gün ortalama değerine ulaşılmıştır. Ortalama gün sayısı 212 olurken kapasite büyüklüğü ile kabul süresi arasında korelasyon araştırılmış ve ilişkisiz bulunmuştur. Genel algının aksine bir santralin devreye alınma süresi ile kapasite büyüklüğü arasında doğrudan bir ilişki olmaması, kapasiteden bağımsız olarak kaynak bazlı tip onay ve izin sürecinin devreye alma süreçlerini hızlandırabileceğine bir işaret olarak görülebilir. Süreç yönetimine ilişkin yapılacak düzenleme veipleştirme yaklaşımları ile daha kısa sürede daha büyük kapasiteler üretime hazır hale gelebilecektir (Şekil 8).

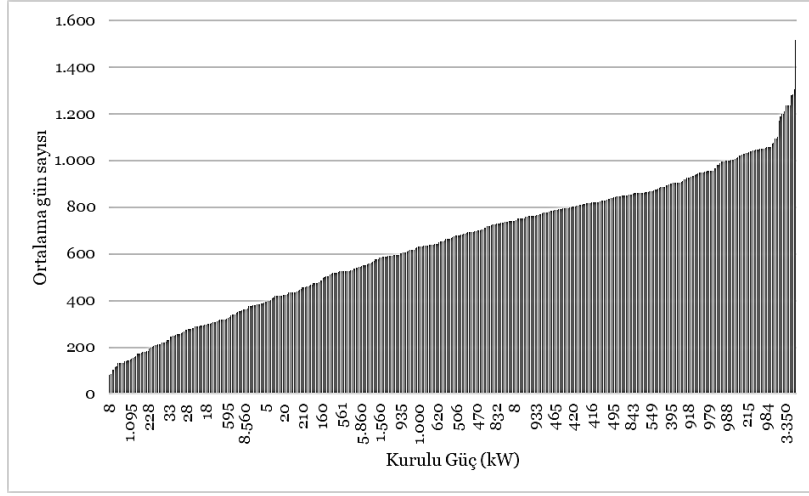


Şekil 6. EDAŞ ortalama gün sayıları

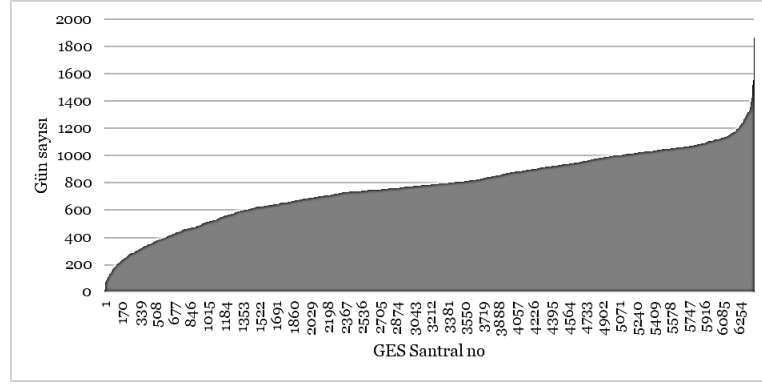


Şekil 7. İllere göre ortalama gün sayısı

GES'ler üzerinde yapılan araştırmada 6394 santral verisi incelenmiştir. En hızlı süre 14 gün olurken en yavaş süre 1895 olarak görülmüştür. Ortalama süre 777 olmuştur (Şekil 9). GES özelinde de kapasite ile kurulum süresi arasında bir ilişki ortaya çıkmamıştır. Bu sonuç tüm kaynak tipleri için geliştirilen yaklaşımla uyumludur.

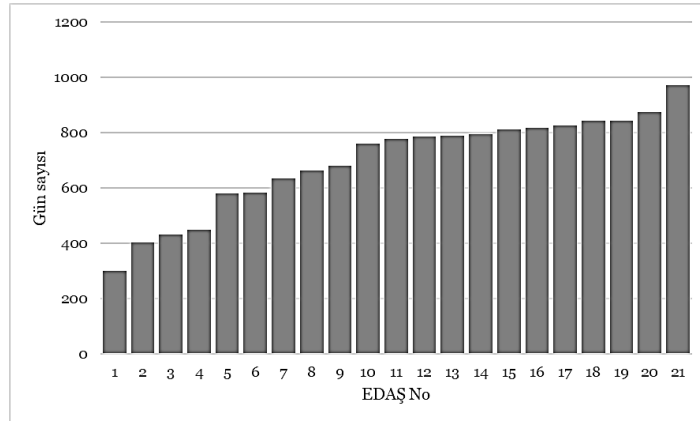


Şekil 8. Kapasite büyüklüğüne göre ortalama gün sayısı



Şekil 9. GES için ortalama süreler

GES için EDAŞ performanslarına bakıldığında en düşük ortalamanın 300, en yüksek 970 gün olduğu ve ortalamanın 696 gün olduğu görülmektedir. Aynı kaynak tipi için bile dağıtım şirketleri bazında farklılıklar oluşması uygulama birlikteliği anlamında süreçsel sıkıntıları teyit etmektedir. Ancak dikkat edilmesi gereken husus dağıtım şirketlerinin süreçleri kadar yerel yönetim süreçleri ve coğrafyanın da bu süreçlere etki ettiğidir (Şekil 10).



Şekil 10. GES için EDAŞ ortalama gün sayısı

Analiz aşamasında geciken yatırımların CO₂ eşdeğerinin ve mali karşılığının hesaplanması ayrıca önem taşımaktadır. Bu tip bir değerlendirmeyi yapabilmek için 3gen, BES, RES ve GES kaynakların devreye girememiş toplam kapasitesinin üretebileceği elektriği hesaplamak gerekmektedir. Tablo 1’de santral tiplerinin toplam kurulu gücü verilmektedir. Tablo 2 ise santrallerin devreye girmesi için gerekli gün sayısı için analiz sonuçlarını göstermektedir. Tablo 1 ve Tablo 2 verilerini kullanarak devreye girecek kapasitenin gecikmesi nedeniyle kullanılan farklı kaynağa ödenen bedel ve bu kaynakların çevreye etkisi hesaplanmak istenirse, ortalama verimlilik, ortalama elektrik fiyatı ve elektriğin kaynaklara göre CO₂ salınım etkisinin bilinmesi gerekir. Ömürgönülşen ve arkadaşlarının çalışmasında [17] verimli rüzgâr kapasitenin %40 kabul edildiği araştırılmıştır. EPIAŞ verilerine göre [18] örneklem aralığındaki ortalama piyasa fiyatı 171 TL/MWh olmuştur. Doğalgaz kullanılarak yapılan elektrik üretiminin GWh başına CO₂ salınımı 499 ton olarak kayıtlıdır [19].

Tablo 1. Santral Tiplerinin Toplam Kurulu Gücü (EPDK-2019 yılı itibarı ile)

Santral Tipi	Toplam Kurulu Gücü (kWe)
BES	41.641
GES	5.310.806
RES	68.078
3/Kojenerasyon	165.426

Tablo 2. GES için EDAŞ ortalama gün sayısı

Sıralama ölçütü	Gün Sayısı			
	Ortalama	En küçük	En büyük	St.Sapma
6545 santral	776	14	1865	255
Kaynak tipine göre	682	423	853	187
Dağıtım OSB - EDAŞ	540	49	963	197
EDAŞ	700	388	863	161
İllere göre	744	225	1184	184
3gen	678	231	1210	284
BES	422	125	1212	290
RES	852	116	1643	370
GES	251	14	1865	252
GES-EDAŞ'lara göre	696	300	970	178
GES-illere göre	750	225	1184	176

5. Değerlendirmeler

Türkiye’de yenilenebilir enerji santrallerinin (trijenerasyon, biyoenerji, rüzgâr ve güneş) çağrı mektubu ile geçici kabul tarihi arasındaki ortalama süre 776 gündür (~2 yıl). Trijenerasyon ortalaması 678, BES ortalaması 422, RES ortalaması 852 ve GES ortalaması 251’dir. Buna göre en hızlı devreye giren kapasite GES kapasitedir. Devreye alınma işlemi en uzun süren kapasite RES kapasitedir.

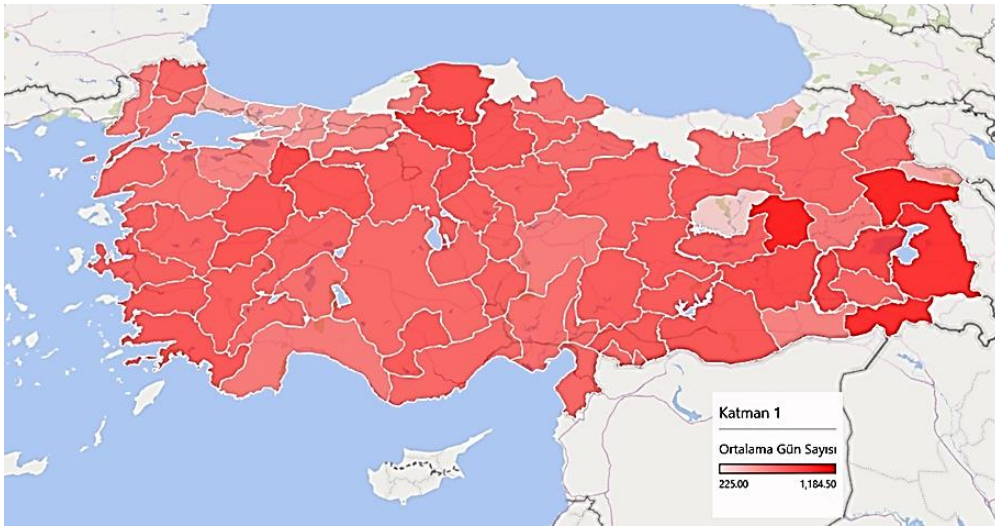
OSB ve EDAŞ’tan oluşan dağıtım şirketlerinin ortalama devreye girme süresi 540 iken yalnızca EDAŞ’lar için bu süre 700 gündür. Buna göre EDAŞ’lar OSB’lere göre çok daha yavaş işlem yapmaktadır.

RES ve GES için en uzun devreye girme süresi çok yüksektir (1643 ve 1865 gün). Ancak; GES standart sapmasının daha küçük olması, ortalamadan sapma yoğunluğunun daha az olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, GES işlemlerinin RES işlemlerine göre kolaylığı bulunmaktadır. Lisanssız üretim santrallerinin ağırlıklı olarak GES olduğu düşünüldüğünde bu sonuç beklenmektedir ve kolaylaştırıcı önlemlerin karşılık verdiği anlamına gelmektedir.

GES'lerin EDAŞ'lara göre değerlendirmesinde ortalama devreye girme süresi 696 gündür. GES'ler için 251 ve EDAŞ'lar için 700 olan bu ortalama göre net şekilde belirli dağıtım şirketinde problemlerin yoğunlaştığı söylenemez. EDAŞ prosedürlerinin yavaşlığa neden olduğu ve ortalama olarak her bölgede aynı oranda yavaşlattığı söylenebilir. Oysa standart sapmalara bakıldığında en düşük değer EDAŞ ortalamalarıdır. Bunun anlamı, özellikle bazı EDAŞ'lar çok daha kolay ve çok daha zor yönde tutum sergileyebilmektedir. Bu sonuca göre EDAŞ'ların bulunduğu bölgelerdeki diğer onay mercilerinden kaynaklı süre uzamalarının da daha sistematik şekilde araştırılmasında fayda görülmektedir.

GES'lerin illere göre değerlendirmesinde ortalama devreye girme süresi 750'dir. Tüm örneklem için bu rakam 744 olmuştur. Tüm GES'ler için 251 değeri hesaplandığı hatırlanırsa, bazı illerde işlemlerin görece çok uzun sürdüğü anlaşılmaktadır. Haritada (Şekil 10) görüleceği gibi Bingöl, Ağrı, Şırnak, Van illerinde devreye girme nedenlerinin çok uzun sürdüğü hesaplanmıştır.

İllere göre devreye girme süresi ortalama 744'tür. Buna göre bazı illerde işlemler daha uzun sürmektedir. Kaynak tipine göre devreye girme süresi ortalama 682 gün olarak hesaplanmıştır. Standart sapması, toplam santrallerin standart sapmasından küçüktür. Buna göre kaynak tipine göre ortalamalar birbirine daha yakındır.



Şekil 11. GES devreye girme sürelerinin illere göre ortalamaları

6. Sonuç

Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; yenilenebilir enerji santralleri arasında en hızlı devreye alınan santraller GES'tir. Lisanssız Üretim Yönetmeliği ile onay prosedürünün sadeleştirilmesinin bu konuda etkili olduğu düşünülmektedir. RES için ortalamaların yüksek olması, devreye alma süresinde bu tip bir sadeleştirme yapılamamış olmasından kaynaklanmaktadır. Lisanssız Üretim Yönetmeliği uygulamalarının RES ve diğer yenilenebilir kapasiteyi de kapsamasına rağmen hem kaynağın karakteri hem teknolojinin bulunduğu seviye gereği GES kaynaklar bu avantajı daha iyi şekilde değerlendirmiştir. YEKA gibi alternatif bir destekleme mekanizmasının (onay süreçleri daha önceden tamamlanmış olan yöntem) analiz sonuçlarına büyük etki edeceği tahmin edilmekle birlikte henüz YEKA devreye alması gerçekleşmemiş olduğundan değerlendirmesi yapılamamıştır.

Dağıtım şirketlerine göre yapılan analizlerde EDAŞ onaylarının OSB onaylarına göre çok daha uzun sürdüğü anlaşılmıştır. Birkaç dağıtım şirketinde görece daha kısa ve daha uzun onay süreleri olduğu anlaşılmaktadır. Kısa olanın iyi uygulama örneği kullanılmalı; uzun olanın problemleri alanları üzerine çalışmalar yapılmalıdır.

Analiz sonuçlarına göre yatırımın işletmeye girmesi için gecikmesi durumu, hem bu kapasiteye alternatif kapasitelerden kullanılan elektriğin maliyeti, hem doğaya kirletici etkileri anlamında büyük zararlara yol açmaktadır. Öyle ki, ortalama hesaplar üzerinden 2,5 milyar TL fosil yakıtlar ile üretilen elektrik için harcanmış ve karşılığında 7,3 milyon ton CO₂ salınımına neden olunmuştur [19]. Bu zararların azaltılması için yatırımların mümkün olan en kısa sürede devreye alınmasının zaruriyeti, ortalama rakamlar üzerinden dahi net bir şekilde anlaşılmaktadır.

İl bazında yapılan analizlerde bazı illerdeki onay prosedürünün oldukça ağır ilerlediği anlaşılmıştır. Bu durumun jeo-politik, sosyal, ekonomik, teknik vb. birçok nedeni olabilir. Kaynak nedenler araştırılmalı ve iyileştirme yöntemleri geliştirilerek otoriteye sunulmalıdır [5].

Analiz sonuçlarına göre Türkiye’de en hızlı devreye alınan santral için devreye alma süresi 14 gün iken en yavaş santral için devreye alma süresi 1865 gün olmuştur. Hem bu aralık çok fazladır; hem de standart sapması 255 görünen bu dağılımda sorunun münferit olmadığı anlaşılmaktadır. Buna göre devreye alma sürecine ilişkin iyileştirme çalışması yapılması önerilmektedir. Bu süreçlerin hızlandırılması için;

- Kaynak bazlı tip başvuruların oluşturulması,
- Yerel yönetimlere ilişkin prosedürlerin tek tip hale getirilmesi,
- Kurumlar arası ortak mutabakat gerektiren prosedürlerin entegre bir bilgi yönetim sistemi aracılığıyla yürütülmesi
- Tüm başvuruların ilgili kurumca bir süreç yönetimine tabi olması
- Kaynak bazlı fizibilite ve finansman modeli konusunun Kamu tarafından ayrı bir birimle desteklenmesi, önerilebilir.

Yatırımın işletmeye geçmesine kadar olan süreçte onay prosedürleri kadar yatırım destek modellerinin doğru stratejiler ile hayata geçirilmesi ve bunun için de teknik, finansal ve işletme yönleriyle de araştırılmasının önem arz ettiği değerlendirilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan verilerin elde edilmesinde yardımcı olan Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. çalışanlarına, verilerin derlenmesinde yardımlarından ötürü değerli arkadaşım Sayın Tamer Emre’ ye teşekkür ederim

Kaynaklar

- [1] Boardman B. Fuel Poverty: From Cold Homes to Affordable Warmth. London;New York;; Belhaven Press; 1991.
- [2] IEA, EA Atlas of Energy, 06 08 2019. [Çevrimiçi]. Available: <http://energyatlas.iea.org/#/tellmap/-1118783123/1>.
- [3] EPDK, 2018 Yılı Elektrik Piyasası Gelişim Raporu, Ankara, 2019.
- [4] Observer, EDF, Fondation Pour Le Monde, Worldwide electricity production from renewable energy sources, Stats and Figures Series, 1. Electricity production in the world: General forecasts, Fifteenth inventory, 2013 edition, <http://www.energiesrenouvelables.org/observ-er/html/inventaire/pdf/15e-inventaire-Chap01-Eng.pdf>.
- [5] Karık F , Sözen A , İzgeç M . Rüzgâr Gücü Tahminlerinin Önemi: Türkiye Elektrik Piyasasında Bir Uygulama. Politeknik Dergisi. 2017; 20(4): 851-861.
- [6] Resmi Gazete, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, Resmi Gazete, 2005.
- [7] Resmi Gazete, Elektrik Piyasasında Lisansız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik, Resmi Gazete, 2013.
- [8] TÜREK, 7.Türkiye Rüzgar Enerjisi Kongresi Raporu, Ankara, 2018.
- [9] Abdmouleh, Zeineb, Rashid A. M. Alammari, and Adel Gastli. 2015. "Review of Policies Encouraging Renewable Energy Integration & Best Practices." Renewable and Sustainable Energy Reviews 45: 249-262.
- [10] Haas R, Panzer C, Resch G, Ragwitz M, Reece G, Held A. A historical review of promotion strategies for electricity from renewable energy sources in EU countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011;15:1003-1034.
- [11] Becker B, Fischer D. Promoting renewable electricity generation in emerging economies. Energy Policy. 2013;56:446-455.
- [12] Schallenberg-Rodriguez J. Renewable electricity support system: Design of a variable premium system based on the Spanish experience. Renewable Energy. 2014;68:801-813.
- [13] İzgeç MM, Emre T, Sözen A, Ömürgönülşen M. Financial sustainability analysis of renewable energy plant applications. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy. 2017;12:895-902.
- [14] Simsek N, Simsek HA. Recent incentives for renewable energy in Turkey. Energy Policy. 2013;63:521-530..
- [15] Ertürk M. The evaluation of feed-in tariff regulation of Turkey for onshore wind energy based on the economic analysis. Energy Policy. 2012;45:359-367.
- [16] Ozcan M. Assessment of renewable energy incentive system from investors' perspective. Renewable Energy. 2014;71:425-432.
- [17] Ömürgönülşen M, Emre T , Atıcı K . Türkiye'deki Rüzgar Enerjisi Santrallerinin Görelî Etkinliklerinin Veri Zarflama Analizi ile Ölçümü. Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi. 2016; 34(2): 79-96.
- [18] EPIAŞ, Şeffaflık Platformu 4 10 2019. [Çevrimiçi]. Available: <https://seffaflik.epias.com.tr/transparency/piyasalar/gop/ptf.xhtml>.
- [19] Enerji Atlası, Enerji Atlası 4 10 2019. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.enerjiatlas.com/haber/elektrik-uretiminde-karbon-salinimi>.

Yüksek Fırın Cürufu ile Stabilize Edilmiş Killi Bir Zeminin Yol Esnek Üstyapı Tabaka Kalınlıklarına ve Maliyetine Etkileri

Tacettin GEÇKİL¹, Mehmet Mahmut TANYILDIZI^{2*}, Ekrem Serdar YILDIRAN³

¹ İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

² 2'nci Ordu Komutanlığı, Malatya, Türkiye

³Togi Metal İnş.San.Tic.Ltd.Şti., Malatya, Türkiye

¹tacettin.geckil@inonu.edu.tr, ²mmtanyildizi@hotmail.com, ³serdaryildiran44@gmail.com

(Geliş/Received: 16/05/2020;

Kabul/Accepted: 28/07/2020)

Öz: Bu çalışmada, çelik üretimi esnasında bir yan ürün olarak ortaya çıkan Yüksek Fırın Cürufu (YFC) ile stabilize edilmiş killi bir yol taban zemininin yol esnek üstyapı kalınlığına ve maliyetine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, kil zemine ağırlıkça %5, 10, 15, 20 oranlarında YFC ilave edilerek stabilize karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanmış olan saf ve katkılı numuneler Standart Proktor, serbest basınç ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneylerine tabi tutularak en yüksek dayanımı veren YFC oranı belirlenmiştir. Bu oran dikkate alınarak, AASHTO 1993 yöntemi ile YFC katkılı zemin üzerine inşa edilecek yol esnek üstyapı tabaka kalınlıkları ve maliyetleri hesaplanmıştır. Deneyler neticesinde, YFC katkısı ile kil zeminin dayanımında önemli iyileşmeler olduğu ve en iyi dayanımın %20 YFC içeren karışımlardan elde edildiği tespit edilmiştir. AASHTO 1993 yöntemi ile yapılan hesaplamalar sonucunda, %20 YFC içeren zeminler için belirlenen tabaka kalınlıklarının, saf killi zemine göre oldukça azaldığı görülmüştür. Her iki zemin için belirlenen tabaka kalınlıklarına göre yapılan tasarım hesabında, zemine %20 YFC ilave edilmesinin, saf killi zemine kıyasla yol üstyapı tabaka kalınlığı %26,67 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Esnek üstyapı, killi zemin, yüksek fırın cürufu, AASHTO metodu.

Effects of a Clay Soil Stabilized by Blast Furnace Slag on Road Flexible Pavement Layer Thickness and Cost

Abstract: In this study, the effects of a clay road subgrade stabilized by Blast Furnace Slag (BFS), which appeared as a byproduct during steel production, on road flexible pavement thickness and cost were investigated. For this purpose, stabilized mixture samples were prepared by adding %5, 10, 15, 20 BFS to the clay soil by weight. The pure and additive samples were conducted Standard Proctor, Unconfined Compression and California Bearing Ratio (CBR) experiments and the BFS ratio was determined to provide the highest strength. Taking into account this ratio, the road flexible pavement layer thicknesses and costs to be built on BFS-additive soil were calculated with the AASHTO 1993 method. As a result of the experiments, it was determined that there were significant improvements in the strength of the clay soil with the contribution of BFS and that the best strength was obtained from mixtures containing %20 BFS. As a result of calculations made by AASHTO 1993, it was observed that the layer thickness determined for soils containing %20 BFS decreased considerably compared to pure clay soils. In the design calculation according to the layer thicknesses determined for both soils, it was determined that adding 20% BFS to the soil reduced the layer thickness of the road pavements by 26.67% compared to pure clay soil.

Key words: Flexible pavement, clay soil, blast furnace slag, AASHTO method.

1. Giriş

Günümüzde, karayolu esnek üstyapılarının inşa edileceği bölgelerde, taşıma gücü zayıf taban zeminlerine çeşitli katkı maddeleri ilave edilerek zeminlerin dayanımı iyileştirilmekte ve üstyapının sağlam bir taban zeminin üzerine oturması sağlanmaktadır. Bu amaçla, zayıf taşıma gücüne sahip zeminlerin dayanımlarını arttırmak için fiziksel, kimyasal ve mekanik olmak üzere çeşitli yöntemler kullanılarak zeminlerin dayanımları arttırılmaya çalışılmaktadır [1].

Zemin özelliklerini iyileştirmek maksadıyla çoğunlukla tercih edilen yöntem zemine katkı maddesi ilave edilerek dayanımında iyileşme sağlamaktır. Bu kapsamda kireç, çimento, uçucu kül, YFC vb. gibi katkılar, zeminlerin dayanımlarının iyileştirilmesinde sıklıkla kullanılan katkı maddeleridir. Bu katkı maddelerinin kullanılması ile, zeminlerin hacimsel stabilite, mukavemet, permeabilite (geçirgenlik), sıkışabilirlik, dayanıklılık (durabilite) gibi özelliklerinde iyileşme sağlanabildiği görülmüştür. Ayrıca, bu katkı maddelerinin maliyetlerinin

* Sorumlu yazar: mmtanyildizi@hotmail.com, Yazarların ORCID Numarası: ¹0000-0001-8070-6836, ²0000-0001-5992-2665, ³0000-0002-8678-5544

uygun olması ve kolaylıkla temin edilebilmesi zemin iyileştirilmesinde veya stabilizasyonunda kullanılmasını tercih sebebi haline getirmiştir [2-3-4].

Killi zeminler gibi taşıma gücü zayıf olan zeminler, yol yapım çalışmalarında bulunması istenmeyen kayma mukavemeti düşük, şişme, büzülme, permeabilite ve sıvılaşma potansiyeli yüksek zeminlerdir ve bu tür zeminler genel olarak zayıf zeminler olarak adlandırılırlar. Bu yüzden, bu tip zeminle karşılaşılan yol yapım çalışmalarında katkı maddeleri kullanılarak taşıma gücü yüksek ve şişme potansiyeli göstermeyen (geoteknik özellikleri daha iyi olan) zeminler elde edilmektedir [5].

Günümüzde ilerleyen teknoloji ile birlikte sanayi atıklarının bertarafını sağlamak oldukça önem kazanmıştır. Bu amaçla, zemin iyileştirme ve dolgu malzemesi gibi farklı inşaat mühendisliği uygulamalarında çeşitli atık malzemelerin kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Bu sayede, ülkemizde çevresel kirliliğe neden olan atık malzemelerinin geri dönüşümü sağlanmış olacağı gibi, ekonomik olarak da kazanç elde edilecektir [6].

Bu çalışma kapsamında, atık YFC'nin zayıf taşıma gücüne sahip killi bir yol taban zemininin dayanımı üzerinde etkisi araştırılmış ve araştırma sonucunda elde edilen veriler ışığında bu durum yol esnek üstyapısı maliyeti bakımından değerlendirilmiştir.

Demir-çelik üretimi sırasında bir yan ürün olarak ortaya çıkan YFC, karayolu mühendisliğinde yol kaplaması, alttemel, temel, zemin iyileştirme ve dolgu malzemesi gibi çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. YFC'nin yapısının %95'i silika, kalsiyum, alüminyum, magnezyum ve oksijenden gibi elementlerden oluşmaktadır [6-7-8-9]. Bu özelliklere sahip bir yan ürün olarak elde edilen YFC'nin, zayıf zeminlerin dayanımlarının artırılması amacıyla kullanılması, hem zeminin taşıma gücü, hem atıkların bertaraf edilmesi ve hem de ekonomik kazanç bakımından fayda sağlayacağı düşünülmektedir [9].

Birçok ülkede, YFC kullanılarak yapılan zemin iyileştirme çalışmalarında olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmalarda, YFC'nin yeraltı suyundan etkilenmediği ve arazide kullanımının uygun olduğu ve YFC'nin yol stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak kullanılabileceği görülmüştür [10].

Sivrikaya ve ark. [11], kil zeminlerin dayanımlarının artırılmasında YFC'nin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Araştırmacılar, iki farklı kil zemin içerisine %5, 10, 20, 30 ve 50 oranlarında YFC ilave ederek karışım numunelerinin özelliklerini incelemişlerdir. Her iki saf kil zemin için YFC oranı arttıkça birim hacim ağırlığının da artış gösterdiği tespit edilmiştir. Benzer şekilde, kil zeminlerin plastik limit (PL) değerleri artış gösterirken, likit limit (LL) değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu sonuçlar ışığında, killerin plastisite indekslerinin (PI) de %92-%180 aralığında azaldığı tespit edilmiştir. PI değerlerinin azalması, YFC katkısının killi zeminlerin su hassasiyetini azalttığı sonucunu doğurmuştur.

Bilgen ve ark. [12], killi zeminlerin dayanımlarının iyileştirilmesinde YFC ve kirecin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, YFC için %0 ile %7,5, kireç için ise %0 ile %5 oranlarında karışım numuneleri hazırlanmış ve bu numunelerin özellikleri incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, YFC'nin tek başına plastisite üzerinde bir etkisinin olmadığı, ancak %5 kireç ve %3,33 YFC karışımında plastisitenin 28 den 9'a düştüğü tespit edilmiştir. YFC hem tek başına, hem de kireç ile birlikte kullanıldığında optimum su içeriğinde önemli bir değişikliğe neden olmamıştır. YFC tek başına kullanıldığında serbest basınç dayanımını yaklaşık 2 kat arttırırken, %5 kireç ve %3,33 YFC karışımı birlikte kullanıldığında serbest basınç dayanımı 11 kat artmıştır.

Cokca ve ark. [13] YFC ve YFC-çimento karışımını, şişme özelliği gösteren zeminlerin dayanımı üzerindeki etkileri için araştırmışlardır. Çalışmada, zemin numunelerine %5 ile %25 oranlarında YFC ve YFC-çimento karışımı ilave edilmiştir. Bu katkıların dane boyu dağılımı, kıvam limitleri, şişme hızı ve şişme oranı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneyler sonucunda, katkı miktarı arttıkça zeminlerin plastisite indeksi ve şişme yüzdesi azalırken, özgül ağırlığı artış göstermiştir. Çalışmanın sonucunda, hem çevresel etkiler hem de şişme yüzdesi göz önüne alındığında %15YFC-çimento karışımının en optimum seçenek olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, daha önce gerçekleştirilen çalışmalardan farklı olarak, YFC ile dayanımı artırılan taşıma gücü zayıf killi bir yol taban zemininin, yol esnek üstyapı tabaka kalınlıklarına ve maliyetlerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, dayanımları artırılmış zemin numuneleri üzerinde sıkıştırma, serbest basınç, CBR deneyleri yapılmış ve AASHTO 1993 tasarım yöntemi yardımıyla saf kil ve YFC katkılı zeminde esnek üstyapı tabaka kalınlıkları belirlenerek güncel maliyetleri hesaplanmıştır.

2. Materyal ve Deneysel Çalışmalar

Çalışma kapsamında, yol taban zemini olarak kullanılan kil malzeme Malatya Kiltape bölgesinden temin edilmiştir. Kil malzemesinin mühendislik özellikleri TS 1900-1 standardına göre belirlenmiş ve Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kil zemininin fiziksel özellikleri

Parametre	Birimi	Değeri
Dane birim hacim ağırlığı (γ_s)	g/cm ³	2,680
Maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmax})	g/cm ³	1,450
Optimum su içeriği (w_{opt})	%	27
Likit limit (LL)	%	61
Plastik limit (PL)	%	29
Plastisite indeksi (PI)	-	32
Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi (USCS)	-	CH
AASHTO sınıflandırma sistemi		A-7-6

Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) verilerine göre, AASHTO sınıflandırma sisteminde A5, A6, A7, A-2-6, A-2-7 veya birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre CH, CL, MH, ML, GC, SC sınıfına giren plastisite indeksi 10'dan büyük ($PI \geq 10$) veya Kaliforniya taşıma oranı (Yaş CBR %) < 10 veya CBR şişme yüzdesi % ≥ 3 olan ve en az %25'i 75µm elekten geçen zemin/malzemeler için stabilizasyon-iyileştirme yapılması öngörülmüştür. Çalışma kapsamında temin edilen kil zeminin sınıfı; Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS) verilerine göre yüksek plastisiteli kil (CH), AASHTO sınıflandırma sistemi verilerine göre A-7-6 (en kötü zemin), kil zeminin $PI = 32 \geq 10$ olduğundan dolayı KTŞ'ye uygun olarak taşıma gücü zayıf kil zemin stabilize edilerek dayanımı artırılmıştır [14].

Kil zeminin dayanımının iyileştirilmesi amacıyla kullanılan ve özgül ağırlığı 2,750 g/cm³ olan YFC ise Karabük ili Karçimsa tesisinden temin edilmiş ve kimyasal özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Yüksek fırın cürufunun (YFC) kimyasal özellikleri

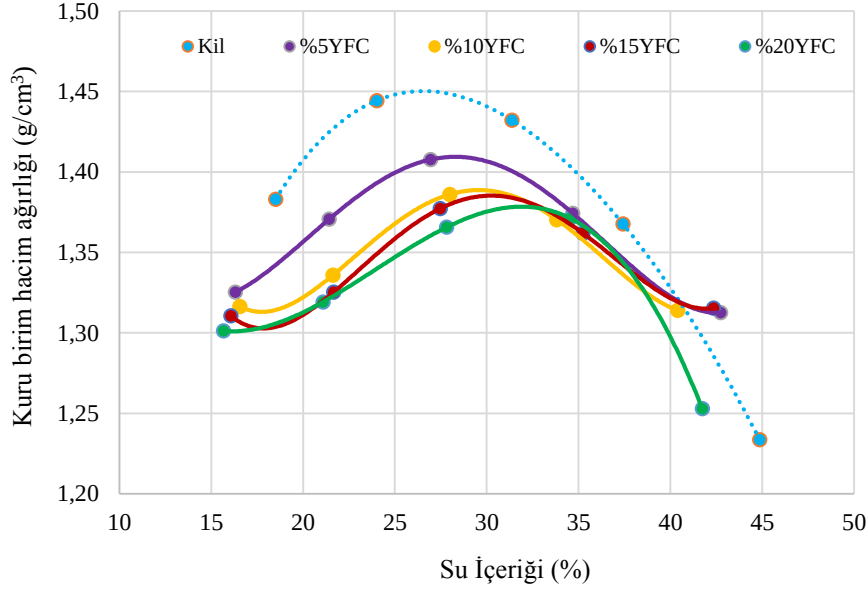
Kimyasal Bileşen	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	S	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	Cl
Ağırlıkça İçerik (%)	32,47	9,94	1,25	32,45	9,31	0,82	0,33	0,31	0,85	1,16	3,51	0,015

Çalışma kapsamında, kil-YFC karışım numuneleri hazırlanmadan önce her iki malzeme 24 saat süresince 105±5 °C'lik etüvde kurutulmuştur. Daha sonra, kil zemin içerisine literatürde yapılmış olan önceki çalışmalar [11-12-13] dikkate alınarak ağırlıkça %5, 10, 15 ve 20 oranlarında YFC ilave edilerek stabilize karışımlar hazırlanmıştır.

Çalışmanın tamamında, saf kil ve stabilize karışımlar sırasıyla Kil, %5 YFC, %10 YFC, %15 YFC ve %20 YFC olarak adlandırılmıştır.

Çalışmada, saf kil ve stabilize karışım numunelerinden üçer adet hazırlanarak, numuneler üzerinde TS 1900-1'e uygun olarak Standart Proktor deneyi gerçekleştirilmiştir. Stabilize numuneler optimum su oranı tayini için deneye tabi tutulurken, YFC'nin karışımdaki puzolanik reaktivitesini arttırmak ve zemin ile arasında iyi bir aderans temin etmek amacıyla [15] su yerine Sodyum Hidroksit (NaOH) solisyonu eklenmiştir.

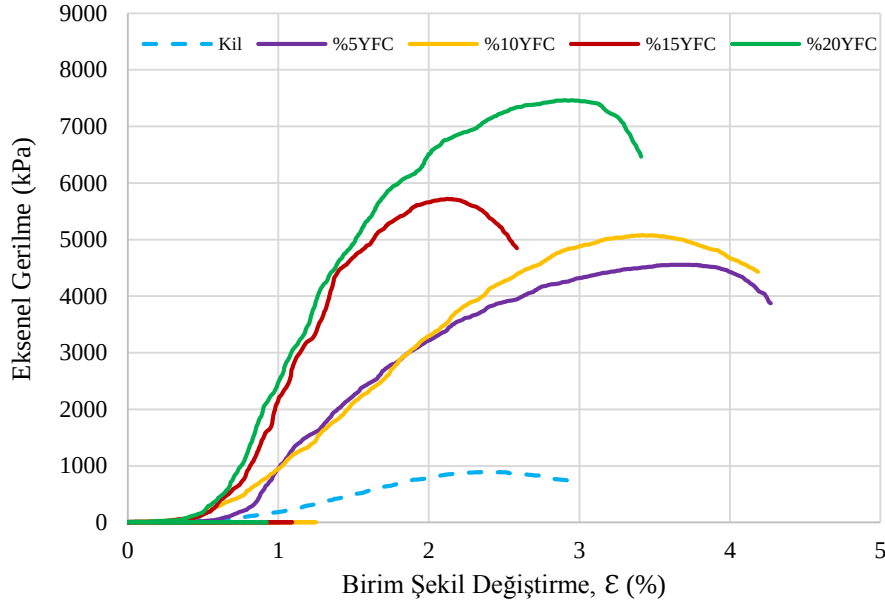
Sıkıştırma çalışmaları sonucunda, numunelerin Standart Proktor deneyleri sonucunda elde edilen Kuru Yoğunluk-Su İçeriği grafikleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Numunelerin kuru yoğunluk (g_k) - su içeriği (%) grafikleri

Şekil 1 dikkate alındığında, YFC miktarındaki artış ile orantılı olarak numunelerin maksimum kuru yoğunluklarında azalma, optimum su muhtevasında ise artış meydana geldiği görülmektedir. Su muhtevasındaki artışın ve kuru yoğunlukta meydana gelen azalmanın, YFC'nin yüksek su emme potansiyelinden ve ince daneli olmasından kaynaklandığı [15] düşünülmektedir.

Serbest basınç deneyi genellikle suya doygun normal konsolide killi zeminlerde kayma direncinin belirlenmesinde kullanılan bir deney olup, deney sonucunda elde edilen Mohr dairesinden zemine ait kayma direnci hesaplanabilmektedir. Deneyde tercihen 38mm çapında ve 76 mm boyunda silindirik kohezyonlu zemin numuneleri kullanılmaktadır. Bu deney, gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü olmak üzere iki şekilde yapılmakla birlikte, yaygın olarak birim boy kısalması kontrollü olanı tercih edilmektedir. Deney, numunenin deney süresince su içeriğinde değişiklikler olabileceğinden dolayı 5-10 dk içerisinde tamamlanmalı ve birim boy kısalması %0,5/dk-%2/dk olmalıdır. Deneye, numunenin taşıdığı yük azalmaya başladığı zaman ya da boy kısalmasının %20'ye ulaşmasından sonra son verilebilir. Bu deneyde eksenel gerilmenin en büyük değeri serbest basınç dayanımını (q_u) verir. Drenajsız kayma mukavemeti ise; $\tau = c_u = q_u/2$ bağıntısı ile elde edilir. Deney çalışmaları kapsamında, Standart Proktor deneyi sonucunda bulunan optimum su içerikleri dikkate alınarak, serbest basınç ve CBR deneylerine tabi tutmak amacıyla karışım numuneleri hazırlanmıştır. Öncelikle, hazırlanmış olan bütün numuneler 28 günlük kür süresine tabi tutulmuş ve bu süre sonunda serbest basınç deneyine maruz bırakılmıştır. Karışım numunelerinin 28 günlük kür süresi sonucunda elde edilen Gerilme-Şekil değiştirme grafikleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Saf ve YFC katkılı numunelerin serbest basınç deneyi sonuçları

Şekil 2’de görüldüğü üzere, hazırlanan karışımlar içerisinde maksimum serbest basınç dayanımının %20YFC katkılı kil numunelere ait olduğu tespit edilmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda %20 YFC katkısı ile stabilize kilin serbest basınç dayanımında önemli miktarda artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun, YFC’nin puzolanik bir malzeme olması ve puzolanik malzemelerin geç mukavemet kazanmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Ancak, YFC kullanılarak yapılan önceki çalışmalar dikkate alındığında maksimum dayanımı veren oranların birbirinden farklılık gösterdiği görülmektedir [11-12-13]. Yapılan incelemeler neticesinde bu farklılığın kullanılan killerin ve YFC’nin yapısal farklılıklarından ve puzolanik reaksiyonu artırmak için kullanılan çözeltilerin cins ve miktarından kaynaklandığı görülmektedir.

Serbest Basınç deneyleri sonucunda, en efektif katkı oranı %20 olarak tespit edildikten sonra, saf ve stabilize karışım numuneleri CBR deneyine tabi tutulmuştur. Bu amaçla, saf kil ve %20 YFC içeren karışım numuneleri hazırlanarak bu numuneler 28 günlük kür süresine tabi tutulmuştur. Çalışmada, her bir deney için ikişer adet numune hazırlanmıştır. CBR deneyine tabi tutulan saf kil ve %20 YFC katkılı karışım numunelerine ait CBR deney sonuçları Tablo 3’te gösterilmiştir.

Tablo 3. Saf kil ve %20 YFC katkılı karışım numunelerinin 28 günlük CBR değerleri

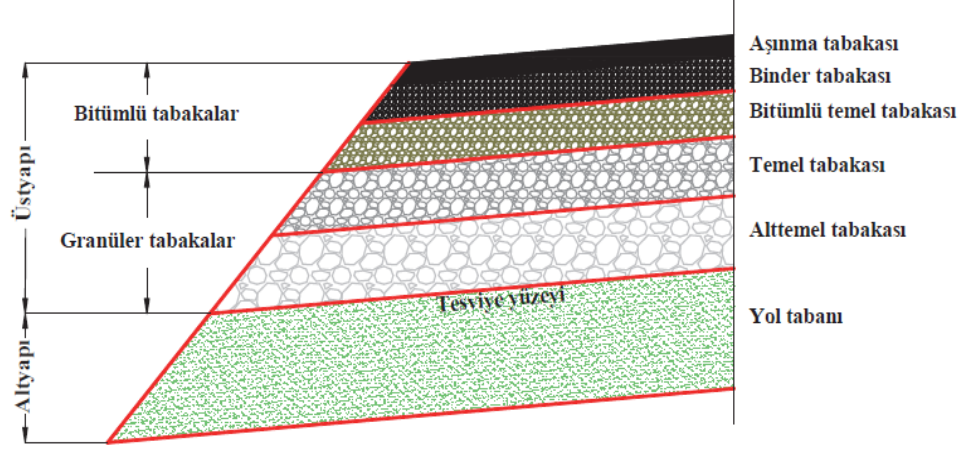
Numune	Kür Süresi	CBR (2,5 mm), (%)	CBR (5 mm), (%)
Saf Kil	28 günlük	32	26,40
Saf Kil+%20 YFC		416,04	315,63

Tablo 3’te görüldüğü üzere deneyler sonucunda; 28 günlük küre tabi tutulmuş saf kilin 2,5 ve 5 mm’lik deplasmanlarına ait düzeltilmiş CBR değerleri sırasıyla %32 ve %26,4; %20YFC katkılı kil zemininin aynı deplasmanlara karşılık gelen düzeltilmiş CBR değerleri sırasıyla %416,04 ve %315,63 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, YFC’nin kil zeminin deformasyonlara karşı direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

3. AASHTO Metodu ile Esnek Üstyapıda Taşıma Gücünün Analitik İncelenmesi

Karayolu üstyapıları, esnek ve rijit üstyapılar olmak üzere genellikle iki şekilde tasarlanmaktadır. Bağlayıcı malzeme olarak asfalt çimentosunun kullanıldığı esnek üstyapılar genel olarak asfalt betonu kaplama, temel ve alt

temel tabakalarından oluşmaktadır. Portland çimentosu kullanılarak inşa edilen kaplama tabakasından oluşan üstyapılar ise rijit üstyapı olarak isimlendirilir ve bu yapılar klasik olarak temel ve beton plak kaplamadan oluşur [16]. Tipik bir esnek üstyapı kesiti aşağıda Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Esnek bir üstyapının kesit görünümü [16].

Karayolu esnek üstyapı tasarımında hedef, projelendirilen yolun tasarım ömrü süresince tekerrür edecek olan trafiği çatlamalara ve deformasyonlara maruz bırakmadan emniyetli bir şekilde taşıyabilecek üstyapı tabaka kalınlıklarının belirlenmesi ve üstyapı tabakalarını oluşturacak malzemelerin özelliklerinin belirlenmesidir. Bu kapsamda, AASHTO 1993 üstyapı tabaka kalınlıklarının hesabında Denklem 1 ile verilmiş olan ampirik denklem kullanılmaktadır. Bu denklem kullanılarak esnek üstyapı tasarımı için Üstyapı Sayısı (SN) değeri hesaplanmaktadır [17].

$$\text{Log}T_{8,2} = Z_R \times S_0 + 9,36 \times \log_{10}(SN+1) - 0,20 + \frac{\log(\Delta PSI/(4,2-1,5))}{0,40 + [1094/(SN+1)^{5,19}]} + 2,32 \times \text{Log}_{10}(M_R) - 8,07 \quad (1)$$

Burada;

- $T_{8,2}$: P_t 'ye erişinceye kadar tekerrür edecek standart dingil (8,2 ton) sayısı
- M_R : Taban zemini esneklik modülü, psi ($6,8950 \times 10^3$ Pa)
- S_0 : Toplam standart sapma
- Z_R : Güvenilirliğin standart normal sapma değeri
- SN : Üstyapı sayısı (inç)
- P_0 : Yolun ilk servis kabiliyeti
- P_t : Yolun son servis kabiliyeti
- ΔPSI : Servis kabiliyetindeki azalma miktarı ($P_0 - P_t$)

SN değeri Denklem 1 ile bulunduktan sonra Tablo 4'de verilen tabaka katsayılarına göre gerekli esnek üstyapı tabaka kalınlıkları Denklem 2 ile hesaplanmaktadır [17].

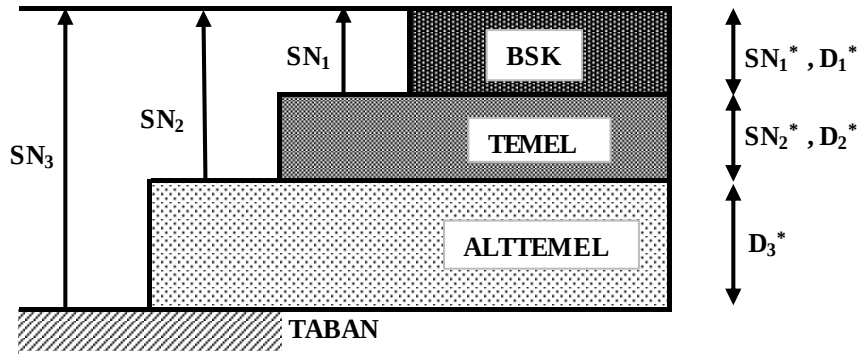
$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times M_2 + a_3 \times D_3 \times M_3 + \dots + a_i \times D_i \quad (2)$$

Bu denklemde; a_1, a_2, a_3 sırası ile kaplama, temel ve alttemel tabakalarının izafi mukavemet katsayıları, D_1, D_2, D_3 kaplama, temel, alttemel tabaka kalınlıkları, M_2, M_3 ise temel ve alttemel tabakası drenaj katsayılarını göstermektedir. Esnek üstyapı tabaka kalınlıklarının hesaplanmasında drenaj katsayıları 1,00 olarak alınmıştır.

Tablo 4. AASHTO tabaka katsayıları [17].

Tabaka Cinsi	Marshall Stabilitesi (kg)	CBR (%)	İzafi Mukavemet Katsayısı (a)
Kaplama Tabakası			
Aşınma	≥ 900	-	0,42
Binder	≥ 750	-	0,40
Bitümlü Temel	≥ 600	-	0,36
Temel Tabakası			
Granüler Temel	-	≥ 100	0,14
Plentmiks Temel	-	≥ 120	0,15
Alttemel Tabakası			
Kum-Çakıl Alttemel	-	≥ 30	0,11
Kırmataş Alttemel	-	≥ 50	0,13

Esnek üstyapı tabaka kalınlıkları belirlendikten sonra Şekil 4’te verilen SN^* değerleri hesaplanarak tabaka kalınlıklarının kontrolü yapılmıştır.

**Şekil 4.** Esnek üstyapıda üstyapı sayıları [14].

SN_1 : Temel tabakası üzerine gereken SN

SN_2 : Alttemel tabakası üzerine gereken SN

SN_3 : Taban üzerine gereken SN

* : Kullanılan malzemeye göre mevcut değerleri göstermektedir.

Çalışmada, YFC’nin esnek üstyapı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla en uygun dayanımı veren karışım oranı ve 28 günlük kür süresi dikkate alınarak AASHTO 1993 yöntemi ile esnek üstyapı tasarımı yapılmıştır.

3.1. AASHTO Metodu ile Esnek Üstyapıda Saf ve %20YFC Katkılı Kil Zeminin Taban Zemini Taşıma Gücünün Analitik İncelenmesi

Esnek üstyapı tasarımı için, %20 YFC katkılı kil zemininin 28 günlük kür süresi sonundaki CBR değerleri esas alınmıştır. Saf ve %20YFC katkılı kil zeminlerin 28 günlük kür sonunda elde edilen CBR değerleri olan %32 ve %416,04 oranları sırasıyla kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bunun için, öncelikle AASHTO yöntemi ile üstyapısı dizayn edilecek yolun taban zemininin esneklik modülü (M_R) değerinin hesaplanması gerekir.

Zemine ait M_R ve CBR değerleri arasında $M_R = 1500 \times CBR$ bağıntısı mevcut olup, zemine ait CBR değerinin bilinmesi durumunda M_R değeri yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir [18].

Buna göre, saf ve %20 YFC katkılı kil zeminler için M_R değerleri sırasıyla, kil zemin için 48.000 psi (330948350,07 Pa) ve %20 YFC katkılı kil zemin için 624.060 psi (4302742236,4 Pa) olarak bulunmuştur. Tablo

5'teki veriler kullanılarak Denklem 1 bağıntı yardımı ile saf ve %20 YFC katkılı kil zeminler için taban üzerine gereken SN_3 (taban üzerine gereken SN) değerleri sırasıyla 5,71 inç (14,50 cm) ve 2,24 inç (5,69 cm) olarak hesaplanmıştır. Esnek kaplamaların hesaplamalarında kullanılan diğer ortak değerler ise Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Esnek üstyapı kaplama hesabında kullanılan parametreler

Parametreler	Seçilen Değerler
Eşdeğer standart dingil yükü tekrerrür sayısı, $T_{8,2}$	30.000.000
Toplam standart sapma, S_0	0,45
Yolun ilk servis kabiliyeti, P_0	4,20
Yolun son servis kabiliyeti, P_t (Otoyollar, devlet yolları için 2,5)	2,50
Servis kabiliyeti indeksi, ΔPSI	1,70
Güvenilirliğin standart normal sapması, Z_R (Devlet yolu $R=85$)	-1,037

3.2. Saf ve %20 YFC Katkılı Zemin İçin Esnek Üstyapı Tabaka Kalınlıklarının Belirlenmesi ve Bu Kalınlıkların Kontrolü

Denklem 1 bağıntısı ile saf killi zemin için SN_3 değerleri 5,71 inç (14,50 cm) ve %20YFC katkılı zemin için 2,24 inç (5,69 cm) olarak hesaplandıktan sonra seçilen esnek üstyapı tabaka kalınlıkları Tablo 6'da, %20 YFC katkılı zemin için seçilen tabaka kalınlıkları Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 6. Saf kil zemin için önerilen tabaka kalınlıkları

Tabaka Adı	Önerilen Kalınlık (D_i), (cm)	İzafi Mukavemet Katsayısı (a_i)
Aşınma	5	0,42
Binder	10	0,40
Bitümlü Temel	12	0,36
Plent-miks Temel	15	0,15
Kırmataş Alttemel	15	0,13

Tablo 7. %20YFC katkılı zemin için önerilen tabaka kalınlıkları

Tabaka Adı	Önerilen Kalınlık (D_i), (cm)	İzafi Mukavemet Katsayısı (a_i)
Aşınma	5	0,42
Binder	8	0,40
Bitümlü Temel	12	0,36
Plent-miks Temel	20	0,15
Kırmataş Alttemel	-	-

Saf ve %20 YFC katkıli kil zemin için belirlenen üstyapı tabaka kalınlıkları toplamı sırasıyla 57 cm ve 45 cm olarak belirlenmiştir. %20 YFC içeren killi zeminler için tabaka kalınlığı saf zemine kıyasla %26,67 oranında azalma gösterdiği tespit edilmiştir.

Seçilen tabaka kalınlıklarının kontrolünün yapılabilmesi maksadıyla, Tablo 5’den plentmix kırmataş temel için CBR = 120 ve kırmataş alt temel için CBR = 50 olarak seçilerek, plentmix kırmataş temel için $M_R = 180.000$ psi ve kum çakıl alt temel için $M_R = 75.000$ psi olarak hesaplanır. M_R değeri hesaplandıktan sonra, bu tabakalar üstünde gerekli SN değerleri Denklem 1 bağıntı yardımı ile plentmix kırmataş temel için $SN_1 = 3,62$ inç (9,19 cm), kırmataş alt temel için $SN_2 = 4,95$ inç (12,57 cm) olarak hesaplanmıştır.

Tablo 8’de saf kil zemin, Tablo 9’da %20 YFC katkıli zemin için hesaplanan esnek üstyapı tabaka kalınlıkları kontrolü verilmiştir.

Tablo 8 ve Tablo 9’da ki hesaplamalarda, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 sırası ile aşınma, binder, bitümlü temel, temel ve alt temel tabakalarının izafi mukavemet katsayıları, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 aşınma, binder, bitümlü temel, temel ve alt temel tabaka kalınlıklarının göstermektedir.

Tablo 8. Saf kil zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıklarının kontrolü

D_1 (cm)	a_1	D_2 (cm)	a_2	D_3 (cm)	a_3	D_4 (cm)	A_4	D_5 (cm)	A_5	$SN^* = a_i \times D_i$	Açıklamalar
5	0,42	10	0,40	12	0,36	-	-	-	-	$SN_1^* = 10,42$	Plentmix kırmataş temel için $SN_1^* > SN_1$ (10,42 > 9,19) Uygun.
$D_4^* = (SN_2 - SN_1^*) / a_4 = (12,57 - 10,42) / 0,15 = 14,33$ cm, Seçilen $D_4 = 15$ cm $SN_2^* = 15 \times 0,15 = 2,25$ $SN_1^* + SN_2^* = 10,42 + 2,25 = 12,67 \geq 12,57$ (SN_2)											
Saf kil zemin için; $D_5^* \geq (SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)) / a_5$ $D_5^* \geq (14,50 - (10,42 + 2,25)) / 0,13$ $D_5^* \geq 14,07$, seçilen $D_5 = 15$ cm $(SN_1^* + SN_2^*) + (15 \times 0,13) = 12,67 + 1,95 = 14,62 \geq 14,50$											

Tablo 9. %20YFC katkıli zemin için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları kontrolü

D_1 (cm)	a_1	D_2 (cm)	a_2	D_3 (cm)	a_3	D_4 (cm)	A_4	D_5 (cm)	A_5	$SN^* = a_i \times D_i$	Açıklamalar
5	0,42	8	0,40	12	0,36	-	-	-	-	$SN_1^* = 9,62$	Plentmix kırmataş temel için $SN_1^* > SN_1$ (9,62 > 9,19) Uygun.
$D_4^* = (SN_2 - SN_1^*) / a_4 = (12,57 - 9,62) / 0,15 = 19,66$ cm, Seçilen $D_4 = 20$ cm $SN_2^* = 20 \times 0,15 = 3,00$ $SN_1^* + SN_2^* = 9,62 + 3,00 = 12,62 \geq 12,57$ (SN_2)											
%20YFC katkıli zemin kil zemin için; $D_5^* \geq (SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)) / a_5$ $D_5^* \geq 0, D_5 = 0$ (alt temel yapılmayacaktır) $(SN_1^* + SN_2^*) + (0 \times 0,13) = 12,62 + 0 = 12,62 \geq 5,69$ (SN_3)											

3.3. Saf ve %20 YFC Katkılı Kil Zeminler İçin Ekonomik Analiz

Çalışmada, YFC ile iyileştirilmiş kil zeminin karayolu esnek üstyapı maliyetleri üzerindeki etkisi, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) verileri esas alınarak değerlendirilmiştir.

KGM tarafından yayınlanmış olan birim fiyat cetvellerinde, alt temel ve temel tabakaları için birim ağırlık (ton) ve birim hacim (m^3) maliyetleri; bitümlü temel, binder ve aşınma tabakaları için birim alan (m^2) maliyetleri yayınlanmıştır. Çalışmada, karayolu üstyapılarının ekonomik analizi için 2019 yılı KGM birim fiyatları poz numarası kullanılmıştır. Bu kapsamda, Tablo 10'da saf killi zemin için analiz kapsamında kullanılacak birim maliyetler verilmiştir [19].

Tablo 10. Saf killi zemin için tabaka cinslerine göre birim maliyetler

Poz Numarası	Tanımı ve Birimi	Birim Fiyatı (TL)	m^2/cm Maliyeti (TL)
KGM/6405/S-M	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu aşınma tabakası yapılması, (m^2)	13,06	2,61
KGM/6320	Asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile) (ton) Not: Kaplama yoğunluğu 2,40 g/cm^3	83,78	2,02
KGM/6212-A	12 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (m^2)	21,93	1,83
KGM/6100/3	Plentmix temel yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile) (ton) Not: Kaplama yoğunluğu 2,40 g/cm^3	40,49	0,97
KGM/6000	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş malzeme ile alt temel yapılması (m^3)	41,68	0,42

Saf killi zemin için tabaka cinslerine göre birim maliyetin hesaplanmasında, kırmataş alt temel tabakası 15 cm, granüler temel tabakası 15 cm, bitümlü temel tabakası 12 cm, binder tabakası (asfalt betonu) 10 cm ve aşınma tabakası (asfalt betonu) 5 cm olarak hesaplanmış Tablo 6'da gösterilmiştir.

Esnek yol kaplamasının maliyet hesabında; her bir tabakanın maliyeti, Tablo 10'da verilen birim fiyatların, tabakanın kendi kalınlığına bölünerek " m^2/cm " cinsinden hesaplanarak elde edilmiş ve bunların toplamı ile üstyapı birim maliyeti belirlenmiştir. Bu hesaplamalara göre, esnek yol üstyapı kalınlığının m^2/cm cinsinden birim maliyeti toplam 7,85 TL olarak elde edilmiştir.

Benzer şekilde, %20 YFC katkıli kil zemin için tabaka cinslerine göre birim maliyetin hesaplanmasında, granüler temel tabakası 20 cm, bitümlü temel tabakası 12 cm, binder tabakası 8 cm ve aşınma tabakası (asfalt betonu) 5 cm olarak hesaplanmış ve Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 11'de %20 YFC katkıli kil zemine ait analiz kapsamında kullanılacak birim maliyetler verilmiştir [19].

Tablo 11. %20 YFC katkılı kil zemin için tabaka cinslerine göre birim maliyetler

Poz Numarası	Tanımı ve Birimi	Birim Fiyatı (TL)	m ² /cm Maliyeti (TL)
KGM/6405/S-M	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu aşınma tabakası yapılması, (m ²)	13,06	2,61
KGM/6320	Asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile) (ton) Not: Kaplama yoğunluğu 2,40 g/cm ³	83,78	2,02
KGM/6212-A	12 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (m ²)	21,93	1,83
KGM/6100/3	Plentmix temel yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile) (ton) Not: Kaplama yoğunluğu 2,40 g/cm ³	40,49	0,97

Bu hesaplamalara göre, %20 YFC katkılı kil zemin için esnek yol üstyapı kalınlığının m²/cm cinsinden birim maliyeti toplam 7,43 TL olarak elde edilmiştir.

Bu hesaplamalara göre, tabaka kalınlıklarının belirlenmesinde %20 YFC katkılı kil zemin, saf killi zemine oranla birim maliyeti yaklaşık %5,65 oranında azaltmaktadır. 1000 m uzunluğunda ve 20 m genişliğindeki bölünmüş bir yolda yol taban zemininin %20YFC ile iyileştirilmesi durumunda 8,400.00 TL tasarruf sağlanmış olacaktır.

4. Sonuçlar ve Tartışma

YFC ilave edilerek dayanımı arttırılan killi bir yol taban zemininin, karayolu esnek üstyapı tabaka kalınlıklarına ve maliyetlerine etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- * Kil zeminin içeriğindeki YFC miktarının artmasına bağlı olarak, karışımların optimum su muhtevalarında artış, maksimum kuru yoğunluk değerlerinde ise azalma görülmüştür. Bu durumun YFC'nin yüksek su emme potansiyeli ve ince taneli yapıya sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- * Serbest basınç deneyi sonuçlarına göre, YFC ilavesi ile saf zeminin serbest basınç dayanım artmış ve en yüksek dayanım %20YFC içeren karışımlardan elde edilmiştir. Bu sonuç, kil zeminin kayma direnci ve kohezyon yeteneği üzerinde YFC'nin iyileştirici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.
- * CBR deney sonuçlarına göre, %20YFC içeren karışımların 2,5 ve 5 mm'lik deplasmanlara karşılık gelen CBR değerleri, saf zeminlere kıyasla sırasıyla 13,0 ve 11,96 kat fazla elde edilmiştir. Bu önemli artışlar, kil zeminin kalıcı deformasyon direnci üzerinde YFC'nin çok olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.
- * Saf ve katkılı zeminler için hesaplanan tabaka kalınlıklarına göre, %20 YFC içeren killi zeminler için tabaka kalınlığı saf zemine kıyasla %26,67 oranında büyük bir azalma göstermiştir.
- * Maliyet hesabı sonuçlarına göre, %20 YFC içeren killi zeminler için üstyapı maliyeti, saf kil zemine kıyasla yaklaşık %5,65 oranında bir azalma göstermiştir.
- * Karayolu üstyapı tabakaları için birim maliyetler dikkate alındığında; 1000 m uzunluğunda ve 20 m genişliğindeki bölünmüş bir yolun taban zemini %20 YFC ile iyileştirildiğinde, saf zemine kıyasla esnek üstyapı maliyetinde 8,400.00 TL tasarruf sağlanmış olacaktır.

Sonuç olarak, killi bir zemine YFC ilave edilmesiyle zeminin dayanımının önemli ölçüde arttığı, esnek yol üstyapı tabaka kalınlıklarının ve yapım maliyetlerinin önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Bu sebeple, zeminlerinin YFC ile iyileştirilmesi durumunda yol üstyapı maliyeti ve YFC'nin çevreye verdiği zararı önlemek bakımından çok faydalı olacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi, FDK-2018-1459 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Tunç A. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları. Türkiye, 2001.
- [2] Çakılcıoğlu İ. Yüksek Plastisiteli Killerin Stabilizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya; 2007.
- [3] Hausman MR. Engineering Principles of Ground Modification. International Edition, 1990; 321-335.
- [4] Kılıç G. Çimento İle Zemin Stabilizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul; 2008.
- [5] Emery JJ, Kim CS, Cotsworth RP. Base Stabilization Using Pelletized Blast Furnace Slag, 1976; 4(1):94-100.
- [6] Öner A, Yıldırım T. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu İçeren ve İçermeyen Betonlarda Kırmataş Kumu İçeriğinin Beton Özelliklerine Etkisi. Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 2005.
- [7] Tokyay M, Erdoğan K. Cürufur ve Cürufu Çimentolar, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara; 2002.
- [8] ACI 233.R-95, Ground Granulated Blast-Furnace Slag As a Cementitious Constituent in Concrete Reported by ACI Committee 233, American Concrete Institute, 2005 Detroit, Michigan.
- [9] Bilgen G, Kavak A, Yıldırım ST, Çapar ÖF. Yüksek Fırın Cürufunun İnşaat Sektöründeki Yeri ve Önemi. 2'nci Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi Bildirileri, 2010. Cilt 1: 506-513, Mersin.
- [10] Bilgen G. Yüksek Fırın Cürufu ile Zemin Stabilizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli; 2007.
- [11] Sivrikaya O, Yavascan S, Cecen E. Effects of Ground Granulated Blast-Furnace Slag on the Index and Compaction Parameters of Clayey Soils. Acta Geotechnica. 2014; 19-27.
- [12] Bilgen G, Kavak A, Çapar ÖF. Düşük Plasisiteli Bir Kilde Katkı Olarak Çelikhane Cürufunun Kullanılması ve Kireç İle Etkileşimi. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 2012; 2(2):30-38.
- [13] Cokca E, Yazici V, Ozaydin V. Stabilization of Expansive Clays Using Granulated Blast Furnace Slag (GBFS) and GBFS-Cement. Geotechnical and Geological Engineering, 2009; 27: 489-499.
- [14] Karayolları Esnek üstyapılar Projelendirme Rehberi, 2013.
- [15] Arulrajah A, Mohammadinia A, Horpibulsuk S, Samingthong W. Influence of Class F Fly Ash and Curing Temperature on Strength Development of Fly Ash Recycled Concrete Aggregate Blends, 2016; Construction and Building Materials, 127:743-750.
- [16] Kök BV. Karayolu Mühendisliği ve Tasarımı. Nobel Yayınevi, Ankara, Türkiye, 2019.
- [17] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. Washington, D.C.:1993.
- [18] Kök BV, Yılmaz M, Geçkil A. Çimento Stabilizasyonlu Zeminin Esnek Üstyapı Maliyetine Etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2012; Cilt 18, Sayı 3, Sayfa 165-172.
- [19] <http://www.birimfiyat.net>, 2019.

Elektromanyetik Silah Matlab/Simulink Modeli

Mehmet Fatih YASUL¹, Hasan GÜLER^{2*}

¹ Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

^{2*} Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

¹ yasulfatih@gmail.com, ^{2*} hasanguler@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 14/11/2019;

Kabul/Accepted: 29/05/2020)

Öz: Roket ve barut teknolojilerinin pahalılığı, mühimmata getirdiği ek yük, ve dünya genelinde de sınırlı bulunması gibi pek çok nedenden dolayı savunma sanayisinde farklı silah ve mühimmat teknolojileri geliştirilmektedir. Her geçen gün kullanım alanı artan elektromanyetik kuvvet, bu çalışmada bir silah mekanizmasına entegre edilerek bir cisme (mermiye) uygulanıp cismin atılması için gerekli olan itici gücü sağlamaktadır. Yüksek güçlü elektromanyetik silah mekanizması, güç kaynağından aldığı potansiyel elektrik enerjisini manyetik alan yardımıyla kinetik enerjiye dönüştürerek mermiye itme kuvveti oluşturarak yüksek hızda atış yapılmasına imkan vermektedir. Günümüzde savunma sanayi teknolojilerinde yerini almaya başlayan elektromanyetik silah için geleceğin önemli silah türlerinden biri olacağı söylenebilir. Elektromanyetik silah da merminin itilmesi ateşlenmeli bir enerji yerine; daha kontrollü, güvenilir ve kesintisiz bir enerji olan manyetik alan enerjisi yardımıyla sağlanmaktadır. Bu çalışmanın amacı elektromanyetik silahın elektriksel devresi yardımıyla davranış modelinin MATLAB Simulink'te mermi hızının, aldığı mesafenin, akımın, kondansatör akımlarının ve sistem bileşenlerinin nasıl davranış sergilediğinin analiz edilmesi ve uygulanabilirliğinin gösterilmesidir.

Anahtar kelimeler: Elektromanyetik kuvvet, elektromanyetik silah, manyetik silah.

Electromagnetic Weapon Matlab/Simulink Model

Abstract: Weapons and ammunition technologies are being developed in many different technological innovations in defense industry due to many reasons such as the cost of rocket and gunpowder technologies, the additional load it brings to ammunition, the depletion of energy resources and the rapid development of technology throughout the world. Because of easy to control, simple and renewable source of electromagnetic force, it is widely used in many different areas. This study is analyzed that a weapon mechanism with magnetic area which created electromagnetic force on an object (bullet) to provide the necessary force for acting of the object and this system was tested with MATLAB Simulink. The high-power electromagnetic weapon mechanism converts the potential electrical energy from the power source into kinetic energy with the help of magnetic field, creating a repulsion force to any object (bullet), allowing high-speed firing. With the development of today's defense industry technologies, faster, easier to control and wide range of weapons has accelerated. In this paper, it is obvious that it is one of the important weapon types of the future for electromagnetic weapons. In the present technology, instead of a type of energy that is difficult to control, the force of the projectile, fire, gunpowder etc. is provided with the help of a clean, uninterrupted energy source that is easy to control, that is, magnetic field energy. The aim of this study is to determine the behavioral model of the electromagnetic weapon by means of MATLAB Simulink and to analyze the behavior of projectile velocity, power supply, system components, current, voltage and force and to extract the applicable high efficiency.

Key words: Electromagnetic force, electromagnetic weapon, magnetic weapon.

1. Giriş

Elektromanyetik silah, bobin silahı ve raylı silah olmak üzere iki farklı türe sahiptir. Bobin silahı daha çok düşük enerjili ve hız gerektirmeyen uygulamalarda, raylı silah ise yüksek enerjili ve hız gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu nedenden dolayı yüksek güçlü bir elektromanyetik silah tasarımı için raylı silah sistemi tercih edilmelidir.

Elektromanyetik silahlar tarih boyunca farklı uygulamalarda kullanılmış olmasına rağmen yeni bir silah türü olarak gösterilmemektedir. İlk elektromanyetik silah 19.yy başlarında da "Paten Elektrikli Savaş Topu" olarak bilinen savaş topudur. Günümüzde dünya genelinde ve ülkemizde bu konu ile ilgili çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Fakat bu çalışmaların sonuçları gizli tutulduğundan dolayı elektromanyetik silah üzerindeki bilgi birikimi oldukça azdır.

* Sorumlu yazar: hasanguler@firat.edu.tr Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-1824-6634, ^{2*} 0000-0002-9917-3619

Bir elektromanyetik silahın çalışma prensibi, yüksek miktarda elektrik enerjisinin Lorentz Yasasına göre kinetik enerjiye dönüştürülmesi esasına dayanır. Bu mekanizmada güç kaynağından alınan elektrik enerjisi plakalara aktarılır. Aktarılan bu elektrik enerjisi elektromanyetik enerjiye çevrilerek mermi armatürüne bir itme kuvveti oluşturur. Armatür namlu boyunca hızlanır ve bununla birlikte armatüre bağlı mermi de hızlanmaya başlar. Mermi ile armatür silah namlusunda birlikte hareket ederken namlu çıkışından sonra zaman içinde ayrılırlar. Ayrılmanın erken ya da daha geç olma durumları mermi ve armatürün ağırlığına ve hızına bağlıdır. Bu tasarım da mermi ile armatürü silah namlusundan ayırmadığından dolayı her ikisi tek bir cisim olarak kabul edilmekte ve elektrik devresinde sadece bir direnç olarak gösterilmektedir [1-2].

Plakalardan akım geçtiğinde belirli bir manyetik alan oluşmaktadır. Bu manyetik alan $\vec{B}$ ile gösterilmektedir. Plakalardan geçen akım i ve merminin enine genişliği $\vec{L}$ ile gösterilirse Lorentz Yasası denklemi sayesinde F kuvvet değeri elde edilebilmektedir. [3].

$$F = i\vec{L} \times \vec{B} \quad (1)$$

Burada plakalardan geçen akım doğru akımdır ve doğru akıma bağlı bir elektrik alan oluşturmaktadır. Fakat bu elektrik alan zamana göre değişmemektedir. Maxwell'in üçüncü yasanına göre, elektrik alan zamana göre değişmediğinden manyetik alan oluşmadığı kabul edilmektedir.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2)$$

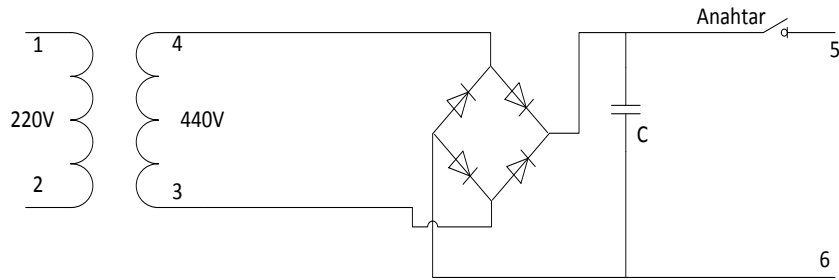
$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

Eşit olarak dağıtılmış 4'lü kondansatör sayılarına kondansatör grubu adı verilir. Bu grupların her bir çıkışına bir bobin bağlanmaktadır. Böylelikle bu yöntem sayesinde zamana göre değişen akım elde edilmektedir. Elde edilen bu akım zamana göre değişen bir elektrik alan meydana getirmektedir. (2) ve (3) nolu Maxwell denklemlerinden görüldüğü üzere manyetik alan oluşturma koşulu sağlanmaktadır [4].

2. Elektromanyetik Silahın Elektriksel Devresi

2.1. Doğrultucu Devresi

Elektromanyetik silah için gerekli doğru gerilimi temin etmek için devre yapısı Şekil 1'de verilmiştir. Alternatif gerilim transformator yardımıyla iki katı oranında yükseltilmektedir. Şekil 1'den de görüldüğü üzere sistemin çıkışında kontrolsüz bir tam dalga doğru gerilim elde edilmektedir. Fakat bu gerilim dalgalı bir doğru gerilimdir. Doğrultucu çıkışına bir filtre kondansatörü konularak gerilimin dalgalanması azaltılmaktadır [5].



Şekil 1. Elektromanyetik Silah Doğrultma Devresi

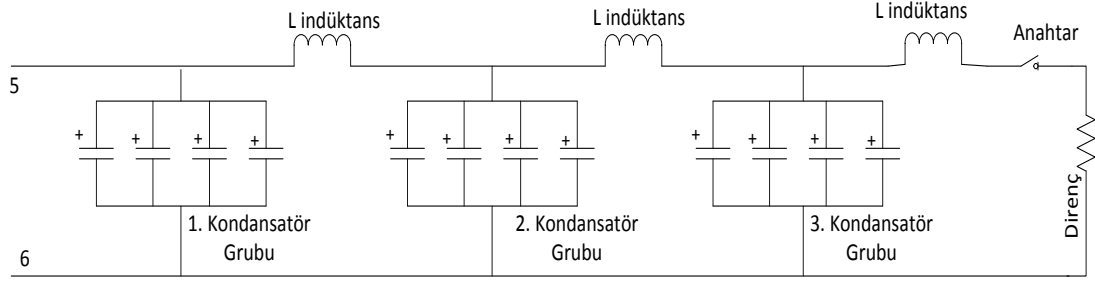
$$C = \frac{I_o \cdot \pi}{\omega \cdot \Delta V} \quad (4)$$

Denklem (4) de bulunan ΔV doğru gerilimdeki dalgalanmayı göstermektedir. Gerilim dalgalanması ΔV için küçük bir değer seçildiği takdirde dalgasız bir doğru gerilim elde edilir. Fakat bu ihtiyaç duyulan kondansatör değerini de belirlediğinden dolayı sistemsel maliyet de aynı oranda artar.

Elektriksel devrede filtre kondansatörünün çıkışında direnç ile birlikte anahtar bulunmaktadır. Anahtar açıldığında doğrultucu devresi açık devre yapılarak devre dışı kalması amaçlanmaktadır. Doğrultma devresinin çıkışında, dalgasız bir doğru gerilim elde edilerek 5 ve 6 numaralı uçlardan kondansatör gruplarına bağlantı sağlamaktadır [6].

2.2. Elektromanyetik Silahın Elektrik Devresi

Elektromanyetik silah elektrik devre bağlantı şeması Şekil 2 verilmektedir. Elektromanyetik silah devresin de toplam 12 adet kondansatör ve 3 adet bobin bulunmaktadır. Devrede bulunan kondansatörler 3 ana gruba ayrılır. Her bir ana grubun çıkışına bir bobin bağlanmaktadır. Plaka girişindeki tüm bobin değerlerinin mermi hareketinden dolayı uzunluğa bölünmesiyle manyetik alan faktörü elde edilir ve L' ile gösterilir. Manyetik alan faktörü aynı zamanda elektromanyetik silahın endüktans gradyanıdır ve H/m ifade edilmektedir [7].



Şekil 2. Elektromanyetik Silahın Elektrik Devre Şeması

3. Elektromanyetik Silahın Denklemleri

Elektromanyetik sistemin matlab Simulink modelini çıkarmak için denklem (1) de gösterilen Lorentz Yasasına ait formülден yararlanılabilir. Fakat bu yasa olduğu gibi kullanılamaz. Çünkü bu denklem vektördür ve ray akımı; uzunluk, kesit ve de merminin pozisyonuna bağlıdır. Bu nedenle metre başına Henry cinsinden hesap yaptığımız L' manyetik alan faktörü bobinini kullanmamız gerekir [8].

$$F = \frac{1}{2} L' i^2 \quad (5)$$

$$F = m \cdot a \quad (6)$$

(5) ve (6) denklemlerinden iki farklı kuvvet formülü bulunur. Bulunan bu denklemleri birbirine eşitlenir ise ivme formülü elde edilir [10].

$$a = \frac{L' i^2}{2m} \quad (7)$$

$$\bar{V} = \frac{2 \cdot E}{\pi} \quad (8)$$

Kondansatör grupların çıkışındaki bobin, kapasitelerin deşarj olma süresini ve mermiye etkiyen darbelerin uzunluğunu etkilemektedir. Kondansatörlerin gerilimlerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Zira kondansatörlerin giriş geriliminden küçük seçilmesi halinde patlama meydana gelir. Bu nedenden dolayı kondansatör gerilimi denklem (8)'de hesaplanacak değerden büyük olması gerekmektedir. Ayrıca kondansatör bünyelerinde belirli bir enerji depolamakta ve bu enerjiyi plakalara aktarmaktadır. Kondansatör kapasitelerinin yüksek seçilmesi bir avantaj olmasının yanında yüksek maliyet gerektirmesi bu çalışma açısından dezavantaj olarak değerlendirilmektedir [11].

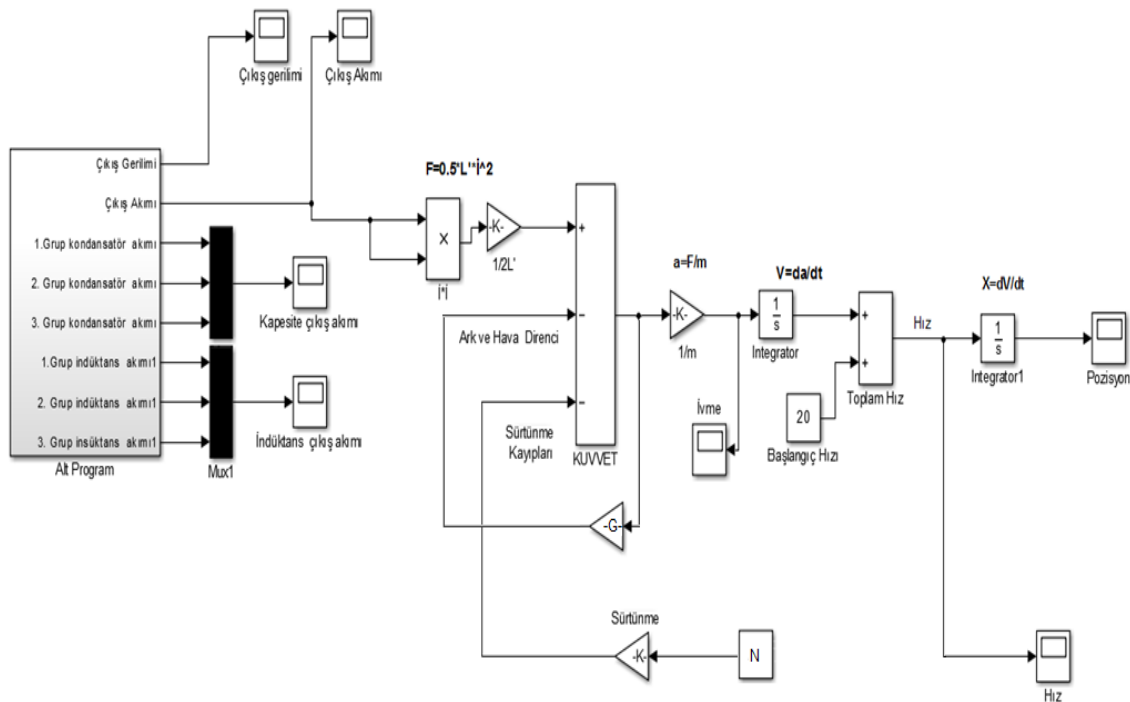
$$E = \frac{1}{2} c \cdot v^2 \quad (9)$$

Denklem (9), devredeki toplam enerji elde edilir. Toplam enerjiden yola çıkarak mermiye etki eden kuvvet bulunur. Sistem de 3 eşit kondansatör grubu vardır ve bu gruptaki kondansatör değerleri de birbirine eşit olduğundan dolayı akımları eşit olmaktadır.

Şekil 2'deki devrede çevre denklemleri direnç üzerindeki akım, devredeki toplam akım olup, bu akım ifadesi kullanılarak plakalardan akam akım hesaplanır. Bu sonuçlar denklem (5)de yerine yazılır ve kuvvet elde edilir. [12].

4. Elektromanyetik Silah Matlab/Simulink Modeli

Elektromanyetik silahın MATLAB Simulink devre modeli Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 4 'teki alt sistem ise çıkış gerilimi ve çıkış akımları elde edilmektedir. Alt sistem de elde edilmiş olan veriler Şekil 3'te kullanılmaktadır. Manyetik alan faktörü ile akımın karesini alarak mermiye etki eden kayıpsız bir kuvvet elde edilir. Hesaplanan kuvveti mermi ve armatür kütlesine bölünmesiyle merminin ivmesi bulunur. İvmenin zamana göre integrali mermi ve armatürün hızını verecektir.



Şekil 3. MATLAB Simulink Devresi

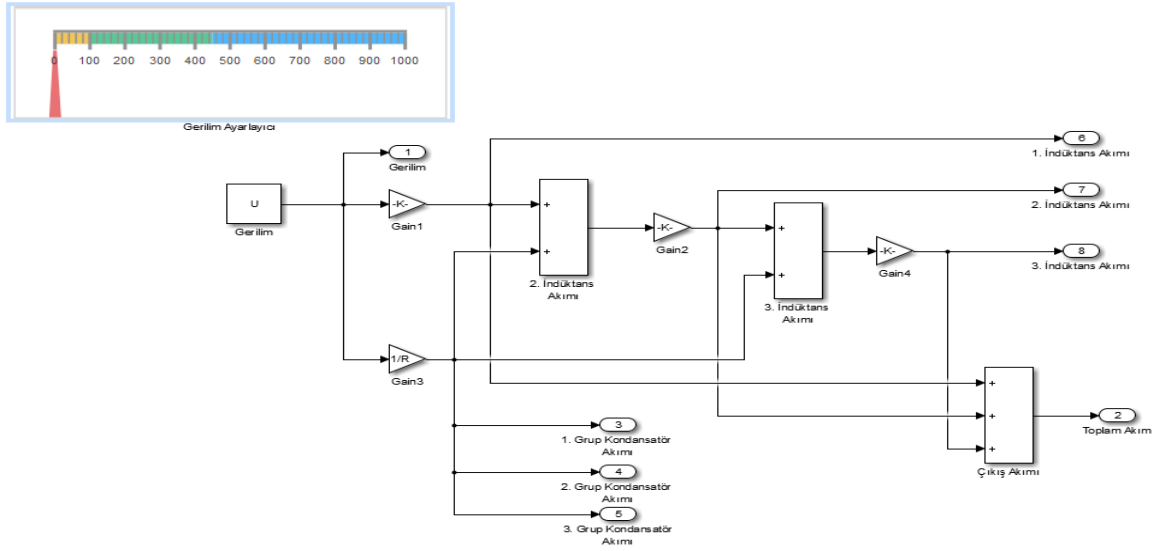
Hesaplanan hızla göre mermi plaka çıkışından büyük bir hız ile çıkar. Fakat elektrik alan manyetik alana dönüşmesi, merminin ani büyük bir akıma maruz kalmasından daha geç olacağından mermi manyetik alana maruz kalamadan iki plaka arasında kaynak olur Bu nedenle mermiye küçük bir enjeksiyon yardımıyla hız kazandırılır. Her iki hız toplanarak merminin toplam hızı elde edilir. Toplam hızın integrali alındığında, mermi ve armatürün zamana göre yer değiştirmesi bulunmaktadır.

Kuvvet, kayıplar sıfır kabul edilirse direkt kütleyle bölerek ivme bulunabilir. Fakat gerçek sistemde sürtünme kayıpları, havanın direnci ve ark kayıpları mevcuttur. Bu sebeple sistemdeki kayıplar kuvveti azaltmaktadır. Sürtünme kuvveti ağırlığın oluşturduğu tepki olan N ve epoksi malzemenin sürtünme katsayısına bağlıdır. Bu nedenden sürtünme kuvveti epoksi malzemenin sürtünme katsayısı ile ağırlığın yüzeye yapmış olduğu tepkinin çarpımı sonucu bulunur.

$$F_s = k \cdot N \quad (11)$$

Denklem (11) de hesaplanan sürtünme kuvveti, kuvvete zıt yönde olduğundan dolayı kuvvetten çıkarılır. Diğer bir kuvvetten çıkarılacak kayıp ise hava direnimi ve ark kayıplarıdır ve bu kayıplar G sembolü ile gösterilir. Literatür araştırmasında bu kayıpların oluşturduğu eksiklik herhangi bir formül yardımıyla gösterilmediğinden dolayı bu kayıplarda %1,%5 ve %10'luk bir eksiklik olduğunu varsayarak gösterilir. Ark kayıplarını ve hava direnimini bulmak için, MATLAB Simulink modelinde görüldüğü gibi kuvvet G katsayısı ile çarpılır. G katsayısının değerleri 0.01, 0.05, ve 0.1'dir.

Şekil 4'te gösterilen Matlab Simulink modeli, ana modelin bir alt tasarımıdır. Bu tasarımda akım, gerilim ve mermi hızının zamana göre davranışlarını incelemek ve bu büyüklüklerin değerlerini hesaplamak amaçlanmıştır. Şekil 2'deki elektriksel devreye bakıldığında 1. grup kondansatörün akımını direnç üzerinden çevre denklemleri atılarak bulunur. Gerilim, empedansa bölünerek elde edilen bobin akımı ile 1.grup kondansatör akımı toplanmaktadır. Bu yöntem ile tüm grup kondansatörlerin akımı ve bobin akımı bulunabilmektedir. Bulunan bu akımlar birbiriyle toplandığı zaman, toplam çıkış akımı elde edilir ve denklem (5) de yerine yazılır.



Şekil 4. Alt Sistem MATLAB Simulink Modeli

Modelde çıkış gerilimi U, gerilim ayarlayıcısı tarafından ayarlanır. Gerilim ayarlanma sırasında 0 ile 100V arası sarı, 100V ile 450V arası yeşil ve 450V ile 1000V arasının kırmızı şeritlerle ayarlanarak kaydedilmiştir. Bu işlemin avantajı ayarlanan gerilimin, kondansatör gerilimini geçmemesi ya da sistemin yüksek verimle çalışmasının kontrol edilebilmesi için yapılmıştır. Gerilim ayarlayıcısı tarafından transformatöre 220V verilmiştir ve transformatör çıkışında 440V elde edilir. Elde edilen gerilim denklem (8) de yerine yazılıp kondansatör dolun gerilimi hesaplanır.

5. Sonuçlar

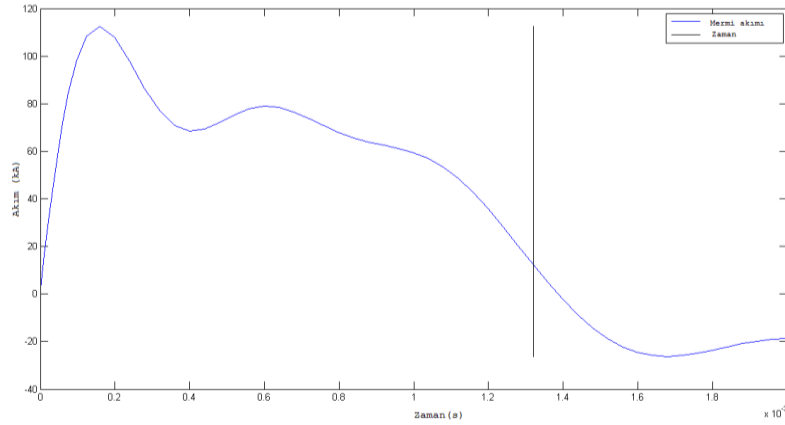
Elektromanyetik silah teknolojisi her geçen gün gelişmekte ve dünya genelinde birçok ülke bu alandaki Ar-Ge yatırımlarını arttırmaktadır. Ülkemizde bu Ar-Ge çalışmaları belirli kurumlarca yapılmaktadır. Fakat bu alandaki çalışmalar, stratejik ve güvenlik gibi birçok nedenden dolayı kamuoyuyla paylaşılmamaktadır. Bu çalışma ile MATLAB Simulink tasarımı gerçekleştirilen elektromanyetik silahın modellenmesi, çalışma mekanizmaları, bulgu ve analizler ile sistemin uygulanabilirliği analiz edilmiştir.

Sistemin modellenmesi sonucu grafiklerdeki bulgular ile Tablo 1'de belirtilen bazı çıkış değerleri için gözlemlenmiştir. Kondansatörler 440V ile dolduğunda 34.84 kJ bir potansiyel enerjiyi kinetik enerjiye çevirmektedir. Bu kinetik enerji mermiye etki ederek mermide bir kuvvet indüklemekte ve bu şekilde mermi hareket etmektedir.

Tablo 1. Giriş ve Çıkış Parametreleri

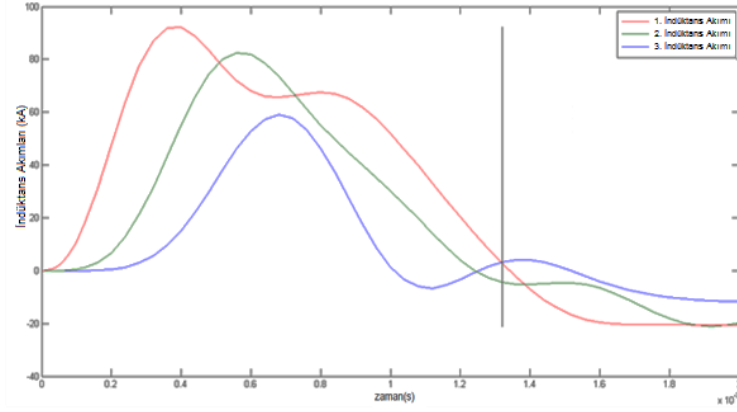
Parametreler	Değerler
Giriş Kapasite Gerilimi	440 V
Kondansatör Kapasite Değeri	30,000 uF
Mermi ve Armatür Ağırlığı	234 gr
Plaka kesiti	100 mm ²
Plaka uzunluğu	1 m
Epoksi malzeme sürtünme katsayısı	0.34
L' Manyetik Alan Faktörü	0.310 uH/m
Plakaların İndüktası	0.30 uH
Plaka Direnci	45,36 mΩ
İndüktans Değerleri	0.93 uH
Mermiye Uygulanan Başlangıç Hızı	~20 m/s
Sistem Frekansı	50~60 kHz
Merminin Namludan Çıkış Hızı	~915.6 m/s

Şekil 5’de elde edilen sonuçlara göre toplam akım 117 kA civarındadır. Bu değer plakaların direnç ve bobin değerlerine göre değişiklik göstermektedir. Kuvvet 2133.7N olarak bulunmuş ve bulunan bu kuvvet kayıpsızdır. Sürtünme kaybı 78.2N civarında bir değer olarak hesaplanmıştır. Hava direnimi ve ark kayıpları sırasıyla 21.33N, 106.65N ve 213.3N olarak kabul edilmiştir.

**Şekil 5.** Mermi Akımının Zamana Göre Değişimi

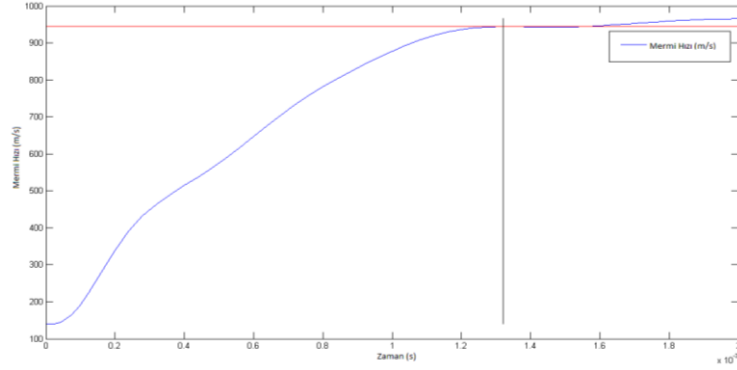
Kayıplar kuvvetten çıkarıldığı takdir de elde edilen bu kuvvet mermi ve armatüre etki eden net kuvvettir. Denklemlerde görüldüğü gibi akımın karesi ile kuvvet birbiriyle doğru orantılı olduğundan, akımın daha büyük olması halinde mermiye etkiyen kuvvetin daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Akımı arttırmak için plakalardaki direnç değerini olabildiğince küçük seçilmesi gerekmektedir.

Şekil 6’da bobin akım boşalmaları kapasite gruplarının deşarjı olarak kabul edilebilir. Bu deşarj durumu plakalardaki bobin değerlerine bağlantılı olduğundan plakalardaki bobin değerini yeterince küçük seçilmesi gerektiği gözlemlenmiştir. Ayrıca toplam akım değerleri 1.35 ms civarında sıfıra yaklaştığı görülmektedir. Yani seçilen namlu uzunluğunun ideal olduğu söylenebilir. Namlu uzunluğunun fazla olması halinde kondansatörler 1.35 msn sonra deşarj olacağından mermi halen namluda kalacak ve gereksiz bir sürtünme ile kayıplar daha da artacaktır. Namlunun gerektiğinden kısa olması halinde ise kondansatörler tam deşarj olmadan mermi namludan çıkışı gerçekleştirecek ve kondansatörlerdeki potansiyel enerjinin hepsi kinetik enerjiye dönüşmemiş olacaktır. Bu da elektromanyetik silahın verimsiz kullanılmasına neden olacaktır.



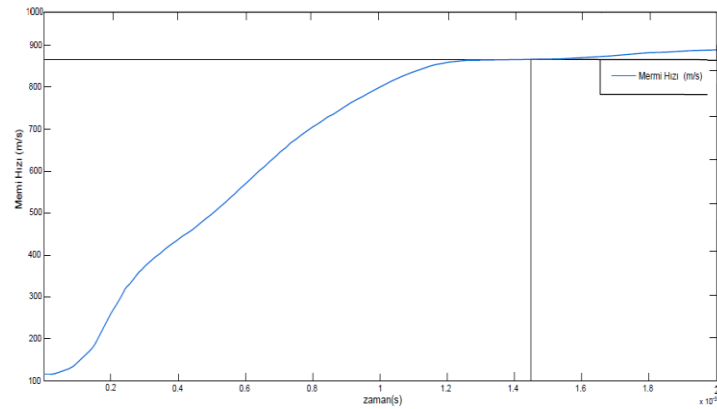
Şekil 6. Bobin Akımlarının Zamana Göre Değişimi

Şekil 7’te görüldüğü gibi mermi hızı 927,225 m/s olarak hesaplanmıştır. Bu hız namludan çıkma hızı olup merminin maksimum hıza ulaştığı görülmektedir. Burada ark ve hava direnimsizlik kayıpları %1 olarak alınmıştır.



Şekil 7. Mermi Hızının Zamana Göre Değişimi (%1)

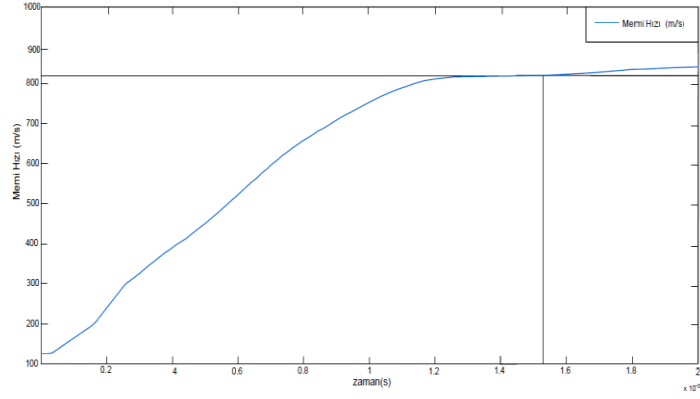
Şekil 8’de ark ve hava direnimsizlik kayıplarının %5 olduğu durumdaki mermi hızı görülmektedir. Kayıplar %5 alındığında mermi hızı 865.8m/s olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 8. Mermi Hızının Zamana Göre Değişimi (%5)

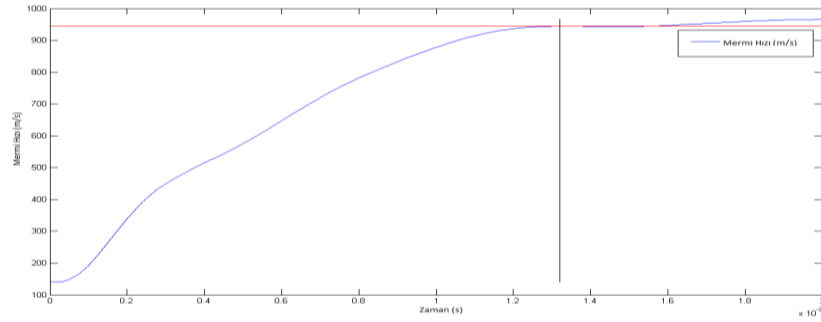
Şekil 9’da ise ark ve hava kayıplarının %10 olduğu durum için mermi hızı görülmektedir. Bu durumdaki mermi hızı 818.4m/s olarak gözlemlenir. Sonuç olarak ark ve hava direnimsizlik kayıpları artınca mermi hızının

azaldığı görülmüştür. Fakat bunların yanında kondansatörlerin ürettiği akım değerinde bir değişiklik gözlemlenmemiştir.



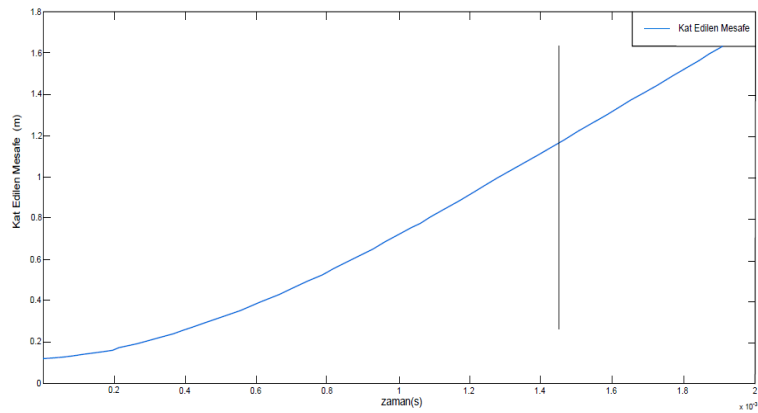
Şekil 9. Mermi Hızının Zamana Göre Değişimi (%10)

Şekil 10'da merminin zamana göre değişimi verilmiştir. Merminin 1.35 msn sonra silahın namlusundan çıktığı gözlemlenmiştir. Gözlemlenen bu değer ark ve hava kayıplarının %1 olduğu durum içindir.

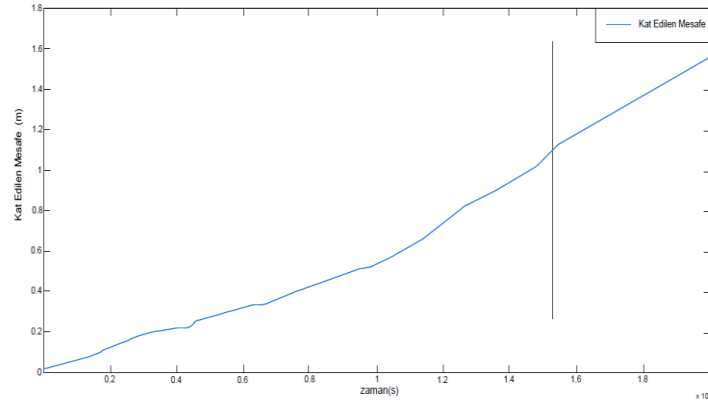


Şekil 10. Merminin Zamana Göre Kat Ettiği Mesafe (%1)

Şekil 11 ve Şekil 12 de gözlemlenen merminin zamana göre aldığı mesafe de merminin namlu içindeki süreleri değişmiştir. Kayıpların %10 olduğu durum için merminin namludan çıkış süresi 1.52 msn olarak görülmektedir. Kayıplar arttıkça merminin namludan çıkış süresinin arttığı görülmektedir.



Şekil 11. Merminin Zamana Göre Kat Ettiği Mesafe (%5)



Şekil 12. Merminin Zamana Göre Kat Ettiği Mesafe (%10)

Elektromanyetik silahın MATLAB Simulink modelinin oluşturulup sistemi etkileyen parametrelerin değiştirilmesi durumunda sistemin nasıl tepki verdiği incelenmeye çalışılmıştır. Bu çalışma ile manyetik alan etkilerinin metaller üzerindeki etkisi gözlemlenmiş, elektromanyetik silah davranışlarını grafiksel hale getirilerek uygulanabilirlik analizi yapılmıştır. Ayrıca elektromanyetik silahın kayıpları artınca akım, hız ve yer değiştirmenin nasıl değiştiği gözlemlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Tübitak 2209-B programı çerçevesinde desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Mcnab IR. Launch to space with an electromagnetic railgun, Inst. for Adv. Technol., Univ. of Texas, Austin, TX, USA, 2003.
- [2] Ma TTH, Tran TK, Yahoui H, Siauve N and Vu HG. Design of Forward-flyback converter based drive with gate voltage limitation for a DC circuit breaker using normally-on SiC JFET, IEEE-2017 Second Conference on DC Microgrids (ICDCM).
- [3] Greca IM and Moreira MA. Mental, Physical and Mathematical Models in the Teaching and Learning of Physics. Inc. Science Education, 2001, 65,112.
- [4] Nied HA. The Finite-Element Modeling of the Resistance Spot-Welding Process. Weld J, 1974, pp 123-132.
- [5] Tarimer I, Arslan S, Guven EM and Karabas MA. Case Study of a New Spot Welding Electrode Which Has the Best Current Density by Magnetic Analysis Solutions. J Electr Eng-Slovak, 2011, 62(4): 233-238.
- [6] Çakır H ve Kaya A. Tam fizik. İstanbul: Kaya Yayınları, 1992.
- [7] Gilbert S. An evaluation of the Use of Analogy. Simile and Metaphor in Science Texts. J of Res in Scien Teach, 1979, 68,78.
- [8] Eggen P, and Kauchek D. Educational psychology: Windows on classroom (6th ed). Upper Saddle River: Pearson Prentice, 2004, 23,24.
- [9] Fraenkel JRT and Wallen NE. How to design and evaluate research in education (3rd ed). New York: McGraw-Hill. 1996.
- [10] Akyazı Ö ve Akpınar AS. Elektromanyetik Fırlatıcılar, Fen ve Mühendislik Bilgisi Dergisi, Fırat Üniversitesi, 2008, 74-125.
- [11] Knoepfel H. Magnetic Fields: A Comprehensive Theoretical Treatise for Practical Use, Wiley, 2000, 22,67
- [12] Islak BY, Açıkbaş G, Açıkbaş NC. Epoksi Matrisli Kompozitlerde Katı Yağlayıcı İlavesinin Sürtünme Kaybının Azaltılmasına Etkisinin İncelenmesi, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2019, Cilt 8, Sayı 1, 583-5.

Veri Seti - Sınıflandırma İlişkisinde Performansa Etki Eden Faktörlerin Değerlendirilmesi

Abdullah ALAN^{1*}, Murat KARABATAK²

¹ Yazılım Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Yazılım Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ alanabdullah2001@hotmail.com, ² mkarabatak@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 15/05/2020;

Kabul/Accepted: 11/08/2020)

Öz: Veri madenciliği yöntemlerinden biri olan sınıflandırma, en çok kullanılan veri madenciliği yöntemidir. Bir veri veya veri grubunun mevcut sınıflardan hangisine ait olduğunun belirlenmesi olarak tanımlanmaktadır. Sınıflandırma çalışmalarında en önemli kriter yüksek başarımlı bir sınıflandırıcı model oluşturabilmektir. Ancak başarımlı etkileyen birçok neden bulunmaktadır. Kullanılan test yöntemlerinin yanı sıra veri setine ait özellikler de başarımlı etkileyen unsurlardan biridir. Bu makalede, hem test tekniklerinin hem de veri setinin özelliklerinin başarıma etkisi detaylı olarak incelenmektedir. Bu amaçla, literatürde yaygın olarak kullanılan 32 farklı veri seti kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmada 9 farklı sınıflandırma algoritması da kullanılarak bu algoritmaların veri setleri üzerindeki başarımları da kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar, algoritmaların etkinliğinin yanı sıra test yöntemlerinin başarıma etkilerini de ortaya çıkarmıştır. Veri setine ait parametrelerin sınıflandırma başarımlarına etkileri makalede detaylı olarak ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Sınıflandırma, veri seti, başarımlı, test teknikleri.

Evaluation of the Factors Affecting Performance on the Data Set - Classification Relationship

Abstract: Classification, which is one of the data mining methods, is the most used data mining method. It is defined as determining the class of the data or data group. The most important criterion in classification studies is to obtain classifier model has high accuracy performance. However, there are many reasons that affect the classifier accuracy. In addition to the test methods, the properties of the data set are also one of the factors affecting the performance. In this paper, the effects of both test techniques and data set on accuracy are examined in detail. For this purpose, experiments were carried out using 32 different data sets, which are widely used in the literature. In addition, the performance of these algorithms on datasets was compared by using 9 different classification algorithms. The results obtained revealed the effectiveness of algorithms as well as the effects of test methods on success. The effects of the parameters of the data set on the classification performance are presented in detail in the paper.

Key words: Classification, Dataset, accuracy, test techniques.

1. Giriş

Son yıllarda farklı kaynaklar aracılığıyla oldukça büyük miktarlarda veri toplanmaktadır. Bu veriler günümüzde günlük yaklaşık olarak 2,5 exabyte boyutuna ulaşmaktadır. Elde edilen veriler 2,5 milyon adet 1 terabyte kapasiteli diske depolanabilecek kapasiteye karşılık gelmektedir. Toplanmakta olan bu veriler farklı çalışma alanlarında kullanılmaktadır. Bunlar; pazarlama stratejileri oluşturmak, halkla ilişkiler çalışmaları, bankacılık sektörü, güvenlik ve bilim insanlarının yaptıkları çalışmalarda kullanılmaktadır [1].

Günümüzde insanlar istem dışı olarak makine öğrenmesi çalışmalarına destek vermektedir. Günlük çekilen fotoğraf ve videolar, sosyal medya üzerinden yapılan yorumlar, video izleme platformlarından izlenen videolar, hastanelerde yapılan testler, çevrim içi alışveriş sitelerinden yapılan işlemler gibi çalışmalar daha sonra makine öğrenmesi modellerinde kullanılmak üzere veri tabanları oluşturmaktadır. Sürekli üretilmekte olan bu veriler çoğu zaman istatistiksel veri olarak kalmakta farklı bir amaç için kullanılmaktadır[2]. Veri bilimi o kadar önemli bir hale gelmiş bulunmaktadır ki NASA uzaya göndermek için yetiştirdiği astronotların yanı sıra veri bilimi üzerinde çalışmalar yapmak için R veya Python programlama dillerine hakim veri bilimcilerde yetiştirmektedir[3].

Makine öğrenmesi, matematiksel ve istatistiksel yöntemler kullanılarak öğrenme gerçekleştirebilen ve mevcut verilerle çıkarımlarda bulunan, bu çıkarımlar sayesinde bilinmeyen hakkında tahminlerde bulunan yöntemlerdir. Makine öğrenmesi yöntemleri ne kadar çok veri ile eğitilirse oluşturulan modelin tahmin etme olasılığı artmaktadır. Makinelerin yaptıkları çıkarımlara en güzel örneklerden biri olarak Google'ın geliştirdiği

* Sorumlu yazar: alanabdullah2001@hotmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-1585-1698, ² 0000-0002-6719-7421

DeepMind'in Go şampiyonunu yenmesi gösterilebilir [4]. Aslında DeepMind'in yaptığı işlem insanların geçmişte yaptıkları hamleleri deneyimleyerek çıkarımlarda bulunmaktadır.

Makine öğrenmesi modeli oluşturulurken öğrenmenin ne oranda gerçekleştiği yani modelin ne kadar doğru tahminlerde bulunduğu büyük öneme sahiptir. Örneğin; kredi kartı sahtekârlığını tespit etmek için oluşturulan bir modelde, modelin yapılan sahte işlemleri doğru tahmin etmesi beklenmektedir. Makine öğrenmesi modelinin oluşturulduğu yöntem, verinin fazlalığı ve verinin dağılımı gibi etkenler ile doğru sonuç üretmeye çalışmaktadır. Burada karşılaşılan en büyük problemlerden biri karar sınıfına ait veri dağılımının dengeli olmamasıdır. Model oluşturulurken karar sınıfına ait azınlık veri gurubu eğitim veri seti içerisinde düşük miktarda ya da hiç yer almayacaktır. Bu da çoğu zaman modelin performansını ölçerken yanılgıya düşülmesine sebep olmaktadır.

Makine öğrenmesi ile ilgili literatür taraması yapıldığında konu ile ilgili yapılan çalışmaların sayısında son zamanlarda bariz bir artış tespit edilmiştir. Aydın [5], çalışmasında yapay zekâ ve öğrenmesi teknikleri kullanarak bir tıp bilişimi uygulaması geliştirmeyi amaçlamış ve tek bir makine öğrenmesi modeli kullanarak tek bir metrik ile sonucu değerlendirmiştir. Hacıfendioğlu [6], glokom hastalığının göz sinirleri zarar görmeyen önce teşhis edilebilmesi ve dünya çapında körlük nedenleri arasında ilk sırada bulunan bu hastalığın tahmin edilmesini amaçlamıştır. Çalışmasında üç farklı makine öğrenmesi modeli kullanmış ve destek vektör makineleri ile oluşturulan modelin en iyi performansı elde ettiği sonucuna ulaşmıştır. Kartal [7], çalışmasında kalp ameliyatı sırasında ya da kalp ameliyatı geçirdikten kısa bir süre sonra hastaya ait hayati riskin makine öğrenmesi yöntemleriyle belirlenmesini amaçlamıştır. Çalışmasında dört farklı makine öğrenmesi modeli kullanmış ve farklı metrikler kullanarak karar ağacı modelinin bu veri seti için en iyi model olduğunu tespit etmiştir. Şeker[8], çalışmasında iyi-kötü koku verilerine yönelik Elektro Ensefolo Grafi (EEG) işaretlerinin analizi ve sınıflandırmasını amaçlamıştır. Çalışmasında dört farklı makine öğrenmesi modeli kullanmış ve rastgele orman modelinin en iyi sonucunu sadece doğruluk metriğini kullanarak tespit etmiştir. Turgut[9], mikro dizi verileri kullanarak makine öğrenmesi yöntemleri ile sınıflandırma yapmıştır. Çalışmasında sekiz farklı makine öğrenmesi modeli kullanmıştır ve çalışmasının sonucunu değerlendirirken sadece doğruluk metriğinden faydalanmıştır. Pekel[10], çalışmasında sınıflandırma problemi üzerinde durmuş, dört makine öğrenmesi modeli kullanmış ve Naive bayes modelinin en iyi sonucu verdiğini doğruluk metriği kullanarak tespit etmiştir. Yukarıda bahsedilen makine öğrenmesi yöntemleri ile oluşturulan çalışmalara bakıldığında sadece tek veri seti ile inceleme yapıldığı ve başarımları kriteri olarak da genellikle doğruluk metriği kullanıldığı gözlemlenmiştir. Makine öğrenmesi yöntemlerinden sınıflandırma ile oluşturulan modellerin performanslarını ölçerken farklı metriklerin kullanımı ve farklı veri dağılımı olduğu durumlarda nasıl değiştiği hakkında yeterince çalışmaya rastlanmamıştır. Yapılan sınıflandırma çalışmalarında ise genelde sonuçlar sayısal olarak verilmekte, sonuçlar hakkında değerlendirme yeterince yapılmadığından dolayı sonuçların anlamı yetersiz kalmaktadır.

Bu araştırmada, diğer çalışmalardan farklı olarak farklı dağılımlara sahip 32 farklı veri seti incelenerek dokuz farklı sınıflandırma algoritması uygulanmıştır. Bu sınıflandırma algoritmaları k-en yakın komşu, karar ağaçları, rasgele orman, Naive bayes, lojistik regresyon sınıflandırma, destek vektör makineleri, gradyan artırma, adaboost ve yapay sinir ağlarıdır. Daha sonra ise karışıklık matrisinden faydalanılarak doğruluk, F_1 ölçütü, Matthews korelasyon katsayısı (MCC-Matthes Corelation Coefficients) ve alıcı işlem karakteristikleri altında kalan alan (AUC-Area under the ROC Curve) metrikleri kullanılmıştır. Ayrıca bu metriklerin ne ifade ettiği, temel düzeyde ifade edilmiştir. Böylelikle model seçimi yapılırken en iyi modelin seçimi için bir yol haritası oluşturulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak sınıflandırma çalışması yapılmıştır. Makine öğrenmesi uygulamalarında oluşturulan modelin doğruluğunun test edilmesi büyük önem arz etmektedir. Modelin performansını sadece doğruluk metriği ile ölçmek çoğu zaman yanılgıya yol açabilmektedir. Bundan dolayı oluşturulan modelin performansının değerlendirilmesinde sadece doğruluk metriği değil buna ek olarak kullanılacak metriklere ihtiyaç duyulmaktadır. Makine öğrenmesi yöntemlerinden olan sınıflandırmada bu değerlendirme için karışıklık matrisi olarak isimlendirilen bir tablodan faydalanılmaktadır. Verilen bilgiler ışığında bu çalışmada kullanılan yöntemlere ait bilgiler verilmiştir.

2.1. Çalışmada Kullanılan Veriler

Bu çalışmada, Kaggle[11] olarak bilinen açık kaynak veri seti sağlayıcısından elde edilen 32 farklı veri seti kullanılmıştır. Kullanılan veri setlerine ait nitelik sayısı, her bir veri setindeki örnek sayısı, veri setinde kaç sınıf olduğu ve sınıfların dağılımına ait denge düzeyi bilgileri Tablo 1'de verilmektedir. Burada yer alan denge düzeyi sütunu, veri setindeki sınıflarının dağılımının dengeli olup olmadığı hakkında bilgi vermektedir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan veri setleri.

No	Veri seti	Özellik Sayısı	Örnek Sayısı	Sınıf Sayısı	Denge Düzeyi(ρ)
1	Avustralya'da Yangın (AY)	24	142.193	2	3,4
2	Wisconsin Meme Kanseri (WMK)	31	569	2	1,7
3	Tic-Tac-Toe Oyunu (TTTO)	10	958	2	1,8
4	Sloan gökyüzü araştırması (SGA)	18	10.000	3	5,8
5	Pulsar yıldızı tahmini (PYT)	9	17.898	2	9,9
6	Ortopedik Hastaların Biyomekanik Özellikleri (OHBÖ)	7	310	2	2,1
7	Ortopedik Hastaların Biyomekanik Özellikleri (OHBÖ)	7	310	3	2,5
8	Kalp Hastalığı (KH)	14	303	2	1,1
9	Yapısal protein dizileri (YPD)	6	111.338	3	1,3
10	Farelerin protein ekspresyonu (FPE)	82	1080	8	2,0
11	Seyahat sigortası (SS)	11	63.326	2	63,9
12	Kas aktivitesini okuyarak jestlerin sınıflandırılması (KAOJS)	64	11.678	4	1,0
13	Parkinson hastalığı sınıflandırma (PHS)	755	756	2	2,9
14	Portekiz bankası pazarlama (PBP)	18	40.841	2	7,8
15	Genetik çeşitlilik sınıflandırma (GÇS)	46	65.188	2	2,9
16	Mobil cihaz fiyat sınıflandırması (MCFS)	21	2.000	4	1,0
17	Türkiye siyasi görüşleri (TSG)	16	885	6	13,1
18	Banka pazarlama (BP)	17	11.162	2	1,1
19	İris çiçeği (İÇ)	6	150	3	1,0
20	Şarap kalitesi (ŞK)	13	6.497	7	545,6
21	Hepatoselüler Karsinom (HCC)	50	165	2	1,6
22	Bireysel kredi sınıflandırma problemi (BKSP)	14	5.000	2	10,9
23	Sahte şirketleri denetlemek için denetim riski (SSDİDR)	25	776	2	1,5
24	İnternette alışverişte kullanıcı tercihleri (İAKT)	18	12.330	2	5,6
25	Şarap için müşteri segmentasyonu (ŞİMS)	14	178	3	1,4
26	Ph tanıma (PT)	4	653	15	1,1
27	Gelir sınıflandırması (GS)	15	32.561	2	3,1
28	Kriyoterapi analiz (KA)	7	90	2	1,1
29	Kredi kartı sahtekarlığı tespiti (KKST)	31	284.807	2	554,5
30	Deniz kulağı (DK)	9	4.177	3	1,0
31	Sesle cinsiyet tanıma (SCT)	21	3.168	2	1,0
32	Pima Kızıldilileri diyabet (PKD)	9	768	2	1,8

Tablo 1’de yer alan denge düzeyi bilgisi, karar sınıfındaki çoğunluk sınıfa ait veri sayısının, azınlık sınıfa ait veri sayısına bölünmesi ile elde edilmekte olup bu hesaplama Denklem 1’de gösterilmektedir. Veri setinin denge durumunun tespiti için kullanılmakta olan bu denklemden elde edilen değer, 1’in üzerinde olduğu durumlarda veri setinin dengesiz olduğunu ifade etmektedir. Bu denklemde yer alan C_i ifadesi, veri setinde yer alan karar sınıfını temsil etmektedir. $\text{Max}_i\{|C_i|\}$ ve $\text{Min}_i\{|C_i|\}$ ifadeleri karar sınıfının yer alan örneklerden en fazla ve en az etiketi içeren sınıfları temsil etmektedir [12].

$$\text{Denge düzeyi } \rho = \frac{\text{Max}_i\{|C_i|\}}{\text{Min}_i\{|C_i|\}} \quad (1)$$

2.2. Sınıflandırma

Denetimli öğrenme yöntemi olan sınıflandırma, makine öğrenmesinde en sık kullanılan yöntemlerden birisidir. Verinin sınıflandırılması işlemi, daha önce sınıf etiketleri belli olan veri setini eğitim ve test olmak üzere iki parçaya bölme işlemi ile başlamaktadır. Burada ki eğitim verisi ile oluşturulacak model tasarlanmakta ve test verisi ile de oluşturulan model test edilmektedir. Oluşturulan model yardımı ile yeni bir örnek ile karşılaşıldığında örneğin hangi sınıfa ait etiketle etiketleneceği belirlenmektedir. Sınıflandırmanın amacı, benzer özelliklerdeki verilerin önceden etiketlenmiş veri gruplarından hangisine ait olduğunu tahmin edilmesidir [13]. Literatürde sınıflandırma işlemi için çok fazla algoritma bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; k-en yakın komşu,

karar ağaçları, naive bayes, destek vektör makineleri, gradyan artırma, yapay sinir ağları, adaBoost, lojistik regresyon sınıflandırıcı ve rasgele orman'dır.

2.2.1. k-en yakın komşu

K-en yakın komşu algoritması mesafeye dayalı algoritmalarından birisidir. Temel çalışma mantığı, verilerin birbirleriyle olan uzaklıkları ve benzerliklerini kullanarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirmektedir. Bu teknikte veri bir örüntü uzayında saklanmaktadır. Karar sınıfı bilinmeyen bir veri geldiğinde verinin hangi sınıfa ait olduğunun belirlenmesi için sınıfı bilinmeyen veriye en yakın k adet veri belirlenir. Daha sonra ise, veri kendisine yakın olan bu k adet veriden hangisine daha çok benziyorsa onun sınıfında etiketlenir[14].

2.2.2. Karar ağaçları

Sınıflandırma problemlerinde, oluşturulması, yorumlanması ve veri seti ile bütünleştirilmesinin kolaylığından dolayı en sık tercih edilen yöntemlerden birisidir. Karar ağaçları, veri yapılarındaki ağaç yapısı ile benzerlik göstermektedir. Karar ağaçları, düğüm ve dallardan oluşan anlaşılması kolay, her bir dalın bir olasılık durumunu temsil ettiği ve prensip olarak veriyi rekürsif olarak alt gruplara dallanma yaparak bölen bir algoritmadır. Bu ayırım aşamasında oluşan dalların her biri bir kuralı temsil etmektedir[15-16].

2.2.3. Rasgele orman

Rasgele sınıflandırma algoritması, ağaç tipindeki sınıflandırma algoritmalarının topluluğu olarak tanımlanabilmektedir. Rasgele orman, tüm öznitelikler ile en iyi dalı kullanarak her bir düğümü dallara ayırmak yerine, her bir düğümden rastgele seçilen öznitelikler arasından en iyisini kullanarak her bir düğümü dallara ayırır. Model oluşturulurken kullanılan her bir veri seti orijinal veri setinden yer değiştirilerek elde edilir. Sonra rasgele öznitelik seçimi yapılarak ağaçlar geliştirilir. Geliştirilen ağaçlar budanmaz ve yapılan işlem rastgele orman algoritmasının doğruluğunu eşsiz yapmaktadır[17-19].

2.2.4. Naive bayes

Bayes teoreminden faydalanılarak oluşturulan bir algoritmadır. Literatürde en sık kullanılan algoritmalarından biri olmasının sebebi kolay anlaşılabilir olması ve uygulanabilirliğidir. Bu yöntem kullanılarak bir verinin hedeflenen niteliğin sınıf değerine ait olma olasılığı bulunabilmektedir. Diğer bir ifade ile elde var olan, sınıflandırılmış veriler kullanılarak yeni gelen verinin mevcut bulunan sınıf etiketlerinden birisi olma ihtimalini hesaplayan bir yöntemdir[15].

2.2.5. Lojistik regresyon sınıflandırma

Regresyon analizi, iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi ölçmek amacı ile kullanılmakta ve tanımlayıcı çıkarımsal istatistik sağlamaktadır. Hedeflenen, bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi en az sayıda değişken ile en iyi uyuma sahip olacak şekilde oluşturabilecek en iyi modeli kurmaktır[20].

2.2.6. Destek vektör makineleri

Destek vektör makineleri, son yıllarda regresyon ve sınıflandırma ile alakalı problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Destek vektör makineleri, sınıflandırma işlemi yaparken yüksek düzeyde başarımlı sağlamak için yüksek boyut özelliklerine sahip çekirdek fonksiyonları kullanmaktadır. Diğer sınıflandırma algoritmalarına göre daha başarılı sınıflandırma yaptığı gözlemlenmiştir[21-22].

2.2.7. AdaBoost

AdaBoost algoritması, zayıf sınıflandırıcıların bir araya gelmesiyle ortaya çıkan güçlü bir sınıflandırıcıyı temsil eden topluluk sınıflandırıcısı olarak isimlendirilmektedir. Modelin genel çalışma mantığı, her aşamada bir önceki aşamanın sonucunda yapılan yanlış tahminlerin ağırlığını artırarak sınıflandırıcının tekrar çalıştırılması ile başlamaktadır. Yapılan bu işlemlerle yanlış yapılan tahminlere odaklanıp, oluşturulan modelin sınıflandırmadaki doğruluk oranını yükseltmek amaçlanmaktadır[23].

2.2.8. Gradyan Artırma

Gradyan artırma algoritması, 2001 yılında Friedman tarafından ortaya atılmıştır. Yöntemin çalışma şekli; iteratif olarak hatayı tahmin edip, hatanın iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Gradyan artırma algoritması, AdaBoost algoritmasında olduğu gibi örnekleri tekrar ağırlandırmaya çalışmamaktadır. Bir önceki aşamada bulunan kayıp fonksiyonunu negatif gradyan vektörüne uydurmaya çalışır. Hatayı azaltmak için, dereceli azaltma sonuçlarını fonksiyona ekler[24].

2.2.9. Yapay sinir ağları

İnsan beynini model olarak alarak geliştirilen bir teknolojidir. Yapay sinir ağları öğrenme yöntemi ile yeni bilgileri üretme, bu bilgileri keşfetme, düşünebilen sistemler tasarlama amacıyla geliştirilmiştir. Yapay sinir ağları kendi iç kurallarını üretir ve bu kurallarla elde edilen sonuçları karşılaştırma yaparak kendisini geliştirir. Yapay sinir ağları deneme yanılma yolu ile kendisini eğitir ve bir işin nasıl yapılması gerektiğini öğrenir[25].

2.3. Model performans değerlendirme metrikleri

Sınıflandırma algoritmaları ile oluşturulan modellerin değerlendirilmesi, hangi sınıflandırma modelinin daha doğru sonuçlar ürettiğinin belirlenmesinde bazı değerlendirme metrikleri kullanılmaktadır. Bunlar genel olarak karışıklık matrisi olarak isimlendirilen bir tabloya dayanmaktadır. Makine öğrenmesi ve istatistiksel sınıflandırma problemlerinde, bir sınıflandırıcının performansını görselleştirmek için geliştirilen bir tablo düzenidir[26-27]. Matrisin her satırı, gerçek değerleri ifade ederken, her sütun ise tahmin edilen değerleri temsil etmektedir. İki sınıflı bir karışıklık matrisi ve alacağı değerler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. İki sınıflı karışıklık matrisi.

	Tahmin Edilen Sınıf		
	Sınıf	Pozitif	Negatif
Gerçek Sınıf	Pozitif	DP	YN
	Negatif	YP	DN

Karışıklık matrisinde geçen terimler ve anlamları aşağıda listelenmektedir;

- Doğru pozitif (DP); sınıflandırıcı tarafından pozitif sınıfa ait verilerden kaç tanesinin doğru şekilde sınıflandırıldığını temsil etmektedir.
- Doğru negatif (DN); sınıflandırıcı tarafından negatif sınıfa ait verilerden kaç tanesinin doğru şekilde sınıflandırıldığını temsil etmektedir.
- Yanlış Negatif (YN); gerçekte pozitif sınıfa ait olan bir verinin sınıflandırma sonucunda negatif sınıf olarak etiketlenmesidir.
- Yanlış pozitif (YP); gerçekte negatif sınıfa ait olan bir verinin sınıflandırma sonucunda pozitif sınıf olarak etiketlenmesidir.

Karışıklık matrisi yardımı ile sınıflandırma performansını belirlemek için kullanılan metrikler ise açıklamaları ile beraber aşağıda verilmektedir;

- Doğruluk; eğitim kümesi kullanılarak oluşturulan modelin test kümesindeki verileri doğru sınıflandırma oranıdır [27]. Denklem 2’de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP + DN}{DP + DN + YP + YN} \quad (2)$$

- Duyarlılık ya da doğru pozitif oran (DPO); sınıflandırıcının gerçekte pozitif sınıfa ait olan verileri doğru olarak tahmin etme oranını vermektedir[27]. Denklem 3’de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\text{Duyarlılık} = \text{Anma} = \text{DPO} = \frac{DP}{DP + YN} \quad (3)$$

- Özgüllük ya da doğru negatif oran (DNO); sınıflandırıcının gerçekte negatif sınıfa ait olan verileri doğru olarak tahmin etme oranını vermektedir[27]. Denklem 4’de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\text{Özgüllük} = \text{DNO} = \frac{DN}{DN + YP} \quad (4)$$

- Kesinlik ya da Pozitif tahmin değeri (PTD); sınıflandırma sonucunda pozitif olarak tahmin edilenlerin ne oranda doğru olarak tahmin edildiğini vermektedir[27]. Denklem 5’de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\text{Kesinlik} = \text{Pozitif Tahmin Değeri} = \frac{DP}{DP + YP} \quad (5)$$

- Negatif tahmin değeri (NTD); sınıflandırma sonucunda negatif olarak tahmin edilenlerin gerçekte ne kadarının negatif sınıfta olduğunu göstermektedir[27]. Denklem 6’da gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\text{NTD} = \frac{DN}{DN + YN} \quad (6)$$

- F ölçütü; kesinlik ve anma ölçütleri tek başlarına anlamlı bir karşılaştırma sonucu çıkarılmasında yeterli olmamaktadır. İki ölçütü bir arada değerlendiren F ölçütü sayesinde daha anlamlı sonuçlar üretebilmektedir. F ölçütü kesinlik ve anma değerlerinin harmonik ortalaması alınarak elde edilmektedir. F-ölçütü genel olarak F_1 , $F_{0.5}$ ve F_2 olarak kullanılmaktadır. F-ölçütü, 0 ile 1 arasında değerler almaktadır. Doğru tahminlerde bulunan bir sınıflandırıcının f-ölçütü değerinin 1’e yakın olması beklenmektedir[27]. Denklem 7’de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$f_\beta - \text{ölçütü} = \frac{(1 + \beta^2)x(\text{kesinlik} * \text{anma})}{\beta^2 + \text{kesinlik} * \text{anma}} \quad (7)$$

- Matthews korelasyon katsayısı(MCC); iki ve çok sınıflı sınıflandırma çalışmalarında performansı ölçmek için MCC olarak adlandırılan bir yöntem önerilmektedir. Bu ölçüm diğer metriklerin aksine karışıklık matrisinde yer alan bütün değerleri kullanmaktadır. MCC, -1 ile +1 arasında değerler almaktadır. Sınıflandırıcı +1’e yakın değerler almışsa doğru tahminlerde bulunduğunu, 0 değerini almışsa rastgele tahminlerde bulunduğunu ve -1’e yakın değerler almışsa yanlış tahminlerde bulunduğunu göstermektedir[28]. Denklem 8’de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\text{MCC} = \frac{DP * DN - YP * YN}{\sqrt{(DP + YP) * (DP + YN) * (DN + YP) * (DN + YN)}} \quad (8)$$

Alıcı işlem karakteristikleri eğrileri altında kalan alan(AUC); sınıflandırıcıların performansını test etmek için genel olarak kullanılmaktadır. AUC, 0 ile 1 arasında değerler üretmektedir. AUC değerinin bire yaklaşması sınıflandırıcının doğru tahminlerde bulunduğunu, 0.5 değerini alması sınıflandırıcının rastgele tahminlerde bulunduğunu ve bu değerin altında aldığı değerlerde ise sınıflandırıcının doğru çalışmadığını göstermektedir [29].

3. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışma da; ilk olarak Bölüm 2.1’de yer alan veri setlerinin her biri için Bölüm 2’de yer alan sınıflandırma algoritmaları uygulanmıştır. Her bir veri seti için iki farklı değerlendirme yöntemi kullanılarak sınıflandırıcı modeller oluşturulmuştur. Kullanılan yöntemler Hold-out ve 10 katlı çapraz doğrulama (10-CV) yöntemidir. Hold-

out yönteminde, veri setini modeli oluşturmak için eğitim ve test parçalarına bölünme işlemi yapılmaktadır. Eğitim verisi ile model oluşturulurken, test verisi ile de bu modelin doğruluğunun testi yapılmaktadır. Bu çalışmada Hold-out yönteminde eğitim ve test verisi bölme işlemi %70 eğitim ve %30 test verisi olacak şekilde yapılmıştır. Çapraz doğrulama yönteminde ise veri seti belirtilen sayıda parçaya bölünmektedir. Bu parçalardan 1 tanesi test diğerleri ise eğitim amaçlı kullanılır. Modelin performansını belirlemek için bu işlem her parça için ayrı ayrı belirlenen sayıda yapılarak her aşamada bir başarımlı değeri elde edilmektedir. Bu elde edilen değerlerin ortalaması alınarak oluşturulacak modelin gerçek performans değeri elde edilmiş olur. Tablo 3'te en yüksek doğruluk değerlerinin hangi sınıflandırma algoritmaları ile elde edildiği ve hangi test yöntemi ile edildiği verilmektedir.

Tablo 3. Çalışmada kullanılan veri setleri için sınıflandırma sonuçları.

No	Veri seti	Sınıf Sayısı	Sınıflandırıcı	Yöntem	Doğruluk	F ₁	MCC	AUC
1	AY	2	KA, GA	10-CV	83,54	0,711	0,412	0,646
2	WMK	2	KNN	Hold-out	98,25	0,980	0,960	0,973
3	TTTO	2	GA	10-CV	100	1,000	1,000	1,000
4	SGA	3	GA	10-CV	98,89	0,976	0,980	1,000
5	PYT	2	RO, AB	Hold-out	98,01	0,938	0,876	0,922
6	OHBÖ	2	RO	Hold-out	86,02	0,832	0,664	0,835
7	OHBÖ	3	RO	Hold-out	84,95	0,792	0,753	0,98
8	KH	2	LRS	10-CV	84,16	0,840	0,680	0,837
9	YPD	3	RO	Hold-out	92,69	0,927	0,889	0,940
10	FPE	8	LRS, YSA	Hold-out	100	1,000	1,000	1,000
11	SS	2	DVM, YSA	10-CV	98,54	0,494	0,000	0,500
12	KAJS	4	KA, NB, DVM, GA, YSA	10-CV	100	1,000	1,000	1,000
13	PHS	2	RO	Hold-out	86,22	0,780	0,559	0,753
14	PBP	2	DVM	10-CV	88,75	0,610	0,168	0,533
15	GCS	2	LRS, YSA, DVM	Hold-out	75,32	0,430	0,000	0,500
16	MCFS	4	YSA	10-CV	95,85	0,958	0,942	0,984
17	TSG	6	DVM	Hold-out	47,58	0,300	0,267	0,480
18	BP	2	GA	Hold-out	85,85	0,859	0,717	0,859
19	İÇ	3	KNN, GA, AB, YSA	Hold-out	97,78	0,978	0,967	0,980
20	ŞK	7	RO	Hold-out	69,03	0,390	0,523	0,500
21	HCC	2	KA, RO, NB, LRS, DVM, GA, AB, YSA	10-CV	100	1,000	1,000	1,000
22	BKSP	2	GA	10-CV	98,76	0,963	0,926	0,948
23	SŞDİDR	2	KA, GA, AB	10-CV	100	1,000	1,000	1,000
24	İAKT	2	RO	Hold-out	90,51	0,796	0,592	0,765
25	ŞİMS	3	LRS, YSA	Hold-out	100	1,000	1,000	1,000
26	PT	15	GA	Hold-out	78,57	0,480	0,770	0,960
27	GS	2	GA	Hold-out	87,63	0,816	0,632	0,800
28	KA	2	RO	10-CV	94,44	0,945	0,890	0,946
29	KKST	2	RO	Hold-out	99,95	0,917	0,833	0,881
30	DK	3	RO	Hold-out	64,59	0,645	0,468	0,840
31	SCT	2	KNN	Hold-out	98	0,980	0,960	0,980
32	PKD	2	YSA	Hold-out	80,95	0,790	0,581	0,778

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, 32 veri seti arasından toplam 20 veri seti için Hold-out yöntemi ile oluşturulan modellerin daha iyi performans sergilediği görülürken diğer 12 veri seti için ise 10 katlı çapraz doğrulama yöntemi ile oluşturulan modellerin daha iyi performans verdiği görülmüştür. Çapraz doğrulama yöntemi makine öğrenmesi modellerinde genellikle tercih edilen bir yöntem olmaktadır. Bunun en önemli nedeni modeli eğitirken ve test ederken verinin tamamını hem eğitim hem de test amaçlı kullanmasıdır. Hold-out yöntemi ise verinin sadece ilk aşamada yani model eğitme ve test aşamasında bir kez bölünmesi ile gerçekleştiğinden model oluşturulurken test bölümünde kalan bir verinin modelin yanlış öğrenmesine sebep olma durumu olabilmektedir. Hold-out yöntemi verinin çok fazla olduğu durumlarda zaman kaybını gidermek için tercih edilebilmektedir. Tablo 4'de yer alan a ve b karışıklık matrislerinde bu durum incelenmektedir.

Tablo 4. PHS veri seti için oluşturulan karışıklık matrisleri.

Tahmin Edilen Sınıf				Tahmin Edilen Sınıf					
		Sınıf	Parkinson	Sağlıklı			Sınıf	Parkinson	Sağlıklı
Gerçek Sınıf	Parkinson		27	21	Gerçek Sınıf	Parkinson		89	103
	Sağlıklı		10	167		Sağlıklı		37	527
	a) Rasgele Orman ve Hold-out			b) Rasgele Orman ve 10-CV					

Tablo 4 (a)'da yer alan karışıklık matrisi, rasgele orman sınıflandırıcısı ve Hold-out yöntemi ile oluşturulan modeli temsil etmekte ve Tablo 4 (b)'deki karışıklık matrisi de yine rasgele orman ve 10 katlı çapraz doğrulama yöntemi ile oluşturulan modeli temsil etmektedir. Oluşturulan karışıklık matrislerinden de görüldüğü gibi (a) modeli toplam veri setinin %30'unu temsil ettiğinden daha az veri ile modelin testi gerçekleştirilmektedir. Çapraz doğrulama yöntemi ile oluşturulan model ise tüm veri setinin kullanımı ile oluşturulmuştur. Oluşturulan (a) ve (b) modellerinin doğruluk değeri sırasıyla %86,22 ve %81,48'dir. Hold-out yöntemi ile oluşturulan modelin başarımları değeri daha yüksek gibi görünse de hem daha az veri ile test gerçekleştirmesi hem de eğitim ve test verilerinin dağılımının modelin sonucunu etkilemesinden dolayı çapraz doğrulama ile oluşturulan modelin tercih edilmesi daha doğru bir yaklaşım olacaktır.

Oluşturulan modeller incelendiğinde dengesiz veri setlerinde sadece doğruluk metriğinin yeterli olmadığı tespit edilmiştir. Bu metriğe ek olarak MCC, F ölçütü ve AUC değerlerinin de verilmesi modelin seçiminde etkili olmaktadır. Tablo 5 (a), destek vektör makineleri ile oluşturulan modeli ve Tablo 5 (b), Naive Bayes ile oluşturulan model sonuçlarını göstermekte ve bu durumu en iyi şekilde ifade etmektedir.

Tablo 5. KKST veri seti için oluşturulan karışıklık matrisleri.

Tahmin Edilen Sınıf				Tahmin Edilen Sınıf					
Gerçek Sınıf		Sınıf	Hileli işlem var	Hileli işlem yok	Gerçek Sınıf		Sınıf	Hileli işlem var	Hileli işlem yok
		Hileli işlem var	284.315	0			Hileli işlem var	282.397	1.918
		Hileli işlem yok	492	0			Hileli işlem yok	176	316
		a) Destek Vektör Makineleri ve 10-CV					b) Naive Bayes ve 10-CV		

Oluşturulan iki model incelendiğinde (a) modeli %99,83 oranında doğruluk değeri verirken, (b) modeli %99,26 doğruluk değeri vermektedir. İlk model (a) incelendiğinde 'Hileli işlem yok' sınıfına ait hiçbir verinin doğru tahmin edilmediği oluşturulan karışıklık matrisinde görülmektedir. Bu sınıflandırıcılara ait olan MCC, F ölçütü ve AUC değerleri incelendiğinde, doğruluk değeri yüksek olan sınıflandırıcının aksine daha düşük doğruluk değerinin elde edildiği sınıflandırıcının aslında daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. DVM ile elde edilen MCC, F ölçütü ve AUC değerleri sırasıyla 0, 0,5 ve 0,49 olduğu ve bu değerlerin sınıflandırıcının rasgele tahmin yaptığını göstermektedir. Aynı değerler, Naive Bayes sınıflandırıcı (b) ile hesaplandığında ise sırasıyla 0,29, 0,8 ve 0,67 olduğu görülmektedir. Bu da model seçimi yaparken sadece doğruluk metriğini kullanılmaması gerektiği, ek olarak farklı metriklerden faydalanılması gerektiğini göstermektedir.

Yapılan testlerin bazılarında %90 ve üzeri, bazılarında ise daha düşük başarımları değerleri elde edildiği Tablo 3'de görülmektedir. Bu çalışmalardan Tablo 4'de yer alan Kredi kartı sahtekarlığı tespiti (KKST) veri seti için oluşturulan model ve Ph Tanıma (PT) veri seti ile oluşturulan modeller incelendiğinde birinci veri setinde %99,83 oranında bir doğruluk değeri elde edilmişken diğer veri setinde %78,57 oranında bir doğruluk değerinin elde edildiği görülmektedir. Tablo 6'da PT veri seti ile oluşturulan modele ait karışıklık matrisi görülmektedir.

Tablo 6. PT veri seti için oluşturulan karışıklık matrisi.

	Sınıf	Tahmin Edilen Sınıf														
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Gerçek Sınıf	0	32	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	5	36	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	1	5	34	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	1	3	6	29	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	2	2	5	33	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	2	1	5	28	4	2	0	2	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	3	1	6	31	3	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	1	1	6	33	2	1	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	2	0	1	1	36	2	1	1	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	2	0	2	1	33	3	3	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	32	3	3	0	1
	11	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	3	30	5	1	1
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	34	3	3
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	33	6
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	37	

Burada Tablo 3'te yer alan diğer metriklerle bakıldığında ise KKST veri seti ile oluşturulan modelin aslında rasgele tahminler de bulunduğu ikinci modelin daha doğru başarımlar değerleri elde ettiği görülmektedir. Burada ikinci önemli nokta ise birinci veri setinin üç sınıflı, diğerinin ise 15 sınıflı bir veri seti olmasıdır. Karar sınıfına ait dağılımın artması model başarımlarındaki yüzdeyi düşürdüğü fakat diğer metriklerle desteklendiğinde aslında daha doğru bir model oluşturulduğu görülmektedir.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu makalede, sınıflandırma çalışmalarında karşılaşılan özel durumlar ve model seçimi yapılırken referans alınan metrikler dikkate alınarak sınıflandırma başarımının doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi yönünde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Doğruluk metriğinin yanı sıra MCC, F ölçütü ve AUC gibi metriklerinde kullanılması gerektiğinin önemine dikkat çekilmiştir. Çalışmada ayrıca sınıf dengesizliği ve sınıf sayısının fazla olduğu durumlarda modelin başarımının nasıl değerlendirileceği hakkında incelemeler yapılmıştır. Genel olarak incelendiğinde üç farklı durum dikkat çekmiştir.

İlk olarak, sınıflandırma modeli oluşturulurken kullanılan test tekniğinin önemi yapılan çalışmada ön plana çıkmaktadır. Sınıflandırıcının performansının doğru olarak değerlendirilebilmesi için mutlaka tüm verilerin test ve eğitim aşamasında kullanılması gerçeği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle mümkün olduğu sürece Çapraz doğrulama testlerinin uygulanması gerektiği tespit edilmiştir. Hold-Out gibi yöntemler kullanıldığı durumlarda daha yüksek doğruluk değerleri elde edilebilse de, eğer çapraz doğrulama testi veri setine uygulanabiliyor ise buradan elde edilen doğruluk değerinin gerçek sonucu yansıttığı ve bu değer kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Sadece çapraz doğrulama testinin uygulanmadığı durumlarda Hold-Out yönteminin kullanılması önerilmektedir.

İkinci olarak, veri setlerindeki sınıf sayısının da sonuçları doğrudan etkilediği görülmektedir. Sınıf sayısının fazla olmasına paralel olarak doğruluk değerinin düştüğü gözlemlenebilmektedir. Ancak, diğer metrikler birlikte değerlendirildiğinde bu düşük başarımın daha az sınıflı veri setlerinden elde edilen yüksek başarımlardan daha olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Örneğin 15 sınıflı bir veri setinden %70 gibi bir doğruluk değerinin elde edilmesi, 2 sınıflı bir veri setinde %80 gibi bir doğruluk değerinden daha anlamlı ve başarılı olduğu sonucunu ortaya koyabilmektedir.

Son olarak, veri setindeki sınıfların dengesiz olarak dağılımı da doğruluk değerinin değerlendirilmesinde sorunlar ortaya çıkarabildiği sonucuna varılmıştır. Bu durumda, sadece doğruluk metriğinin kullanılması yanlış model seçimine sebep olabilmektedir. Bu çalışmada yer alan KKST ve SS veri setleri ile oluşturulan modellerde sadece doğruluk metriğinden faydalanılması rasgele tahminlerde bulunan modellerin daha iyi sonuç verdiği sonucunu yansıtabilmektedir. Bu durumun önüne geçmek için MCC, F ölçütü ve AUC metriklerinden yararlanılması faydalı olacaktır. Böylece doğru sınıflandırıcın seçilmesi daha kolay hale gelebilecektir.

Sonuç olarak, sınıflandırma çalışmalarında doğru sınıflandırıcının seçilmesinin çok önem arz ettiği ve bu hususta dikkat edilmesi gereken birçok parametrenin olduğu ortaya konulmuştur. Özellikle, veri setinin boyutu, sınıfların dağılımları, sınıf sayısı ve kullanılacak olan test yöntemi ile beraber değerlendirme metriklerinin doğru bir şekilde kullanılması, iyi bir sınıflandırma yapılmasında çok önemli parametreler olduğu sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Bu makale, Abdullah ALAN'ın "Makine Öğrenmesi Sınıflandırma Yöntemlerinde Performans Metrikleri ile Test Tekniklerinin Farklı Veri Setleri Üzerinde Değerlendirilmesi" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Kaynaklar

- [1] Gürsakar N. Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme. Bursa, 2017.
- [2] Göbekçin T. (Ed.) Master algoritma. İstanbul, 2017.
- [3] <https://open.nasa.gov/blog/datanaut-fall-2017-class-announcement/> (Erişim Tarihi: 21.01.2020)
- [4] <https://www.theguardian.com/media-network/2015/mar/05/digital-oligarchy-algorithms-personal-data> (Erişim Tarihi: 1.01.2020)
- [5] Aydın F. Kalp ritim bozukluğu olan hastaların tedavi süreçlerini desteklemek amaçlı makine öğrenmesine dayalı bir sistemin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Edirne, 2011.
- [6] Hacıfendioğlu Ş. Makine öğrenmesi yöntemleri ile glokom hastalığının teşhisi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2012.
- [7] Kartal E. Sınıflandırmaya dayalı makine öğrenmesi teknikleri ve kardiyolojik risk değerlendirmesine ilişkin bir uygulama, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015.
- [8] Şeker M. İyi-kötü kokular ile ilişkili EMOTIV-EPOC tabanlı EEG kayıtlarının makine öğrenmesi yöntemleri ile sınıflandırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 2017.
- [9] Turgut S. Makine öğrenmesi yöntemleri kullanarak kanser teşhisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017.
- [10] Pekel E. Farklı makine öğrenmesi algoritmalarının karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 2018.
- [11] <https://kaggle.com> (Erişim Tarihi: 05.05.2020)
- [12] Johnson JM, Khoshgoftaar TM. Survey on deep learning with class imbalance. *Journal of Big Data* 2019; 6(1): 27.
- [13] Fawcett T. An introduction to ROC analysis, *Pattern recognition letter* 2006; 27 (8): 861-874.
- [14] Ayık YZ, Özdemir A, Yavuz U. Lise türü ve lise mezuniyet başarısının, kazanılan fakülte ile ilişkisinin veri madenciliği tekniği ile analizi. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi* 2007; 10(2): 441-454.
- [15] Bozkır AS, Sezer E, Gök B. Öğrenci seçme sınavında (öss) öğrenci başarımını etkileyen faktörlerin veri madenciliği yöntemleriyle tespiti. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 2009, 13-15 Mayıs, Karabük, s:1-7.
- [16] Albayrak AS, Koltan Yılmaz Ş. Veri madenciliği: Karar ağacı algoritmaları ve İMKB verileri üzerine bir uygulama. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi* 2009; 14(1): 31-52.
- [17] Breiman L. Random forests, machine learning, 2001 Kluwer Academic Publishers 2001; 45(1): 5-32.
- [18] Archer KJ. Empirical characterization of random forest variable importance measure. *Computational Statistics & Data Analysis* 2008; 52(4): 2249-2260.
- [19] http://www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests/cc_home.htm (Erişim Tarihi: 24 Nisan 2019)
- [20] Balaban ME, Kartal E. Veri madenciliği ve makine öğrenmesi temel algoritmalar ve R dili ile uygulamaları. İstanbul, 2015.
- [21] Boser B, Guyon I, Vapnik V. A training algorithm for optimal margin classifiers. *Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory: Pittsburgh, Pennsylvania, USA* 1992; 144-152.
- [22] Melgani F, Bruzzone L. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 2004; 42(8): 1778-1790.
- [23] Kégl B. Introduction to AdaBoost, 2009; 11-14.
- [24] Friedman J. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of Statistics* 2001; 29(5): 1189-1232.
- [25] Özdemir ME, Yıldırım E, Yıldırım S. Classification of emotional valence dimension using artificial neural networks. In *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* 2015; 23: 2549-2552.
- [26] Han J, Kamber M, Pei J. Data mining: Concepts and techniques. Morgan Kaufmann Publishers 2012.
- [27] Japkowicz N. Performance evaluation for learning algorithms, Cambridge University Press, Cambridge 2011.
- [28] Akosa J. Predictive accuracy: a misleading performance measure for highly imbalanced data. In *Proceedings of the SAS Global Forum* 2017; 12.
- [29] Kılıç S. Klinik karar vermede ROC analizi. *Journal of Mood Disorders* 2013; 3 (3): 135-40.

Bitümlü Sıcak Karışımların Laboratuvar Ortamında Yaşlandırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Çağla DURMAZ^{1*}, Burak ŞENGÖZ² Derya KAYA ÖZDEMİR³, Ali TOPAL⁴, Ali ALMUSAWI⁵

^{1,5} Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye

^{2,3,4} Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

^{*1} cagladurmaz@gmail.com, ² burak.sengoz@deu.edu.tr, ³ d.kaya@deu.edu.tr, ⁴ ali.topal@deu.edu.tr,

⁵ alialmusawi.engin89@gmail.com

(Geliş/Received:04/05/2020;

Kabul/Accepted: 13/08/2020)

Öz: Trafik hacmindeki ve dingil yüklerindeki artışlar, tasarım ve yapım hataları, tekerlek izi oluşumu, düşük sıcaklık çatlakları ve yorulma çatlakları gibi bozuklukların artmasına sebep olmaktadır. Bitümlü bağlayıcının yaşlanması ile doğrudan ilişkili olan bu deformasyonlar, yollardan beklenen performansı ve yolun öngörülen hizmet ömrünü azaltmaktadır. Yukarıda belirtilen deformasyonlara büyük ölçüde sebep olan yaşlanma, uçucu bileşenlerin kaybı ve oksidasyon nedeniyle asfalt bağlayıcının sertleşmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışma, National Cooperative Highway Research Program tarafından önerilen yeni laboratuvar ortamında yaşlandırma yöntemi (NCHRP 09-54) ile mevcut standardı (AASHTO R30) karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Yaşlanma etkisini incelemek üzere yaşlandırılmamış ve laboratuvar ortamında kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış asfalt numuneleri üzerinde dolaylı çekme mukavemeti deneyleri gerçekleştirilmiştir. Asfalt numunelerinin yaşlanma seviyeleri daha sonra yaşlanma indeksleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Asfalt, oksidasyon, kısa dönem yaşlanma, uzun dönem yaşlanma, dolaylı çekme mukavemeti.

Comparison of Laboratory Aging Methods of Asphalt-Aggregate Mixtures

Abstract: The raise in axle loads, heavy traffic, design and construction errors in the last two decade increase the failures such as rutting, fatigue and low temperature cracking. These deformations decrease the level of performance and service life of the roads. Aging phenomenon, which is defined as the hardening of asphalt binder due to loss of volatile components and oxidation, is the primary factor of the above-mentioned failures. This study aims to evaluate the current standard (AASHTO R30) regarding to the laboratory aging procedure with the new method proposed by National Cooperative Highway Research Program (NCHRP 09-54). In order to investigate the aging effects, the indirect tensile strength tests have been performed on unaged, short and long term laboratory aged asphalt concrete specimens. The aging level of the asphalt concrete specimens had been evaluated through aging indices.

Key words: Asphalt, oxidation, short term aging, long term aging, indirect tensile strength.

1. Giriş

Sıcaklığa ve çevre koşulları etkisine maruz kalan bitümlü bağlayıcının zamanla sertleştiği bilinmektedir. Zamanla gerçekleşen bağlayıcının sertleşmesi olayına, gevrekleşme veya daha basit bir şekilde yaşlanma adı verilir. Yaşlanma, bitümlü malzemenin viskozitesinin artmasına ve daha kırılgan bir duruma gelmesine sebep olmakta, aynı zamanda, asfalt yüzeyinde çatlaklara ve suya bağlı bozulmalara karşı daha duyarlı olmasına da neden olmaktadır. Yaşlanmanın, kısa dönem yaşlanma ve uzun dönem yaşlanma olarak iki aşamada olduğu bilinmektedir [1]. Kısa dönem yaşlanma, karışımın depolanması, plente taşınması, plente karıştırılması, şantiyeye taşınması, serilmesi ve sıkıştırılması işlemleri sırasında meydana gelmektedir. Bu yaşlanmanın buharlaşmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Uzun dönem yaşlanma, yolun servis ömrü boyunca gerçekleşmektedir. Bu yaşlanmanın ise büyük ölçüde oksidasyondan kaynaklandığı düşünülmektedir [1]. 1850'lerden beri Avrupa'da kaplama malzemesi olarak kullanılan asfaltın sertleşmesi ilk olarak 1900'lerde ABD'de araştırılmaya başlanmıştır [2]. A.W. Dow, 1903'te bitümlü bağlayıcı yaşlanması üzerine ilk belgelenmiş deneyleri gerçekleştirmiş, bitümün sertleşmesini ve özelliklerini kaybetmesini etkileyen faktörleri incelemiştir. [3]. Dow tarafından gerçekleştirilen çalışmada, sıcak karışım asfalttan geri kazanılan bitümün ağırlık ve penetrasyon özellikleri araştırılmıştır. 1961'de Traxler [4] önem sırasına göre bitümün yaşlanmasını etkileyen faktörleri aşağıdaki gibi listelemiştir:

* Sorumlu yazar: durmaz.cagla@ogr.deu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-5483-0606, ² 0000-0003-0684-4880, ³ 0000-0003-1517-9405, ⁴ 0000-0002-2601-1926, ⁵ 0000-0002-4507-2492

- 1-Oksidasyon,
- 2-Buharlaşma veya uçucu madde kaybı,
- 3-Polimerizasyon (aktif ışığa bağlı),
- 4-Yoğunlaşma polimerizasyonu (ısıya bağlı).

Traxler (1963), yaptığı başka bir çalışmada bu faktörlerin sayısını 15'e çıkarmıştır [5]. Bu 15 faktörden 4'ünün sertleşmeye en çok sebep olduğu düşünülmüştür. Petersen (1984), karışımların yaşlanmasına ilişkin faktörleri: buharlaşma sonucu bitüm içindeki uçucu bileşenlerin kaybı; oksidasyon reaksiyonundan kaynaklanan bitümün kimyasal bileşimindeki değişiklikler ve moleküler yapıya bağlı olarak tiksotropik etkiler olmak üzere üç ana faktöre indirmişlerdir [6]. Daha sonra araştırmacıların çoğu bu üç faktöre dayanan çalışmalar yürütmüşlerdir.

Asfalt karışımlarının laboratuvar ortamında yaşlandırma prosedürlerini geliştirmek için çeşitli araştırmalar yapılmıştır. AASHTO R30 (2002), (Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)), American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) tarafından laboratuvar ortamında asfalt karışımlarının kısa ve uzun süreli yaşlandırılmasını temsil etmek için önerilen mevcut standarttır. Bu standarda göre, kısa dönem yaşlanma etkilerini temsil etmek için gevşek (sıkıştırılmamış) karışım numuneleri, hava sirkülasyonlu etüv içerisinde 135 C'de 4 saat yaşlandırılmalı, uzun dönem yaşlanma simülasyonu için ise numuneler sıkıştırıldıktan sonra hava sirkülasyonlu etüvde 85 C'de 120 saat yaşlandırılmalıdır [7]. Bonaquist (2011) tarafından, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) 09-43 projesi kapsamında deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmada, kısa dönem yaşlanmayı laboratuvar koşullarında temsil etmek için, sıkıştırma sıcaklığındaki (Tc) koşullandırma süresi 2 saat olarak belirlenmiş; servis ömrü boyunca yaşlanma için ise temsili olarak daha yüksek bir sıcaklık ve daha uzun yaşlandırma süresi uygun bulunmuştur [8]. Martin ve diğ. (2014) laboratuvar koşullandırma deneylerini içeren NCHRP 09-49 projesini gerçekleştirmişlerdir. Arazide Tc'nin belirlenmesinin zorluğu göz önüne alınarak, sıkıştırma sıcaklığında (Tc) 2 saat koşullandırma yerine standart laboratuvar yaşlandırma protokolü olarak 135 C'de 2 saat koşullandırmayı önermişlerdir [9]. Daha yakın zamanda tamamlanan NCHRP 09-52 projesi, NCHRP 09-43 ve NCHRP 09-49 projelerini harmanlayarak daha kapsamlı bir inceleme sağlamıştır. NCHRP 09-52 projesinde bulgular, AASHTO tarafından önerilen mevcut standardın (AASHTO R30) uzun süreli yaşlandırma prosedürünün uygun bulunduğunu ancak kısa dönem yaşlandırma protokolü olarak mevcut standartta önerilen 4 saat yerine 2 saat boyunca 135 C'de yaşlandırmanın önerildiğini göstermektedir [10]. Kim ve diğ. (2018) tarafından tamamlanan NCHRP 09-54 projesinde ise uzun dönem yaşlanmayı temsil etmek için yeni bir prosedür geliştirilmiş ve sonuçlar ABD ve Kanada'da bulunan çok çeşitli iklimleri temsil eden dokuz arazi projesinden elde edilen arazi karışımları ile kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Bu projede, gevşek karışımın yaşlanma protokolü olarak etüv içerisinde 95 C'de koşullandırılma önerilmiştir. Yaşlandırma süreleri ise iklim, yıl ve derinliğe göre belirlenmiştir. Önerilen prosedürde, süreyi belirlemek için kaplama tabakasının 6 mm, 20 mm ve 50 mm derinliklerinde 4, 8 ve 16 yıllık arazi yaşlanması için laboratuvar yaşlandırma süresi haritaları oluşturulmuştur. ABD'de yapılan çalışmada, 4 yıllık servis ömrüne sahip bir yol için önerilen yaşlandırma süresi 3 ila 5 gün olarak belirlenmiştir. Genelde hesaplamalar için 4 yıllık bir süre ve 20 mm derinlik dikkate alınmaktadır [11].

Bu çalışmanın amacı, asfalt karışımlarının kısa ve uzun dönem yaşlandırılmasında National Cooperative Highway Research Program tarafından önerilen yaşlandırma yöntemi NCHRP 09-54 ile mevcut yaşlandırma standardını (AASHTO R 30) karşılaştırmaktır.

2. Materyal ve Yöntem

Deneysel çalışmalarda, bitümlü bağlayıcı olarak Türkiye Petrol Rafineleri A.Ş.'ne bağlı İzmir Aliğa Rafinerisinden temin edilen 50/70 penetrasyon sınıfı bağlayıcı kullanılmıştır. Geleneksel saf bitümlü bağlayıcı özelliklerini tespit etmek için penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, viskozite, parlama, ince film halinde ısıtma, ince film halinde ısıtma deneyi sonrası penetrasyon ile ince film halinde ısıtma deneyi sonrası yumuşama noktası deneyleri uygulanmıştır. Geleneksel bitümlü bağlayıcı deney sonuçları Tablo 1'de sunulmuştur.

Sıcak asfalt karışımlarında agrega olarak Dere Grup A.Ş. İzmir Belkahve taş ocağından temin edilen kalker kullanılmıştır. Agrega özelliklerini belirlemek amacıyla özgül ağırlık, Los Angeles aşınma, sodyum sülfat sağlamlık, ince agrega köşellilik ve yassılık indeksi deneyleri uygulanmıştır. Agrega deney sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Karışım agrega gradasyonu, Karayolları Teknik Şartnamesi'nde aşınma tabakaları için belirtilen Tip 1 gradasyon limitlerine uygun olarak seçilen gradasyon değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 1. Saf bitüme uygulanan klasik bitüm deneyleri sonuçları.

Test	Standartlar	Sonuçlar	Limitler
Penetrasyon (25 C; 0.1 mm)	ASTM D5	65	50 – 70
Yumuşama Noktası (C)	ASTM D36	51	46 – 54
Viskozite (135 C)-Pa.s	ASTM D4402	0,412	-
Viskozite (165 C)-Pa.s	ASTM D4402	0,104	
Düktilite (25 C; cm)	ASTM D113	100	-
Özgül Ağırlık	ASTM D70	1,030	-
Parlama Noktası (°C)	ASTM D92	+260	230 (min)
Penetrasyon İndeksi (PI)	-	0,35	-
RTFOT	ASTM D2872-12		
Kütle değişimi (%)	-	0,160	0.5 (max)
RTFOT sonrası penetrasyon	ASTM D5	53	50 (min)
RTFOT sonrası kalıcı penetrasyon (%)	ASTM D36	82	50 (min)
RTFOT sonrası yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	58	48 (min)

Tablo 2. Kalker agregasının fiziksel özellikleri.

Test	Standatlar	Sonuçlar	Limitler
Hacim Özgül Ağırlık (Kaba agrega)	ASTM C127	2,704	
Hacim Özgül Ağırlık (İnce Agg.)	ASTM C128	2,691	
Özgül Ağırlık (Filler)		2,732	-
Los Angeles Aşınma (%)	ASTM C 131	22,6	max. 45
Yassılık İndeksi (%)	ASTM D 4791	7,5	max. 10
Sodyum Sülfat Sağlamlık (%)	ASTM C 88	1,47	max. 10 – 20
İnce Agrega Köşeliliği	ASTM C 1252	47,85	min. 40

Tablo 3. Kalker agregası için seçilen gradasyon.

Elek No.	Gradasyon (%)	Şartname Limitleri
19 mm	100	100
12.5 mm	92	88-100
9.5 mm	73	72-90
No.4	44,2	42-52
No.10	31	25-35
No.40	12	10-20
No.80	8	7-14
No.200	5,3	3-8

2.1 Marshall tasarım yöntemi

Optimum bitüm içeriğini bulmak için Marshall tasarım yöntemi kullanılmıştır. Her bir bitüm yüzdesi için üç deney numunesi hazırlanmıştır. Tüm deney ve ölçüm sonuçlarına göre bitüm yüzdesi-Stabilite, Akma, Boşluk, mineral agregalar arasındaki boşluk (VMA) ve asfaltla dolu boşluk (VFA) grafikleri çizilmiştir. Sonuç olarak, aşınma tabakası için standartta belirtilen %3 ile %5 hava boşluğu ortalamasına (%4) karşılık gelen bitüm miktarı optimum bitüm içeriği olarak belirlenmiştir.

2.2 Yaşlandırma yöntemleri

Laboratuvar da sıcak asfalt karışımlarının yaşlanmasını temsil etmek için numuneler; yaşlandırılmamış numuneler; kısa dönem yaşlandırılmış numuneler ve uzun dönem yaşlandırılmış numuneler olmak üzere üç farklı gruba ayrılmıştır. Kısa ve uzun dönem yaşlandırma koşulları ve kullanılan yöntemlerin adları Tablo 4'te sunulmaktadır. Uzun dönem yaşlandırma yöntemi uygulanmadan önce numunelerin kısa dönem yaşlandırılması gerekmektedir.

Tablo 4. Laboratuvar Ortamında Yaşlandırma Yöntemleri.

Yöntem	Yaşlandırma Koşulları					
	Kısa Dönem Yaşlandırma			Uzun Dönem Yaşlandırma		
	Sıcaklık (C)	Süre (saat)	Karışım Durumu	Sıcaklık (C)	Süre (saat)	Karışım Durumu
AASHTO R30	135	4	Gevşek	85	5	Sıkıştırılmış
NCHRP 09-54		4	Gevşek	95	4*	Gevşek

* hesaplamalar ile belirlenen değer

Daha önce belirtildiği gibi, mevcut standart deney yöntemi (AASHTO R30) gevşek (sıkıştırılmamış) asfalt karışımının 4 saat 135 C'de hava sirkülasyonlu etüvde kısa dönem yaşlandırılmasını; kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin daha sonra sıkıştırılarak numunelerin 120 saat boyunca 85 C'de uzun dönem yaşlandırılmasını içermektedir. NCHRP 09-54 yönteminde, AASHTO R30 standart yöntemi ile aynı kısa dönem yaşlandırma koşulu uygulanmaktadır (135 C'de 4 saat). Uzun dönem yaşlandırmada ise mevcut yöntemden farklı olarak sıkıştırılmış asfalt numuneleri yerine gevşek karışım kullanılmış ve yaşlandırma işlemi 95 C'de gerçekleştirilmiştir. Tablo 4'te belirtilen yaşlandırma süresi için aşağıdaki denklem (Denklem 1) kullanılmıştır:

$$t_{oven} = \sum_{i=1}^N D * A * \exp\left(-\frac{Ea}{R * T_i}\right) / 24 \quad (1)$$

Burada toven = arazi yaşlanmasını yansıtmak için 95 C'de gerekli etüv yaşlandırma süresi (gün), D = derinlik düzeltme faktörü, A = frekans faktörü, Ea = aktivasyon enerjisi, R = evrensel gaz sabiti (bu değer 0.0831 kJ / mol.k olarak alınmıştır.), Ti = ilgilenilen saatte ilgilenilen derinlikteki kaplama sıcaklığını (K) ifade etmektedir.

Bu çalışmada, 20 mm derinlik dikkate alınmış, derinlik düzeltme faktörü (D), frekans faktörü (A) ve aktivasyon enerjisi (Ea) Tablo 5'ten elde edilmiştir.

Tablo 5. İklimsel yaşlanma indeksi katsayıları [11].

Kaplama Tabakası	Derinlik Düzeltme Faktörü (D)	Frekans Faktörü (A)	Aktivasyon Enerjisi (Ea)
Aşınma tabakası (6 mm)	1,0000	1,40962	13,3121
20-mm derinlik	0,4565	1,40962	13,3121
Daha derindeki tabakalar	0,2967	1,40962	13,3121

Kaplama sıcaklığı (T_i), Witczak [12] tarafından geliştirilen aşağıdaki denklem (Denklem 2) ile belirlenmiştir.

$$T_i = T_a * \left[1 + \frac{1}{z+4} \right] - \frac{34}{z+4} + 6 \quad (2)$$

T_i = saatlik kaplama sıcaklığı (°F), T_a = saatlik hava sıcaklığı (°F), z = kaplama yüzeyinin altındaki derinlik (Bu değer 20 mm derinliğe karşılık gelen 0,79 inç olarak alınmıştır).

T_i 'nin hesaplanmasında, meteorolojik parametreleri eksiksiz ve temsil gücü iyi olan İzmir'in 4 ana ilçesi (Dikili, Aliağa, Menemen, Buca) üzerinden istasyon noktaları seçilmiş olup, 2015, 2016, 2017 ve 2018 yılları için saatlik hava sıcaklığı değerleri (T_a) Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. 4 yıllık süre, daha önce belirtildiği gibi NCHRP 09-54 yönteminin tavsiyesine dayanmaktadır. 1 numaralı denklemde tüm değişkenlerin değerleri belirlendikten sonra t_{oven} değerleri İzmir'in 4 ana ilçesi bazında hesaplanmıştır (Tablo 6).

Tablo 6. İzmir ili 4 ana ilçe için t_{oven} değerleri.

İlçe/Yıllar	2015 (günler)	2016 (günler)	2017 (günler)	2018 (günler)	Toplam (günler)
Dikili	1,035	1,043	1,037	1,057	4,17
Aliağa	1,039	1,052	1,039	1,062	4,19
Menemen	1,039	1,052	1,039	1,063	4,19
Buca	1,038	1,052	1,040	1,061	4,19

Tablo 6'da belirtildiği gibi NCHRP 09-54 yöntemi dahilinde laboratuvar ortamında uzun dönem yaşlandırma işlemi için ortalama 4 günlük sürenin kullanılması uygundur.

2.3 Dolaylı çekme mukavemeti testi

Laboratuvarda hazırlanan numunelerin kısa ve uzun dönem yaşlanma durumunu değerlendirmek için, basit olması ve numunelerin kolaylıkla üretilmesi sebebiyle en çok uygulanan testlerden biri olan çekme mukavemeti (ITS) testi yapılmıştır [13]. Laboratuvarda hazırlanan silindirik asfalt numuneleri yükleme çerçevesine yerleştirildikten sonra yük, düşey düzlemde (51 mm / dakika yükleme hızında) uygulanmış ve numunenin yatay yönünde oluşan gerilme yükü ölçülmüştür. Numunenin dayanabildiği en yüksek yük Marshall cihazı tarafından otomatik olarak belirlenmiştir. Malzemelerin ITS değerleri aşağıdaki denklem (Denklem 3) kullanılarak elde edilebilir.

$$St = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D} \quad (3)$$

S_t = Dolaylı çekme mukavemeti (ITS), kPa.

P = Uygulanan maksimum yük, N.

t = Numunenin kalınlığı, mm.

D = Numunenin çapı, mm.

Laboratuvarda hazırlanan asfalt karışımlarının yaşlanma etkilerini değerlendirmek için ITS değerlerine ek olarak, yaşlanma indeksleri de araştırılmıştır. Kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin ITS değerleri ile yaşlandırılmamış numunelerin ITS değerleri arasındaki oran kısa dönem yaşlanma indeksi (SAI) ve uzun dönem yaşlanma indeksi (LAI) olarak hesaplanmıştır.

3. Deneysel Çalışma Sonuçları

3.1 Marshall tasarım yöntemi sonuçları

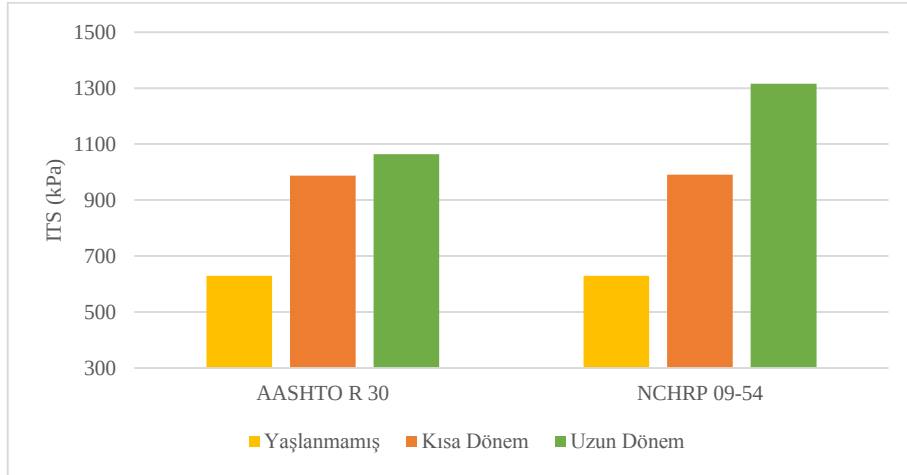
Deneysel çalışmaların sonucu olarak, %4 hava boşluğuna karşılık gelen optimum bitüm içeriği %4,8 (agrega ağırlığına) olarak tespit edilmiştir. Tablo 7'de belirtildiği gibi, %4 hava boşluğu seviyesine karşılık gelen tüm parametreler şartname sınırları içerisinde.

Tablo 7. Marshall testi sonuçları.

Parametre	Sonuç	Şartname
Optimum Bitüm içeriği (%)	4,8	4-7
Stabilite (kg)	1135	900 (min)
Akma (mm)	2,60	2-4
Asfaltla dolu boşluk VFA (%)	71	65-75
Mineral agregata içerisindeki boşluk VMA (%)	14	14-16

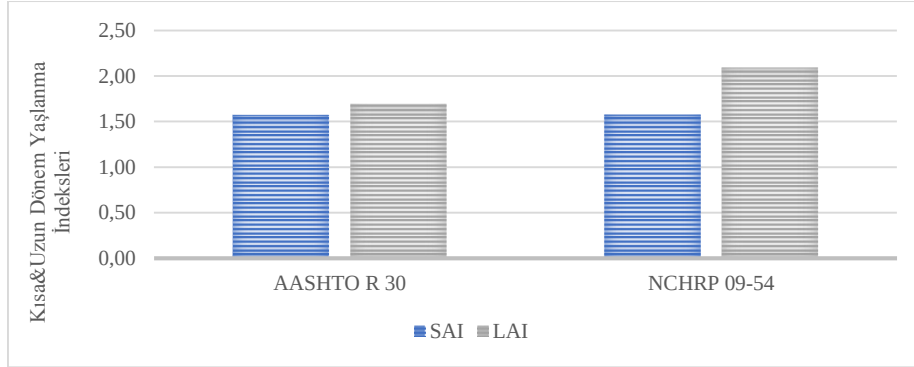
3.2 Dolaylı çekme mukavemeti testi sonuçları

Yaşlandırılmamış, kısa dönem yaşlandırılmış ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin ITS değerleri Şekil 1'de sunulmuştur. Sonuç olarak, her iki yöntemde de uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin ITS değerleri kısa dönem yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış numunelerin ITS değerlerinden daha yüksektir. Dolaylı çekme gerilmesi değerlerindeki artış, yaşlanmanın etkisinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Her iki yöntemin de kısa dönem yaşlandırma koşulları aynı olduğu için, beklenildiği gibi ITS değerleri de aynıdır. Ancak uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin ITS değerleri incelendiğinde NCHRP 09-54 yönteminin daha yüksek ITS değerlerine sebep olduğu söylenebilir.



Şekil 1. Dolaylı çekme deneyi sonuçları.

Kısa dönem yaşlandırılmış ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin ITS değerleri ile yaşlandırılmamış numunelerin ITS değerleri arasındaki oran kısa dönem yaşlanma indeksi (SAI) ve uzun dönem yaşlanma indeksi (LAI) olarak hesaplanmış ve Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. Yaşlanma indeksi sonuçları.

Yaşlanma indeksi değerlerine bakıldığında, değer ne kadar düşük olursa, bitümlü karışımın yaşlanma etkisine o kadar az maruz kaldığı söylenebilir. AASHTO R30 ve NCHRP 09-54 yöntemleri, kısa dönem yaşlandırma koşulları aynı olduğu için beklenildiği gibi benzer kısa dönem yaşlanma indeksi değerleri göstermiştir. Uzun dönem yaşlanma indekslerine bakıldığında ise, NCHRP 09-54 yöntemi ile yaşlandırılmış numunelerin, AASHTO R30 yönteminden daha yüksek bir sıcaklıkta ve daha kısa bir sürede koşullandırılmaları sebebiyle belirgin seviyede daha yüksek yaşlanma indeksi değerine sahip oldukları gözlenmiştir. Bu artıştan yola çıkılarak NCHRP 09-54 yönteminde yaşlanma etkisinin daha fazla olduğu söylenebilir.

4. Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu çalışmada, mevcut standart (AASHTO R30) ve NCHRP 09-54 laboratuvar yaşlandırma yöntemleri dolaylı çekme mukavemeti ve yaşlanma indeksi parametreleri göz önünde bulundurularak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur:

- ✓ İncelenen yaşlandırma yöntemleri için, numunelerin dolaylı çekme mukavemeti (ITS) değerleri, yaşlandırma süreleri arttıkça yükselmektedir. ITS'deki artış asfaltın, daha sert, kırılğan ve yorulma çatlaklarına daha duyarlı hale geldiğinin bir göstergesidir. Dolayısı ile ITS değerinin yüksek olması istenmeyen bir durumdur. Ayrıca, daha yüksek ITS'e sahip numunelerin yorulma ömrü belirli bir gerilme seviyesinde azalmaktadır. Yaşlanma, sertliği artırarak asfalt malzemelerinin çatlaklara karşı duyarlılığını arttırdığından, yaşlandırılmış karışımlarda çatlak oluşumu gözlenme olasılığının, yaşlandırılmamış karışımlardan daha yüksek olması beklenmektedir.
- ✓ Hava sirkülasyonlu etüvde kısa dönem yaşlandırılmış numuneler arasında, her iki yönteme ilişkin kısa dönem yaşlandırma koşullarının önemli bir farklılık göstermemesi nedeniyle, araştırılan yöntemlerin her ikisi de benzer ITS değerleri vermiştir. Numunelerin yaşlanma özelliklerinin daha iyi değerlendirilebilmesi için hesaplanan kısa ve uzun dönem yaşlanma indekslerinden elde edilen bulgular ışığında, daha düşük yaşlanma indeksi değerlerine sahip karışımlarda yaşlanmanın daha az etkisi olduğunu düşünmek mümkündür.
- ✓ NCHRP 09-54 yönteminde ise ilgili meteorolojik parametreler toplanarak hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda İzmir bölgesi için uzun dönem yaşlandırma süresi 4 gün olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, uzun dönem yaşlandırma koşulu olarak gevşek numunelerin 4 gün 95 C’de yaşlandırılması, sıkıştırılmış numunelerin 85 C’de 120 saat (5 gün) yaşlandırılmasına alternatif olarak önerilebilir. Hangi yöntemin daha efektif sonuçlar verdiğini görebilmek adına aynı gradasyona sahip araziden alınan belirli bir hizmet ömrüne sahip (yaşlanmış) numuneler ile laboratuvar ortamında yaşlandırılan numunelerin ITS değerlerinin belirlenip karşılaştırılması önerilmektedir.

Teşekkür

Yazar, bu çalışmanın gerçekleşmesine katkısından dolayı Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne teşekkür etmektedir.

Kaynaklar

- [1] Bell CA, Wieder AJ, Fellin MJ. Laboratory ageing of asphalt-aggregate mixtures: field validation. Washington DC: Strategic Highway Research Program, 1994.
- [2] Croney D. The Design and Performance of Road Pavements. London, England: Her Majesty's Stationery Office, 1977.
- [3] Dow AW. Asphalt experiments at Washington. Engineering News Record (ENR) 1903; 47(18): 18-25.
- [4] Traxler RN. Relation between Asphalt Composition and Hardening by Volatilization and Oxidation. American Association of Asphalt Paving Technologist (AAPT) 1961; 30: 359-377.
- [5] Traxler RN. Durability of Asphalt Cements. Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT) 1963; 32: 44-58.
- [6] Petersen JC. Chemical Composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability: State of the Art. Transportation Research Record (TRR) 1984; 999: 13-30.
- [7] AASHTO R 30-02. "Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt (HMA)", American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington DC, 2002.
- [8] Bonaquist RF. Mix design practices for warm mix asphalt. Transportation Research Board (TRB) 2011; 691.
- [9] Martin AE. Evaluation of the moisture susceptibility of WMA technologies. Transportation Research Board (TRB) 2014; 763.
- [10] Yin F, Martin AE, Arámbula-Mercado EDITH, Newcomb D. Short-Term Laboratory Conditioning of Asphalt Mixtures. Relationships of Laboratory Mixture Aging to Asphalt Mixture Performance Transportation Research Board (TRB) 2018; 21.
- [11] Kim YR, Castorena C, Elwardany MD, Rad FY, Underwood S, Gundla A, Gudipudi P, Farrar MJ ve diğerleri. Long-term aging of asphalt mixtures for performance testing and prediction. Transportation Research Board (TRB) 2018.
- [12] Witczak MW. Design of full-depth asphalt airfield pavements. Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements; 11-15 September 1972; London, England.
- [13] Yılmaz M, Kök BV, Yalçın E. Farklı Katkılar İçeren Bitümlü Sıcak Karışımların Yorulma Ömürlerinin İncelenmesi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2017; 29(2): 173-183.

Stiren-Butadiyen-Stiren İçeriğinin Bitümün Kırılmış Yüzey Morfolojisine Etkilerinin İncelenmesi

Derya KAYA ÖZDEMİR

Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye
d.kaya@deu.edu.tr

(Geliş/Received: 06/02/2020;

Kabul/Accepted: 14/08/2020)

Öz: Ülkemizde ve dünyada en sık kullanılan polimer katkısı Stiren-Butadiyen-Stiren (SBS), bitümlü malzemelerde moleküller arası çapraz bağlanmaları oluşturmakta ve bu da bitüm yapısında yapısal, kimyasal, reolojik ve morfolojik vb. farklılıklara yol açmaktadır. Çalışma kapsamında, Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) kullanılarak Polimer Modifiye Bitümün (PMB) kırılmış yüzey morfolojilerinin farklı oranlarda SBS kullanımıyla değişimleri incelenmiştir. Farklı oranlarda SBS kullanımının bitüm içerisindeki şişme oranları Floresan mikroskop (FM) ve Image J Programı kullanılarak araştırılmış ve sonuçlar bitümün çapraz bağ oluşumları ile ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. Ek olarak, numuneler Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFO) deneyi ve Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) kullanılarak uzun dönem yaşlanmaya maruz bırakılmış, moleküller arası bağların zarar görmesi sağlanmış ve bunun yüzey morfolojik görüntüler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, SBS miktarının %5'den fazla kullanılması durumunda daha yüksek malten içeriğindeki bitümlerin kullanılması gerektiği ve PMB numunelerinin saf bitüme oranla çapraz bağlanmalardan kaynaklı olarak daha pürüzlü kırılmış yüzey morfolojisine sahip olduğu bulunmuştur. Uzun dönem yaşlandırılan numunelerde ise, moleküller arası bağların zayıflamasından kaynaklı olarak daha pürüzlü kırılmış yüzeyler elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Polimer modifiye bitüm, SBS, morfoloji, SEM, Floresan optik mikroskop.

Investigation of the Effects of Styrene-Butadiene-Styrene Content on Bitumen Cracked Surface Morphology

Abstract: Styrene-Butadiene-Styrene (SBS), which is the most commonly used polymer in Turkey and all around the world, creates cross-linking between molecules and it causes many differences in bitumen's structural, chemical, rheological and morphological characteristics. Within the scope of the study, the changes of Polymer Modified Bitumen (PMB) cracked surface morphology depending on different content of SBS usage were investigated using the Scanning Electron Microscope (SEM). In addition, the volumetric changes of altering SBS content in the PMB is examined by Fluorescent optical microscopy (FM) and Image J Program. The results are investigated with the cross-linking occurrence due to the SBS modification. In addition, samples were subjected to long-term aging using Rotational Thin Film Oven (RTFO) Test and Pressure Aging Vessel (PAV), in order to damage the molecular internal bonds and the effects of aging on cracked surface morphological images are examined. As a result, it is possible to say that, higher amount of maltene fraction is required to use more than 5% of SBS content. PMB samples have more rough cracked surface morphology due to cross-linking compared to neat bitumen. Long term aged samples had more rough cracked surfaces due to the damages in intermolecular bonds.

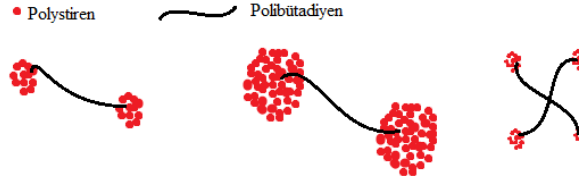
Key words: Polymer Modified Bitumen, SBS, morphology, SEM, Fluorescent optic microscopy.

1. Giriş

Bitüm, ısıtıldığında sıvı hale gelen ancak oda sıcaklığında katı halde bulunan termoplastik davranışa sahip kompleks organik moleküllerin (temel Hidrokarbon, minör Oksijen, Nitrojen, Kükürt) birleşiminden oluşan bağlayıcı bir malzemedir. Bitüm ham petrolden elde edilir ve ayrıca maltenler (Doymuş yağ + Aromatik + Reçineler) ve Asfaltenlerden oluşmaktadır (DARA) [1-4]. Asfaltenler, yüksek polar malzemeler olarak kabul edilir ve diğer bileşenlerle karşılaştırıldığında en yüksek moleküler ağırlığa sahiptirler ve bitümün elastik davranışından sorumludurlar [5]. Maltenler ise kauçuklar veya polimerler tarafından emilen ve bitümün viskoz davranışından sorumlu olan bileşenlerdir [6].

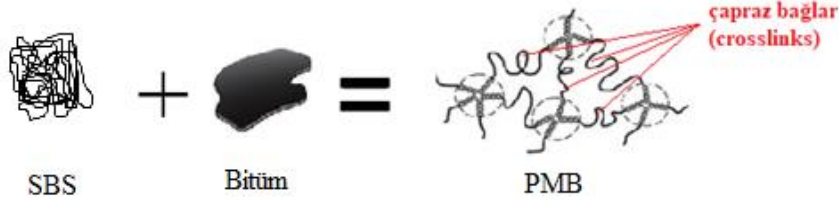
* Sorumlu yazar: d.kaya@deu.edu.tr. Yazarın ORCID Numarası: 0000-0003-1517-9405

Günden güne ilerleyen asfalt teknolojisi ile birlikte istenilen özelliklerde asfalt kaplaması üretebilmek mümkündür. Bu sebeple, dünyanın birçok yerinde olduğu gibi Türkiye’de de, kullanılacağı bölgenin koşullarına göre asfalta istenilen özellikleri kazandıran polimer katkıları sıkça uygulanmaktadır. Bitümün polimer katkıları ile modifikasyonu sonucunda oluşan Polimer Modifiye Bitüm (PMB), asfaltın mekanik ve termal özelliklerini iyileştirmek, bakım ve onarım masraflarını düşürmek gibi birçok avantajı sayesinde uzun yıllardır katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır [3, 7-10]. Stiren-Butadiyen-Stiren (SBS), bitüm gibi termoplastik malzemelerle kullanılabilen elastomerik bir polimer katkısıdır. SBS, düşük sıcaklıklarda çatlama direncini, yüksek sıcaklıklarda ise tekerlek izi direncini artırması sayesinde PMB teknolojisi Türkiye’de ve dünyada en yaygın kullanılan kopolimerlerden biridir [11-17]. SBS esnek polibütadien (PB) matrisinde (sürekli faz) bulunan sert polistiren (PS) domenlerinden (dağılmış faz) meydana gelen Stiren-Butadien triblok zincirlere sahip kopolimerlerdir [18] (Şekil 1).



Şekil 1. Farklı oranlarda PS ve PB içeren SBS polimerlerinin şematik gösterimleri.

SBS kopolimerinin polibütadien matrisi bitümün malten bileşenlerini emerek orijinal hacminin 9-10 kata kadar şişmesine sebep olmaktadır. PB blokları bitümün doymuş yağ bileşenleri, PS blokları ise bitümün aromatik bileşenleri ile benzer çözünürlük parametrelerine sahip olmalarından dolayı tepkimeye girerek şişerler [3, 6, 19]. Malten / asfalt oranı, modifiye asfaltın SBS ile modifikasyonu sırasında önemli bir parametredir [20]. Bitüm içeriğindeki malten oranının, polimer ile daha iyi bir işlenebilirlik yaratması açısından belirli bir değer aralığında olması gerekmektedir. SBS'nin bitüm ile karıştırılmasıyla, polistiren (PS) uç blokları üç boyutlu bir ağ oluşturarak fiziksel olarak çapraz bağlanırlar (Şekil 2). Bu çapraz bağlar, SBS miktarı, bitüm özellikleri ya da stiren/butadien oranı gibi birçok parametreye doğrudan bağlıdır [21].



Şekil 2. PMB içeriğinde oluşan çapraz bağların gösterimi

PMB içeriğindeki katkı türleri ve miktarları bitüm fazı içeriğindeki çapraz bağ dağılımlarını etkilemekte ve bu durum Taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenebilmektedir [22]. Önceki çalışmalar göstermiştir ki, saf bitümün kırılan yüzeyinin SEM altındaki morfolojik görüntüleri pürüzsüz, homojen ve devamlıdır [23]. Polimer katkılı numunelerde polimer ve bitüm arasında oluşan çapraz bağlar ile birlikte saf bitüme kıyasla daha fazla bağ bulundurdıkları için, PMB numuneleri kırılma durumunda daha pürüzlü yüzey sağlamaktadırlar [24]. Bu bilgiye dayanarak, farklı miktarda polimer içeren bitümlerin, içeriklerindeki bağ miktarları göz önünde bulundurulduğunda, yüzey morfolojilerinin de değişken olmasını beklemek mümkündür.

Kumar ve arkadaşları Hindistan’da 2016 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada, farklı penetrasyon sınıfına ait bitümler kullanılarak SBS kopolimerinin bitüm fazı içerisinde dağılımı ve farklı bitüm sınıflarının bu dağılım üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bitümün penetrasyon sınıfının artması ile yüzey morfolojisinin pürüzlülüğü azalmaktadır. Buna sebep olarak, penetrasyon sınıfının artmasıyla birlikte bitümlü malzemelerin viskoz davranışının artmasını ve kırılma yüzeylerinin de bu oranda daha hızlı toparlanmasını göstermek mümkündür. Aynı çalışmada, daha yüksek penetrasyon sınıfına ait bitümün SBS ile polimerizasyonu sonucunda daha pürüzlü bir yüzey morfolojisine sahip olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, yüksek penetrasyon sınıfına ait numuneler içeriğinde daha yüksek aromatik bileşen içermekte, bu da SBS ile daha çok tepkimeye girmesini sağlamaktadır. Böylece, SBS hacmindeki artış kırılma yüzeylerinin daha pürüzlü olmasını sağlamaktadır [25].

Bitümlü numunelerin yüzey morfolojisini etkileyen bir diğer parametre de malzemelerin yaşlanma özellikleridir. Kırılma çizgileri, malzemenin zayıf noktalarını, yani moleküllerin bağlanma noktalarını takip etmektedir. Bu durumda, yaşlanmanın sonrasında bağları zarar görmüş numunelerin kırılmalarının ardından yüzey morfolojilerinin de daha pürüzlü olduğu görülmüştür [26].

Çalışma kapsamında, PMB üretiminde farklı oranlarda (%4-5-6) SBS kullanımının ve PMB içeriğinde oluşturduğu çapraz bağların etkilerinin, numunelerin kırılmış yüzey morfolojileri üzerindeki değişimleri SEM kullanılarak araştırılmıştır. Ayrıca PMB içeriğindeki nihai şişen SBS hacminin oluşan bağ yapıları üzerindeki olası etkileri, floresan optik mikroskop ve görüntü işleme teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Son olarak, numuneler Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFO) Deneyi ve Basıncılı Yaşlandırma Kabı (PAV) kullanılarak uzun dönem yaşlanmaya tabi tutulup moleküler bağlarının zarar görmesi sağlanmış ve bu durumun kırılmış yüzey morfolojisi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

2. Deneysel Çalışmalar

2.1. Malzemeler

Deneysel çalışmalarda TÜPRAŞ Aliağa rafinerisinden temin edilen 50/70 penetrasyon sınıfı bitüm kullanılmıştır. Kullanılan bitüme ait DARA (doymuş yağ, aromatikler, rezin ve asfalten) Analizi sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Ayrıca, saf bitüm üzerinde; penetrasyon, yumuşama noktası, özgül ağırlık, parlama noktası vb. geleneksel bitüm deneyleri ve Brookfield Dönel Viskozimetresi (RV) kullanılarak viskozite deneyi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 1. Saf bitümün DARA analizi sonucu

Doymuş Yağ (%)	Aromatikler (%)	Rezinler (%)	Asfaltenler (%)
8,76	66,37	9,84	15,03

Tablo 2. Saf bitümün geleneksel laboratuvar deney sonuçları

Deney	ASTM Standardı TS EN Standardı	Sonuçlar	Limitler
Penetrasyon (25°C; 0,1mm)	ASTM D5/D5M-13 TS EN 1426	55	50-70
Yumuşama Noktası (°C)	ASTM D36/D36M-12 TS EN 1427	49	46-54
Viskozite (135°C)	ASTM D4402/D4402M-13	412,5	-
Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) sonrası:	ASTM D 2872 TS EN 12607-1	-	-
* Kütle Değişimi (%)	-	0,04	0,5 (maks.)
* Penetrasyon Değeri	ASTM D5/D5M-13 TS EN 1426	51	50 (min.)
*Yumuşama Noktası (°C)	ASTM D 2872 TS EN 1427	54	48 (min)
Düktilite (25°C; cm)	ASTM D113-07 TS EN 13589	121	>100
Özgül Ağırlık	ASTM D70-09e1 TS EN 15326	1,03	-
Parlama Noktası (°C)	ASTM D92-12b TS 123 EN 22592	+260	230 (min)

Deneysel çalışmalarda kullanılan D 1192 SBS kopolimeri Kraton® Polimers/Hollanda’dan temin edilmiştir. Tablo 3’de SBS kopolimerine ait moleküler ağırlık değerlerini belirlemede kullanılan GPC (Jel Geçirgenlik Kromatografisi) deneyi sonuçları verilmiştir.

Tablo 3. SBS kopolimerinin moleküler ağırlık sonuçları

Mp (g/mol) Tepe moleküler ağırlık	Mn (g/mol) Ozmotik Basınç son grup analizi	Mw (g/mol) Işık saçılması	Mz (g/mol) Sedimentasyon dengesi	Mz+1 (g/mol) Ekstrüzyon değeri	Mv (g/mol) Viskozite	PD Polidispersite indeksi
162217	151970	165267	181287	205128	178424	1.087498

2.2. SBS Polimer Modifiye Bitüm Üretimi

Türkiye’de ve dünyada SBS katkılı PMB üretiminde yaygın olarak katkı oranı bitüm ağırlığının %5’i olarak kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında, karışımdaki SBS oranı değişiminin PMB hacminde SBS dağılımı ve kırılmış yüzey morfolojisine etkisini ortaya koymak amaçlandığı için %5±1 SBS içeren PMB numuneleri incelenmiştir. Polimer modifiye bitüm örnekleri, bitüm ile farklı oranlardaki (%4, 5 ve %6) SBS kopolimerleri sabit karıştırma koşulları (sıcaklık $175 \pm 5^\circ\text{C}$, karıştırma süresi 30 dk. ve karıştırma hızı 2000 rpm) altında üretilmiştir. Son olarak numuneler, yaşlanmanın kırılmış yüzey morfolojik görüntüler üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi amacıyla önce kısa dönem ardından ise uzun dönem yaşlandırma işlemine maruz bırakılmışlardır.

Bitümlü malzemelerde yaşlanma, bitümün karıştırma ve sıkıştırma süresi ya da hizmet ömrü boyunca gerçekleşmektedir. Yaşlanma esas olarak iki aşamada oluşmaktadır. Malzemenin maruz kaldığı ilk yaşlanma, kısa süreli yaşlandırma olarak adlandırılır ve karıştırma sıkıştırma süresince asfaltta uçucu madde kaybı ile ilişkilidir. İkinci tür yaşlanma ise, uzun süreli yaşlandırma olarak adlandırılan malzemenin servis ömrü süresince kademeli olarak oksidasyona uğramasıyla ilişkilidir [27]. Kısa dönem yaşlanma laboratuvar ortamında Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) ile uzun dönem yaşlanma ise Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) kullanılarak simüle edilebilmektedir [27].

RTFOT (ASTM D2872-12, 2012): Bu deney, 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet cam şişe kullanılarak yapılmaktadır. Her bir behere 35 gram asfalt çimentosu doldurulur. Düşey ekseninde dakikada 15 devir yapacak şekilde 85 dakika süreyle döndürülmektedir. Dönme esnasında deney aletinin tabanında bulunan bir hava üfleyici yardımıyla numune kaplarına, akışı $4000 \pm 200 \text{ mL/dak.}$ olacak şekilde hava verilmektedir. Sıcaklığın etkisiyle bitüm, kapları tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmakta, hava üfleyici sayesinde de bitümün kısa dönem yaşlanması sağlanmaktadır.

PAV (ASTM D6521-05, 2005): Basınçlı yaşlandırma kabı deneyi, 50 gr. kısa dönem yaşlandırılmış bitümün 140 cm çapında kaplara boşaltılması ve bu kapların önceden ısıtılmış PAV cihazlarına yerleştirilmesi ile başlamaktadır. Sıcaklık $\pm 2^\circ\text{C}$ hassasiyete dayanarak ayarlanmalı ve kullanılacak bağlayıcının kıvama göre 90, 100 veya 110°C değerlerinden biri seçilmelidir. Deney 20 saat süreyle 2,10 MPa basınçlı hava kullanılarak uygulanmaktadır. 20 saat sonra basınç boşaltma işlemi 8-10 dakika sürecek şekilde tedricen boşaltılır. Ardından numuneler cihazdan çıkarılarak 163°C da 30 dakika etüvde tutularak içinde hapsolan hava uzaklaştırılır ve etüvden alınan numuneler DSR cihazında kullanılmak üzere saklanır. Bu şekilde bitümde uzun dönemde ortaya çıkan fiziksel ve kimyasal değişiklikler temsil edilmektedir [28].

DeneySEL sonuçlar kısmında her bir numune yaşlanma durumu ve içeriğindeki SBS miktarı göz önünde bulundurularak kısaltmalar ile anılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan kısaltmalar, malzeme yaşlanma özellikleri ile birlikte Tablo 4’de sunulmuştur.

Tablo 4. PMB ve saf bitüm numunelerinin karıştırma koşulları ve yaşlanma durumları

Numune Adı	İçeriğindeki SBS miktarı (%)	Yaşlanma durumu
%4-UA	4	Yaşlandırılmamış
%5-UA	5	Yaşlandırılmamış
%6-UA	6	Yaşlandırılmamış
NB-UA	*saf bitüm	Yaşlandırılmamış
%4-A	4	Uzun dönem yaşlandırılmış
%5-A	5	Uzun dönem yaşlandırılmış
%6-A	6	Uzun dönem yaşlandırılmış
NB-A	*saf bitüm	Uzun dönem yaşlandırılmış

2.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

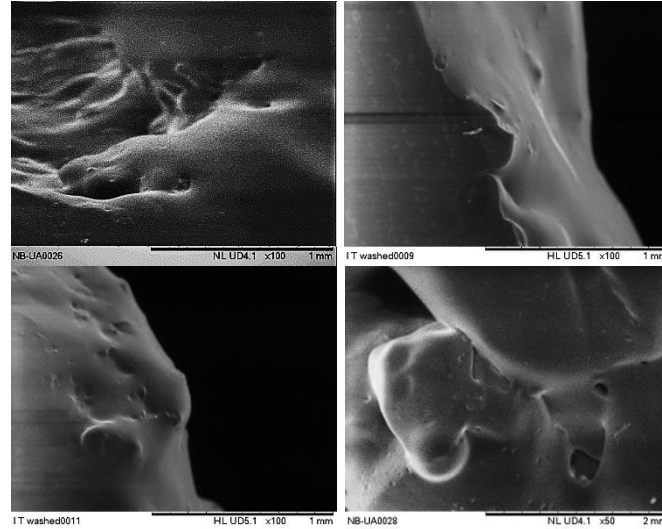
Saf ve SBS katkılı bitümlerin kırılmış yüzey morfolojileri yüksek vakumlu (5kV), Hitachi (Tokyo, Japonya) marka masaüstü tipi Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılarak elde edilmiştir. Bitümlü malzemelerin yüzey morfolojisinin SEM kullanılarak incelenebilmesi için sıvı nitrojen yardımıyla soğutulup yüzey blok numunenin kırılması sağlanmalıdır. Böylece, saf bitüm ya da PMB numunelerinin zayıf bağlanma yaptığı yerlerin incelenmesi mümkündür. Numunelerin kırılma yüzeylerini morfolojik görüntülerini elde edebilmek için numunelerin sıvı nitrojen içerisinde yaklaşık 1 dakika bekletilerek donması sağlanmış ve en zayıf noktadan kopma eğiliminde olan donmuş PMB numunelerinin yüzey morfolojileri kıyaslanmıştır. Numune hazırlama aşamasında sıvı nitrojenin kullanılmasının sebebi, numunenin yüzey morfolojisini elde ederken herhangi bir plastik deformasyondan kaçınma gereksinimidir.

2.4. Optik Mikroskop

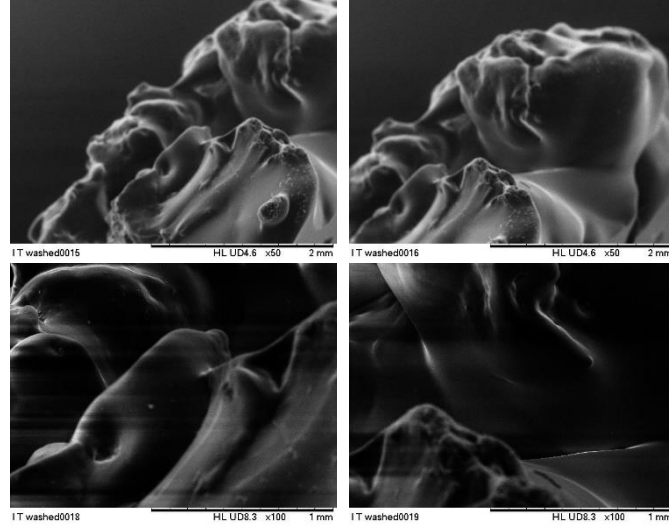
Deneyisel çalışmalar süresince PMB numunelerinin morfolojik görüntüleri Leica DMEP Floresan Optik Mikroskobu kullanılarak gözlemlenmiştir. Görüntülerin kaydedilmesi mikroskoba bağlı Nikon Coolpix 4500 kamera ile $\times 40$ büyütme kullanılarak sağlanmıştır. Ayrıca, bitüm morfolojisinin en etkili şekilde elde edilmesini sağlayan mavi filtre atışmanı da kullanılmıştır. Elde edilen görüntüler Image J programı kullanılarak işlenmiş ve farklı oranda SBS kopolimerinin bitüm fazındaki dağılımı araştırılmıştır. Numune hazırlama, PMB'lerin morfolojisini incelemede önemli bir rol oynayabilir. Yeterli miktarda bitüm (3-5 g) cam bir lam üzerine yerleştirilerek, gerekli inceliğe ulaşabilmesi amacıyla, 100°C sıcaklıklı ısıtma tablasında 1 dakika bekletilerek numune hazırlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Önceki çalışmalar farklı örnek hazırlamadan kaynaklanan morfolojilerdeki farklılıkları ortaya çıkabileceğini göstermektedir [29,30]. Bu sebeple, kıyaslama yapılabilmesi açısından, her bir numune aynı hazırlama koşullarına maruz bırakılmıştır.

3. Deneyisel Sonuçlar ve Tartışma

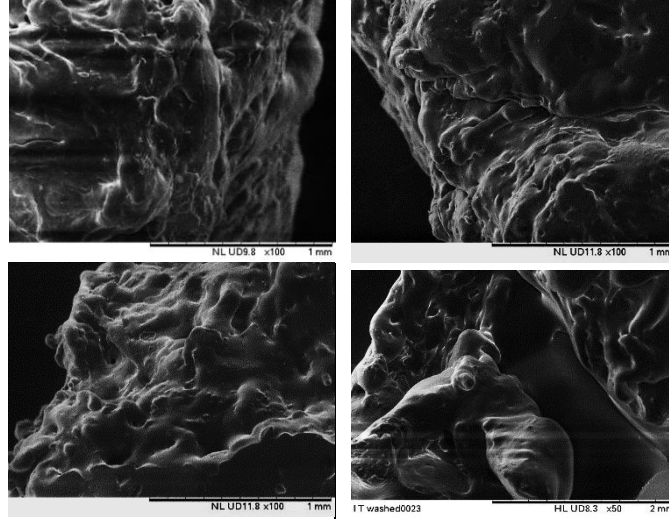
Saf bitüm ve farklı oranlarda SBS kullanılarak hazırlanan PMB numunelerinin kırılmış yüzey morfolojik görüntüleri SEM kullanılarak incelenmiş ve elde edilen görüntüler Şekil 3-6'de sunulmuştur.



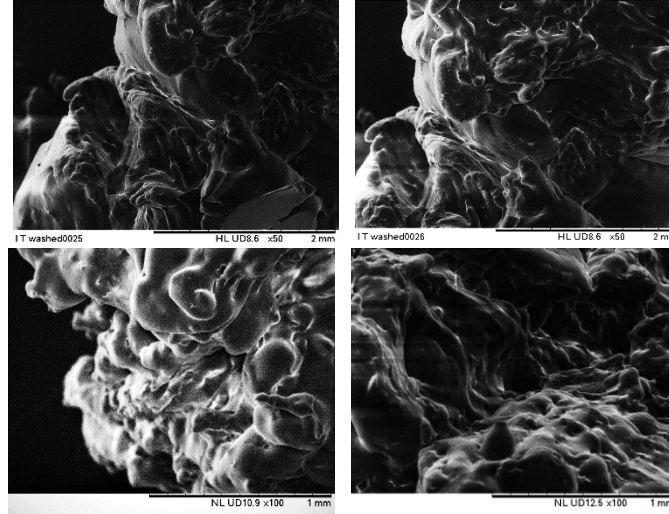
Şekil 3. Saf bitüme ait SEM ile elde edilen yüzey morfolojik görüntüleri



Şekil 4. %4-UA numunesine ait SEM ile elde edilen yüzey morfolojik görüntüleri

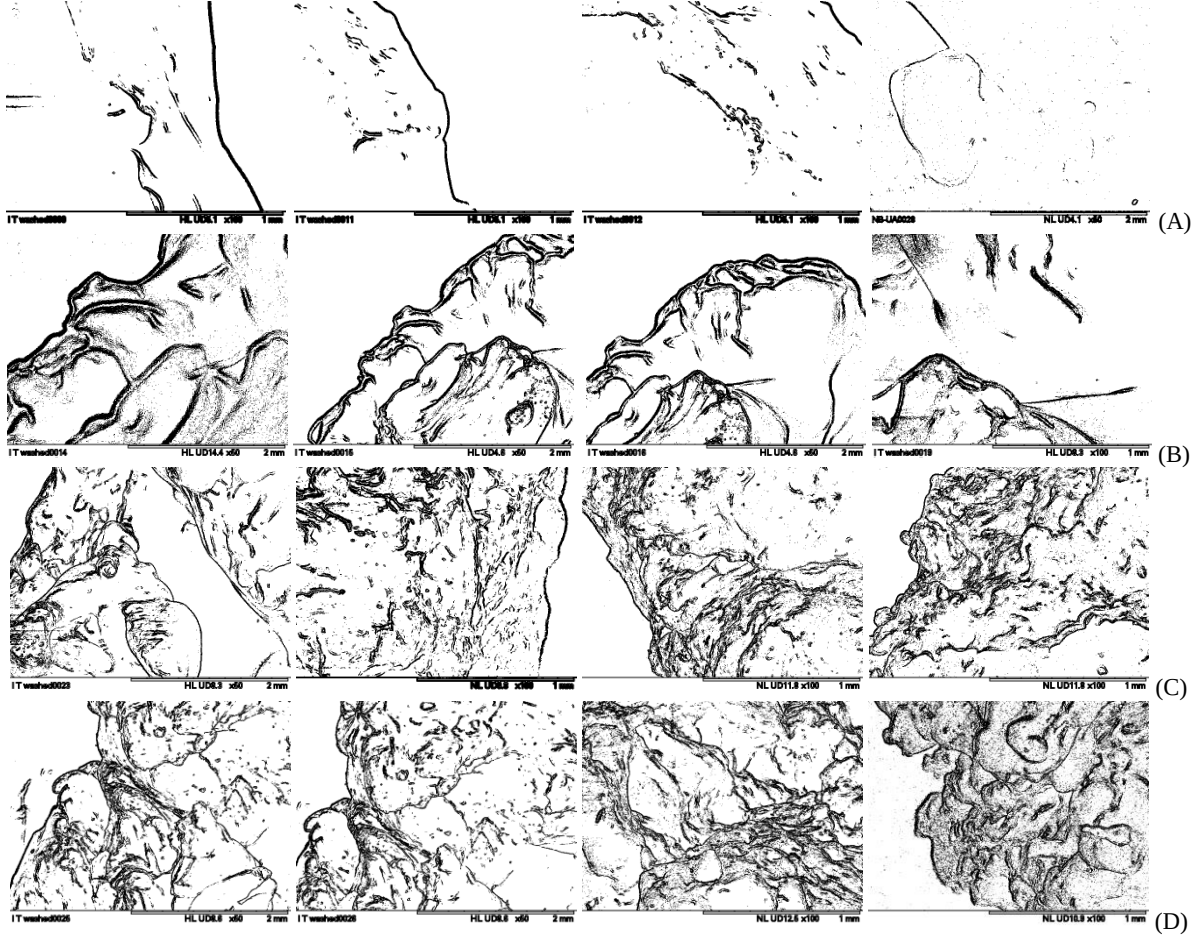


Şekil 5. %5-UA numunesine ait SEM ile elde edilen yüzey morfolojik görüntüleri



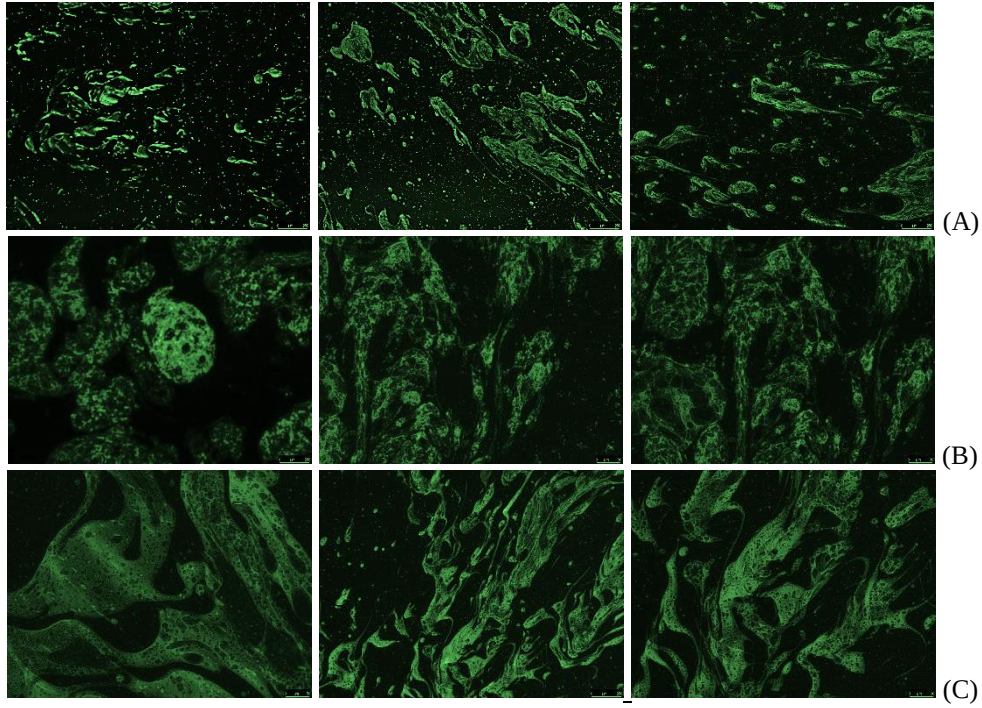
Şekil 6. %6-UA numunesine ait SEM ile elde edilen yüzey morfolojik görüntüleri

Şekil 3-6'dan da görülebileceği gibi, SBS katkılı PMB numunelerinin kırılmış yüzey morfolojileri, modifikasyon sonrasında meydana gelen çapraz bağlar sebebiyle, saf bitüme oranla daha pürüzlüdür. Benzer sebeple, PMB içeriğindeki SBS oranının artması oluşan çapraz bağ miktarını arttırmış ve bu da daha pürüzlü yüzey oluşumuna sebep olmuştur. Ancak, %5-UA numunesi ve %4-UA numunelerinde meydana gelen pürüzlülük artışı %5-UA ve %6-UA numunelerinde artışa oranla daha azdır. Bunu daha iyi görebilmek amacı ile her bir numuneye ait görseller ImageJ programında incelenmiş ve numunelerin kırılma noktalarının köşeliliklerini gösteren görseller Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Saf ve PMB numunelerine ait SEM ile elde edilen ikili yüzey morfolojik görüntüleri
(A) NB (B) %4-UA (C) %5-UA (D) %6-UA

%6-UA numunesinin %5-UA numunesine göre çok belirgin olmayan pürüzlülük artışına sebep olması şu bilgi ile aydınlatılabilir; %5 oranında SBS kopolimeri kullanımı asfalt içeriğindeki belirgin miktar malten bileşenlerini emerek şiştiği için daha fazla SBS kullanımında bitüm içeriğinde yeterince şişmesini sağlayacak malten içeriği bulunmamaktadır [15]. Bu sebeple SBS miktarındaki artış, %5 SBS kullanımının artmasıyla doğrusal bir şekilde artmamaktadır. Bu da oluşan çapraz bağ miktarını etkilemekte ve böylece; SEM incelemesi için oluşturulan yüzeylerdeki pürüzlülükteki artış miktarı daha düşük oluşmaktadır. PMB içeriğindeki SBS kopolimerinin bitüm malten fraksiyonlarını emerek şişmesi floresan mikroskop altında gözlemlenebilmektedir [31]. Bu sebeple, farklı içerikte SBS içeren PMB numuneleri floresan mikroskop ile incelenmiş ve her bir numuneye ait elde edilen morfolojik görüntülerden bazı örnekler Şekil 8'de sunulmuştur. Elde edilen görseller Image J programında işlenmiş ve kırılma yüzeylerini meydana getiren çapraz bağ miktarı ile doğrudan ilgili olan PMB içeriğindeki SBS hacimleri hesaplanmıştır ve veriler Tablo 5'de verilmiştir. Tablo 5'de belirtilen "nihai SBS miktarı" ifadesi bitüm ağırlığının %4-5 ve 6'sı olacak şekilde eklenen SBS polimerinin bitümün yağlı bileşenlerini emmesi sonucu elde edilen PMB içeriğindeki SBS miktarıdır.



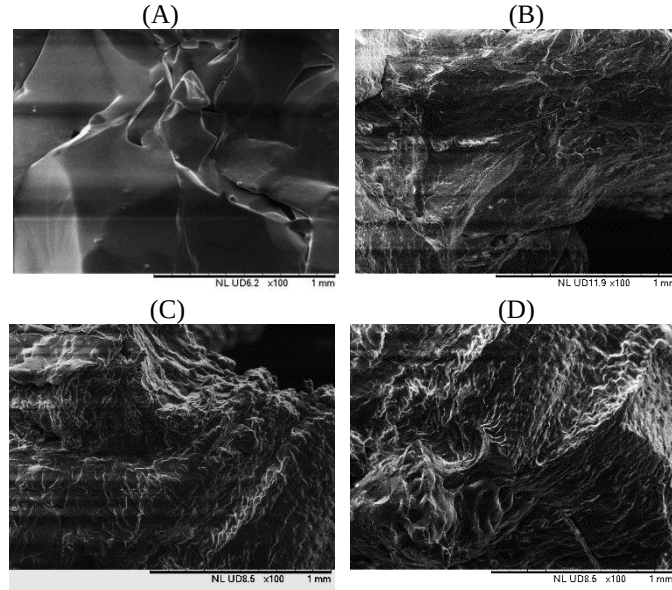
Şekil 8. PMB numunelerine ait Floresan optik mikroskop ile elde edilen morfolojik resimler
(A) %4-UA (B) %5-UA (C) %6-UA

Tablo 5. PMB içerisindeki SBS oranı ve şişme miktarları

Numune Adı	PMB içerisindeki SBS dağılımı (%)	SBS şişme oranı (kullanılan SBS oranı/nihai SBS miktarı)
%4-UA	32,8	8,02
%5-UA	42,6	8,52
%6-UA	43,71	7,28

Şekillerden de görülebileceği gibi, PMB numunelerinin morfolojik görüntüleri, farklı oranda SBS kopolimeri kullanılması ile değişmektedir. Ancak SBS oranının %5'ten %6'ya çıkarılması FM altında gözlemlenebilen PMB içeriğindeki SBS hacminde çok büyük bir artışa sebep olmamaktadır. Tablo 4'te de sunulduğu gibi %4 SBS oranının %5'e çıkarılması, bitüm içeriğindeki SBS hacminde %10 gibi bir artışa sebep olmaktadır. Bu durum bitümün içeriğindeki malten miktarının emilerek SBS'in başlangıç hacminin 8-9 katına kadar şişmesine olanak verecek olması ile açıklanabilir. Fakat %6 SBS miktarının kullanılması, SBS'in ancak 7,28 katına kadar şişmesine olanak vermektedir. Çünkü bitüm içeriğindeki malten miktarı %6 SBS'in 8 katına şişmesini sağlayacak kadar yeterli değildir. Sonuç olarak, PMB içeriğindeki nihai SBS hacmi karışımın yaklaşık olarak %43'ünü oluşturmaktadır. Diğer bir deyişle, %5'ten daha yüksek oranda SBS kullanılsa bile, PMB içeriğindeki şişme miktarı azalacağı için buna bağlı olarak PMB içeriğindeki nihai SBS hacmi ciddi oranda değişmeyebilir. Böylece darbe altında kırılarak oluşan kırılma yüzeylerini meydana getiren çapraz bağ miktarı da çok değişmeyecektir. Bu durum, SEM görüntülerindeki %6 SBS kullanılmasının yüzey morfolojisinde pürüzlülüğünün azalan miktarda artmasını açıklayabilmektedir.

Son olarak, numuneler uzun dönem yaşlandırılarak bağların zarar görmesi sağlanmış ve kırılma yüzey morfolojik görüntülerinin pürüzlülük değişimleri incelenmiştir. Bitümlü malzemeler yaşlandıkça moleküler bağları maruz kaldıkları olumsuz hava koşulları ve trafik yükleri ile zayıf bağlara sebep olmaktadır. Bu sebeple, içeriğinde daha fazla bağ bulundurulmuş numunelerin daha pürüzlü yüzey morfolojilerine sahip olmasını beklemek mümkündür. Uzun dönem yaşlandırılmış saf bitüm ve farklı oranlarda SBS içeren PMB numunelerine ait görseller Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 9. (A) NB-A, (B) %4-A, (C) %5-A ve (D) %6-A numunelerine ait yüzey morfolojik görüntüleri

Şekil 9’da görüldüğü gibi, görüntüler beklenen doğrultuda elde edilmiş ve PMB numunelerinde, saf bitüme oranla, bitüm ve SBS arasında oluşan çapraz bağ oluşumu ile meydana gelen artan bağ yapısından kaynaklı, daha pürüzlü yüzeyler elde edilmiştir. Yaşlandırılmamış numuneler ile uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin kırılmış yüzey morfolojileri kıyaslandığında ise, yaşlanmış numunelerin daha küçük derinlikte pürüzlülükler elde ettiği görülmüştür. Bunun sebebi, kırılma çizgilerinin daha zayıf bağları takip etmesi ve numunelerin yaşlandırılmasının ardından PMB içeriğindeki tüm bağların zayıflamış olmasıdır. Tablo 5’de de belirtildiği gibi saf bitüm ile çalışmada kullanılan en az polimer içeriği olan %4 SBS içeren numuneler arasında yaklaşık %33’lük bir SBS hacmi farkı varken, %4 ile %6 arasında yaklaşık %11’lik bir fark vardır. Uzun dönem yaşlandırmanın ardından çoklu karbon bileşeninden oluşan bitümün kendi bağları da zarar gördüğü için yüzey morfolojisindeki pürüzlülük artışının tek sebebi değişen SBS miktarı ile artan çapraz bağ oluşumları değildir. Ancak, SBS içeren PMB numunelerinin saf bitüme oranla daha fazla pürüzlülük oluşturduğunu söylemek mümkündür.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Çalışma kapsamında, farklı oranlarda SBS kullanımının bitüm ve SBS arasında oluşan çapraz bağ oluşumlarından kaynaklı kırılma noktalarındaki yüzey pürüzlülükleri üzerindeki etkisinin SEM ve FM kullanılarak incelenmesinin ardından elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- SEM ile yapılan incelemelerde, PMB numunelerinde, bitüm ve SBS arasında meydana gelen çapraz bağ oluşumdan kaynaklı olarak, kırılmış yüzey pürüzlülüklerinin saf bitüme oranla daha fazla olduğu görülmüştür.
- PMB içeriğindeki SBS miktarının %5’ten %6’ya çıkarılması, %4 oranından %5’e çıkarılmasına kıyasla daha az pürüzlülük artışı meydana getirmektedir. Buna sebep olarak, %5 oranında SBS kopolimeri kullanımının asfalt içeriğindeki malten bileşeninin neredeyse tamamını emerek şişmesi gösterilebilir. Sonuç olarak, çalışmada kullanılan bitümün yeterli malten içeriğinde olmamasından ötürü, %5’den daha fazla SBS kullanımında yüzey pürüzlülüklerinde yüksek oranda artış görülmemektedir.
- Floresan mikroskop ile yapılan çalışmalar göstermiştir ki, SBS oranının %5’ten %6’ya çıkarılması PMB içeriğinde ciddi bir SBS hacmi artışına sebep olmamaktadır. Diğer bir deyişle, %5’ten daha yüksek oranda SBS kullanılsa dahi, PMB içeriğindeki SBS hacminin şişme oranı azalacak ve nihai SBS miktarı ciddi oranda değişmeyecektir.
- Bitümün yaşlanması ile birlikte moleküller arası bağlar zayıflamakta bu da kırılmış yüzey morfolojilerinin daha pürüzlü olmasına sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak, içeriğinde daha fazla bağ bulunduran PMB numuneleri saf bitüme kıyasla daha pürüzlü yüzeyler sağlamaktadır. Ancak, uzun dönem yaşlandırma işleminin ardından bitümün kendi bağlarının da zarar görmesinden kaynaklı olarak SBS oranının değişimi ile artan çapraz

bağ miktarının yüzey morfolojik görüntüler üzerindeki değişime etkisini kesinlik içeren ifadelerle açıklamak mümkün değildir.

Elde edilen sonuçlar ışığında gelecek çalışmalara yön vermesi açısından bazı öneriler de bulunulabilir:

- Çalışma kapsamında, bitümün içeriğindeki malten miktarının SBS şişmesi üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur. Bu durum, farklı penetrasyon sınıfındaki bitümler ve farklı Stiren Butadiyen içeren SBS kopolimerlerinin kullanılması ile daha kapsamlı olarak araştırılabilir.
- Çalışma kapsamında sadece taramalı elektron mikroskobu ve floresan optik mikroskop kullanılarak morfolojik incelemeler yapılmıştır. Konfokal lazer tarama mikroskobu, Elektron tarama mikroskobu, Atomik kuvvet mikroskobu gibi çeşitli görüntüleme cihazları ile de PMB numunelerinin morfolojik incelemelerinin yapılması halinde daha detaylı değerlendirme yapmak mümkün olabilecektir.
- SBS ilavesi ile oluşan çapraz bağlanmaların etkilerinin incelenmesi amacıyla morfolojik incelemelerin yanı sıra, PMB'nin kimyasal, yapısal ve hatta termal karakterizasyon incelemelerinin de yapılması gerekmektedir.

Teşekkür

Yazar, çalışma kapsamında kullanılan Floresan Optik Mikroskop mavi filtre atasmanını DEÜ BAP 2018.KB.FEN.028 nolu Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında temin ettiği için Dokuz Eylül Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür etmektedir.

Kaynaklar

- [1] Boysen RB, Schabron JF. The automated asphaltene determinator coupled with saturates, aromatics, and resins separation for petroleum residua characterization. *Energ Fuel* 2013; 27(8): 4654-4661.
- [2] Carrera V, García-Morales M, Navarro FJ, Partal P, Gallegos C. Bitumen chemical foaming for asphalt paving applications. *Ind Eng Chem Res* 2010; 49(18): 8538-8543.
- [3] Liang M, Liang P, Fan W, Qian C, Xin X, Shi J, Guozhi N. Thermo-rheological behavior and compatibility of modified asphalt with various styrene-butadiene structures in SBS copolymers. *Mater Design* 2015; 88: 177-185.
- [4] Navarro F, Partal P, Martinez-Boza F, Valencia C, Gallegos C. Rheological characteristics of ground tire rubber-modified bitumens. *Chem Eng J* 2002; 89(1-3): 53-61.
- [5] Speight J. Petroleum Asphaltenes-Part 1: Asphaltenes, resins and the structure of petroleum. *Oil Gas Sci Technol* 2004; 59(5): 467-477.
- [6] Masson J, Collins P, Robertson G, Woods J, Margeson J. Thermodynamics, phase diagrams, and stability of bitumen-polymer blends. *Energ Fuel* 2003; 17(3): 714-724.
- [7] Collins J, Bouldin M, Gelles R, Berker A. Improved performance of paving asphalts by polymer modification (with discussion). In: *Asphalt Paving Technology Conference*; 4-6 March 1991; Seattle, New York. pp. 43-79.
- [8] Lu X, Isacson U. Modification of road bitumens with thermoplastic polymers. *Polym Test* 2000; 20(1): 77-86.
- [9] Sengoz B, Isikyakar G. Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. *Constr Build Mater* 2008; 22(9): 1897-1905.
- [10] Zhu J, Birgisson B, Kringos N. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *Eur Polym J* 2014; 54: 18-38.
- [11] Airey GD. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens☆. *Fuel* 2003; 82(14): 1709-1719.
- [12] Larsen DO, Alessandrini JL, Bosch A, Cortizo MS. Micro-structural and rheological characteristics of SBS-asphalt blends during their manufacturing. *Constr Build Mater* 2009; 23(8): 2769-2774.
- [13] Ouyang C, Wang S, Zhang Y, Zhang Y. Preparation and properties of styrene-butadiene-styrene copolymer/kaolinite clay compound and asphalt modified with the compound. *Polym Degrad Stabil* 2005; 87(2): 309-317.
- [14] Polacco G, Stastna J, Biondi D, Zanzotto L. Relation between polymer architecture and nonlinear viscoelastic behavior of modified asphalts. *Curr Opin Colloid In* 2006; 11(4): 230-245.
- [15] Kaya D, Topal A, McNally T. Correlation of processing parameters and ageing with the phase morphology of styrene-butadiene-styrene block co-polymer modified bitumen. *Mater Res Exp* 2019; 6(10): 105309.
- [16] Kaya D, Topal A, Gupta J, McNally T. Aging effects on the composition and thermal properties of styrene-butadiene-styrene (SBS) modified bitumen. *Constr Build Mater* 2020; 235: 117450.
- [17] Kaya D, Topal A, McNally T. Relationship between processing parameters and aging with the rheological behaviour of SBS modified bitumen. *Constr Build Mater*, 2019; 221: 345-350.
- [18] Schaur A, Unterberger S, Lackner R. Impact of molecular structure of SBS on thermomechanical properties of polymer modified bitumen. *Eur. Polym. J* 2017; 96: 256-265.
- [19] Hernández G, Medina EM, Sánchez R, Mendoza AM. Thermomechanical and rheological asphalt modification using styrene-butadiene triblock copolymers with different microstructure. *Energ Fuel* 2006; 20(6): 2623-2626.
- [20] E García RG. Effect of Stirring Speed in Hot Mixing Process of Modified Asphalt with SBS Copolymer on Polymeric Distribution and its Rheological Properties. London, England: Cambridge University Press, 2016.

- [21] Jiang Z, Easa SM, Hu C, Zheng X. Evaluation of new aspect of styrene-butadiene-styrene modified bitumens: Damping property and mechanism. *Constr Build Mater* 2020; 242: 118-185.
- [22] Loeber L, Sutton O, Morel J, Valleton JM, Muller G. New direct observations of asphalts and asphalt binders by scanning electron microscopy and atomic force microscopy. *J Microsc-Oxford* 1996; 182(1): 32-39.
- [23] Wilson A, Fuchs G, Scramoncin C, Martin D, Planche J. Localization of the polymer phase in bitumen/polymer blends by field emission cryo-scanning electron microscopy. *Energ Fuel* 2000; 14(3): 575-584.
- [24] Kosma V, Hayrapetyan S, Diamanti E, Dhawale A, Giannelis EP. Bitumen nanocomposites with improved performance. *Constr Build Mater* 2018, 160: 30-38.
- [25] Kumar K, Singh A, Maity SK, Srivastava M, Sahai M, Singh RK, Madhukar OG. Rheological studies of performance grade bitumens prepared by blending elastomeric SBS (styrene butadiene styrene) co-polymer in base bitumens. *J Ind Eng Chem*, 2016; 44: 112-117.
- [26] Rasool R, Hongru Y, Hassan A, Wang S, Zhang H. In-field aging process of high content SBS modified asphalt in porous pavement. *Polym Degrad Stabil* 2018; 155: 220-229.
- [27] Bell CA. Summary report on aging of asphalt-aggregate system: Strategic Highway Research Program Report National Research Council, Washington DC, USA: SHRP Report, 1989.
- [28] Ahmedzade P, Yılmaz M, Yılmaz M. Bitümlü Bağlayıcıların Yaşlandırılmasında Kullanılan Deney Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi* 2007; 23(1): 112-126.
- [29] Kou C, Kang A, Zhang W. Methods to prepare polymer modified bitumen samples for morphological observation. *Constr Build Mater* 2015; 81: 93-100.
- [30] Soenen H, Lu X, Redelius P. The morphology of bitumen-SBS blends by UV microscopy: an evaluation of preparation methods. *Road Mater Pavement* 2008; 9(1): 97-110.
- [31] Bearsley S, Forbes A, Haverkamp RG. Direct observation of the asphaltene structure in paving-grade bitumen using confocal laser-scanning microscopy. *J. Microsc*, 2004; 215: 149–55.

Derin Öğrenme ve Aşağı Örneklem Yaklaşımları Kullanılarak Duygu Sınıflandırma Performansının İyileştirilmesi

Yunus SANTUR

Enformatik Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
ysantur@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 28/06/2020;

Kabul/Accepted: 14/08/2020)

Öz: Bir metnin hangi duygu sınıfına ait olduğunu bulma problemi duygu sınıflandırma olarak bilinmektedir. Bu işlemin otomatize bir şekilde yapılması çevrimiçi ortamda büyük miktarda verinin çok kısa sürelerde analiz edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece müşteri memnuniyetini ölçme, reklam ve içerik önerme gibi birçok farklı amaçla kullanılabilmektedir. E-ticaret uygulamalarında duygu sınıflandırma için kullanıcı yorumlarının yanı sıra, memnuniyet derecesini ölçen sayısal bir puanlama ya da duygu durumunu kategorik bir değişken olarak ifade edecek bir değişkene daha ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sayede etiketli verilerden oluşan veri seti üzerinde denetimli öğrenme ile model oluşturulmaktadır. Burada yaşanan bir dezavantaj kullanıcıların bir üründen çoğunlukla memnun olmaları ya da tam tersi şikâyetçi olmalarıdır. Bu durumda oluşan veri seti dengesiz olmaktadır. Bu çalışmada Türk e-ticaret platformu Hepsiburada firmasına ait 243 bin kullanıcı yorumundan oluşan veri seti kullanılmıştır. Dengesiz olan bu veri setinde, sınıflandırma performansının iyileştirilmesi için derin öğrenme algoritmaları kullanılmış ve dengesiz veri seti yaklaşımı sunulmuştur. Sunulan yaklaşım ile yanlış pozitif oranı % 69'dan % 90'a, doğruluk değeri ise % 95.5'ten % 99'a iyileştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Derin Öğrenme, Metin Sınıflandırma, Yinelenen Sinir Ağları

Improving Sentiment Classification Performance Using Deep Learning and Undersampling Approaches

Abstract: The problem of finding out which emotion class a text belongs to is known as sentiment classification. Performing this process in an automated manner enables large amounts of data to be analyzed in a very short time, online. Thus, it can be used for many different purposes such as measuring customer satisfaction, recommending advertisements and content. In e-commerce applications, besides user comments for emotion classification, a numerical scoring that measures the degree of satisfaction or another variable that will express the emotional state as a categorical variable is needed. In this way, a model is created with supervised learning on the data set consisting of labelled data. A disadvantage here is that users are mostly satisfied with a product or vice versa complained. In this case, the data set is unbalanced. In this study, a data set consisting of 243 thousand user comments of the Turkish e-commerce platform Hepsiburada was used. In this unbalanced dataset, deep learning algorithms were used to improve classification performance and an unbalanced dataset approach was presented. With the approach presented, the false positive rate was improved from % 69 to % 90 and the accuracy was improved from % 95.5 to % 99.

Keywords: Deep Learning, Recurrent Neural Network, Sentiment Classification

1. Giriş

Yapay zekânın alt dallarından biri olarak kabul edilen Doğal Dil İşleme (DDİ) metin verileri üzerinde duygu sınıflandırma, özet bilgi çıkarma, yazar tanıma, benzerlik ölçme, varlık tanıma, soru-cevap robotları geliştirilmesi, makine çevirisi gibi görevlerle ilgilenen bir disiplindir [1]. DDİ, dilin önden/sondan eklemeli olması, kullanılan kısaltma, bağlaç, noktalama işaretleri, cümle öğelerinin sırası, özellikle çevrimiçi kaynaklarda kullanılan ve duygu durumları ifade eden emojiler nedeni ile karmaşık bir süreç olarak ele alınmaktadır. DDİ süreci verinin hazırlanması ve makine öğrenmesi kullanılarak model geliştirilmesi şeklinde ana adımda ele alınmaktadır.

DDİ'de kullanılan metin veri seti "Külliyyat" olarak adlandırılmaktadır. DDİ süreci, bu külliyyattan gelen veriler üzerinde faydasız kelime tespiti, kök bulma, vektörleştirme gibi ön işleme ve veri temizleme yapılması, ardından denetimli/denetimsiz/pekiştirmeli veya hibrit makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak bir model geliştirilmesi ve çıktı olarak amaçlanan bilginin elde edilmesi şeklinde işlemektedir [2].

* Sorumlu yazar: ysantur@firat.edu.tr. Yazarın ORCID Numarası: 0000-0002-8942-4605

DDİ’de kullanılan yaklaşımlardan birisi olan duygu analizi bir metnin daha önce belirlenen sınıflardan hangisine ait olduğunun tespit edilmesidir. Duygu analizi günümüzde sosyal medya başta olmak üzere sağlık, bilişim, e-ticaret gibi birçok farklı alanda kullanıcıların haber, paylaşım ve e-ticaret platformlarında ürünlere yaptıkları yorumların adaptif olarak sınıflandırılması ve bu bilgilerin analiz edilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sayede insan eliyle işlenemeyecek ölçüde büyük veri makine öğrenmesi ile işlenebilmektedir [3]. E-ticaret alanında duygu analizi, kullanıcı-ürün ve kullanıcı-platform etkileşimi kullanılarak fiyat ve tanıtımların belirlenmesi, müşteri memnuniyetinin ölçülmesi, müşteri kayıp analizi ve kişiye özgü kampanyaların yapılması gibi farklı amaçlarla kullanılabilir. Bu amaçla kullanıcıdan ürün ve/veya mağaza/süreçle ilgili metin ve duygu durumunun sınıfını ifade edecek kategorik bir giriş istenmektedir. Bu kategorik giriş puanlama ya da doğrudan sınıfa ait bir emoji olabilmektedir. Puanlama olması durumunda “Denklem 1” de verildiği gibi eşik değeri karşılaştırması yapılarak kullanıcıdan alınan yorum pozitif/negatif gibi sınıflandırılabilir. Çoklu giriş aracılığı ile verilecek kategorik girişlerde ise daha çok sınıf ifade edilebilmektedir. “Denklem 1” de verilen t giriş cümlesi olmak üzere e seçilen eşik değeri ve p ise yoruma verilen puandır. Bu durumda pozitif ve negatif olmak üzere iki sınıflı bir etiketleme yapılmış olmaktadır. Bazı durumlarda skor skalasındaki ortanca değeri “nötr” olarak kabul edilerek üç sınıflı bir etiketleme yapılabilir. Sonuç olarak giriş metni ve sınıf etiketinden oluşan iki sütunlu etiketli bir seti ile denetimli makine öğrenme süreci kullanan makine öğrenmesi algoritmaları ile eğitim işlemi gerçekleştirilmektedir [4].

Duygu analizinde, ön işleme aşamasında gerçekleştirilen bir diğeri işlemden vektörleştirme yani metin verilerinin sayısallaştırılmasıdır. Sayısallaştırma için kullanılacak en basit algoritma her bir kelimenin benzersiz lojik bir değeri olarak ifade edilmesini sağlayan “one-hot-encoding” yaklaşımıdır. Ancak bu yaklaşım külliyat içinde geçen her kelime için ayrı bir kodlama gerektirdiğinden giriş verilerinin boyutunu önemli ölçüde arttırmaktadır. Metin işleme algoritmalarının gerektirdiği bellek ve işlem gücü yüksektir, bu nedenle geleneksel makine öğrenmesi algoritmaları yerine derin öğrenme algoritmalarına ihtiyaç duyarlar. Derin öğrenme kullanmanın bir diğeri avantajı, makine öğrenmesinde kullanılan boyut indirgeme ve özellik seçim işlemlerinin bu yaklaşımda model tarafından keşfedilebilir ve öğrenilebilir olmasıdır [5].

$$s(t) = \begin{cases} 1, & t(p) \geq e \\ -1, & t(p) < e \end{cases} \quad (1)$$

2. Duygu Analizi

Duygu analizi, etiketli veriler üzerinde denetimli makine öğrenmesi ile eğitilen bir model kullanılarak giriş metninin önceden belirlenen hangi duygu sınıfına ait olduğunun sınıflandırılması şeklinde işleyen bir süreçtir. Literatürde birçok amaçla faydalı olarak kullanılabilir. En bilinen kullanım alanı, sosyal medya kullanıcılarının gündem konuları ile ilgili yazdıkları yorumların otomatize sınıflandırılmasıdır [6, 7]. Bunun yanı sıra duygu analizinin turizm alanında geliştirilmesi için büyük veri ile entegre edilen yaklaşımlar geliştirilmiştir [8].

Abualigah ve diğeri (2020) çevrimiçi dökümanların kullanılarak sağlık bakım kalitesinin artırılması amacıyla bu alana özgü yapılan çalışmaları inceleyen bir derleme çalışması gerçekleştirmiştir [9]. Doğal dil işleminin bir alt dalı olan duygu analizi, dilin gramatik yapısı ve öğe dizilimi gibi birçok alt problemle uğraşmaktadır, bu açıdan Çince ve Arapça gibi dillere özgü farklı yaklaşımlar gerçekleştirilmesi gerekmektedir [10]. Yousif ve diğeri (2017) bilimsel çalışmalarda benzerlik analiz yapılması, bilimsel atıflardaki duygu analizi yapılması için hibrit yaklaşımlar geliştirmişlerdir [11]. Duygu analizinin son yıllarda artan bir ilgiyle kullanıldığı alanlardan birisi de finans sektörüdür. Hisse senetlerinin gelecekteki fiyat hareketleri için finans ile ilgili çevrimiçi veri izleme platformlarında kullanıcı ve analistlere ait yorumların adaptif olarak sınıflandırılması ve zaman serileri üzerinde hibrit yaklaşımların kullanılması ile hisse senedi trend tahmini metrik değerlerinin iyileştiği görülmüştür [12]. Bu çalışmada ise bir e-ticaret sistemine ait kullanıcı yorumlarını içeren ve oldukça dengesiz olan bir veri setinde sınıflandırma performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır, genel olarak duygu sınıflandırma çalışmalarında kullanılan ön işlemler sıralı olarak aşağıdaki gibi verilmiştir [13].

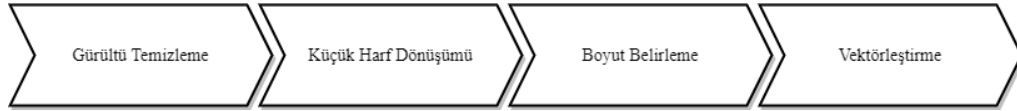
Gürültü temizleme: Metin içinde yer alan noktalama işaretleri metinden atılır. Metinden atılması gereken diğeri grup ise İngilizcede “Stop Words” olarak bilinen eklerdir. Türkçede faydasız kelimeler olarak adlandırılan bağlaç gurubu bu ekler öğrenme modelinin eğitiminde etkisi olmadığı için boyut küçültme ve eğitim/test adımında gereksinim duyulan işlem gücünün gereksiz kullanılmaması amacıyla metinden atılır.

Dönüşüm: Metin içinde büyük/küçük harfler karışık olabilir, metnin eğitimden önce sayısallaştırılmasında farklı temsillere neden olacağı ve bu durumda modelin başarımını kötü yönde etkileyeceği için tüm metin genel olarak küçük harflere dönüştürülür.

Boyut seçimi: Görüntü işleme uygulamalarında olduğu gibi veri setinin eş bir boyuta getirilmesi işlemidir. Eğitim ve test işleminde giriş verilerinin aynı boyutta olması gerekmektedir. Metin verileri birbirinden çok farklı boyutta olabilmektedir. Aynı boyuta getirme için “Denklem 2” de verildiği gibi külliyat içinde yer alan kelimelerin frekans değerleri kullanılır. Eşitlikte metinde yer alan her kelimenin frekansını temsil eden C_i değeri külliyat için seçilen eşik değer olan C_e değerinden daha büyük ise metin vektöründe tutulur. Her bir giriş metninde frekansı düşük kelimeler metinden atılır. Bu noktada yaşanabilecek bir problem çok kısa yorumların belirlenen boyuttan daha düşük kelime içermesidir. Bu durumda metin vektörleştirme aşamasında 0 gibi seçilen bir değerle boyuta eşit olana kadar doldurulur.

Vektörleştirme: Eğitim işleminden önceki en önemli adımdır. Makine öğrenmesi algoritmaları sayısal değerlere ihtiyaç duyarlar. Metin verilerinin sayısallaştırılması için birçok yaklaşım kullanılabilmektedir. Yaklaşımların ortak özelliği metin verilerinin sayısallaştırılarak temsil edilmesi ve öğrenme modeline giriş oluşturacak özelliklerin seçiminin sağlanmasıdır.

$$b = C_i \sum \text{Eğer } C_i(f) > C_e(f) \quad (2)$$



Şekil 1. Metin sınıflandırma için kullanılan ön işlem adımları

2.1. Vektörleştirme Yöntemleri

One-hot Encoding: Şekil 1’de verilen ilk vektörleştirme yönteminde metin içindeki her kelime tek bir bit lojik “1” değerlerinin ise lojik “0” olarak kodlanması ise elde edilir. Vektörleştirme için kullanılabilecek en basit yöntemlerden bir tanesidir. Ancak külliyatın boyu ile orantılı olarak oldukça fazla sayıda vektör elde edilmiş olunur, bu durum öğrenme algoritmasının eğitim işleminin uzamasına neden olmaktadır. Bu tekniğin, en önemli dezavantajı ise metinde yer alan öğelerin sırası ve birbirleri ile olan ilişkilerini temsil edemeyecek oluşudur [14].

Bag of Words: Kelime torbası anlamına gelmektedir. Bu yaklaşımda külliyat içinde geçen kelimelerin sıklığı temsil olarak kullanılır, “Denklem 3” te $x_{i,j}$ metin içinde kelimenin geçip geçmediğini gösteren mantıksal değişken olmak üzere, bow külliyat içindeki kelimelerin kelime çantası haline getirilmesini temsil eder, sayısallaştırma için her kelime için 1 veya 0 değerleri külliyat içindeki sıklıklarına göre belirler. Bu yöntemde “one-hot encoding” yönteminde olduğu gibi kelime ve öge sırası bilgisi tutulmaz. Ancak temsil edilen boyut daha küçüktür. Bu yaklaşım metin sınıflandırmadan ziyade, öge diziliminin daha az önemli olduğu spam belirlemede yaygın olarak kullanılmaktadır [14].

$$bow = \begin{pmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m,1} & \cdots & x_{m,n} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } x_{i,j} \text{ içindeyse } C \\ 0, & \text{Değilse} \end{cases}$$

TF-IDF: Bir kelimenin külliyat içindeki önemini gösteren istatistik temelli bir ağırlıklandırma yöntemidir. “Denklem 4” te $tf_{i,j}$ i’nin j içindeki frekansını, df_i i terimini içeren toplam doküman sayısını ve N ise toplam doküman sayısını vermektedir. Metin işlemede faydasız kelime tespiti genelde kural tabanlı olarak çalışmaktadır. Ancak bu yöntem en sık geçen terimlerin ağırlığını düşürdüğünden noktalama işareti ve bağla gibi faydasız kelimelerin elenmesi amacı ile de kullanılabilmektedir. BoW yönteminde olduğu gibi öge dizilimi ile ilgili bir bilgi tutmazlar. Ancak web sitelerinin pagerank gibi puanlaması gibi algoritmalarda kullanılmaktadır [15].

$$w_{i,c} = tf_{i,j} \log\left(\frac{N}{df_i}\right) \quad (4)$$

N-gram: Veri üzerinde arama ve karşılaştırma yaparken tekrar sayısını belirlemek için kullanılan bir algoritmadır. N tekrar derecesini ifade etmektedir. N sayısına göre 1:unigram, 2:bigram, 3:trigram olarak isimlendirilmektedir. Arama motorlarında olduğu gibi metin arama ve birbirleri ile en çok ilişkili kelimelerin bulunmasında kullanılmaktadır. Döküman aramada en sık kullanılan algoritmalarından bir tanesidir, bu özelliklerinin yanı sıra diğer bazı vektörleştirme algoritmalarında da kullanılırlar [16].

Word2vec: Detimsiz öğrenme ve tahmin tabanlı olarak çalışan, metin içindeki öğelerin dizilimini temsil edebilen vektörleştirme algoritmalarından bir tanesidir. Google araştırmacısı Mikolov (2013) tarafından geliştirilmiştir [17]. Word2vec CBOW ve Skip-gram olmak üzere iki algoritma kullanılmaktadır. Her ikisi de gizli katmandan oluşan bir yapay sinir ağı (YSA) kullanılmaktadır. Bu YSA’da giriş ve gizli katmanda aktivasyon fonksiyonu kullanılmaz, çıkış katmanında ise softmax bulunmaktadır. Word2vec algoritmasının en önemli hiper parametrelerinden bir tanesi w_t giriş penceresi sayısının seçimidir. Bu giriş penceresi sayısına göre öncesinde/sonrasında geçen kelimeler tahmin edilmeye çalışıldığı için öge dizilimi temsil edebilmektedir. YSA girişinde külliyat içinde yer alan benzersiz kelime sayısı kadar vektör oluşturularak one-hot encoding yapılmaktadır. Skip-gram algoritmasında w_t giriş olarak alınarak, diğer kelimeler tahmin edilmeye çalışılmaktadır, CBOW algoritması ise diğer kelimeleri giriş olarak alıp merkezdeki tek kelimeyi tahmin etme prensibine göre çalışmaktadır. CBOW algoritması küçük veri setlerinde daha etkindir, büyük veri setleri kullanan uygulamalarda ise Skip-gram daha performanslı çalışmaktadır. Benzer şekilde pencere sayısı küçük ise CBOW, büyük ise Skip-gram algoritması tercih edilmektedir [17].

Kullanılan YSA’nın çıkış katmanı olasılıksal değerleri içermektedir. Verilen girişe göre çıkış değeri olacak e tüm e^x lere bölündüğünde, her bir çıkışın kendi olasılıksal değeri elde edilmiş olunur. Bu yaklaşım “Denklem 5” te olduğu gibi eşitlik olarak ifade edilebilmektedir. Verilen eşitlikte $P(w_{t+j}|w_t)$ w_t kelimesinden pencere sayısı (j) sonra w_{t+j} kelimesinin gelme olasılığıdır. Word2vec algoritmasında varsayılan eğitim tur sayısı 5, pencere sayısı 10, vektör boyutu ise 300’dür. Metinde ki öge sırasını temsil edebilmesinin yanı sıra, eğitim işleminin uzun olması en büyük dezavantajlarıdır. Google geliştiricileri bu dezavantajı giderebilmek için negatif örneklemeyle dayalı bir başka yaklaşım geliştirmişlerdir. İngilizce için eğitilmiş modeller kullanmak avantaj yaratmaktadır, ancak Türkçe için word2vec kullanılarak eğitilmiş veri seti bulmak zordur [18].

$$P(w_{t+j}|w_t) = e^{U_{t+j}^T V_{w_t}} / \sum_{w=1}^v e^{U_w^T V_{w_t}} \quad (5)$$

Fasttext: Word2vec kullanılarak Facebook (2016) araştırmacıları tarafından geliştirilmiştir. Word2vec algoritmasında kullanılan YSA yapısında giriş olarak one-hot encoding ile kodlanmış vektörleri kullanmadan önce metin n-gram algoritmasına göre parçalanır. Word2vec ile kıyaslandığında birlikte geçen kelimeler daha iyi düzeyde temsil edilebilmektedir. Bu bağlamda word2vec ile kıyaslandığında pencere sayısı ile birlikte n-gram algoritmasındaki n sayısının da hiper parametre olarak verilmektedir [19].

GloVe: Word2vec algoritmasında kullanılan CBOW ve Skip-gram istatistik temelli olarak kelimelerin anlamsal birlikteliklerini yakalayabilir ancak birlikte kullanıma istatistiklerini kullanmazlar. Pennington (2014) tarafından önerilen bu modelde “Denklem 6” da verilen yeni yaklaşımla istatistiklerin daha etkin kullanımını amaçlamışlardır. Eşitlikte X_{ij} külliyat içinde kelime çiftlerinin birlikte geçme sayısı, w_i, w_j ise külliysat içindeki geçme sayısı, V külliyyattaki kelime sayısıdır [20].

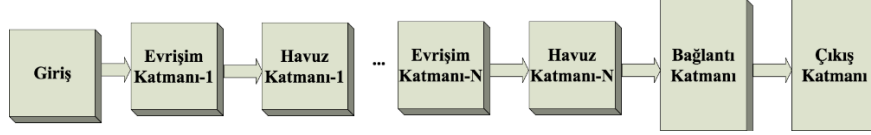
$$J = \sum_{i,j=1}^v f(X_{ij})(w_i^T w_j + b_i + b_j - \log X_{ij})^2 \quad (6)$$

3. Derin Öğrenme

Makine öğrenmesi ile kıyaslandığında derin öğrenme büyük veri setleri ve karmaşık görevler için daha uygundur. Makine öğrenmesinde, daha küçük veri setlerinde öğrenme başarımını arttırmak için özellik seçimi gibi işlemler elle yapılabilir; derin öğrenme algoritmalarında ise elde bulunan nitelikli verilerden özellik seçimi gibi işlevlerinde adaptif yapılması sağlanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan derin öğrenme algoritmaları aşağıda incelenmiştir [21].

3.1. Evrişimli Sinir Ağları

Evrişimli Sinir Ağları (ESA) özellikle, Dünya genelinde düzenlenen Imagenet yarışmalarında en iyi performans gösteren algoritmalarından birisi olduğu için oldukça popüler hale gelmiştir. Çekişmeli üretici ağlar ve oto kodlayıcılar gibi birçok farklı sinir ağında kullanılan ESA'lar tek ve çok boyutlu verilerle çalışabilmektedir [22].



Şekil 2. ESA yapısı

Şekil 2’de ESA modelinin genel blok diyagramı ve çalışma adımları verilmiştir. Bu adımlar sırası ile giriş verisini alma, giriş verisi üzerinde alt-örnek oluşturma (evrişim) ve oluşturulan alt-örnekler üzerinde havuz (özellik seçimi) yapma işlemlerini kapsamaktadır. Öğrenme ağında istenildiği kadar özyinelemeli olarak evrişim ve havuz ara katmanları çoğaltılabilir. Son adımda tüm ağıdaki tüm sinir hücrelerinin bağlandığı bağlantı katmanı ve sınıflandırıcı sayısı kadar çıkış hücresi bulunmaktadır [22].

Evrişim Katmanı: Bu aşamada giriş verisi üzerinde daha küçük bir çekirdek matris seçilerek konvolüsyon işlemi uygulanmaktadır. Giriş matrisi üzerinde satır ve sütunlar boyunca gezdirilen bu çekirdek matris sonrası giriş verisinden n adet alt veri matrisi oluşturulmuş olur. Bu işlem ESA sınıflandırma başarısı açısından büyük önem arz etmektedir. Saha uygulamalarında sınıflandırıcının başarısını arttırmak için giriş verisine gürültü ekleme, simetri alma, döndürme gibi ön-işlemler de uygulanarak veri kümesi genişletilir. Eğitim işlemine bu ön adımları eklemek sözü edilen gürültülü, simetrik, döndürülmüş verinin de tanınmasını sağlamaktadır. “Denklem 7” de f giriş verisi k seçilen $m \times n$ boyutunda kernel matrisi olmak üzere bu konvolüsyon sonrası i adet E ile ifade edilen alt örnek elde edilmektedir.

$$E_{ij}^l = \sum_{a=0}^{m-1} \sum_{b=0}^{m-1} w_{ab} f_{(i+a)(j+b)}^{l-1} \quad (7)$$

Havuz Katmanı: Elde edilen alt-örnekler üzerinde $m \times n$ boyutunda ikinci bir kernel matris ile tekrar konvolüsyon işlemi uygulanır ancak bu defa alt-örnek elde etmek yerine çekirdek matris içindeki verilerden ağıdaki hücrelerin eğitiminde kullanılacak ve alt-örneği ifade eden özellikler seçilir. Bu aşamada çekirdek boyutu minimum 2×2 boyutunda olmaktadır. Özellik olarak matris içindeki minimum, maksimum ya da ortalama değer seçilebilir. “Denklem 8” de verilen E_i bir önceki adımda elde edilen alt-örnek olmak üzere bu alt-örnekler üzerinde seçilen $m \times n$ boyutundaki p kernel matrisi gezdirilerek her bir pencereden “Denklem 9” da olduğu gibi özellik değerler elde edilir. Geleneksel yapay sinir ağları kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda veri girişi olarak kullanılacak görüntü üzerinde boyut küçültme ve öz-değer elde etme işlemi kullanılmaktadır. Ancak ESA modelleri üzerinde giriş verisi üzerinde verinin anlamını düşürmemek için boyut küçültme/öz-değer elde etme kullanılmaz. Hatta tam aksine modelin iyi eğitilebilmesi için gürültü ekleme gibi ön-işlemler ile veri genişletilebilir.

$$P_{vec} = \sum_i E_i * p \quad (8)$$

$$\sum_1^n P_{vec} = \left\{ \begin{matrix} \min \\ \max \\ \text{mean} \end{matrix} \right\} \sum_i E_i \quad (9)$$

Bağlantı Katmanı: Bu katman çıkış katmanından bir önceki katmandır. ESA modelinde yukarıda verilen evrişim ve havuz katmanları öz-yinelemeli olarak tekrar edilebilir. Seçilecek katman sayısı ağıın eğitiminde aşırı öğrenme ve eksik öğrenme oluşturmayacak şekilde belirlenmelidir.

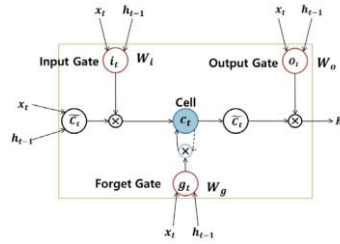
Çıkış Katmanı: ESA modelinde elde edilmek istenen sınıf sayısı kadar hücre bulunan ağıdaki son katmandır. Genellikle çıkış değerleri yüzdelik tahmini ifade eden $\{0-1\}$ aralığına normalize edilmiş değerler olmaktadır.

3.2. Tekrarlayan Sinir Ağları

Tekrarlayan Sinir Ağları (TSA) hafızalı ağlar olarak bilinirler. İleri beslemeli ve/veya çok katmanlı sinir ağları anlık girişlere göre çıkış üretirler [23]. TSA'lar ise $t-1$ ve daha önceki çıkışları da ağ eğitiminde kullanırlar. Bu özellikleri nedeni ile birbirlerine bağlı ardışıl verilerden oluşan zaman serileri üzerinde daha etkindirler. Bu bağlamda öğeleri birbirine bağlı olan metin verileri de zaman serilerine benzedikleri için TSA ağları için daha uygundur. Bu nedenle sohbet robotları, makine çevirisi gibi birçok metin işleme uygulamasında TSA'lar yaygın olarak kullanılırlar. TSA'lar bu avantajlarının yanı sıra gradyan problemleri ortaya çıkarabilmektedir. Bu dezavantaj gradyan değerinin aşırı büyüyerek optimum değerden uzaklaşma ya da sıfıra çok yaklaşarak yok olması şeklinde gerçekleşmektedir. Bu dezavantajların giderilmesi için eşik değer ya da ağ çıkışında Relu gibi doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonları kullanılabilir [24]. Hochreiter ve Schmidhuber (1997) TSA'lar da yaşanan gradyan problemlerini çözen UKSB algoritmasını geliştirmiştir [25]. UKSB genelleştirilmiş bir çeşidi olan GTB'ler ise daha küçük boyutlu veriler üzerinde kullanılan ve daha kolay eğitilebilen yapı olarak daha basit hafızalı ağlardır [26].

3.2.1. Uzun Kısa Süreli Bellek (UKSB)

Şekil 3'te verilen UKSB'ler YSA'larda kullanılan nöronlar yerine hafıza blokları içermektedir. Şekilde görüldüğü gibi bir UKSB yapısı bir bellek hücresi (c_t) ile giriş kapısı (i_t), çıkış kapısı (o_t) ve unutma kapısı (g_t) olmak üzere 3 kapıdan oluşmaktadır. X_t ve h_t sırası ile t anındaki giriş ve gizli durumdur. "Denklem 10-15" te verilen U , W ağırlık b ise bias değerleridir (Kim et al., 1997).



Şekil 3. UKSB yapısı [27]

$$g_t = \sigma(U_g x + W_g h_{t-1} + b_g) \quad (10)$$

$$i_t = \sigma(U_i x_t + W_i h_{t-1} + b_i) \quad (11)$$

$$\tilde{c}_t = \tanh(U_c X_t + W_c h_{t-1} + b_c) \quad (12)$$

$$c_t = g_t * c_{t-1} + i_t * \tilde{c}_t \quad (13)$$

$$o_t = \sigma(U_o x_t + W_o h_{t-1} + b_o) \quad (14)$$

$$h_t = o_t * \tanh(c_t) \quad (15)$$

3.2.2. Geçitli Tekrarlayan Birim (GTB)

UKSB ile kıyaslandığında GTB eğitimleri daha kolay, daha genelleştirilmiş derin öğrenme algoritmalarından birisidir. GTB'ler de hafıza birimi seçimlidir, en önemli fark ise unutma kapısının olmamasıdır. Daha basit olmalarına rağmen küçük veri setleri ve birçok problemde UKSB'ye çok yakın performans elde edilebilmekte bunun yanı sıra eğitimleri daha kolay ve daha az süre almaktadır. Daha kompleks uygulamalarda ve hatırlanması gereken uzun süreli çıkışlar var ise UKSB'ler daha avantajlı olmaktadır.

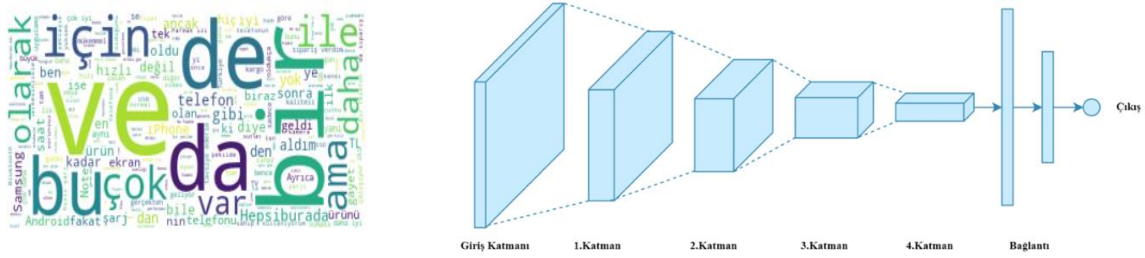
4. Veri Seti ve Metot

Çalışmada derin öğrenme algoritmalarının metin sınıflandırma performanslarının kıyaslanması için Türk e-ticaret platformu Hepsiburada firmasının Kaggle platformunda yayınlanan kullanıcı yorumlarını içeren veri seti kullanılmıştır [28]. Çalışmada kullanılan veri seti 243.000 kullanıcı yorumunu ve yorumun duygu sınıfını (pozitif, negatif) içermektedir. Veri setinin yaklaşık % 98'i pozitif, % 2'si ise negatif yorumları içermektedir. Bu yönü ile oldukça dengesiz bir veri setidir.

Tablo 1. Hepsiburada veri setine ait örnekler [28]

Yorum	Sınıf etiketi
Logitech M175 Kablosuz Nano Mouse gerçek güzel bir ürün ben memnun kaldım tavsiye ederim sonuçta bilindik bir marka ayrıca fiyat bakımından da uygun	1
Daha önce elimde olan m195 modeline göre çok daha kötü çıktı.Kaydırma tekerleği bi garip bazen işlemiyor gibi bir de çok sesli.Bunun yanında tıklarken yada gezinirken mi tam anlamadım ama bi gıcırtı g...	0
Mausum tıklama esnasında tutukluk yapıyor aynı noktaya birkaç defa tıklamam gerekiyor anlatacağım bunlar ama 20 kelime söyleyecek bişey yok maalesef	0
ürünü sipariş ettim.hemen elime geçti.gayet iyi çalışıyor.kablolu mause bana göre değil sürekli çocuklar kablousunu koparıyorlar.bu derten de bu sayede kurtulmuş oldum.herkese almasını tavsiye ederim.	1

Tablo 1’de verilen veri seti 13.676 negatif yorum, 229.821 pozitif yorum içermektedir. En kısa yorumlar “harika”, “başarılı” gibi tek kelimeden oluşmaktadır. En uzun yorum ise 329 kelimeden oluşmaktadır. Veri setindeki yorumların ortalama kelime sayısı ise 23’tür. Bu değerler bağlaç ve bazı noktalamalar atıldıktan sonra elde edilmiştir. Veri setinde faydasız kelime tespiti için en sık geçen kelimelerin frekansı ölçülmüştür. Aşağıda veri setinde pozitif ve negatif yorumlarda en sık geçen 20 kelime frekans büyüklüğü sırasına göre verilmiştir. Şekil 4’te ise veri setinin kelime bulutu gösterimi verilmiştir.

**Şekil 4.** Veri seti kelime bulutu gösterimi ve önerilen yaklaşım

4.1. Önerilen Yaklaşım

Çalışmada aynı veri seti üzerinde, aynı koşullar altında çalışma süresi, bellek ve doğruluk performanslarının ölçümü için ESA, UKSB ve GTB kullanılmıştır. Önerilen genel yaklaşım Şekil 4’te verilmiştir.

Tablo 2. Öğrenme modelinde kullanılan hiper parametreler

Nöron/hücre sayısı (ESA, UKSB ve GTB için aynı seçilmiştir)				Giriş uzunluğu	Optimizasyon	Budama	Aktivasyon fonksiyonu
1.katman	2.katman	3.katman	4.katman				
32	16	8	4	50	Adam	.1	Sigmoid, .5

4.2. Değerlendirme

Önerilen yaklaşımın değerlendirilmesi için çalışma süresi ve Tablo 3’te verilen karşıtlık matrisi üzerinde elde edilen performans metrikleri kullanılmıştır [30]. Test verileri üzerinde, tahmin ve gerçek sınıf “1” ise DP, tahmin ve gerçek sınıf “0” ise DN değeri “1” artırılır. Eğer gerçekte negatif olan yorum pozitif olarak tahmin edilmiş ise YP, gerçekte pozitif olan yorum negatif olarak tahmin edilmiş ise YN değeri 1 artırılarak bu matris oluşturulmakta ve “Denklem 16-20” da verilen metrik ölçüler hesaplanmaktadır. Genel doğruluğun (D) yanı sıra sırası ile pozitiflerin doğru tahmin oranını (DPO) ve negatiflerin doğru tahmin (YPO) oranı yine karşıtlık matrisi kullanılarak hesaplanabilmektedir.

Tablo 3. Karşıtlık matrisi

Model Tahmini	Gerçek Sınıf	
	DP	YP
	YN	DN

$$D = (DP + DN)/N$$

(16)

$$DPO = DP / (DP + YP) \quad (17)$$

$$YPO = DN / (DN + YN) \quad (19)$$

$$DD = (DPO + YPO) / 2 \quad (20)$$

4.2. Deneysel Sonuçlar ve Dengesiz Veri Seti Yaklaşımı

Bu çalışma IDAP konferansında sunulan çalışmanın genişletilmiş halidir [13]. Bildiri çalışmasında aynı veri seti kullanılarak GTB algoritması ile % 95 doğruluk elde edilmiştir. Bu çalışmada ise aynı veri seti için GTB, UKSB ve ESA algoritmaları aynı koşullar altında karşılaştırılmış, hiper parametre iyileştirilmesi ile doğruluk değeri iyileştirilmiş ve dengesiz veri setine özgü yaklaşım geliştirilerek tüm performans metrikleri iyileştirilmiştir.

Kaggle platformunda yayınlanan e-ticaret platformu Hepsiburada kullanıcı yorumları veri seti ile elde edilen deneysel sonuçlara ait karşılaştırma matrisleri ve metrik performans değerleri Tablo 4'te toplu olarak gösterilmiştir. En yüksek doğruluk GTB yöntemi kullanılarak % 95.9 olarak elde edilmiştir. Ancak veri seti % 98 oranında pozitif yorum içeren oldukça dengesiz bir setidir bu nedenle en iyi YPO değeri GTB ile % 69 olarak elde edilebilmiştir. En yüksek DPO ise UKSB kullanılarak % 97.8 olarak elde edilmiştir. Görüntü işleme uygulamalarında dengesiz veri setleri üzerinde baskın sınıfın aşağı örneklenmesi ya da azınlık sınıfın yukarı örneklenmesi ile veri seti dengeli hale getirildiğinde daha başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir [29].

Azınlık sınıfın yukarı örneklenmesi bu veri setinde mümkün değildir. Baskın sınıfın aşağı örneklenmesi durumunda ise veri seti boyutu oldukça küçülecek ve model yeterince öğrenemeyecektir.

Bu uygulama için pozitif yorumlarda geçen kelimelerin sıklık frekans ölçümleri yapılarak en sık geçen 20 kelime pozitif yorumlardan çıkarılmıştır. Vektörleştirme işlemi her ne kadar sık geçen kelimeleri düşük ağırlıklarla ağırlıklandırmış olsa da öğrenme modelinin negatif yorumları yeterince öğrenemediği çıkarımı deneysel sonuçlardan elde edilmiştir. Bu bağlamda geliştirilen basit yaklaşım “Denklem 21” de olduğu gibi pozitif yorumları içeren C_p külliyatından en sık geçen 20 kelime olan C_{pn} çıkarılmıştır. Bu yaklaşımla yeniden eğitilen modelde YPO oranı ESA ile % 92 olarak gerçekleşmiştir. Modelin eğitim tur sayısı, kayıp fonksiyonu ve giriş kelime uzunluğu gibi hiper parametreler deneysel gözlemlere dayalı olarak iyileştirilmiştir. Eğitim süreleri göz önüne alındığında en hızlı algoritma ESA, en yavaş algoritma ise UKSB'dir. Tablo 4-6'da elde edilen en iyi sonuçlar okunabilirlik için koyu gösterilmiştir. Tabloda Doğruluk, DPO ve YPO yanı sıra “Denklem 20”de verilen ve DPO ve YPO değerlerinin toplamının ikiye bölünmeden elde edilen dengelenmiş doğruluk değeri (DD) de verilmiştir. Bu bağlamda en iyi DD GTB ile % 83 olarak elde edilmiştir. Dengesiz veri seti için ile önerilen basit yaklaşım ile bu değer ESA ile % 95.5 değerine, DPO % 99 değerine iyileştirilmiştir.

$C_{pn} = \{\text{bir, ve, çok, bu, için, ürün, iyi, tavsiye, güzel, daha, da, ama, gayet, hızlı, ederim, olarak, gibi, ürün, elime}\}$

$$C_p = C_p - C_{pn} \quad (21)$$

Tablo 4. GTB algoritması için deneysel sonuçlar ve karşıtlık matrisleri

Tahmin Edilen Sınıflar		Gerçek Sınıflar					
		1-tur		10-tur		16-tur	
Yöntem		68677	4373	67544	1829	67481	1784
GTB		0	0	1133	2544	1196	2589
	D	.94		.959		.959	
	DPO	.94		.973		.974	
	YPO	-		.691		.684	
	DD	-		.832		.829	
GTB + Dengesiz veri seti yaklaşımı		68308	953	68295	693	68300	762
		369	3420	382	3680	377	3611
	D	.981		.985		.984	
	DPO	.986		.989		.988	
	YPO	.90		.905		.905	
	DD	.943		.947		.944	

Tablo 4'te en sık geçen kelimelerin pozitif yorumları içeren veri kümesinden çıkarılmadan ve çıkarıldıktan sonra eğitilen modele ait sonuçları GTB algoritması için verilmiştir. Modelin doğruluk değeri % 95.9'tan % 98.5'e, YPO oranı % 69.1'den % 90'a, DD ise % 83'ten % 94'e iyileştirilmiştir.

Tablo 5. UKSB algoritması için deneysel sonuçlar ve karşıtlık matrisleri

Tahmin Edilen Sınıflar		Gerçek Sınıflar					
		1-tur		10-tur		16-tur	
UKSB		68677	4373	66926	1490	67360	1874
		0	0	1751	2883	1317	2499
	D	.94		.955		.956	
	DPO	.94		.978		.972	
	YPO	-		.622		.654	
	DD	-		.8		.81	
UKSB + Dengesiz veri seti yaklaşımı		68431	1660	68173	677	68133	644
		246	2713	504	3696	544	3729
	D	.973		.983		.983	
	DPO	.976		.99		.99	
	YPO	.916		.88		.87	
	DD	.946		.935		.93	

Tablo 5’te en sık geçen kelimelerin pozitif yorumları içeren veri kümesinden çıkarılmadan ve çıkarıldıktan sonra eğitilen modele ait sonuçları UKSB algoritması için verilmiştir. UKSB algoritması ile eğitilen modelin doğruluk değeri % 95.5’ten % 98.3’e, YPO oranı % 62.1’den % 88’e, DD ise % 80’den % 93.5’e iyileştirilmiştir.

Tablo 6. ESA algoritması için deneysel sonuçlar ve karşıtlık matrisleri

Tahmin Edilen Sınıflar		Gerçek Sınıflar					
		1-tur		10-tur		16-tur	
ESA		68677	4373	67302	2017	67543	2355
		0	0	1375	2356	1134	2018
	D	.94		.953		.952	
	DPO	.94		.97		.966	
	YPO	-		.631		.64	
	DD	-		.8		.8	
ESA + Dengesiz veri seti yaklaşımı		68583	2411	67996	646	68386	874
		94	1962	681	3727	291	3499
	D	.965		.981		.984	
	DPO	.966		.99		.987	
	YPO	.954		.845		.923	
	DD	.96		.917		.955	

Tablo 6’da en sık geçen kelimelerin pozitif yorumları içeren veri kümesinden çıkarılmadan ve çıkarıldıktan sonra eğitilen modele ait sonuçları ESA algoritması için verilmiştir. ESA algoritması ile eğitilen modelin doğruluk değeri % 95.3’ten % 98.1’e, YPO oranı % 63.1’den % 84.5’e, DD ise % 80’den % 91.7’ye iyileştirilmiştir

5. Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmada metin sınıflandırma problemi için aynı koşullar altında ESA, GTB ve UKSB derin öğrenme algoritmalarının performansları karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan veri seti % 98 olumlu, % 2 olumsuz yorum içeren oldukça dengesiz bir setidir, bu yönü ile model makine öğrenmesi ile eğitilmeden tüm yorumların olumlu olarak etiketlenmesi durumunda bile % 98 doğrulukla çalışacak ancak bu durumda ürünlerden memnun olmayan müşteri kitlesi ve şikâyet edilen ürünler tespit edilememiş olunacaktır. Görüntü işleme uygulamalarında dengesiz veri seti içeren çalışmalarda baskın sınıfın aşağı örneklenmesi prensibine dayanan basit bir yaklaşım bu çalışmada kullanılmış ve önerilen yaklaşım günümüzde yaygın olarak kullanılan üç farklı derin öğrenme algoritması ile test edilmiştir. Önerilen yaklaşımla baskın sınıfta en sık geçen kelimeler eğitim veri setinden çıkarılarak, azınlık sınıfa ait örneklerin daha iyi tanınması amaçlanmıştır. Yaklaşımın test edildiği üç algoritmada da sınıflandırma değerlerinin iyileştiği görülmüştür. Özellikle olumsuz yorumların doğru sınıflandırılmasını gösteren YPO metrik değeri oldukça tatmin edici ölçüde iyileştirilmiştir. Sonuç olarak dengesiz veri setine sahip duygu sınıflandırma problemleri için baskın sınıfın aşağı örneklenmesinin sınıflandırma metrik değerlerini iyileştirdiği deneysel çalışmalar yapılarak görülmüştür. Gelecekte dengesiz metin veri seti içindeki azınlık sınıfları etkin öğrenecek çekişmeli üretici derin öğrenme algoritmaları kullanan yaklaşımların geliştirilmesi planlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmada Kaggle platformunda yayınlanan e-ticaret platformu Hepsiburada veri seti kullanılmıştır.

Kaynaklar

- [1] Collobert R, Weston J, Bottou L, Karlen M, Kavukcuoglu K, Kuksa P. Natural language processing (almost) from scratch. *Journal of machine learning research* 2011; 12, 2493-2537.
- [2] Young T, Hazarika D, Poria S, Cambria E. Recent trends in deep learning based natural language processing. *IEEE Computational Intelligence Magazine* 2018; 13(3), 55-75.
- [3] Goldberg Y. Neural network methods for natural language processing. *Synthesis Lectures on Human Language Technologies* 2017; 10(1), 1-309.
- [4] Zhuang H, Wang C, Li C, Wang Q, Zhou, X. Natural language processing service based on stroke-level convolutional networks for Chinese text classification. In *2017 IEEE Int. Conf. on Web Services*, 25-30 June, HI, USA, pp. 404-411.
- [5] Young T, Hazarika D, Poria S, Cambria E. Recent trends in deep learning based natural language processing. *IEEE Computational Intelligence Magazine* 2018; 13(3), 55-75.
- [6] Feldman, R. Techniques and applications for sentiment analysis. *Communications of the ACM*, 56(4), 82-89.
- [7] Neri, F, Aliprandi, C, Capeci, F, Cuadros, M, By, T. Sentiment Analysis on Social Media. *ASONAM*, 12, 919-926.
- [8] Alaei, A. R, Becken, S, Stantic, B. Sentiment analysis in tourism: capitalizing on big data. *Journal of Travel Research*, 58(2), 175-191.
- [9] Abualigah, L, Alfar, H. E, Shehab, M, Hussein, A. M. A. Sentiment Analysis in Healthcare: A Brief Review. In *Recent Advances in NLP: The Case of Arabic Language*, (pp. 129-141). Springer, Cham.
- [10] Tubishat, M, Abushariah, M. A, Idris, N, Aljarah, I. Improved whale optimization algorithm for feature selection in Arabic sentiment analysis. *Applied Intelligence*, 49(5), 1688-1707.
- [11] Yousif, A, Niu, Z, Tarus, J. K, Ahmad, A. A survey on sentiment analysis of scientific citations. *Artificial Intelligence Review*, 52(3), 1805-1838.
- [12] Derakhshan, A, Beigy, H. Sentiment analysis on stock social media for stock price movement prediction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 85, 569-578.
- [13] Santur Y. Sentiment Analysis Based on Gated Recurrent Unit. In *2019 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, 21-22 Sep. Malatya, Turkey, pp. 1-5.
- [14] Kulkarni A, Shivananda A. Converting text to features. In *Natural Language Processing Recipes*, Apress, Berkeley, CA. 2019; 67-96.
- [15] Arroyo-Fernández I, Méndez-Cruz C. F, Sierra G, Torres-Moreno J. M, Sidorov, G. Unsupervised sentence representations as word information series: Revisiting TF-IDF. *Computer Speech & Language* 2019; 56, 107-129.
- [16] Song Y. MIHNet: Combining N-gram, Sequential and Global Information for Text Classification. In *Journal of Physics: Conference Series* 2020; 1453, 012156.
- [17] Mikolov T, Chen K, Corrado G, Dean J. Efficient estimation of word representations in vector space. *arXiv preprint arXiv:2013; 1301.3781*.
- [18] Guo D, Wang Q, Liang M, Liu W, Nie, J. Molecular Cavity Topological Representation for Pattern Analysis: A NLP Analogy-Based Word2Vec Method. *International Journal of Molecular Sciences* 2019; 20(23), 6019.
- [19] Joulin A, Grave E, Bojanowski P, Douze M, Jégou H, Mikolov T. FastText: zip: Compressing text classification models. *arXiv preprint arXiv:2016; 1612.03651*.
- [20] Pennington J, Socher R, Manning CD. Glove: Global vectors for word representation. In *Proceedings of the 2014 conference on empirical methods in natural language processing (EMNLP)*, 25-29 Oct., Doha, Qatar, pp.1532-1543.
- [21] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning. *Nature* 2015; 521(7553), 436-444.
- [22] He T, Huang W, Qiao Y, Yao J. Text-attentional convolutional neural network for scene text detection. *IEEE transactions on image processing* 2016; 25(6), 2529-2541.
- [23] Lukoševičius M, Jaeger H. Reservoir computing approaches to recurrent neural network training. *Computer Science Review* 20019; 3(3), 127-149.
- [24] Song S, Huang H, Ruan T. Abstractive text summarization using LSTM-CNN based deep learning. *Multimedia Tools and Applications* 2019; 78(1), 857-875.
- [25] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural computation* 1997; 9(8), 1735-1780.
- [26] Luo LX. Network text sentiment analysis method combining LDA text representation and GRU-CNN. *Personal and Ubiquitous Computing* 2019; 23(3-4), 405-412.
- [27] Kim HY, Won CH. Forecasting the volatility of stock price index: A hybrid model integrating LSTM with multiple GARCH-type models. *Expert Systems with Applications* 2018; 103, 25-37.
- [28] Hepsiburada kullanıcı yorumları [2018], Available: <https://www.kaggle.com/bulentsiyah/hepsi-burada-yorum>.
- [29] Segura-Bedmar I, Colón-Ruiz C, Tejedor-Alonso MÁ, Moro-Moro M. Predicting of anaphylaxis in big data EMR by exploring machine learning approaches. *Journal of biomedical informatics* 2018; 87, 50-59.

Yapay Zekâ ve İstatistiksel Yöntemler ile Küresel Ticarete Rekabet Ölçütü Olan Lojistik Performans İndeksine (LPI) Etken Parametrelerin Ülke Bazlı İncelenmesi ve Tahmin Modellerinin Geliştirilmesi

Ömer Faruk CANSIZ¹, Kevser ÜNSALAN^{2*}

^{1-2*} İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, Türkiye

¹ ofaruk.cansiz@iste.edu.tr, ^{2*} kevser.keskin@iste.edu.tr

(Geliş/Received: 19/03/2020;

Kabul/Accepted: 22/08/2020)

Öz: Firmalar ürettikleri ürünleri pazarlamak için birçok farklı yöntem geliştirmektedir. Ürünün, üreticiden tüketiciye ulaşana kadar sürecin her aşaması rekabet piyasasında incelenmesi gereken önemli birer unsur olmaktadır. İncelenen bu süreçler lojistik ana teması altında toplanmaktadır. Bu çalışmada ülkelerin lojistik alt yapısı hakkında önemli bilgi veren ve küresel ölçekte karşılaştırma imkânı sunan lojistik performans indeksi (LPI) kavramı incelenmektedir. LPI'ne etki eden parametreler gözden geçirilmekte ve bu bağlamda liman alt yapı kalitesi, layner taşımacılığı, gümrük giderleri, havayolu yük taşımacılığı, ihracat miktarı değişkenleri incelenmektedir. Bu değişkenlerin LPI ile ilişkisi istatistiksel olarak ele alınmaktadır. Çalışmanın son aşamasında ise istatistiksel olarak anlamlı olan girdiler göz önünde bulundurularak sayısal veriler ışığında LPI için yapay zekâ ve çok değişkenli lineer regresyon (MLR) yöntemleri kullanılarak tahmin modelleri geliştirilmektedir.

Anahtar kelimeler: Lojistik performans indeksi, yapay zekâ, YSA, ANFIS, regresyon

Prediction of Logistics Performance Index by Analysis of Effective Parameters on LPI Based on Countries, Which is Competition Criterion in Global Trade by Using Artificial Intelligence and Statistical Methods

Abstract: Companies develop many different methods to market the products they produce. Every stage of the product, from the manufacturer to the consumer, is an important element that must be examined in the competitive market. These processes are gathered under the main theme of logistics. In this study, logistics performance index (LPI), which gives important information about the logistics infrastructure of the countries and offers the opportunity to compare globally, is examined. Parameters affecting LPI are reviewed and along with the variables of port infrastructure quality, liner transportation, customs expenses, airline freight transportation, export amount. The relationship of these variables with LPI is considered statistically. In the last stage of the study, considering the statistically significant inputs, prediction models are developed using artificial intelligence and multiple linear regression (MLR) methods in the light of numerical data.

Key words: Logistics performance index, artificial intelligence, ANN, ANFIS, regression

1. Giriş

Lojistik, üretici ve tüketici arasındaki sirkülasyonun koordinasyonu ile ilgilenmektedir. Lojistik hizmetler; ürünün kabulü, depolanması, stok yönetimi, siparişin hazırlanması ve sevkiyatın sağlanmasından meydana gelmektedir [1]. Küresel ticaretin artışı ile beraber, lojistik sektörünün önemi ön plana çıkmaktadır. Sektörel büyümenin artışı ile ülkelerin küresel ölçekte lojistik performansları hakkında bilgi sahibi olmaları büyük önem arz etmektedir. Lojistik sektörü bakımından gelişmiş ülkeler daha rekabetçi davranmakta ve kar marjlarını yükseltmektedir [2]. Bu nedenle ülkelerin lojistik performansları hakkında bilgi sahibi olmaları ve küresel ölçekte yerini bilerek gelişimini sağlaması oldukça önemlidir. Dünya Bankası'nın iki yılda bir yayınladığı altı indikatöre bağlı olarak hesaplanan lojistik performans indeksi (LPI), ülkelerin lojistik sektörü açısından yerinin bilinmesinde önemli bir ölçüt olmaktadır [3]. LPI, ülkelerin gümrük işlemleri, lojistik maliyetleri, ulaşım altyapısı bakımından ülkeler arasındaki farklılıkları ortaya çıkarmaktadır [4]. LPI belirlenirken kıstas olarak alınan indikatörler eşit ağırlıklı olarak dikkate alınmaktadır. Temelde her indikatörün farklı ağırlıklarla etki etmesi gerekmektedir. Bunun için literatürde öznel ve nesnel ağırlıklandırma metotları mevcuttur [5]. LPI etken parametrelerin ağırlıklarının

* Sorumlu yazar: kevser.keskin@iste.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-6857-2513, ² 0000-0002-9163-4855

belirlenmesinin yanında etken parametrelerinde belirlenmesi oldukça önemlidir. Lojistik sektöründe etken girdilerin incelenmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Başar ve Bozma havuzlanmış panel veri analizi kullanılarak LPI'ne etken makro düzeyde ekonomik ve politik faktörleri araştırmaktadır [6].

Güner ve Coşkun çalışmalarında ülkelerin rekabet gücünü önemli ölçüde etkileyen sosyal ve ekonomik değişkenlerin LPI değişimi üzerine etkilerini araştırmaktadır [7]. Bir başka çalışmada LPI'nin alt indekslerinin gayri safi milli hâsıla üzerindeki etkisi incelenmektedir [8]. Karaköy ve Üre yüksek ve orta gelirli ülkelerin gelişiminin LPI ile ilişkisini ortaya koymaktadır [9]. Bir başka çalışmada ülkedeki nitelikli iş gücünün arttırılmasının LPI üzerine etkileri analiz edilmektedir[10].

Bu çalışmada LPI ve etken indikatörler üzerinde durulmaktadır. Çalışmanın birinci aşamasında LPI üzerinde etkili olan parametreler istatistiksel olarak incelenmektedir. İkinci aşamada belirlenen parametrelere göre ülkeler klasik sınıflandırma metodu dikkate alınarak sınıflandırılmaktadır. Çalışmanın son aşamasında ise korelasyon analizi sonuçlarına göre LPI belirlemede $\alpha=0,05$ anlamlılık düzeyinde etkili olan parametreler dikkate alınarak LPI tahmin modelleri oluşturulmaktadır. Tahmin modellemesinde yapay zekâ tekniklerinden uyarlanabilir sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) ve yapay sinir ağları (YSA) yöntemi kullanılmaktadır. İstatistiksel metotlardan ise MLR tekniği olan doğrusal, etkileşimli, karesel ve basit karesel yöntemleri kullanılmaktadır. Tahmin modellerinin karşılaştırılmasında hataların karesinin ortalaması (HKO), ortalama yüzde hata (OYH) ve korelasyon (R) performans kriterleri kullanılmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışmada Liman altyapı kalitesi (Quality of Port Infrastructure-QPI), layner taşımacılığı bağlantı endeksi (Liner Shipping Connectivity Index-LSCI), gümrük giderleri (Burden of Customs Procedure-BCF), hava yolu yük taşımacılığı (Air Transport-AT), ticari hizmet ihracatı (Commercial Service Exports-CSE), gıda ihracatı (Food Export-FE), imalat ihracatı (Manufactures exports-MAE), mal ihracatı (Merchandise Exports-MEE), değişkenleri kullanılarak LPI tahmin modellemesi yapılmaktadır. En son yayınlanan LPI verisinin 2016 yılında yayınlanmasından dolayı, bu yıldaki veriler dikkate alınarak modelleme yapılmaktadır.

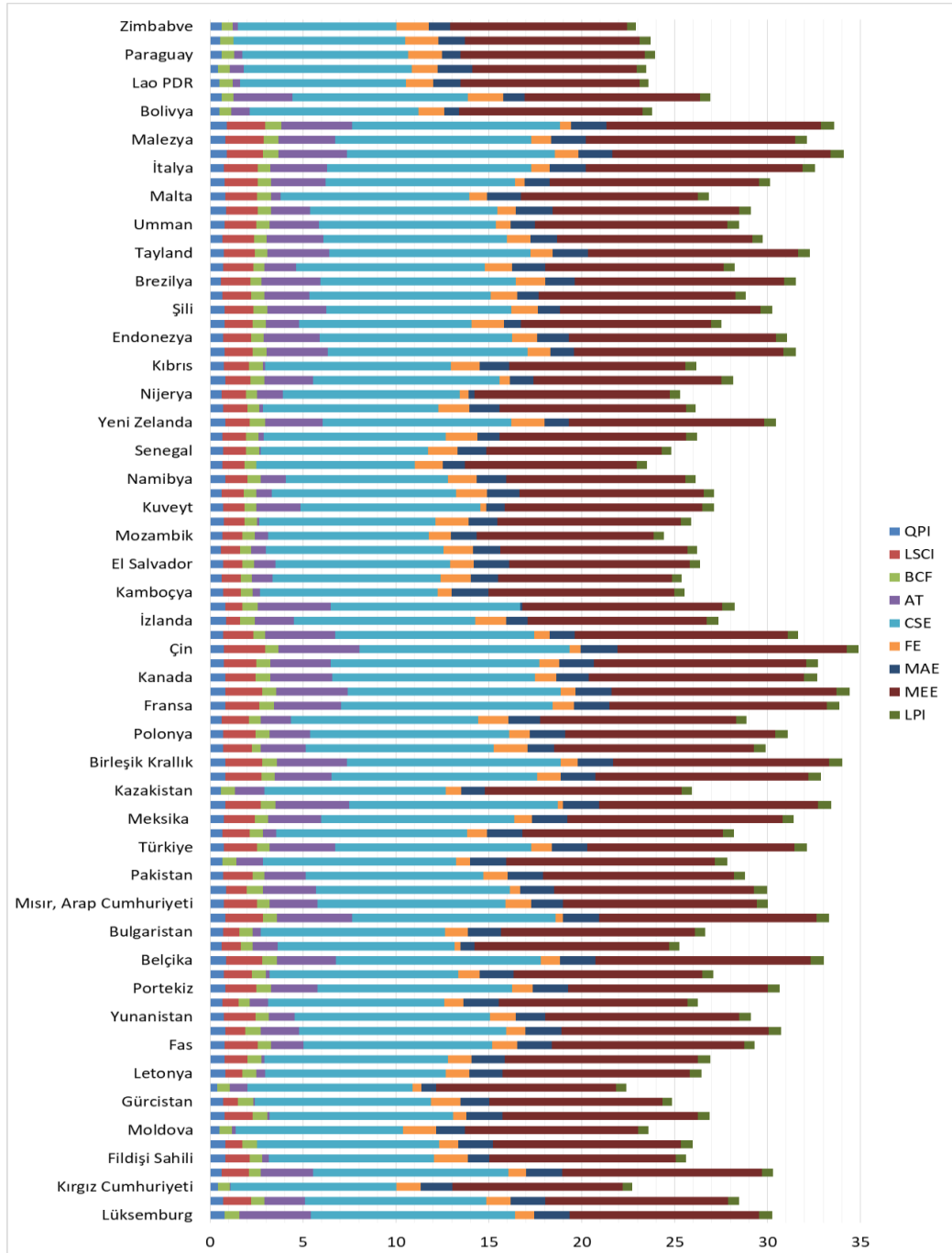
Liman altyapı kalitesi (QPI), şirket yöneticilerinin ülkelerindeki liman tesislerine ilişkin algılarını ölçmektedir. Veriler, Dünya Ekonomik Forumu'nun 150 ortak kuruluşla birlikte yürüttüğü anket çalışması sonucu elde edilmektedir. Şirketlerin büyüklüğü ve sektördeki faaliyetleri esas alınarak QPI verileri toplanmaktadır. Veriler yüz yüze veya çevrimiçi olarak toplanmaktadır. Denize kıyısı olmayan yani limanı bulunmayan ülkelere ise liman tesislerinin ne seviyede erişebilir olduğu sorulmaktadır. Puanlar 1 ile 7 arasında değişim göstermektedir [11]. Layner taşımacılığı bağlantı endeksi (LSCI), ülkelerin küresel ölçekte deniz ağlarına ne kadar iyi bağlandığı gösteren bir endekstir. Deniz taşımacılığı sektörünün beş ana bileşeni olan gemi sayısı, konteyner taşıma kapasitesi, maksimum gemi büyüklüğü, hizmet sayısı ve konteyner kullanan şirket sayısı dikkate alınarak Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Konferansı (UNCTAD) tarafından hesaplanmaktadır. Her bir bileşen için o yılın her bir bileşeninin maksimum değerine bölünür. Beş bileşenin her ülke için ortalaması alınır ve ortalama o yıl için maksimum ortalama bölünür ve 100 ile çarpılır [12].

Gümrük giderleri (BCF), şirketlerin gümrük prosedürlerinin etkinliği konusundaki algılarını ölçmektedir. Veriler Dünya Ekonomik Forumu'nun 150 ortak kuruluşla yürüttüğü anket çalışması sonucu elde edilmektedir. Değerlendirme şirketlerin büyüklüğüne ve faaliyet sektörüne göre farklılık göstermektedir. Katılımcılar ülkelerindeki gümrük prosedürlerinin etkinliğini değerlendirmektedir. Puanlar 1'den 7'ye kadar en verimsizden en verimliye doğru artmaktadır [13]. Havayolu yük taşımacılığı (AT), hava yolu taşımacılığında her bir uçuşta, bir uçağın kalkıştan bir sonraki inişe kadar süreçte, kat edilen kilometre cinsinden taşınan yükün hacmidir [14]. Ticari hizmet ihracatı (CSE), toplam hizmet ithalatı ile başka bir yerde yer almayan devlet hizmetleri ihracatıdır. IMF'nin ödemeler dengesi el kitabında, aynı anda üretilebilen, aktarılabilen ve tüketilebilen maddi olmayan malların ekonomik çıktısı olarak tanımlanmaktadır[15]. Tanımlar, farklı ekonomiler arasında farklılık göstermektedir [16].

Gıda ihracatı (FE), Standart Uluslararası Ticaret Sınıflandırmasının (SITC) gıda ürünlerini hayvansal, bitkisel, içecek, tohum, çekirdek, sebze vb. sınıflandırmasına göre ülkelerin gıda ihracatının toplam ihracata oranını göstermektedir [17]. Sanayi ürünleri ihracatı (MAE), SITC tarafından ülkelerin sanayi ürünleri; makine ve nakliye ekipmanları, temel sanayi ürünleri, demir dışı metaller, kimyasallar, çeşitli sanayi ürünleri olmak üzere sınıflandırılarak hesaplanmaktadır [18]. Mal ihracatı (MEE), ülkelere göre gemide teslim edilen mal ticareti miktarını göstermektedir. Ekonomiye giren veya çıkan malların miktarı, gümrük raporlarından veya finansal işlem raporlarından elde edilmektedir [19]. Lojistik performans indeksi (LPI), bir ülkenin lojistiğinin; gümrükleme sürecinin etkinliği, Ticaret ve ulaştırma ile ilgili altyapının kalitesi, rekabetçi fiyatlar düzenleme kolaylığı, lojistik

hizmetlerin kalitesi, sevkiyatları izleme kalitesi, planlanan süre içerisinde gönderilerin alıcıya ulaşma sıklığına göre 1'den 5'e kadar puanlanması ile elde edilmektedir.

Ülkelerin LPI puanları, Dünya Bankası (WB) tarafından akademik, uluslararası kurumlar, özel şirketler ve uluslararası lojistikle uğraşan kişilerle ortaklaşa yürütülen anketler dikkate alınarak belirlenmektedir[20]. Çalışmada LPI, sekiz farklı parametre esas alınarak incelenmektedir. İstatistiksel incelemeler 85 farklı ülke baz alınarak yapılmaktadır. Verilerde karşılaştırma, sınıflandırma yapılabilmesi ve tahmin modellerinin geliştirilebilmesi için logaritmik transformasyon uygulanarak datalar normal dağılıma uygun hale getirilmektedir. Dataların $\log(x+1)$ transformasyonu sonrası ülkelere göre değişimi şekil 1'de verilmektedir [21].



Şekil 1. LPI ve etken parametrelerin ülkelere göre değişimi

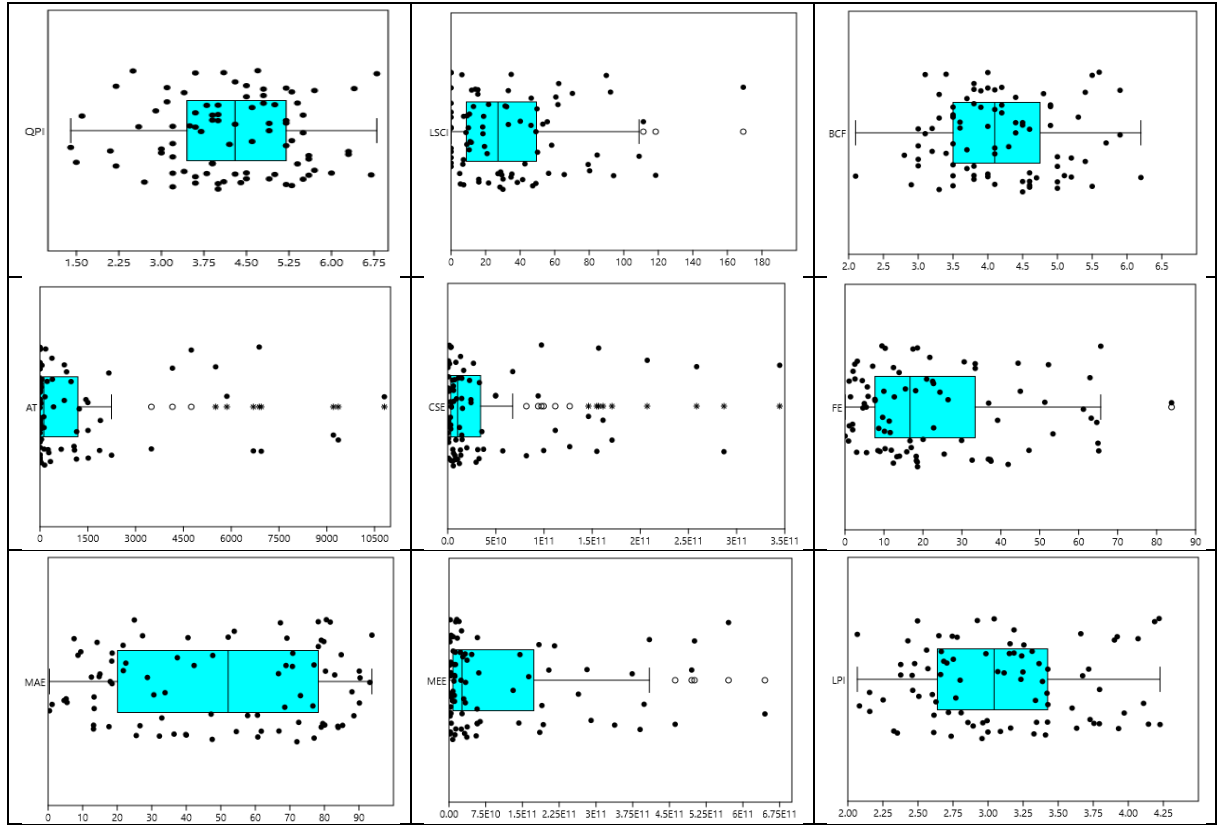
Tablo 1’de incelenen parametrelerin özet istatistikleri verilmektedir. Analiz edilen 85 ülkenin QPI’ sı 1,4 ile 6,8 arasında değişmektedir. Ortalaması ve standart sapması $4,26 \pm 1,20$ ve varyasyon katsayısı %28,11’dir. Analiz edilen ülkelerin %25’inin QPI değeri 3,45 ile ortalamanın altındadır. %75’inin ise QPI değeri 5,2’nin altındadır. LSCI değerlerine bakıldığında 0 ile 169,2 aralığında değişmektedir. 0 değerini alan ülkelere bakıldığında denize kıyısı olmayan ülkeler olduğu görülmektedir. Bu da o ülkelerde layner taşımacılığının yapılamadığı göstermektedir. Ortalaması ve standart sapması $33,51 \pm 32,95$, değişim katsayısı %98,32’dir. Analiz edilen ülkelerin %25’inin LSCI değerleri 8,89’dan , %75’inin ise 49,45’ten düşük olduğu görülmektedir.

Ülkelerin BCF değerleri incelendiğinde 2,1 ile 6,2 aralığında değişiklik göstermekte, ortalama ve standart sapması $4,16 \pm 0,84$ ’tür. Verilerin varyasyon katsayısı %20,11’dir. BCF değerlerinin %25’inin 3,5’ten, %75’inin ise 4,75’ten düşük olduğu görülmektedir. AT değerleri incelendiğinde 0,003 ile 21304,59 milyon ton-km aralığında olduğu görülmektedir. Hava yolu yük taşımacılığı hacminin ülkelere göre ortalaması ve standart sapması $1439,17 \pm 3200,4$ milyon ton-km, varyasyon katsayısı %222,38’dir. Ülkelerin %25’inin hava yolu yük taşımacılığı hacmi 2,30 milyon ton –km den, %75’inin ise 1190,87 milyon ton-km’den düşük olduğu belirlenmektedir. Ayrıca At değerlerine göre ülkelerin %75’inin ortalamanın altında aldığı görülmektedir. CSE değerlerine bakıldığında 317000000 \$ ile 34500000000 \$ aralığında değişmektedir. Ülkelerin ortalaması ve standart sapması $39500000000 \pm 68300000000$ \$, varyasyon katsayısı %172,68 çıkmaktadır. Analiz edilen ülkelerinin %25’inin CSE değerlerinin 31100000000 \$’dan düşük %25’inin ise 34200000000 \$’dan yüksek olduğu görülmüştür.

Ülkelerin FE değerleri analiz edildiğinde %2 ile %83,82 oranında değişim göstermektedir. FE oranının ülkelere göre ortalaması ve standart sapması $22,29 \pm 19,72$, değişim katsayısı ise %88,48 çıkmaktadır. Ülkelerin %25’inin FE oranının %7,69’dan düşük, %75’inin ise %33,42’den düşük olduğu analiz edilmektedir. Ülkelerin sanayi ürünlerinin ihracattaki payı %0,38 ile %93,76 aralığında değişmektedir. MAE değerlerinin kıstas alınan 85 ülkeye göre ortalaması ve standart sapması $49,42 \pm 29,25$, varyasyon katsayısı ise %59,19 çıkmaktadır. Analiz edilen ülkelerin %25’inin MAE oranı %20,11’den düşük, %75’inin ise %78,23’ten düşük çıkmaktadır. MEE değerlerine bakıldığında en az MEE 6960000000 \$, en fazla ise 2100000000000 \$ olduğu görülmektedir. Ülkelerin MEE ortalaması ve standart sapması $138000000000 \pm 295000000000$ \$, değişim katsayısı ise % 213,36 çıkmaktadır. Ülkelerin %25’inin MEE değeri 77500000000 \$ dan, %75’inin ise 173000000000 \$ dan düşük olduğu görülmektedir. Ülkelerin LPI değerleri incelendiğinde 2,07 ile 4,23 aralığında çıkmaktadır. 85 ülkenin LPI ortalaması ve standart sapması $3,08 \pm 0,56$, değişim katsayısı ise %18,24 çıkmaktadır. Ülkelerin %25’inin LPI değeri 2,64’ten %75’inin ise 3,42’den düşük olduğu belirlenmektedir.

Tablo 1. LPI ve etken parametrelerin özet istatistikleri

	QPI	LSCI	BCF	AT	CSE	FE	MAE	MEE	LPI
N	85	85	85	85	85	85	85	85	85
Min	1,4	0	2,1	0,003	3,17E+08	0,02747	0,382269	6,96E+08	2,067254
Max	6,8	169,2	6,2	21304,59	3,45E+11	83,82269	93,75454	2,10E+12	4,225967
Mean	4,255294	33,51153	4,161176	1439,168	3,95E+10	22,29044	49,41816	1,38E+11	3,081765
Std. error	0,129722	3,573615	0,09075	347,1321	7,41E+09	2,139095	3,172479	3,20E+10	0,060983
Variance	1,430359	1085,512	0,700022	1,02E+07	4,66E+21	388,9367	855,4932	8,72E+22	0,31611
Stand. dev	1,195976	32,9471	0,836673	3200,4	6,83E+10	19,72148	29,24882	2,95E+11	0,562237
25 prcntil	3,45	8,885	3,5	2,2995	3,11E+09	7,690892	20,11319	7,75E+09	2,63853
75 prcntil	5,2	49,445	4,75	1190,866	3,42E+10	33,42057	78,23348	1,73E+11	3,424785
Skewness	-0,19719	1,489061	0,282235	3,783544	2,549824	1,134739	-0,1079	4,518782	0,288052
Kurtosis	-0,26132	2,765624	-0,38142	18,17265	6,712543	0,490721	-1,4954	25,40394	-0,75861
Coeff. var	28,1056	98,31573	20,10666	222,3785	172,678	88,47505	59,18637	213,3608	18,24398



Şekil 2. Parametrelerin box-jitter grafikleri

Verilerin çarpıklık katsayısı incelendiğinde LSCI, AT, CSE, FE ve MEE parametrelerinin normal dağılıma uygun olmadığını göstermektedir. Bu da veriler için transformasyon yapılmasının gerekliliğini göstermektedir. Şekil 2’de parametrelerin ham değerleri esas alınarak box-jitter dağılımları verilmektedir. Grafiklere göre LSCI, AT, CSE, FE, MEE parametrelerinin sağa çarpık olduğu açık bir şekilde görülmektedir. QPI, BCF, MAE ve LPI parametrelerinin ise medyan değerinin kutuyu simetriğe yakın ayırmasından dolayı normal dağılıma yakın olduğu görülmektedir.

LPI ve değişkenler arasında $\alpha=0,05$ anlamlılık düzeyinde farklılık olup olmadığının testi için öncelikle varyansların homojenliği testi için F testi uygulanmaktadır. Varyans homojenliği testinde H_0 hipotezi, $\sigma_1^2=\sigma_2^2$ ise varyanslar homojendir, değil ise heterojen olması üzerine kurulmaktadır. Tablo 2 de varyans homojenliğinin test edilmesi için F testi sonuçları verilmektedir. Tabloda her bir değişkenin p değerleri incelendiğinde $\alpha=0,05$ ve $\alpha=0,01$ anlamlılık düzeyinde H_0 hipotezinin red edildiği görülmektedir. Yani tüm değişkenler ve LPI arasında varyansların heterojen olduğu söylenebilmektedir. Bu durumda varyansların heterojen olması koşuluna göre değişkenler için t testi uygulanmakta ve sonuçlar tablo 3’te verilmektedir. T testi için H_0 hipotezi, LPI ve değişken parametrelerin ortalaması arasında fark olmaması üzerine kurulmaktadır. Tablodaki p değerleri incelendiğinde hem $\alpha=0,05$ hem de $\alpha=0,01$ anlamlılık düzeyinde değişkenler ve LPI değerlerinin arasında önemli derecede fark olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

Tablo 2. LPI ve değişkenler arasında varyansların homojenliği için F testi

	QPI	LSCI	BCF	AT	CSE	FE	MAE	MEE	LPI
Ortalama	4,255294	33,51153	4,161176	1439,168	3,95E+10	22,29044	49,41816	1,38E+11	3,081765
Varyans	1,430359	1085,512	0,700022	10242562	4,66E+21	388,9367	855,4932	8,72E+22	0,31611
Gözlem	85	85	85	85	85	85	85	85	85
df	84	84	84	84	84	84	84	84	84
F	4,524874	3433,967	2,214489	32401876	1,48E+22	1230,384	2706,314	2,76E+23	
P(F<=f) tek-uçlu	1,96E-11	2,6E-125	0,000168	3E-292	0	1,3E-106	5,6E-121	0	
F Kritik iki-uçlu	1,434729	1,434729	1,434729	1,434729	1,434729	1,434729	1,434729	1,434729	

Tablo 3. LPI ve değişkenler arasında varyansların heterojen olması durumuna göre t testi

	QPI	LSCI	BCF	AT	CSE	FE	MAE	MEE	LPI
Ortalama	4,255294	33,51153	4,161176	1439,168	3,95E+10	22,29044	49,41816	1,38E+11	3,081765
Varyans	1,430359	1085,512	0,700022	10242562	4,66E+21	388,9367	855,4932	8,72E+22	0,31611
Gözlem	85	85	85	85	85	85	85	85	85
Öngörülen Ortalama Farkı	0	0	0	0	0	0	0	0	0
df	119	84	147	84	84	84	84	84	84
t Stat	8,186964	8,513881	9,872366	4,137002	5,339156	8,976168	14,60304	4,321105	
P(T<=t) tek-uçlu	1,71E-13	2,82E-13	2,99E-18	4,16E-05	3,91E-07	3,31E-14	4,53E-25	2,12E-05	
t Kritik tek-uçlu	1,657759	1,663197	1,655285	1,663197	1,663197	1,663197	1,663197	1,663197	
P(T<=t) iki-uçlu	3,42E-13	5,65E-13	5,98E-18	8,31E-05	7,82E-07	6,63E-14	9,06E-25	4,24E-05	
t Kritik iki-uçlu	1,9801	1,98861	1,976233	1,98861	1,98861	1,98861	1,98861	1,98861	

Değişkenler arasındaki çapraz korelasyon ilişkisi Tablo 4’te verilmektedir. $\alpha=0,05$ anlamlılık düzeyinde LPI ile diğer değişkenler arasında anlamlı bir ilişki olduğu görülmektedir. Bu nedenle LPI tahmin modellerinin oluşturulmasında tüm değişkenler dikkate alınmaktadır. LPI ile en güçlü ilişki CSE arasında çıkmaktadır. En zayıf ilişki ise %39,2 ile MAE parametresinde görülmektedir. FE parametresi ve LPI arasında ise negatif ilişki görülmektedir. Bu da günümüzde tarım ve hayvancılık ülkesi olmanın lojistik performans indeksini düşürdüğünü göstermektedir.

Tablo 4. Parametrelerin çapraz korelasyon değerleri

	QPI	LSCI	BCF	AT	CSE	FE	MAE	MEE	LPI
QPI		0,65817	0,66431	0,47151	0,58328	-0,24587	0,30318	0,50528	0,73054
LSCI	0,65817		0,22726	0,53709	0,64338	-0,25642	0,36073	0,65043	0,52714
BCF	0,66431	0,22726		0,34151	0,50721	-0,30764	0,24497	0,36284	0,69665
AT	0,47151	0,53709	0,34151		0,76243	-0,42696	0,14195	0,78363	0,66826
CSE	0,58328	0,64338	0,50721	0,76243		-0,41727	0,501	0,86619	0,83804
FE	-0,24587	-0,25642	-0,30764	-0,42696	-0,41727		-0,00975	-0,49437	-0,47316
MAE	0,30318	0,36073	0,24497	0,14195	0,501	-0,00975		0,30859	0,39206
MEE	0,50528	0,65043	0,36284	0,78363	0,86619	-0,49437	0,30859		0,74805
LPI	0,73054	0,52714	0,69665	0,66826	0,83804	-0,47316	0,39206	0,74805	

Ülkeler arasındaki benzerlikleri ve farklılıkları ortaya koymak amacıyla, klasik kümeleme ve SIMPER (Similarity Percentage) analizleri yapılmaktadır. Kümeleme analizinde aritmetik ortalama ile ağırlısız çift grup algoritması (UPGMA) ve Chord benzerlik indeksi kullanılmaktadır. QPI, LSCI, BCF, AT, CSE, FE, MAE, MEE ve LPI parametreleri dikkate alınarak Tablo 5’teki gibi sınıflandırılmaktadır. Sınıflandırmanın kofenetik korelasyon katsayısı %80,54 (Cofen. Corr.=0,8054) bulunmaktadır. SIMPER analizi, her parametrenin ülkeler arasındaki farklılığa yol açma oranlarını belirlemede kullanılmaktadır. Analizde Chord benzerlik ölçütü kullanılmaktadır. Analiz sonuçları Tablo 6’da verilmektedir. Ülkelerin sınıflandırılmasında en fazla katkırı %65,16 oranıyla AT parametresi vermektedir.

Tablo 5. Ülkelerin değişkenlere göre sınıflandırılması

A1	A21	A221	A222	B1	B21	B22
Katar	Lüksemburg, Etiyopya	Filipinler, Belçika, Kore Cumhuriyeti, Mısır, Arap Cumhuriyeti, Finlandiya, Türkiye, Meksika, Japonya, İspanya, Birleşik Krallık, Fransa, Almanya, Kanada, Hindistan, Çin, Rusya, Kuveyt, Bahreyn, Avustralya, Endonezya, Şili, Brezilya, Tayland, Kolombiya, Umman, Suudi Arabistan, İtalya, Hollanda, Malezya, Singapur	Ürdün, Fas, İrlanda, Yunanistan, Portekiz, Pakistan, Arjantin, Polonya, Ukrayna, İzlanda, Namibya, Yeni Zelanda, Ekvador, Peru, Lübnan, Panama	Moğolistan, Cezayir, Çek Cumhuriyeti, Kazakistan, Nijerya, Bolivya	Kırgız Cumhuriyeti, Moldova, Lao PDR, Nepal, Paraguay, Uganda, Zimbabve	Fildişi Sahili, Estonya, Slovenya, Gürcistan, Letonya, Litvanya, Tunus, Hırvatistan, Bulgaristan, Romanya, Kamboçya, Madagaskar, El Salvador, Myanmar, Mozambik, Honduras, Kosta Rika, Benin, Senegal, Gana, Guatemala, Kıbrıs, Malta

Tablo 6. SIMPER analizine göre parametrelerin sınıflandırmaya katkıları

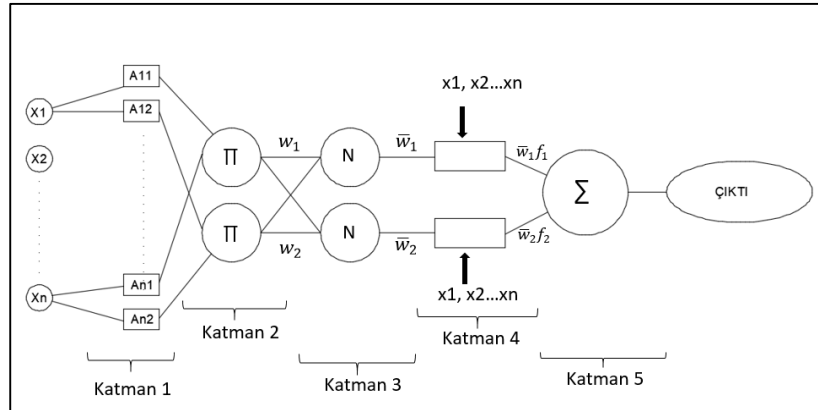
Taxon	Av. dissim	Contrib. %	Cumulati ve %	Mean A21	Mean A222	Mean B21	Mean A221	Mean B22	Mean B1	Mean A1
AT	0,01676	65,16	65,16	3,51	2,06	0,298	3,26	0,431	1,29	3,96
LSCI	0,003837	14,92	80,08	0	1,49	0	1,73	1,17	0,4	0,913
FE	0,002515	9,778	89,86	1,47	1,42	1,63	0,955	1,35	0,707	0,0118
MAE	0,001382	5,373	95,23	1,52	1,62	1,44	1,71	1,65	0,989	0,141
MEE	0,000597	2,319	97,55	9,83	10,4	9,4	11,3	9,92	10,4	10,8
CSE	0,000489	1,903	99,45	10,2	10	8,94	10,7	9,57	9,52	10,2
QPI	8,69E-05	0,3378	99,79	0,69	0,747	0,515	0,765	0,703	0,555	0,82
BCF	4,30E-05	0,1672	99,96	0,721	0,705	0,663	0,734	0,692	0,664	0,806
LPI	1,06E-05	0,04138	100	0,623	0,61	0,531	0,651	0,575	0,573	0,663

2.2. Metot

Çalışmanın bu bölümünde LPI tahmin modellemesinde kullanılan yöntemlerden bahsedilmektedir. Modellemelerde yapay zekâ tekniklerinden yapay sinir ağları (YSA) ve uyarlanabilir sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ANFIS), istatistiksel yöntemlerden ise çoklu doğrusal regresyon (MLR) yöntemleri tahmin modellemesinde kullanılmaktadır.

İstatistiksel bir yöntem olan regresyon analizi değişkenler arasındaki sebep-sonuç ilişkisinin belirlenmesinde kullanılmaktadır [22]. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerindeki etkisi katsayılar ile ifade edilir. Bu katsayı, regresyon katsayısıdır ve değişkenin bağımlılık derecesini göstermektedir. Bu çalışmada, MLR tekniklerinden doğrusal, etkileşimli, karesel ve basit karesel regresyon kullanılmaktadır.

ANFIS yöntemi; YSA ve bulanık mantık yöntemlerinden oluşan hibrit bir modeldir. Bulanık çıkarım sistemi (FIS) üç ana gruba ayrılmaktadır: Mamdani, Sugeno, Tsukamoto [23]. Bulanık sistemlerin temel yapısı olan üyelik fonksiyonlarının uygun şekilde seçilmesi ANFIS performansına bağlıdır. Öğrenme yeteneğiyle YSA hem bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarının en iyi parametrelerini bulmak için hem de FIS' in bulanık kurallarını oluşturmak için sistematik bir süreç sunabilmektedir [24]. ANFIS yapısı Şekil 3'te gösterilmektedir. “X1, X2, X3,...,Xn”; “A11,...,An2”; “Π”; “N” ve “wi” sırasıyla girdi parametrelerini, üyelik fonksiyonlarını, kuralları, kullanılan modellemelerde sisteme uygulanan bulanık kurallardan sonra parametrelerin ağırlığını temsil etmektedir.



Şekil 3. ANFIS genel model yapısı

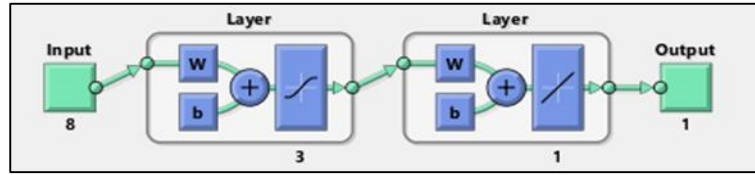
Bu çalışmada, ANFIS modelinin üyelik fonksiyonu (MF) sayısı her bağımsız değişken için ikidir. Modelin MF tipi gauss (gaussmf) üyelik fonksiyonudur. Gaussmf üyelik fonksiyonunun matematiksel formülü denklem 1'de verilmektedir. Burada f çıktıyı, x girdiyi, σ standart sapmayı ve c ise ortalamayı temsil etmektedir [25].

$$f(x; \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

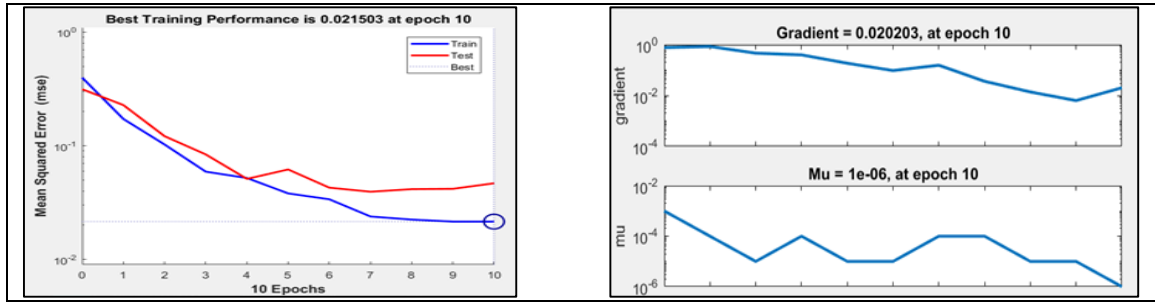
YSA yöntemi, doğrusal olmayan ilişkili problemlerde birçok istatistiksel ve yapay zekâ yöntemine kıyasla yüksek performans göstermektedir. Bir YSA modelinde, her giriş farklı ağırlıklarla çarpılmakta, daha sonra transfer fonksiyonu ile işlenmekte ve bir sonraki katmandaki nöronlara aktarılmaktadır. Bu işlemler ağdaki katman sayısına

bağlı olarak tekrarlanmaktadır. Her katmanda ağ modeli geliştirmek için yeni ağırlıklar atanarak ağıın öğrenmesi gerçekleştirilmektedir [22]. YSA yönteminin avantajlarının yanı sıra dezavantajları da bulunmaktadır. YSA yönteminde, ağırlıkların atanması kara kutu mantığına dayanmaktadır. Yani, ağırlıkların nasıl atandığı bilinmemektedir [26].

Bu çalışmada, tek gizli katmanı olan YSA modelleri oluşturulmaktadır. Yaygın olarak kullanılan MATLAB eğitim algoritmalarından gradient descent backpropagation (GD), gradient descent with momentum backpropagation (GDM), Levenberg-Marquardt backpropagation (LM) ve resilient backpropagation (RP) kullanılmaktadır. Dört eğitim algoritmasından en iyi sonucu LM algoritması vermektedir. Şekil 4'te en iyi YSA modelinin ağ yapısı görülmektedir. Gizli katmanında tansig ve çıkış katmanında purelin transfer fonksiyonu kullanılmaktadır. Ayrıca ağıın gizli katmanında 3 nöron kullanılmaktadır. En iyi modelin eğitim süreci ve MSE grafikleri Şekil 5'te verilmiştir.



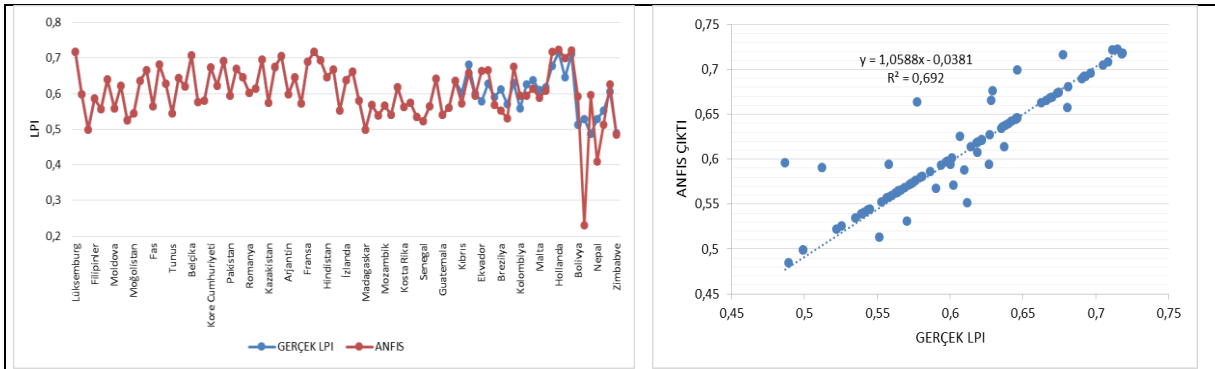
Şekil 4. En iyi YSA modelinin ağ yapısı



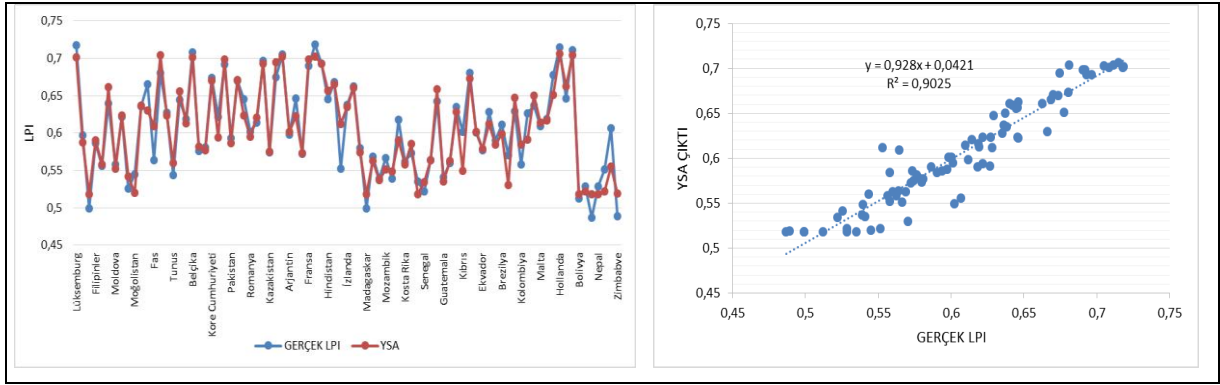
Şekil 5. En iyi YSA modelinin epoch sayısına göre HKO değişimi ve en iyi YSA modelinin eğitim süreci

3. Sonuçlar ve Tartışma

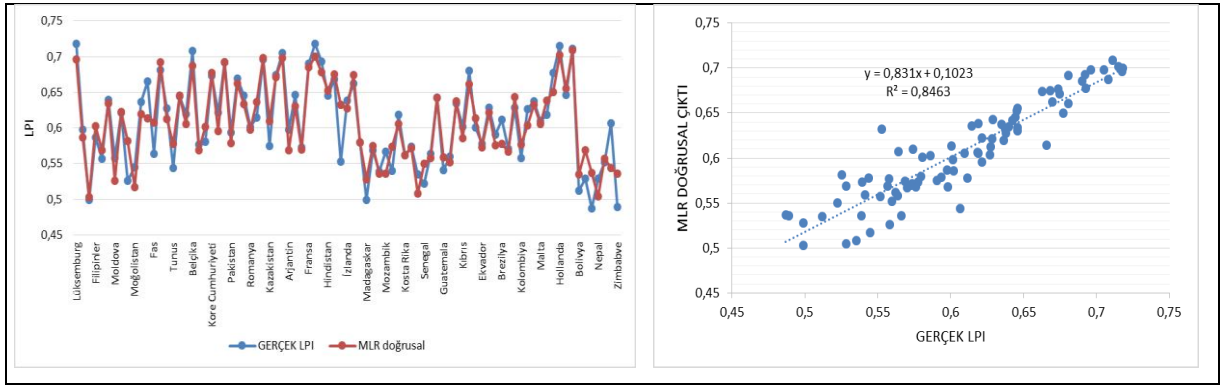
Altı farklı teknikle oluşturulan tahmin modellerinin en iyi model sonuçları şekil 6, 7, 8, 9, 10 ve 11'de gösterilmektedir.



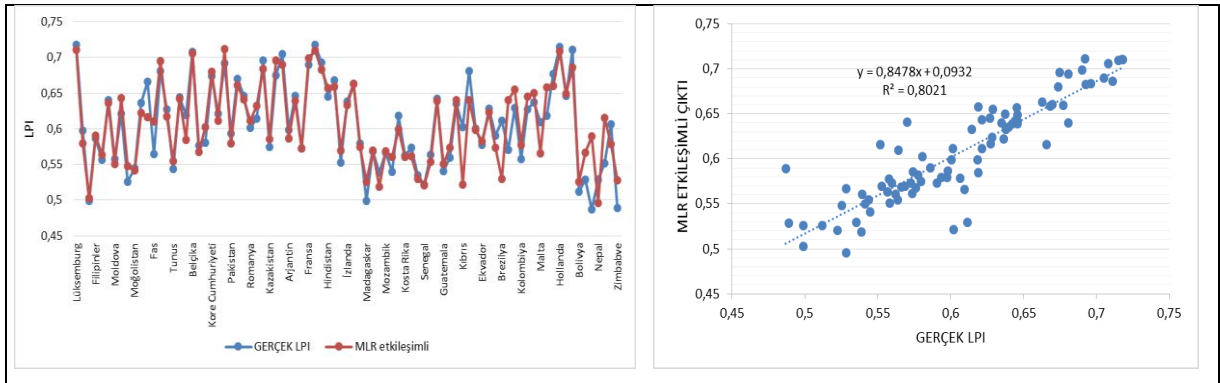
Şekil 6. Gerçek LPI değerleri ile ANFIS model sonuçlarının karşılaştırılması ve ANFIS model sonuçları ile gerçek LPI değerlerinin saçılım grafiği



Şekil 7. Gerçek LPI değerleri ile YSA model sonuçlarının karşılaştırılması ve YSA model sonuçları ile gerçek LPI değerlerinin saçılım grafiği

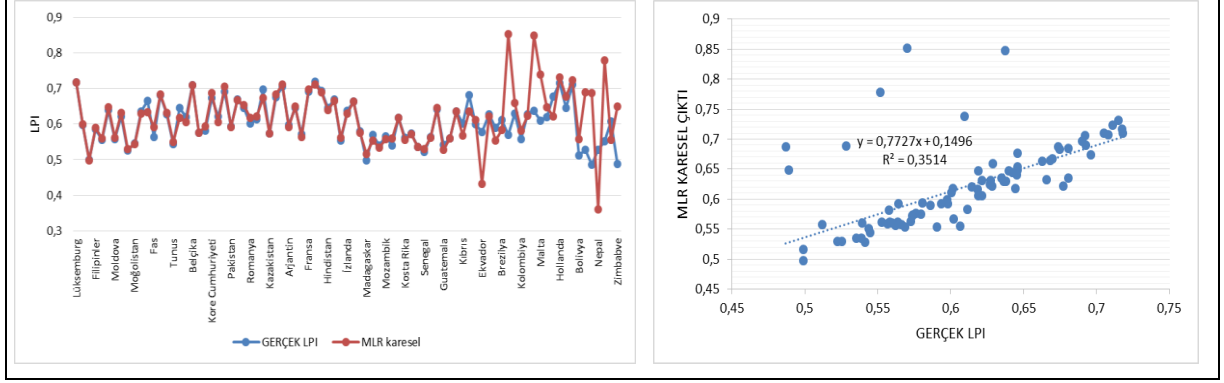


Şekil 8. Gerçek LPI değerleri ile MLR doğrusal model sonuçlarının karşılaştırılması ve MLR doğrusal model sonuçları ile gerçek LPI değerlerinin saçılım grafiği

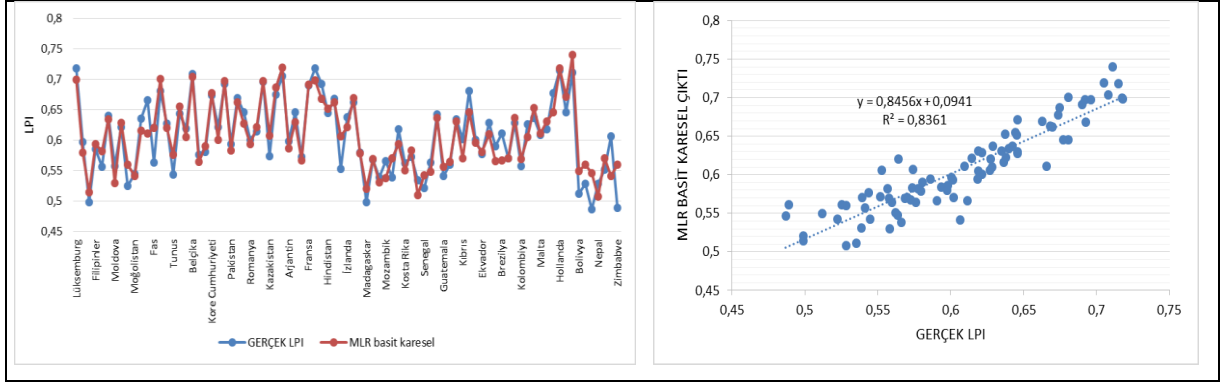


Şekil 9. Gerçek LPI değerleri ile MLR etkileşimli model sonuçlarının karşılaştırılması ve MLR etkileşimli model sonuçları ile gerçek LPI değerlerinin saçılım grafiği

Yapay Zekâ ve İstatistiksel Yöntemler ile Küresel Ticarete Rekabet Ölçütü Olan Lojistik Performans İndeksinde (LPI) Etken Parametrelerin Ülke Bazlı İncelenmesi ve Tahmin Modellerinin Geliştirilmesi

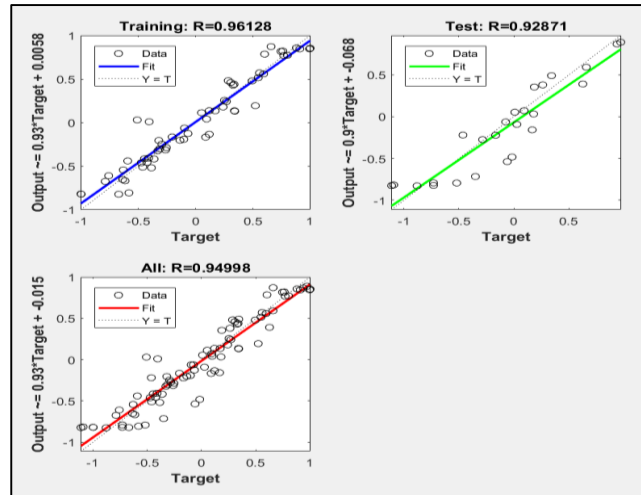


Şekil 10. Gerçek LPI değerleri ile MLR karesel model sonuçlarının karşılaştırılması ve MLR karesel model sonuçları ile gerçek LPI değerlerinin saçılım grafiği



Şekil 11. Gerçek LPI değerleri ile MLR basit karesel model sonuçlarının karşılaştırılması ve MLR basit karesel model sonuçları ile gerçek LPI değerlerinin saçılım grafiği

Altı teknik ile geliştirilen modellerden en iyi performansa sahip model YSA modelidir. En iyi YSA modelinin eğitim ve test periyotlarına göre ilişki grafikleri Şekil 12’de verilmektedir. MATLAB programında yapılan analiz sonucunda en iyi YSA modelinin ağırlık ve taban değerleri alınmış ve Denklem 2’de YSA formülü oluşturulmaktadır.



Şekil 12. En iyi YSA modelinin eğitim ve test sonuçlarının ilişki grafikleri

$$LPI_{YSA} = \text{purelin} \left(\tan \text{sig} \left\{ \begin{bmatrix} -2,13849 & 0,875191 & -0,15029 & 0,205434 & -1,45779 & -0,06178 & -0,11327 & -0,52984 \\ 0,937982 & 2,490775 & 3,434398 & 1,967771 & -2,72981 & -2,95108 & 1,68057 & 2,917624 \\ -2,08598 & 0,471223 & -1,17416 & -2,21344 & 3,134528 & 5,541638 & 0,754601 & 0,293774 \end{bmatrix}^T \right\} \times \begin{bmatrix} QPI \\ LSCI \\ BCF \\ AT \\ CSE \\ FE \\ MAE \\ MEE \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1,538773 \\ 1,797445 \\ -6,74912 \end{bmatrix} \times [-0,58553 \quad 0,293335 \quad 0,726483]^T + |0,774719| \right) \quad (2)$$

Performans değerlendirme kriterleri her model için hesaplanmaktadır. Performans kriterleri hataların karesinin ortalaması (HKO), ortalama yüzde hata (OYH) ve model sonuçları ile gerçek LPI değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren korelasyon katsayısıdır (R). HKO ve OYH eşitlik 3 ve 4'teki gibi verilmektedir.

$$MSE = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N Y_{i(real)} - Y_{i(estimated)} \right)^2 \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N Y_{i(real)} - Y_{i(estimated)} \right| \quad (4)$$

Altı modelin performans kriterleri Tablo 7'de verilmektedir. Performans değerleri incelendiğinde karşılaştırma grafikleri ile tutarlı sonuçlar elde edilmektedir. En az hata miktarı YSA modelinde görülmektedir. YSA modelinin R, MSE ve MPE değerleri sırasıyla % 94,998, 0,00035 ve %1,35'dir. YSA den sonra en iyi model, 0,00054 HKO ve %91,994 R ile MLR doğrusal modelidir. En kötü performansa sahip model ise %59,28 ilişki ve 0,00419 HKO ile MLR karesel modelidir.

Tablo 7. Tahmin modellerinin performans sonuçları

	R	HKO	OYH(%)
YSA	0,94998	0,00035	1,35
ANFIS	0,83185	0,00177	1,49
MLR doğrusal	0,91994	0,00054	1,73
MLR etkileşimli	0,89561	0,00071	1,81
MLR karesel	0,59280	0,00419	3,05
MLR basit karesel	0,91438	0,00058	1,84

4. Sonuçlar

Bu çalışmada ülkelerin küresel ölçekte lojistikteki önemini belirleyen lojistik performans indeksi(LPI) ve performans indeksine etken değişkenler üzerinde durulmaktadır. Çalışmanın ilk aşamasında LPI'ne etken parametrelerin ne ölçüde etkili olduğu kümeleme, SIMPER analizleri ile ortaya konulmaktadır. Analiz sonucunda LPI'nde en etkili parametrenin AT olduğu ortaya konulmaktadır. Ayrıca ülkelerin belirlenen parametrelere göre sınıflandırılmasında da AT parametresinin en etkili olduğu göze çarpmaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde LPI'ne etken parametreler dikkate alınarak tahmin modelleri oluşturulmaktadır. Tahmin modellerinin karşılaştırılmasında HKO, OYH, R performans kriterleri dikkate alınmaktadır. Buna göre en iyi performansa sahip tahmin modeli YSA yöntemi ile oluşturulan modeldir.

Bu çalışmadan elde edilen LPI denklemleri dikkate alınarak, ülkelerin liman altyapı kalitesi, layner taşımacılığı bağlantı endeksi, gümrük giderleri, havayolu yük taşımacılığı, ticari hizmet ihracatı, gıda ihracatı, imalat ihracatı ve mal ihracatı göstergelerine bağlı olarak geleceğe yönelik ülkelerin lojistik performansları hakkında bilgi sahibi olacakları düşünülmektedir. Ayrıca ortaya konan denklemler sayesinde eşit ağırlıklı olarak belirlenen LPI değeri yerine farklı ağırlıklarda girdiler ile yeni LPI değeri belirlenmektedir. Bunun yanı sıra anket usulü belirlenen sübjektif LPI değeri yerine, bu çalışmadan elde edilen denklemler ile ülkelerin lojistik performans ölçütleri dikkate alınarak daha objektif LPI değerine ulaşılacağı düşünülmektedir.

Referanslar

- [1] Bayraktutan Y, Tüylüoğlu Ş, Özbilgin M. Lojistik sektöründe yoğunlaşma analizi ve lojistik gelişmişlik endeksi: Kocaeli örneği. Journal of Alanya Faculty of Business/Alanya İletme Fakültesi Dergisi 2012; 4(3): 61-71.
- [2] Gergin R E, Baki B. Türkiye'deki bölgelerin lojistik performanslarının bütünleştirilmiş AHS ve TOPSIS yöntemiyle değerlendirilmesi. Business & Economics Research Journal 2015; 6(4): 115-135.
- [3] Çemberci M, Civelek ME, Canbolat N. The moderator effect of global competitiveness index on dimensions of logistics performance index. Procedia-Social and Behavioral Sciences 2015; 195, 1514-1524.
- [4] Martí L, Puertas R, García L. The importance of the Logistics Performance Index in international trade. Applied Economics 2014; 46(24), 2982-2992.
- [5] Ulutaş A, Karaköy Ç. An analysis of the logistics performance index of EU countries with an integrated MCDM model. Economics and Business Review 2019; 5(4): 49-69.
- [6] Başar SI, Bozma G. (2017). Ülkelerin Lojistik Performanslarının Belirleyicileri. Kafkas Üniversitesi. Sosyal Bilimler Enstitüsü 2017; (20), 447-458.
- [7] Güner S ve Coskun E. Comparison of impacts of economic and social factors on countries' logistics performance: a study with 26 OECD countries. Research in Logistics and Production 2012; 2(4): 329-343.
- [8] Uca N, Civelek M E, Çemberci M. The effect of the components of logistics performance index on gross domestic product: conceptual model proposal. Eurasian Business&Economics Journal 2015;1: 86-93.
- [9] Karaköy Ç, Üre S. Yüksek ve orta gelirli ülkelerde büyüme ve lojistik performans endeksi arasındaki ilişki. Al Farabi 4. Uluslararası sosyal bilimler kongresi Erzurum. 2019; 575-580, Erzurum.
- [10] Jhavar A, Garg SK, Khera SN. Analysis of the skilled work force effect on the logistics performance index—case study from India. Logistics Research 2014; 7(1), 117.
- [11] <https://www.indexmundi.com/facts/indicators/IQ.WEF.PORT.XQ> (10.10.2019)
- [12] <https://datacatalog.worldbank.org/liner-shipping-connectivity-index-maximum-value-2004-100> (10.10.2019)
- [13] <https://datacatalog.worldbank.org/burden-customs-procedure-wef-1extremely-inefficient-7extremely-efficient> (10.10.2019)
- [14] <https://datacatalog.worldbank.org/air-transport-freight-million-ton-km-1> (10.10.2019)
- [15] <https://www.imf.org/external/np/sta/bop/bopman.pdf> (10.10.2019)
- [16] [https://datacatalog.worldbank.org/search?search_api_views_fulltext_op=AND&query=Commercial%20service%20exports%20\(current%20US\\$\)&nid=&sort_by=search_api_relevance&sort_order=DESC](https://datacatalog.worldbank.org/search?search_api_views_fulltext_op=AND&query=Commercial%20service%20exports%20(current%20US$)&nid=&sort_by=search_api_relevance&sort_order=DESC) (10.10.2019)
- [17] <https://www.indexmundi.com/facts/indicators/TX.VAL.FOOD.ZS.UN> (10.10.2019)
- [18] <https://datacatalog.worldbank.org/manufactures-exports-merchandise-exports-0> (10.10.2019)
- [19] <https://www.indexmundi.com/facts/indicators/TX.VAL.MRCH.CD.WT> (10.10.2019)
- [20] <https://www.indexmundi.com/facts/indicators/LP.LPI.OVRL.XQ> (10.10.2019)
- [21] <https://www.worldbank.org/> (10.10.2019)
- [22] Dal K, Cansiz OF, Ornek M, Turedi Y. Prediction of footing settlements with geogrid reinforcement and eccentricity. Geosynthetics International 2019; 26 (3): 1-12.
- [23] Unes F, Joksimovic D, Kisi O. Plunging flow depth estimation in a stratified dam reservoir using neuro-fuzzy technique. Water Resour. Manage 2015; 29: 30055-3077.
- [24] Jang JSR, Sun CT, Mizutani E. Neurofuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence IEEE Transactions on Automatic Control 1997; 42(10): 1482-1484.
- [25] <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/gaussmf.html> (21.11.2019)
- [26] Karayiannis N, Venetsanopoulos A N. (2013). Artificial neural networks: learning algorithms, performance evaluation, and applications (Vol. 209). Springer Science & Business Media.

Güneş Enerjisi ile Reyhan Kurutma Sisteminin Tasarlanması, İmalatı, Deneysel İncelenmesi ve Alternatif Yöntemlerle Karşılaştırılması

Tarkan KOCA^{1*}, Merve Nur POLAT²

¹ Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

² Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

*¹ tarkan.koca@inonu.edu.tr, ² mervenuratar@gmail.com

(Geliş/Received: 30/05/2020;

Kabul/Accepted: 22/08/2020)

Öz: Bu çalışmada güneş enerjisi ile reyhan kurutma sistemi tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilerek mor reyhan bitkisi kurutma deneyleri yapılmıştır. Deneyler üç grup şeklinde gerçekleştirilmiştir. Birinci grup deneylerde reyhanlar kurutma kabineye konmuş ve sıcaklıklar 45°C, 50°C, 55°C 'ye ulaştığında sabit tutulmuş ve birer saat aralıklarla kütle ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İkinci grup deneylerde kurutma makinesinde sıcaklık 45°C, 50°C, 55°C, 60°C 'ye ulaştığında sabit tutularak reyhanlar kurutma makinesinin içerisine konmuş ve kuruma gerçekleştirilmiştir. Üçüncü grup deneylerde farklı başlangıç kütlelerine sahip reyhanlar kurutma kabineye konularak kurumaları sağlanmıştır. Kuruma süreleri 3 ile 7 saat arasında olmuştur. Kurutma işlemlerinin tamamlanmasının ardından kurutulan ürünlerin su aktivitesi ve renk analizi deneyleri yapılmıştır. Kurutulmuş reyhanın nihai nem içeriği %15'in altına düşürülmüştür. Su aktivite değerleri literatürde belirtilen 0,6 değerinin altında bulunmuş ve mikrobiyal büyüme açısından güvenli kabul edilebileceği sonucuna varılmıştır. Farklı sıcaklıklarda yapılan deneylerde kuruma süreleri beklendiği gibi bulunmuştur. Renk analizi deneyleri yapılmıştır. Analizler sonucunda imalatı gerçekleştirilen bu sistemin başarılı bir şekilde reyhanın kurutulmasına olanak sağladığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Mor reyhan, kurutma sistemi, güneş enerjisi.

Experimental Study, Design and Production of Purple Basil Drying System with Solar Power and Comparison with Alternative Methods

Abstract: In this study, solar energy supported basil drying system was designed and manufactured while conducting purple basil plant drying experiments. The experiments were carried out in three groups. In the first group of experiments, basil having were placed in the drying chamber and when the temperatures reached 45°C, 50°C, 55°C, the mass was measured at one hour intervals. In the second group of experiments, when the temperature reached 45°C, 50°C, 55°C, 60°C in the dryer, basil having were put into the dryer and dried. In the third group of experiments basil having a starting mass of different were placed in the drying cabinet and dried. Drying times were between 3 and 7 hours depending on the temperature increase. After the completion of drying process, water activity and color analysis of the dried products were performed. The final moisture content of dried basil is reduced to less than 15%. Water activity values have been found below the 0,6 value specified in the literature and it has been concluded that it can be accepted as safe in terms of microbial growth. Drying times were found as expected in experiments at different temperatures. Color analysis experiments were carried out and required values were reached. As a result of the analysis, it was found that the manufactured system successfully enables the drying of basil.

Key words: Purple basil, drying system, solar energy.

1. Giriş

Reyhan bitkisi (*Ocimum basilicum* L.), Lamiacea familyasının, Ocimoideae alt familyasından *Ocimum* cinsinin bir türüdür [1,2]. Dünyada 65'in üzerinde türe sahip olan *Ocimum* bitkisinin türleri Asya, Afrika ve Orta Amerika'da doğal yayılış göstermektedir [3]. Hem taze hem de kurutulmuş olarak kullanılan reyhan bitkisi, salata, makarna, pizza, et, çorba, deniz ürünleri, tatlılar ve bazı gıda ürünlerine eklenerek farklı bir aroma katmakta ve lezzetini arttırmaktadır. Yapılan araştırmalarda reyhan bitkisinin insan sağlığı için birçok yararının olduğu tespit edilmiştir. Reyhan yapraklarının idrar söktürücü ve uyarıcı olarak kullanıldığı, öksürüğü kestiği, baş ağrısını giderdiği bilinmektedir [4]. İshal, kronik dizanteri, solunumla ilgili rahatsızlıkların, ağız ve diş hastalıklarının, mantar hastalığının tedavilerinde kullanılmaktadır [5].

* Sorumlu yazar: tarkan.koca@inonu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-6881-4153, ² 0000-0003-4609-245X

Gıdaları bozmadan uzun süre muhafaza edebilmek için kalıcı veya geçici koruma yöntemleri uygulanmaktadır. “Geçici muhafaza, gıdayı soğutarak veya soğutucuda saklayarak, gıdanın nem ve hava ile temasını keserek sağlanabilir. Kalıcı ve daha uzun süreli koruma için ise uygulanabilecek en iyi yöntem gıdaların kurutularak muhafazasını sağlamaktır” [6]. Kurutma işlemiyle gıda içeriğindeki nem seviyesinin mikroorganizmaların gelişimini engelleyecek düzeye getirilmesi amaçlanmaktadır. Kurutma teknik anlamda katının içerdiği nemin, bir gaz akımı içinde buharlaştırılarak gaza geçirilmesiyle alınmasıdır [7].

Gıdaların kurutulmasının hijyenik şartlarda gerçekleştirilmesi büyük öneme sahiptir. Tarımsal ürünlerin açık alanda yere serilerek kurutulması aflatoxin gibi zararlı etkilerin oluşmasına sebep olmaktadır. Ürün kurutucuları ile ürün kalitesinin korunarak kurutulması amaçlanmaktadır. Her alanda olduğu gibi ürünün ürün kurutucularında kurutulmasının sağlanabilmesi için enerjiye ihtiyaç vardır. Sanayi ve teknolojiadaki gelişmeler, enerji talebinin her geçen gün artmasına ve bu da dünyada büyük bir enerji sorununun ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Enerji üretiminde kullanılan, çevreye ve insanlara zarar veren petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil kaynaklı yakıtların yerine yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisinin kurutma işlemlerinde kullanılması oldukça önemlidir.

Reyhan tıbbi ve aromatik bir bitkidir. “Tıbbi ve aromatik bitkilerin hassas yapılarından dolayı, ürüne uygun hassas kurutma yöntemlerinin seçimi ayrı bir önem arz etmektedir” [1]. Yapılan çalışmalarda reyhan bitkisinin döner tamburlu kurutucuda, doğrudan değmeli kurutucuda, etüvde, mikrodalga fırınında, gölgede, güneşte, dondurarak, fırında (konvektif) kurutma, CO₂ kurutma yöntemiyle, havalı kolektörler yardımıyla kurutulduğu görülmektedir. Polatçı ve Tarhan [8], reyhan bitkisini doğrudan değmeli kurutucuda, etüvde, güneşte, gölgede ve mikrodalga fırında kurutmuşlardır. Korucu [9], reyhan (*Ocimum Basilicum* L.) bitkisini, geliştirdiği döner tamburlu kurutucuda farklı kurutma şartlarında kurutmuştur. İnan [10], reyhan bitkisini doğrudan değmeli kurutucuda farklı kurutma şartlarında kurutmuştur. Gülçimen [11], havalı güneş kolektörü, sirkülasyon fanı ve kurutma odasından oluşan deney düzeneği imal etmiş olup reyhan ve nane kurutma deneyleri yapmış ve kurutma parametreleri elde etmiştir. Cesare vd. [12], reyhan bitkisini hava ile kurutma, mikrodalga ile kurutma ve dondurarak kurutma yöntemleriyle kurutmuşlardır. Özcan vd. [13], reyhan bitkisini fırında kurutma ve güneşte kurutma yöntemleriyle kurutmuştur. Akpınar [14], güneşte kurutma yöntemiyle tıbbi ve aromatik bitkilerin kurutulmasıyla ilgili deneyler yapmıştır. Diaz-Maroto vd. [15], fırında kurutma, oda sıcaklığında havayla kurutma ve dondurarak kurutma yöntemleriyle reyhan (*Ocimum basilicum* L.) kurutmuşlardır. Demirhan ve Özbek [16], mikrodalga fırında fesleğen yapraklarını (*Ocimum basilicum* L.) kurutmuşlardır. Baritoux vd. [17], reyhanı kurutarak saklamış, üç, altı ve yedi ay muhafaza ettikten sonra uçucu yağ analizi yapmıştır. Busic vd. [18], *Ocimum basilicum* L. bitkisini dondurarak, CO₂ kurutma yöntemiyle ve fırında kurutmuşlar. Calín-Sánchez vd. [19], *Ocimum basilicum* L. bitkisini konvektif, mikrodalga ve konvektif-mikrodalga kombine yöntemleriyle kurutmuşlardır. Hassanpouraghdam vd. [20], *Ocimum basilicum* L. bitkisini fırında kurutma, gölgede kurutma ve güneşte kurutma yöntemleriyle kurutmuşlardır. Tarakemeh ve Aboutalebi [21], *Ocimum basilicum* L. bitkisini güneşte, gölgede ve fırında kurutmuşlardır. Yousif vd. [22], *Ocimum basilicum* L. bitkisinin sıcak hava yardımıyla mikrodalga fırında kurutmuşlardır.

Yapılan çalışmalarda farklı güneş enerjili kurutma sistemlerinin geliştirildiği ve farklı ürünlerin kurutulmasının gerçekleştirildiği görülmektedir. Dina vd. [23], Endonezya’da yetiştirilen kakao bitkisinin çekirdeklerini kurutmak için güneş enerjisinden faydalanarak sürekli zamanlı olan kurutma makinesi tasarlamış ve imalatını gerçekleştirmişlerdir Aktaş vd. [24], güneş enerjili bir kurutucu tasarlamış, imal etmiş ve domates kurutarak analiz etmişlerdir. Akman vd. [25], güneş enerjisi destekli kurutma sisteminin tasarımını yaparak imalatını gerçekleştirmişlerdir. Ceylan vd. [26], güneş enerjili havalı kollektörlü bir kurutma fırınında elma kurutulmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Romero vd. [27], dolaylı bir güneş enerjili kurutma sisteminin imalatını gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilen bu güneş enerjili sistemler dışında farklı yöntemler kullanılarak ahlat [28], elma [29], patlıcan [30] gibi gıdaların kurutulması deneyleri de gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde reyhan bitkisi çeşitli yöntemlerle kurutulmuştur. Yapılan bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran en önemli özellik deneylerde Malatya ili mor reyhanın kullanılması ve doğrudan güneş enerjisinden faydalanılarak enerji sarfıyatı olmadan kurutmanın sağlanmasıdır. Mor reyhan coğrafi işarette sahip olup Malatya ili Arapgir ilçesinde yetiştirilmektedir. Arapgir Mor Reyhanının yaprak yapısı yumuşak olup; 5-10 cm arası uzunlukta ve 3-6 cm arası genişlikte, renk olarak koyu mor renk hâkimdir. Arapgir Mor Reyhanı yöreye özgü bir genotip olup; tamamı mor renklidir. Bu çalışmada, mor reyhan bitkisi, tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen güneş enerjisi destekli kurutma makinesinde kurutularak; literatürde bulunan farklı kurutma yöntemleriyle kurutulan reyhan bitkisinin kuruma performanslarının ve kalite özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Malatya'nın Arapgir ilçesinde yetiştiriciliği yapılan mor reyhan (*Ocimum basilicum* L.) örneklerinin hasadı Eylül- Ekim 2019 tarihlerinde gerçekleştirilmiştir. Toplanan reyhanlar saplarından ayrılmış ve yapraklar kurutma işlemi gerçekleştirilene kadar +4 °C'de muhafaza edilmiştir. Ayıklanan reyhan yapraklarının aynı boyutlarda seçilmesine özen gösterilmiştir. Taze reyhan yapraklarının başlangıç nem içeriğinin $86,6 \pm 1,03$ olduğu gözlemlenmiştir.

2.1. Reyhan kurutma deney düzeneği

Güneş enerjisi destekli kurutma sistemi imal edilerek deneylerde kullanılmıştır. Güneş enerjisi destekli kurutucuda hedef, doğrudan güneş enerjisini kullanarak ortamın ısıtılmasını sağlamak ve ısıtılan ortamda bulunan reyhan yapraklarında bulunan nemin, bitkinin iç yapısını bozmadan hızlı bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamaktır. İmal edilen güneş enerjili kurutma sisteminin genel görünümü ve şematik resmi Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir.

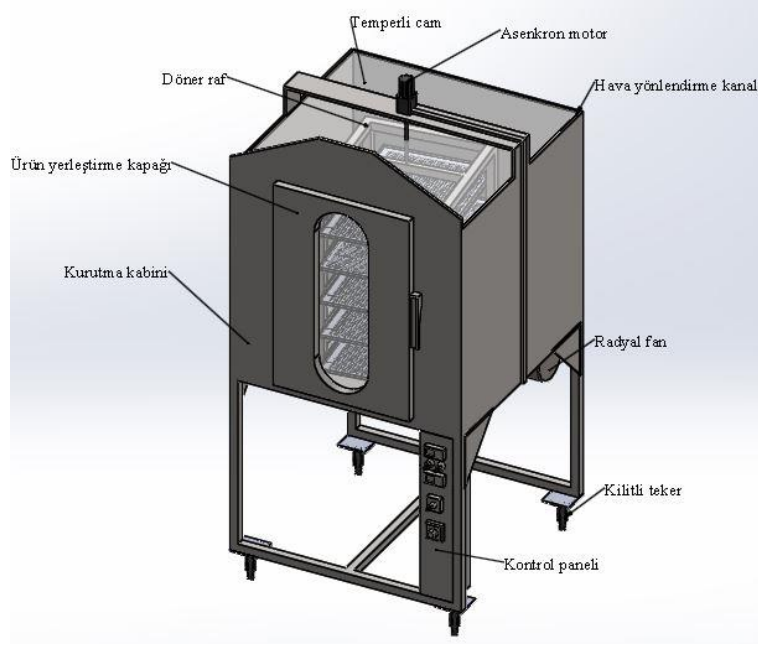


Şekil 1. Güneş enerjili kurutma sisteminin genel görünümü

Makinenin kurutma kabini 850x850x780 mm ölçülerinde metal sacdan imal edilmiştir. Kabin içerisine beş katlı döner bir raf yerleştirilmiştir. Fan yardımıyla içeriye alınan havanın kurutulmak istenen reyhanların üzerine eşit dağılımını sağlamak için rafları döndürmek amacıyla redüktörlü minyatür asenkron motor kullanılmıştır. Kullanılan motorun dönme hızı 10 devir/dakika'dır. Döner raf sistemine beş adet 600x400 mm boyutlarında delikli tepsi yerleştirilmiştir. Delikli tepsinin tercih edilmesinin sebebi reyhanların sıcak hava ile temas eden yüzey alanını artırmaktır. Sistemde hava sirkülasyonunu sağlamak ve kabin içi sıcaklığını istenen düzeyde sabit tutmak için alüminyum gövde radyal fan kullanılmıştır. Sıcaklığın istenilen değerlerde sabit tutulmasını sağlamak için fanın otomatik kontrol yardımıyla devreye girmesi sağlanmıştır. Fan yardımıyla içeriye alınan havanın raflara homojen üflenmesini sağlamak amacıyla kurutma bölgesi içerisinde belli aralıklarla delikler açılarak bir kanal oluşturulmuştur. Kabin içi sıcaklık, dış sıcaklık ve nemi ölçmek için sıcaklık ve nem kontrol cihazı kullanılmıştır. Güneş ışınlarından maksimum düzeyde faydalanabilmek için makinenin tavan kısmı ve açma kapama kapağının bir kısmı temperli camdan imal edilmiştir.

Güneş enerjisi destekli reyhan kuruma sisteminde deneyler 21 gr ve 50 gr olmak üzere farklı kütlelerde reyhanlar kurutularak gerçekleştirilmiştir. Kütle artışının kuruma sürelerini etkileyip etkilemediği araştırılmış, 45°C, 50°C, 55°C ve 60°C 'de deneyler gerçekleştirilerek farklı sıcaklıklardaki kuruma sürelerinin kıyası yapılmıştır. Kurutulmuş reyhanların su aktivitesi, renk analizi gibi analizleri yapılmış ve literatürde bulunan diğer çalışmalarla kıyaslanmıştır. Deneyler üç grup şeklinde gerçekleştirilmiştir. Birinci grup deneylerde 21 gr başlangıç kütlesine sahip reyhanlar kurutma kabine konmuş ve sıcaklık istenen değere ulaştığında sabit tutularak kurumunun gerçekleşmesi sağlanmıştır. Fırın içi sıcaklığı 45°C, 50°C, 55°C 'ye ulaştığında sabit tutulmuş ve birer saat aralıklarla kütle ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İkinci grup deneylerde kurutma fırını güneşe konmuş ve sıcaklık 45°C, 50°C, 55°C, 60°C 'ye ulaştığında sabit tutularak 21 gr başlangıç kütlesine sahip

reyhanlar içerisine konmuş ve kuruma gerçekleştirilmiştir. Üçüncü grup deneylerde ise kurutma fırını güneşe konmuş ve istenen sıcaklığa ulaşıldığında 50 gr başlangıç kütlesine sahip reyanlar kurutma makinesine konularak kurumaları sağlanmıştır. Bu deneylerde de sıcaklıklar 45°C, 50°C, 55°C 'de sabit tutulmuştur. Kütle artışının kuruma zamanını etkileyip etkilemediği araştırılmıştır.



Şekil 2. Deney düzeneğinin şematik görünümü

Delikli tepsilere konularak güneş enerjili kurutma makinasında kurutulan mor reyanların taze ve kurutulmuş görünüşleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Taze ve kurutulmuş mor reyan

2.2. Nem tayini

Taze reyan yapraklarının nem tayini, örneklerin 105°C'de etüvde tutulması ile gerçekleştirilmiştir. Bir saatlik aralıklarla tartılan ürünlerin nem oranı aşağıda verilen Denklem 1 ve Denklem 2 kullanılarak hesaplanmıştır. Nem oranlarını belirlemek için hassas terazi kullanılmıştır. Yaş baza ve kuru baza göre nem içeriklerinin hesaplanması için aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır. Burada N_{yb} yaş baza göre nem içeriği, M_s sıvı kütlesi, M_k kuru kütlesi olarak gösterilmektedir.

$$\% \text{ yaş baza göre nem içeriği: } \%N_{yb} = \frac{M_s}{M_s + M_k} \times 100 \quad (1)$$

$$\% \text{ kuru baza göre nem içeriği: } \%N_{kb} = \frac{M_s}{M_k} \times 100 \quad (2)$$

2.3. Su aktivitesi tayini

Su aktivitesi, “gıdadaki suyun buhar basıncının aynı sıcaklıktaki saf suyun buhar basıncına oranıdır” [31] şeklinde ifade edilebilir. Su aktivitesi, gıdaların muhafazasında göz önünde bulundurulacak bir değerdir. 0,6’nın altındaki su aktivitesi değerine sahip gıdalar mikrop ürememesi açısından güvenli kabul edilmektedir [32]. Reyhan tozlarının su aktivitesi değerleri ± 0.001 hassasiyete sahip su aktivitesi ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Su aktivitesi değerleri Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır. a_w su aktivitesi, P gıdadaki suyun buhar basıncı, P_0 saf suyun buhar basıncı olarak alınmıştır.

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (3)$$

2.4. Renk analizi

Reyhan tozlarının renk değerleri ölçümü colorimeter ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Renk analizi ölçümlerinde CIE L^* , a^* ve b^* renk sistemi kullanılmıştır. “ L^* ” 0 ile 100 arasında değer alabilmekte ve parlaklığı ifade etmektedir. 0 değerini siyah renkte alırken 100 değerini beyaz renkte almaktadır [33]. “ a^* ” ifadesinin pozitif değer alması kırmızılığı temsil ederken negatif değer alması yeşil rengi temsil etmektedir. Sıfır değer alması ise griliği temsil etmektedir [33]. “ b^* ” ifadesinin pozitif değer alması sarılığı temsil ederken negatif değer alması maviliği temsil etmektedir. Sıfır kesim noktası griliği yani renksizliği temsil etmektedir [33]. “ C^* ” (kroma değeri) renk doygunluğunu ifade etmektedir. Kroma değeri Denklem 4 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$C^*(Kroma) = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})} \quad (4)$$

H° (Hue açısı) değeri bir renk dairesi olarak tanımlanmakta olup Denklem 5 kullanılarak hesaplanmaktadır. Hue açısı kırmızı-mor renklerini 0° ve 360° açı değerlerinde, mavimsi yeşil rengi 180° ve 270° açı değerinde, sarı rengi ise 90° açı değerinde almaktadır. Hue açısı.

$$H^\circ = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (5)$$

Toplam renk değişimi (ΔE), kahverengileşme indeksi (BI) değerleri Denklem 6, Denklem 7 ve Denklem 8 kullanılarak hesaplanmaktadır. Taze reyhan yapraklarına ait referans değerleri L_0 , a_0 , b_0 ile ifade edilmiştir.

$$\Delta E = \sqrt{((L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2)} \quad (6)$$

$$BI = \frac{100 \times (x - 0,31)}{0,17} \quad (7)$$

$$x = \frac{a^* + 1,75L^*}{(5,645L^* + a^* - 3,012b^*)} \quad (8)$$

2.5. Ölçüm belirsizliği

Bir ölçüm sonucunda, ölçülen büyüklüklere etkisi olan değerlerin dağılımını karakterize eden bir parametrelere ya da ölçülen değerlerin büyüklüğünü etkileyen ve negatif olmayan sayısal ifadelerle ölçüm belirsizliği adı verilir. Deney süresince yapılan tüm ölçümlerde okunan değerlerin doğruluğu çok önemlidir. Bunu sağlayabilmek için cihazların kalibrasyonu ile birlikte ölçüm belirsizlikleri de oldukça değerlidir. Deneyde kullanılan ölçüm cihazlarının hassasiyeti ve ölçüm belirsizlikleri Tablo 1’de bu verilmiştir. Sistemde ölçülmesi gereken büyüklük R , bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler ise $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ olarak kabul edilerek Denklem 9 ile, her bir bağımsız değişkene ait hata oranları $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ve R büyüklüğünün hata oranı W_R (belirsizlik) ise Denklem 10 ile hesaplanabilir [34].

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (9)$$

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

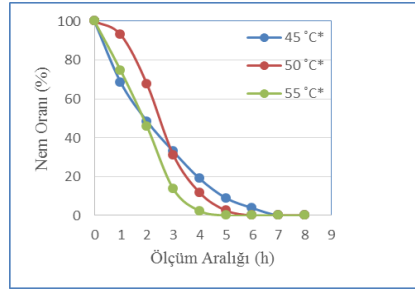
Tablo 1. Ölçüm cihazlarının hassasiyetleri ve belirsizlikleri

Kullanılan cihaz	Teknik özellikleri	Hassasiyet	Belirsizlik
Alüminyum gövde radyal fan	Güç (W) :90, Gerilim (V) :220, Debi (m ³ /h) :380	±1	±0,89
Redüktörlü asenkron motor	Güç:6 W Gerilim:220 V,Dönüş hızı: 10 d/d	±1	0,92
Sıcaklık Ölçer	Ölçme skalası:-0 °C...+80,0 Duyarlılık: ±0,1°C	±0,1 °C	±0,91°C
Nem kontrol cihazı	Ölçme skalası: 5... 95 %RH, Duyarlılık:±1 %RH	±2	±1,01
Hassas terazi	Kapasite: 6000 gr, Hassasiyet: 10 mg	±0,01g	±0,49g
Su aktivitesi ölçüm cihazı	Ölçüm aralığı:0,03-1,00 a _w , Doğruluğu : +/- 0,005 a _w	±0,005	±0,001
Colorimeter CR-5, Ölçüm cihazı	Görüntü verileri: L* a* b* / L* C* h*	±0,005	0,001

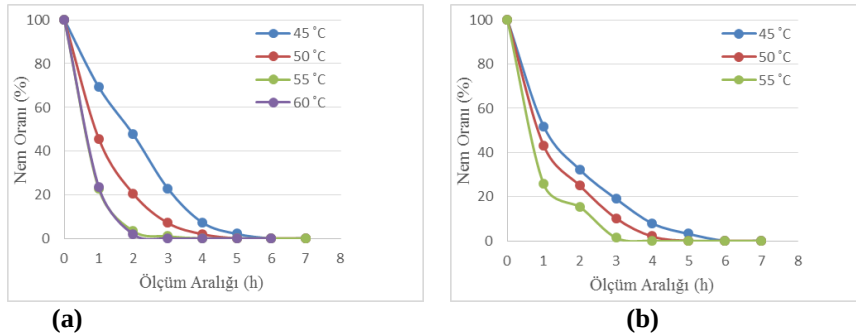
3. Araştırma Bulguları ve Tartışma

3.1. Nem oranı

Yapılan deneylerde kütle sabit değere ulaşana kadar saatte bir kütle ölçümü gerçekleştirilmiştir. Kabin içi sıcaklığın 45°C, 50°C ve 55°C' ye ulaştığında sabit tutulduğu deneylerde nem oranı istenilen değerlere sırasıyla 7, 6 ve 5 saatte ulaşmıştır. Şekil 4'te de görüldüğü gibi 50°C ve 55°C' ye ait kuruma eğrileri 45°C' deki kuruma eğrisine oranla daha fazla dalgalanma sergilemiştir.

**Şekil 4.** Sıcaklığın zamanla sabit değere ulaştığı deneylerin nem oranları

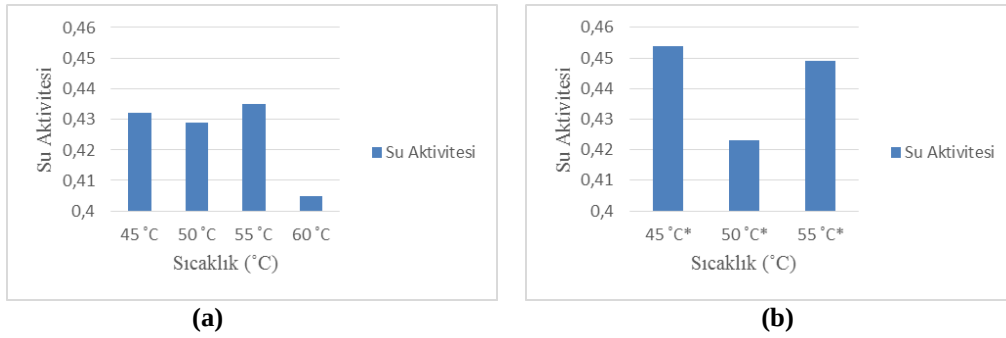
Kabin içi sıcaklığın 45°C, 50°C, 55°C ve 60°C' ye ulaştığında sabit tutulup kurutulacak reyhan yapraklarının başlangıç kütleleri 21 gram ve 50 gram seçilerek raflara yerleştirildiği deneylerde nem oranlarının istenilen değerlere sırasıyla 6, 5, 4 ve 3 saatte ulaştığı Şekil 5'te görülmektedir. 55°C ve 60°C' ye ait kuruma eğrileri benzerlik göstermektedir. Kuruma başlangıçta hızlı gerçekleşmekteyken zamanla yavaşlamıştır. Nem oranları incelendiğinde kuruma hızının zamanla azaldığı gözlemlenmektedir.

**Şekil 5.** Sıcaklığın başlangıçtan itibaren sabit tutulduğu deneylerin zamana bağlı nem oranları
(a) başlangıç kütlesi 21 gr (b) başlangıç kütlesi 50 gr

3.2. Su aktivitesi tayini sonuçları

0,6'nın altındaki su aktivitesi değerine sahip gıdalar mikrop ürememesi açısından güvenli kabul edilmektedir [32]. Mor reyhan bitkisinin yapraklarının farklı kurutma yöntemlerinde su aktivitesi değerlerinin 0,120 ile 0,262 aralığında olduğu gözlemlenmiştir. 0,120 ile en düşük su aktivitesi değerine 600 W mikrodalga gücünde kurutulan numunelerin sahip olduğu, 0,262 su aktivitesi değerine güneşte kurutulan reyhan tozlarının sahip olduğu belirlenmiştir [1]. Ocimum basilicum L. bitkisinin vakum mikrodalga kurutma yöntemi ve 48°C sıcak hava ile kurutma yöntemi kullanılarak kurutulduğu çalışmada su aktivitesi değerlerinin sırasıyla 0,340 ve 0,370 olarak bulunduğu gözlenmiştir [22].

Yapılan bu çalışma için Şekil 6'daki su aktivitesi değerleri incelendiğinde en yüksek su aktivitesi değerinin (0,454) 45°C' de sıcaklığın başlangıçta sabit tutulmadığı reyhan tozlarına, en düşük su aktivitesi değerininse (0,405) 60°C sabit sıcaklıkta kurutulan reyhan tozlarına ait olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Su aktivitesi tayini sonuçları (a) Sıcaklık başlangıçtan itibaren sabit (b) Sıcaklık istenilen değere ulaştığında sabit

Bahsedilen çalışmaların su aktivitesi değerlerinin yapılan bu çalışmadaki reyhan tozlarının su aktivitesi değerlerinden düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklılık, kurutma koşulu ve kurutma yönteminin aynı olmamasından, ürünün farklı özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

3.3. Renk analizi sonuçları

Renk analizi, kurutulan ürünlerin duyuusal anlamda kalitesini gösteren bir faktördür. Ürünlerin yaşken sahip oldukları rengi kurutulduğunda da koruması beklenir. Tablo 2'de literatürde bulunan reyhan kurutma çalışmalarındaki renk analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 2. Literatürde bulunan reyhan kurutma deneylerinde renk analiz sonuçları

Kurutma Şekli	Yaş Rengi	L*	a*	b*	ΔE	, C*	H°	BI
Mikrodalga Fırın [16]	Yeşil	24	-9	7	5	8	110	30
		32	-3	11	15	16	125	40
Doğrudan Değmeli Kurutucu [10]	Yeşil	45,94	14,04	26,37	0,00	29,89	118,06	53,4
		30,24	0,01	14,86	24,27	14,89	89,17	65,67
Mikrodalga Fırın [22]	Yeşil	35,43	6,55	10,52	-	-	-	-
		28,70	-1,06	9,89	-	-	-	-
Doğrudan Değmeli Kurutucu [8]	Yeşil	28,03	-15,82	13,75	-	-	-	-
		48,60	-1,44	28,39	-	-	-	-
Mikrodalga Fırın [1]	Mor	21,50	2,71	-0,26	0,00	2,87	19,10	14,08
		26,80	5,49	5,17	6,03	6,25	357,26	30,62
Döner Tamburlu Kurutucu [9]	Yeşil	27,33	-15,51	12,77	0	12,78	71,62	38,21
		53,07	2,57	29,02	28,4	31,68	89,01	73,36

Yapılan bu çalışmada ise taze reyhan yapraklarının ve farklı sıcaklıklarda kurutulan reyhan yapraklarının L* değerlerinin 25,15–90,58 arasında, a* değerlerinin -0,49–5,49 arasında, b* değerlerinin -0,26–0,2 arasında, C* değerlerinin 0,52–5,49 arasında, H° değerlerinin 157,86–357,26 arasında, ΔE değerlerinin 0 – 65,70 arasında, BI değerlerinin -0,58–14,08 arasında olduğu bulunmuştur. Renk analizi sırasında ölçülen değerler Tablo 3'te

verilmiştir. Kurutulan reyhan tozlarının renk analizlerinde farklılıklar kurutma sıcaklıklarının değişmesinden kaynaklanmaktadır. L* değerleri incelendiğinde kurutulmuş ürünlerin değerleri arasında ciddi bir fark görülmektedir. Taze reyhan yapraklarına kıyasla kurutulmuş ürünlerin parlaklık değerinin arttığı tespit edilmiştir. a* değerleri incelendiğinde taze reyhan yapraklarının kırmızılık değerinin 5,49 olduğu kurutulmuş reyhanlarınkinin ise -0,49 olduğu görülmektedir. Kurutulmuş ürünlerin kırmızılık değerinin negatif olması ürünlerin kurutuldukça renginin yeşile yaklaşması anlamına gelmektedir. Bunun bir diğer sebebi ise deneylerin yapıldığı mevsimde hasat edilen reyhanlarının renklerinin havaların soğumasıyla mordan yeşilimsi bir renge dönüşmesidir. b* değerlerine göre yaş reyhanların mavilikleri fazla olup kurutuldukça sarılıkları artmıştır.

Tablo 3. Renk analizinde ölçülen değerler

Kurutma Sıcaklıkları	L*(Parlaklık)	a*(Kırmızılık)	b*(Sarılık)
45 °C	90,55	-0,49	0,19
50 °C	90,55	-0,49	0,18
55 °C	90,57	-0,49	0,19
60 °C	90,55	-0,48	0,18
45 °C*	90,58	-0,49	0,20
50 °C*	90,57	-0,49	0,20
55 °C*	90,55	-0,49	0,17
Taze Reyhan	25,15	5,49	-0,26

Denklem 4, Denklem 5, Denklem 6, Denklem 7 ve Denklem 8 kullanılarak hesaplanan; kroma değerlerinin 0,52 ile 5,49 arasında, Hue açısının 157,86 ile 357,26 arasında olduğu, kahverengilik değerinin -0,58 ile 14,08 arasında olduğu, toplam renk değişiminin 0 ile 65,70 arasında olduğu görülmüştür. Kurutulan reyhan yapraklarının kroma değerlerinin taze reyhan yapraklarının kroma değerlerinden düşük olması, kurutulan reyhanların renginin donuklaştığını göstermektedir. Kurutulan reyhan yapraklarının Hue açısı değerleri 180°'ye yakın bulunurken, taze reyhan yapraklarının Hue açısı değerlerinin 360 °'ye yakın olduğu bulunmuştur. Bu açı değişimi kendine özgü mor renge sahip olan reyhan yapraklarının kurutma sonrası renginin mordan siyaha yaklaşmasından kaynaklanmaktadır. Güneş enerjisi destekli reyhan kurutma sisteminde kurutulan reyhanların kahverengilik değerlerinde fark görülmekte olup bu değerlerin kurutma işlemiyle azaldığı görülmektedir.

3.6. Kuruma Süresi

Kurutma işlemlerinde kuruma süresi önemli bir faktördür. Tablo 4'te literatürdeki reyhan kurutma deneylerinde kuruma süreleri verilmiştir.

Tablo 4. Literatürde bulunan reyhan kurutma deneylerinde kurutma süreleri

Kurutma Şekli	Sıcaklık- Basınç	Kurutma Süresi
Döner tamburlu kurutucu [35].	Sabit Sıcaklık, Kademeli Sıcaklık	39 saat, 25,5 saat
Doğrudan değmeli kurutucu [10].	Sabit Sıcaklık, Kademeli Sıcaklık	31,5 saat, 25,5 saat
Etüvde kurutma [8].	35°C, 45°C, 55°C	52 saat, 50 saat, 34 saat
Mikrodalga fırın [8].	55°C	9 dakika, 22 dakika
Mikrodalga fırın [1].	45°C, 50°C, 55°C	8 dakika, 6 dakika, 4,5 dakika
Vakum mikrodalga fırın [22].	48°C	1 dakika, 6 dakika, 12 dakika
Gölgede doğal kurutma [8-15].	Gölgede	58 saat, 15 gün
Güneşte doğal kurutma [1,36].	Güneşte	10 saat
Yarı gölge doğal kurutma [13].	40°C, 50°C	28 saat, 15 saat
Dondurarak kurutma [18].	-20 °C, 0,005 bar; 40°C, 80-100 bar	4 gün, 2, 3, 4 sat
Havalı kolletörler yardımıyla kurutma [11].	Farklı akış debilerinde 50°C	300-480 dakika
Fırında (Konvektif) kurutma [1,36].	45°C -50°C -55°C	6 saat 5 saat 4 saat

Reyhan kurutulurken rengi, aroması ve diğer iç özellikleri bozulmadan kurutma yapılmalıdır. Hızlı yani kısa sürede kurutmalarda bu özelliklerin bazılarının bozulduğu bilinmektedir. Bu çalışmada ise kurutma

makinesinin içerisine kurutulacak reyhanlar yerleştirildikten sonra güneşe konulup kabin içi 45°C, 50°C ve 55°C değerlerine geldiğinde sıcaklıkların sabit tutularak kurumanın sağlandığı deneylerde bitkinin 7, 6 ve 5 saatte kuruduğu tespit edilmiştir. Kabin içi sıcaklığı 45°C, 50°C, 55°C ve 60°C değerlerine ulaştıktan sonra reyhanların makine içerisine konularak kurutulması sağlanmış ve kuruma sürelerinin sırasıyla 6, 5, 4 ve 3 saat olduğu görülmüştür. Sıcaklığın başlangıçta sabit tutulup yaş mor reyhanın kütlesinin artırıldığı deneylerde ise 45°C, 50°C ve 55°C’ de kurumanın sırasıyla 6, 5 ve 4 saatte gerçekleştiği belirlenmiştir. İmalatı gerçekleştirilen kurutma sisteminde sıcaklığın artırılmasıyla kuruma sürelerinde önemli ölçüde düşüş olduğu görülmektedir. Yapılan deneyler sonucunda yaş mor reyhan kütlesinin artışının kuruma süresinde değişikliğe neden olmadığı görülmüştür.

6. Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada, mor reyhan bitkisinin kurutulmasını sağlamak üzere güneş enerjisi destekli reyhan kurutma sistemi tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir. İmal edilen bu sistemde reyhan yapraklarının başarılı bir şekilde kurutulması sağlanmıştır. Fosil yakıt kullanılan birçok kurutma sistemi olmasına rağmen, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılacağı yeni bir sistemin oluşturulmaya çalışılmasının amacı, fosil yakıtlarının kullanımının azaltılmasına bir katkıda bulunmaktır. Bu sistemin tasarlanması ve imalatının yapılmasının amacı elektrik enerjisiyle havayı ısıtma prensibine dayanan fırında (konvektif) kurutma yönteminin yerine, yenilenebilir enerji olan güneş enerjisiyle havanın ısıtılarak ürünlerin kurutulmasının sağlanmasıdır. Kurutulmuş gıdaların raf ömrünü etkileyen faktörler arasında içerdikleri nem miktarı bulunmaktadır. Tıbbi ve aromatik bitkilerin sahip oldukları %70 – 85 yüksek nem içeriğinden dolayı, raf ömrünün uzun olmasını sağlayabilmek için %10-15 son nem oranına düşürülmeleri gerekmektedir olup, yapılan bu çalışmada kurutulmuş reyhanların son nem içerikleri %15’in altına düşürülmüş ve başarılı bir kurutma sağlanmıştır. Su aktivitesi 0,6’nın altında olan gıdalar mikrop ürememesi açısından güvenli kabul edilmektedir [32]. Bu çalışmada ise en yüksek su aktivitesi değeri farklı sıcaklıklarda yapılan deneylerde 0,454- 0,405 arasında bulunmuştur. Su aktivitesi değerleri, literatürde belirtilen 0,6 değerinin altında bulunduğu için mikrop ürememesi açısından güvenli kabul edilebilir ve başarılı bir kurutma sağlanmıştır denebilir. Kurutma sürelerinde oldukça iyi sonuçlara ulaşılmıştır. İmalatı gerçekleştirilen kurutma sisteminde sıcaklığın artırılmasıyla kuruma sürelerinde önemli ölçüde düşüş olduğu gözlemlenmektedir. Yapılan deneyler sonucunda yaş mor reyhanın kütle artışının kuruma süresinde değişikliğe neden olmadığı görülmüştür. Bulunan kuruma sürelerinin mor reyhan yapraklarının fırında kurutulmasıyla gerçekleştirilen deneylerle yakın olduğu görülmüştür. Güneş enerjisi destekli kurutma sisteminin başarılı bir kurutma sağladığı sonucu çıkarılmıştır.

İmal edilen reyhan kurutma sisteminde reyhan bitkisi kurutulurken nem tayini, su aktivitesi tayini, renk analizi gibi analizler gerçekleştirilmiş olup sistemin başarılı bir şekilde reyhanın kurutulmasına olanak sağladığı görülmüştür.

Teşekkür

FYL-2019-1500 kodlu projeye vermiş oldukları desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi’ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Altay K, Farklı yöntemlerle kurutulan Arapgir mor reyhanının (*Ocimum basilicum*) kuruma davranışlarının incelenmesi ve kuru ürünün bazı kalite özelliklerinin belirlenmesi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2019.
- [2] Aslan Öz MN, Balıkesir yöresinde doğal olarak yetişen biberiye ve fesleğen bitkilerine ait uçucu yağların antioksidan ve antimikotik özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 2017.
- [3] Ermişler A, Altın otu (*elichrysnum arenarium*) ve fesleğen (*ocimum basilicum*) bitkilerinin sinek kovucu (repellent) özelliklerinin karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye, 2017.
- [4] Kulan E.G, Eskişehir koşullarında yetiştirilen reyhan (*ocimum basilicum* L.) bitkisinin bazı bitkisel özelliklerinin ve diurnal varyabilitesinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2013.
- [5] Günay E, Telci İ, Isparta Ekolojik Koşullarında Bazı Reyhan (*Ocimum basilicum* L.) Genotiplerinin Verim ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 2017; 12 (2): 100-109.

- [6] Koca T, Polat MN, Reyhan kurutma yöntemleri ve karşılaştırma. International Conference On Engineering & Natural Sciences-4 (ISPEC); 2019; Ankara, Türkiye; pp. 106-112.
- [7] Ratti C, Hot-air and freeze-drying of high value foods: A Review, Journal of Food Engineering 2001; 49 (4): 311-319.
- [8] Polatçı H, Tarhan S, Farklı kurutma yöntemlerinin reyhan (*Ocimum basilicum*) bitkisinin kuruma süresine ve kalitesine etkisi. Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 2009; 26 (1): 61-70.
- [9] Korucu B, Yeni tip döner tamburlu kurutucunun geliştirilmesi ve reyhan (*Ocimum basilicum* L.) bitkisi kurutma performansının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, 2009.
- [10] İnan E, Yeni tip doğrudan değmeli kurutucunun geliştirilmesi ve reyhan (*Ocimum basilicum* L.) bitkisini kurutma performansının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, 2010.
- [11] Gülçimen F, Yeni tasarlanan havalı kollektörler yardımı ile reyhan ve nane kurutulması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2008.
- [12] Cesare LF, Forni E, Viscardi D, Nani RC, Changes in the chemical composition of basil caused by different drying procedures, Cesare, Journal of Agricultural and Food Chemistry 2003; 51 (12): 3575–3581.
- [13] Özcan M, Arslan D, Ünver A, Effect of drying methods on the mineral content of basil (*Ocimum basilicum* L.), Journal of Food Engineering 2005; 69 (3): 375-379.
- [14] Kavak AE, Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. Journal of Food Engineering 2006; 77 (4): 864-870.
- [15] Diaz-Maroto MC, Sánchez Palomo E, Castro L, Viñas G, Pérez-Coello MS, Changes produced in the aroma compounds and structural integrity of basil (*Ocimum basilicum* L.) during drying. Journal of the Science of Food and Agriculture 2004; 84 (15): 2070–2076.
- [16] Demirhan E, Özbek B, Microwave-drying characteristics of basil, Journal of Food Processing and Preservation 2010; 34 (3): 476-494.
- [17] Baritau O, Richard H, Touche J, Derbesy M, Effects of drying and storage of herbs and spices on the essential oil. Part I. Basil, *ocimum basilicum* 1992; 7 (5): 267-271.
- [18] Bušić A, Vojvodić A, Komes D, Akkermans C, Belščak-Cvitanović A, Stolk M, Hofland G, Comparative evaluation of CO₂ drying as an alternative drying technique of basil (*Ocimum basilicum* L.)—The effect on bioactive and sensory properties. Food Research International, 2014; 64 (1): 34-42.
- [19] Calín-Sánchez A, Lech K, Szumny A, Figiel A, Carbonell-Barrachina A.A., Volatile composition of sweet basil essential oil (*Ocimum basilicum* L.) as affected by drying method. Food Research International 2012; 48 (1): 217-225.
- [20] Hassanpouraghdam MB, Hassani A, Vojodi Mehrabani L, Farsad N, Drying methods affects essential oil content and composition of basil (*Ocimum basilicum* L.). Hassanpouraghdam Journal of Esserntial Oil Bearing Plants 2010; 13 (6): 759-766.
- [21] Tarakemeh A, Aboutalebi A, Effect of drying method on the essential oil quantity of basil (*Ocimum basilicum* L.), Journal of Essential Oil Bearing Plants, 2012; 15 (3): 503- 505.
- [22] Yousif AN, Scaman CH, Durance TD, Girard B, Flavor volatiles and physical properties of vacuum-microwave- and air-dried sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). Journal of Agricultural and Food Chemistry 1999; 47 (11): 4777–4781.
- [23] Dina S.F, Ambarita H, Napitupulu FH, Kawai H, Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans. Case Studies in Thermal Engineering 2015; 5 (1): 32-40.
- [24] Aktaş M, Şevik S, Doğan H, Öztürk M, Fotovoltavik ve termal güneş enerjili sürekli bir kurutucuda domates kurutulması. Tarım Bilimleri Dergisi 2012; 18: 287-298.
- [25] Akman H, Çerçi KN, Hürdoğan E, Büyükalaca O, Güneş enerjisi destekli bir kurutma sisteminin tasarımı, imalatı ve ilk ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi. Osmaniye Korkut Ata Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2018; 1 (1), 1-9.
- [26] Ceylan İ, Aktaş M, Doğan H, Güneş enerjili kurutma fırınında elma kurutulması. Politeknik Dergisi 2006; 9 (6): 289-294.
- [27] Romero VM, Cerezo E, Garcia MI, Sanchez MH, Simulation and validation of vanilla drying process in an indirect solar dryer prototype using CFD Fluent program. Energy Procedia 2014; 57 (1): 1651-1658.
- [28] Türk Tİ, Çelebi RS, Toğrul H, Farklı ön işlem uygulanan Ahlatın kuruma ve büzülme davranışının modellenmesi. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 2018; 33 (4): 1231-1245.
- [29] Yoğurtçu H, Yanıt yüzey metodu kullanarak mikrodalga ile elma kurutmanın optimizasyonu. Ournal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 2019; 34 (3): 1365-1376.
- [30] Doymaz İ, Aktaş C, Patlıcan dilimlerinin kurutma ve rehidrasyon karakteristiklerinin belirlenmesi. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 2018; 33 (3): 833-841.
- [31] Anonim. Gıdaların fiziksel özellikleri, https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/15137/mod_resource/content/0/DERS-12.pdf. Erişim tarihi Kasım 11, 2009.
- [32] Quek SY, Chok NK, Swedlund P, The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders. Chemical Engineering and Processing 2007; 46 (5): 386-392.
- [33] McGuire RG, Reporting of objective color measurements, hortscience 1992;27(12): 1254-1255.
- [34] Kline SJ, McClintock FA, Describing uncertainties in single sample experiments. Mech Eng 1953; 75 (1): 3-8.
- [35] Polatçı H, Farklı kurutma yöntemlerinin reyhan (*Ocimum basilicum*) bitkisinin kuruma süresine ve kalitesine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Osmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, Türkiye, 2008.
- [36] Altay K, Hayaloğlu AA, Dirim SN. Determination of the drying kinetics and energy efficiency of purple. Heat and Mass Transfer 2019; 55(8): 2173–2184.



Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Telif Hakkı Devir Formu / Copyright Form

Biz aşağıda gerekli bilgileri bulunan,

[Yazarların Adı / Author names]

.....tarafımızdan yazılmış,

[Makale Adı / Article title]

.....

başlıklı makale içeriği, sunduğu sonuç, bilgi, bulgu ve yorumları konusunda, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü'nün hiç bir sorumluluk taşımadığını kabul ederiz.

Sunduğumuz makalenin orijinal olduğunu; herhangi bir başka dergiye yayınlanmak üzere gönderilmediğini; daha önce yayınlanmadığını; tümüyle yada bir bölümü herhangi bir kongre/sempozyum da sunulup fakat tam metin olarak basılmadığını ve orijinal telif hakkı devri formu ile birlikte Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü'ne gönderildiğini garanti ederiz.

Makalenin telif hakkından feragat etmeyi kabul ederek sorumluluğu üstlenir ve imza ederiz. Bu vesileyle makalenin telif hakkı Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü' ne devredilmiştir. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü makalenin yayınlanabilmesi konusunda yetkili kılınmıştır. Bununla birlikte yazarların aşağıdaki hakları saklıdır:

Aşağıdaki ve diğer bütün durumlarda makalenin Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi tarafından yayınlandığına dair referans verilmelidir.

1. Telif Hakkı dışında kalan patent v.b. bütün tescil edilmiş haklar.
2. Makaleyi satmamak koşulu ile kendi amaçları için çoğaltma hakkı.
3. Yazarın gelecekteki kitaplar ve dersler gibi çalışmalarında; makalenin tümü ya da bir bölümünü ücret ödemeksizin kullanma hakkı.

Bütün yazarlar tarafından imzalanması gerekiyor: (Sorumlu yazar/Corresponding author*)

Yazarın Adı ve Soyadı / Author Names

İmzası / Signature

Tarih / Date

1

2

3

4

5

NOT: Eksik imza durumunda sorumluluk imzalayan yazarlara aittir. Lütfen formu doldurunuz, imzalayanız ve aşağıdaki adrese metinle birlikte gönderiniz.

Adres: Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Editörlüğü, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 23119-Elazığ.