

Eylül'25

Sayı/Number: 3 / Volume: 15
Yıl/Year: 2025

Yayın Sahibi

TMMOB
Elektrik Mühendisleri Odası Adına
Mahir ULUTAŞ

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

Ender KELLEÇİ

Yayın İdare Merkezi

İhlamur Sokak No:10 Kat:3
Kızılay - Ankara
Tel: (312) 425 32 72
Faks: (312) 417 38 18
<http://bilimseldergi.emo.org.tr>
bilimseldergi@emo.org.tr
EMO Üyelerine parasız dağıtılır

Dergi Koordinatörü

Sevgi Kınacı
sevgi.kinaci@emo.org.tr

Sayfa Düzeni

TMMOB
Elektrik Mühendisleri Odası

Yayın Türü

Yerel Süreli Yayın
4 ayda bir yayınlanır

Basım Adedi

500

Basım Tarihi

Eylül 2025

EMO BİLİMSEL DERGİ

Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal
Mühendisliği Bilimsel Dergisi

The Journal of Electrical, Electronics, Computer and
Biomedical Engineering

YAYIN KURULU

BAŞ EDITÖR/EDITOR IN CHIEF

Prof. Dr. Arif NACAROĞLU
Gaziantep Üniversitesi

EDITÖRLER/EDITORIAL BOARD

Prof. Dr. Erhan Akın
Fırat Üniversitesi

Prof. Dr. Güven Önbilgin
Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Prof. Dr. M. Timur AYDEMİR
Kadir Has Üniversitesi

Prof. Dr. Aydoğan ÖZDEMİR
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Muhittin GÖKMEN
MEF Üniversitesi

Prof. Dr. Tayfun AKGÜL
İstanbul Teknik Üniversitesi



TMMOB

Elektrik Mühendisleri Odası

UCTEA/Chamber of Electrical Engineers

EMO Bilimsel Dergi Danışma Kurulu

Prof. Dr. A. Hamit Serbest	Çukurova Üniversitesi
Prof. Dr. Altay Güvenir	Bilkent Üniversitesi
Prof. Dr. Cengizhan Öztürk	Boğaziçi Üniversitesi
Prof. Dr. Erhan Akın	Fırat Üniversitesi
Prof. Dr. Güven Önbilgin	Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Prof. Dr. Murat Eyüboğlu	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Timur Aydemir	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Ali Hikmet Doğru	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Arif Nacaroglu	Gaziantep Üniversitesi
Prof. Dr. Aydın Köksal	Bilişim A.Ş.
Prof. Dr. Aydoğan Özdemir	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Aydın Baytan Ertüzün	Boğaziçi Üniversitesi
Prof. Dr. Belgin Türkay	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Bülent Sankur	Boğaziçi Üniversitesi
Prof. Dr. Cüneyt Güzeliş	Yaşar Üniversitesi
Prof. Dr. Erdal Panayırıcı	Kadir Has Üniversitesi
Prof. Dr. Erkan Afacan	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Ferit Acar Savacı	İzmir İleri Teknoloji Enstitüsü
Prof. Dr. H. Bülent Ertan	Atılım Üniversitesi
Prof. Dr. Haldun Karaca	Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. İbrahim Eksin	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. İnci Çilesiz	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. İrfan Karagöz	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. İsmail Hakkı Altaş	Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. İsmail Hakkı Çavdar	Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Kemal Leblebicioğlu	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Lale Tükenmez Ergene	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Mithat İdemen	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Muhittin Gökmen	MEF Üniversitesi
Prof. Dr. Murat Aşkar	İzmir Ekonomi Üniversitesi
Prof. Dr. Osman Eroğlu	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Prof. Dr. Oya Kalıpsız	Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Özlem Özgün	Hacettepe Üniversitesi
Prof. Dr. Sermin Onaygil	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Tayfun Akgül	İstanbul Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Ahmet Koltuksuz	Yaşar Üniversitesi
Doç. Dr. Osman Abul	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Prof.Dr. Ece Olcay Güneş	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Hülya Gökarp	Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Prof. Dr. Bilal Gümüş	Dicle Üniversitesi
Prof. Dr. Alkan Alkaya	Mersin Üniversitesi
Doç.Dr. Ömer Melih Gül	İstanbul Teknik Üniversitesi
Doç.Dr. Mustafa Berke Yelten	İstanbul Teknik Üniversitesi
Doç.Dr. Oğuzhan Ceylan	Marmara Üniversitesi
Doç.Dr. Mete Çubukçu	Ege Üniversitesi
Bora Güngören	Portakal Teknoloji
Fikret Küçükdeveci	TEPA
Hasan Ali Pazar	Siemens

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

LED'li Yol Aydınlatma Sistemlerinde Işık Renk Sıcaklığının, Çevresel ve Finansal Hususlara Etkisinin İncelenmesi <i>Investigation of the Environmental and Financial Impacts of Light Color Temperature in LED Road Lighting Systems</i> Kerem Can Yıldırım Araştırma Makalesi	7
Sentinel-2 Multispektral Zaman Serileri Kullanarak 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremi Sonrası Tarımda Değişim Tespiti <i>Change Detection in Agriculture Following the February 6, 2023 Kahramanmaraş Earthquake Using Sentinel-2 Multispectral Time Series</i> Tuğcan Dünder Araştırma Makalesi	17
Kritik Altyapıların Savunmasında Yeni Nesil Yöntemler: Siber Saldırıların Tespitinde Yapay Zekâ Uygulamaları <i>New Generation Methods in the Defense of Critical Infrastructures: Artificial Intelligence Applications in Detecting Cyber Attacks</i> Mehmet Akif Özgül, Şevki Demirbaş Derleme Makalesi	31
Single-Image HDR Reconstruction with Attention-Driven Autoencoder Cevher RENK, Serdar ÇİFTÇİ Araştırma Makalesi	45
Farklı Topolojiler Altında Robotik Kablosuz Sensör Ağlarında Sınırlı Kapasiteli Bataryalı bir İHA Aracılığıyla Verimlilik ve Enerji Farkında Veri Toplama <i>Efficiency and Energy-Aware Data Collection via a UAV with Limited Capacity Battery in Robotic Wireless Sensor Network under Various Topologies</i> Ömer Melih Gül, Aydan Müşerref Erkmen Araştırma Makalesi	55
Grup Seyreklik ve Düşük Dereceli Modellerin Uzlaştırılmasıyla Çarpımsal Gürültünün Giderilmesi <i>Removal of Multiplicative Noise via Reconciliation of Group Sparsity and Low-Rank Models</i> Mehmet Demir Araştırma Makalesi	67
Kısmi Rezonanslı İndüksiyonlu Ocaklarda Çalışma Limitleri <i>Operating Limits for Quasi Resonant Induction Hobs</i> Metin Öztürk Araştırma Makalesi	77

LED'li Yol Aydınlatma Sistemlerinde Işık Renk Sıcaklığının, Çevresel ve Finansal Hususlara Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Environmental and Financial Impacts of Light Color Temperature in LED Road Lighting Systems

Kerem Can Yıldırım
ID 0009-0005-9232-8445
Elektrik-Elektronik Mühendisi
keremcanyildirim@outlook.com

Öz

Bu çalışmada LED'li yol aydınlatma sistemlerinde farklı ışık renk sıcaklıklarının yatırım ve işletme maliyetleri, çevresel koşullar ve kullanıcı deneyimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Modelleme ve simülasyon süreçlerinde ulusal ve uluslararası standartlar esas alınmış, tasarımların uygunluğu DIALux EVO yazılımı ile yapılan simülasyonlar aracılığıyla doğrulanmıştır. Analiz sonuçlarına göre, ışık renk sıcaklığı (Kelvin değeri) azaldıkça enerji tüketiminde ve toplam maliyetlerde artış olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, yüksek Kelvin değerine sahip ışıkların da yaban hayatı üzerinde daha olumsuz etkiler oluşturduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, düşük Kelvin değerindeki ışık kaynaklarının sisli hava koşullarında daha yüksek ışık geçirgenliği sağladığı belirlenmiştir. Tüm bulgular ışığında, ışık renk sıcaklığının yalnızca görsel bir unsur olmadığı; ekonomik, çevresel ve kullanıcı odaklı kararları etkileyen kritik bir parametre olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Yol Aydınlatma, LED, Işık Renk Sıcaklığı

Abstract

This study examines the effects of different correlated color temperatures (CCT) in LED-based road lighting systems on investment and operational costs, environmental conditions, and user experience. National and international standards were used as references in the modeling and simulation processes, and the compliance of lighting designs was verified through simulations conducted using DIALux EVO software. The analysis results indicate that as the color temperature (Kelvin value) decreases, both energy consumption and total costs increase. However, it was also determined that lighting with higher Kelvin values has more adverse effects on wildlife. Additionally, light sources with lower Kelvin values were found to provide better light transmittance under foggy weather conditions. In conclusion, the findings reveal that color temperature is not merely an aesthetic consideration but a critical parameter that influences economic, environmental, and user-centered decisions.

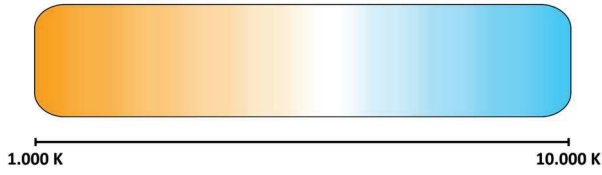
Keywords: Road Lighting, LED, Light Color Temperature

1.Giriş

Aydınlatma, güvenlik ve konfor ihtiyaçlarının karşılanması için modern yaşamın vazgeçilmez unsurlarından biridir. Bu ihtiyacın karşılanması için akkor telli lambanın icadından bugüne cıva buharlı lambalar, sodyum buharlı lambalar, floresan lambalar gibi birçok farklı teknoloji kullanılmıştır. Günümüzde ise aydınlatma ihtiyacımızın büyük bir kısmı LED'li ürünler ile sağlanmaktadır.

Yüksek enerji verimliliği, uzun ömür, düşük bakım maliyetleri ve bakım ihtiyacının daha az olması sebebiyle LED'li aydınlatma sistemlerinin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Söz konusu bu avantajları ile LED'li armatürler sera gazı emisyonlarının ve küresel karbon ayak izinin azaltılması projelerinde önemli bir rol almaktadır. Örneğin, İngiltere otoyollarından sorumlu National Highways 2030/2040/2050 Net Zero Highways planında 2027 yılına kadar yol aydınlatmalarını %70 oranında LED armatür ile değiştireceğini belirtmiştir. [1]

İdari kurumların aydınlatma şartnamelerinde de eski teknoloji olarak tarif edebileceğimiz ürünler yerini LED'li armatürlere bırakmıştır. Yeni yapılan projelerde LED'li armatür kullanımı idareler tarafından zorunlu tutulmaktadır. Hatta yapımı tamamlanmış birçok tesiste, otoyolda, devlet ve belediye yollarında konveksiyonel aydınlatma armatürleri LED'li armatürler ile değiştirilmekte olup 13 Mayıs 2024 tarihli "Kamuda Tasarruf ve Verimlilik Paketi"nde "Sokak ve cadde ışıklandırmasında LED dönüşümünün hızlandırılması" maddesi, konunun hükümet nezdinde de önemsendiğini göstermektedir.[2][3] Yapılan tüm LED aydınlatma projelerinin şartnamelerinde teknik özelliklerin içerisinde tarif edilen bir husus da ışık renk sıcaklığıdır. Işık renk sıcaklığı Kelvin (K) değeri ile belirtilir. Düşük Kelvin değeri ışığın sarı renk yoğunluğunda olduğunu, yüksek Kelvin değeri ise ışığın mavi-beyaz renk yoğunluğunda olduğunu belirtir. Şekil 1'de ışık kaynaklarındaki ışık renginin Kelvin değeri karşılığı gösterilmiştir.



Şekil 1: Işık renk sıcaklığı skalası

Bu çalışmada, karayolu aydınlatma sistemlerinde kullanılan LED'li armatürlerin ışık renginin, yatırım/işletme maliyetlerine, çevresel hususlara ve kullanıcılara etkisi incelenmiştir.

2. Yol Aydınlatması

Karayolu aydınlatma sistemleri, bir yol üzerinde güvenli seyahat için en önemli unsurlardan biridir. Güney Afrika'da yapılan bir araştırmada gün içerisindeki doğal aydınlatma koşulları incelenmiş olup karanlık yollarda kaza risk oranının gündüz koşullarına göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. [4]

Yeni Zelanda'da yapılan bir diğer araştırmada ise aydınlatılmış bir yol üzerinde rapor edilen kazalar incelenmiştir. İncelemenin sonucunda artan parıltı değerine karşılık gündüz/gece kaza oranlarının da azaldığı gözlemlenmiştir. [5][6]

Karayolunda yapılacak aydınlatma sisteminin özellikleri ülkemizde de kullanılmakta olan EN 13201 (TS EN 13201) standardı ile belirlenmektedir. Standart içerisinde yol aydınlatmaları farklı sınıflara ayrılmış olup aydınlatma tesis edilecek yolun özelliklerine göre farklı sınıflar bulunmaktadır. Bu sınıflara ait temel özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Yol sınıflarına göre aydınlatma gereklilikleri

Yol Aydınlatma Sınıfı	L (cd/m ²)	U ₀ (Min.)	U ₁ (Min.)
M1	2,00	0,40	0,70
M2	1,50	0,40	0,70
M3	1,00	0,40	0,60
M4	0,75	0,40	0,60
M5	0,50	0,35	0,40
M6	0,30	0,35	0,40

L: Ortalama Parıltı
U₀: Ortalama üzgünlük
U₁: Boyuna Düzgünlük

Yol aydınlatma standardının karşılanması için en önemli husus aydınlatma armatürleridir. Ülkemizde yol aydınlatma sistemlerinde kullanılacak LED'li armatürler "TEDAŞ MLZ/2010-057 Led Işık Kaynaklı Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi" ile belirlenmiştir. Farklı proje şartnamelerinde aydınlatma yapılacak yoldan sorumlu idari kurumlar tarafından çeşitli değişiklikler yapılırsa dahi temel olarak TEDAŞ şartnamesi kullanılmaktadır. Bu şartname

gelişen teknolojiye ve farklı koşullara uyum sağlayacak şekilde zamanla yenilenmektedir.

TEDAŞ – MLZ/2010-057 şartnamesinin Revize Ekim 2020 yayınında ışık renk sıcaklığı 4.000 K olarak belirlenmiştir. [7] Ancak Şubat 2025 Taslak yayınında ışık renginin 3.000 K veya 4.000 K olarak seçilebileceği belirtilmiştir. [8]

Işık rengi her ne kadar estetik bir husus olarak görülse de güvenlikten enerji tüketimine kadar birçok hususu etkilemektedir. Kelvin değeri düştükçe armatürün güç ihtiyacı artmaktadır. Bunun sebebi ışık renk sıcaklığı mavi ışık veren bir LED çip üzerine fosfor katmanları eklenerek elde edilmesidir. Düşük Kelvin değerinde ışık renk sıcaklığı elde etmek için daha fazla fosfor kullanılması gerekmektedir. Bu durum verimi düşürerek enerji tüketimini artırmaktadır.

Çalışma kapsamında incelenmek üzere A ve B markasına ait dört LED'li yol aydınlatma armatürü seçilmiş olup Tablo 2'de verilmiştir. A markasına ait, aynı tipte iki armatür incelendiğinde de aynı güç değerine sahip olmalarına rağmen farklı ışık akılarına sahip olduğu, B markasına ait aynı tipte iki armatürün birbirine çok yakın ışık akısına sahip olmasına karşın farklı güç tüketimlerinin olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ışık renk sıcaklıklarının farklı olmasıdır.

Tablo 2: LED armatürlerin teknik özellikleri

Özellik	A		B	
	1. Armatür	2. Armatür	3. Armatür	4. Armatür
Işık Rengi(K)	3.000	4.000	3.000	4.000
Armatür Gücü(W)	110	110	104,1	100,6
Işık Akısı(lm)	13.100	14.300	11.903	11.901
CRI	70	70	70	70
Etkinlik Faktörü (lm/W)	119	130	114,3	118.2

K: Kelvin
W: Watt
lm: Lümen
CRI: Renksel Geri Verim Endeksi

İlgili TEDAŞ şartnamesinde 3.000 ve 4.000 K ışık renk sıcaklıkları tariflendiği için diğer ışık renk sıcaklığındaki alternatifler inceleme dışı tutulmuştur.

2.1. Işık Renk Sıcaklığının Kullanıcılara Etkisi

Işık renk sıcaklığının sürücüyeye veya algıya etkisi merak edilen bir konu olmuştur. Bu durumun değerlendirilmesi için yapılan bir çalışmada 3.000 K, 4.000K ve 5.000 K ışık renk sıcaklığında ve 20-30 lx değerlerinde, farklı yaş gruplarında 18 kişi deneye tabi tutulmuştur. Deney sırasında EEG (Electroencephalography) verileri ve tepki süreleri

incelenmiştir. İnceleme sonucunda, özellikle 20 lux ışık koşullarında Kelvin değeri arttıkça uyanıklık, dikkat, zihinsel etkinlik ve uyarılma düzeyinin belirtisi olan β (beta) değerinin de arttığı, 30 lux ışık koşullarında ise 4.000 K değerinin 3.000 K değerine göre β dalgalarında artış gösterdiğini ancak 5.000 K değerinin 4.000 K değerine göre anlamlı bir artış göstermediği gözlemlenmiştir. Yani düşük ışık koşullarında ışık renk sıcaklığı artışı kullanıcıları daha çok etkilemiştir. En kısa tepki süresi ise 30 lx aydınlık seviyesinde 4.000 K ışık renk sıcaklığında sağlanmıştır. Deneye katılan sürücüler ise 4.000 K ışık renk sıcaklığında daha uyanık hissettiklerini belirtmişlerdir.^[9]

Işık renk sıcaklığının kullanıcıya etkisi üzerinde yapılan bir diğer çalışmada düşük ışık renk sıcaklığına sahip lambalarda gözün karanlığa adaptasyonunun daha kolay olduğu ve renk algısının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.^[10]

Yol aydınlatma sistemlerinde ışık ile ilgili en önemli hususlardan bir tanesi sis durumunda göstereceği performanstır. Sis, yoğunluğuna göre değişkenlik gösteren, yarı geçirgen bir meteorolojik oluşumdur ve içeriğinde su, organik veya inorganik bileşenler içerir.^[11] Işık renk sıcaklığı farklı değerlerde farklı dalga boylarına sahiptir. Dolayısıyla sis içerisinden geçen ışık farklı renk sıcaklıklarında farklı şekillerde yansımaktadır. Yapılan bir çalışmada dört farklı ışık kaynağının sis yoğunluklarına göre geçirgenlikleri incelenmiş olup LED’li yol aydınlatma armatürlerinde düşük ışık renk sıcaklığının sis içerisinden daha fazla geçiş yaparak ölçüm yüzeyine ulaştığı görülmüştür.^[10]

2.2. Yapay Aydınlatma ve Işık Renk Sıcaklığının Yaban Hayata Etkisi

Yapılan araştırmalar yapay aydınlatmanın hayvanlar üzerinde fizyolojik ve nörolojik etkisinin olduğunu göstermektedir. Bir kuş türü olan zebra ispinozu üzerinde yapılan çalışmada yapay gece ışığına maruz bırakılan deneğin beyindeki hipokampus bölgesinde yeni nöron sayısının arttığı gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, bu artışın normal dengeyi bozabilecek patolojik bir tepki olabileceğini ve dolaylı olarak uyku bozukluğu veya artan gece hareketliliği gibi davranışsal değişimlere yol açabileceğini öne sürmektedir.^[12] Yapay aydınlatma üzerine Şikago bölgesinde yapılan bir diğer çalışmada ise gece aktif olan türlerin daha karanlık bölgelerde %19,6 daha fazla aktivite gösterdiği tespit edilmiştir.^[13]

Amerika Birleşik Devletleri Kaliforniya Eyaleti Ulaştırma Departmanı tarafından LED aydınlatmanın karasal yaban hayatı üzerine etkisi incelenmiştir. 3.000’in üzerinde kaynak ve 342 ayrı çalışmanın detaylı analiz edildiği bu çalışma incelendiğinde, kısa dalga boyuna sahip (beyaz, mavi) ışıkların yaban hayatın yön bulma, üreme, av-avcı ilişkileri gibi süreçlerini olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.^[14]

2.3. Işık Renk Sıcaklığının Sera Gazı Salımına Etkisi

Fosil yakıtların kullanımı artan sera gazı salımları ile küresel çapta sıcaklık artışlarına da sebep olmaktadır. Bu durum

dünyanın ekolojik dengesini bozmakta ve iklim değişikliklerini beraberinde getirmektedir. IPCC’nin (Intergovernmental Panel on Climate Change) raporuna göre 2000 yılından 2018 yılına küresel CO₂ konsantrasyonundaki artış, on yılda yaklaşık 20 ppm olup, bu oran, son 800.000 yıl boyunca CO₂’nin sürdürülebilir artış hızının 10 katına kadar çıkmaktadır^[15]

Elektrik üretiminde fosil yakıt kullanımı ülkemizde ve dünyada devam etmektedir. TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi) tarafından yayınlanan 2024 yılı “Türkiye Brüt Elektrik Üretiminin Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Aylık Dağılımı” tablosu incelendiğinde elektrik üretiminin %54,31’inin kömür, linyit, doğalgaz ve sıvı yakıt gibi fosil enerji kaynaklı olduğu görülmektedir.^[16] Bu durum ülke bazlı değişiklik göstermekte olsa da fosil yakıt tüketimi tamamen sıfırlanamamıştır.

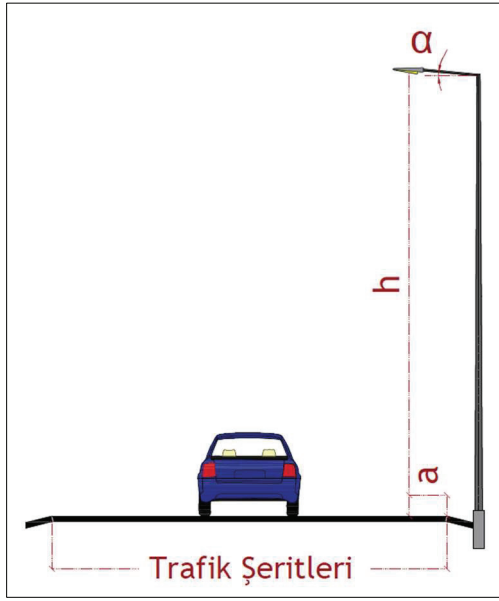
Benzer ışık akısına sahip farklı ışık renk sıcaklıklarının elektrik enerjisi tüketimindeki fark sera gazı emisyonlarını da etkileyecektir.

3. Maliyet Analizi İçin Modelleme ve Simülasyon

Yatırım ve işletme maliyet analizleri için yapılan simülasyonlarında DIALux EVO programı kullanılmıştır. Tablo 2’de verilen armatürlerin fotometrik özellikleri üretici firma veya DIALux programının kütüphanesinden alınarak program içerisine dahil edilmiştir. Maliyetlerin incelenmesi için yol modellemesinde ve aydınlatma direklerinde her bir yol alternatifi için aynı parametreler kullanılmıştır. Yol ve aydınlatma direk tasarımına ait parametreler Tablo 3’te verilmiş olup proje örnek kesiti Şekil 2’de verilmiştir.

Tablo 3: Yol ve aydınlatma direk parametreleri

Parametreler	Yol-1	Yol-2
Yol Uzunluğu	60 km	50 km
Şerit Sayısı	3	2x2
Şerit Genişliği	3,50 metre	3,75 metre
Yol Kaplama Sınıfı	0,07 (CIE R3)	0,07 (CIE R3)
Yol Aydınlatma Sınıfı	M3	M4
Işık Noktası Yüksekliği (h)	12 metre	15 metre
Taşıyıcı Kol Açısı (α)	5°	0°
Işık Noktası Sarkması (a)	1 metre	0 metre
Bakım Faktörü	0,90	0,90
Aydınlatma Yerleşimi	Sağdan Tek	Sağdan Tek



Şekil 2: Aydınlatılmış karayolu kesiti

3.1. Yol-1 Yatırım Maliyetleri İçin Simülasyon

Yatırım maliyetlerinin belirlenmesi için öncelikle Tablo 2’de fotometrik özellikleri belirtilen 1. armatür ile Yol-1 için simülasyon yapılmıştır. EN 13201 standardının gereklilikleri 32 metre direk açıklığında sağlanmıştır. Daha sonra yine Tablo 2’de fotometrik özellikleri belirtilen 2. armatür ile Yol-1 için simülasyon yapılmıştır. EN 13201 standardının gereklilikleri 35 metre direk açıklığında sağlanmıştır. Simülasyonlar sonucunda oluşan veriler Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4: Yol-1 1. ve 2. armatür simülasyon sonuçları

Büyüklik	Nominal	1. Armatür Hesaplanan	2. Armatür Hesaplanan
L_m	$\geq 1,00 \text{ cd/m}^2$	1,00 cd/m^2	1,01 cd/m^2
U_o	$\geq 0,40$	0,64	0,63
U_i	$\geq 0,60$	0,78	0,72
TI	$\leq \%15$	$\%6$	$\%6$
R_{EI}	$\geq 0,30$	0,62	0,62

3.2. Yol-1 İşletme Maliyetleri İçin Simülasyon

İşletme maliyetlerinin belirlenmesi için öncelikle Yol-1 için Tablo 2’de fotometrik özellikleri belirtilen 3. armatür ile simülasyon yapılmıştır. EN 13201 standardının gereklilikleri 34 metre direk açıklığında sağlanmıştır. Daha sonra yine Tablo 2’de fotometrik özellikleri belirtilen 4. armatür ile Yol-1 için simülasyon yapılmıştır. EN 13201 standardının gereklilikleri 34 metre direk açıklığında sağlanmıştır. Simülasyonlar sonucunda oluşan veriler Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5: Yol-1 3.ve 4. armatür simülasyon sonuçları

Büyüklik	Nominal	3. Armatür Hesaplanan	4. Armatür Hesaplanan
L_m	$\geq 1,00 \text{ cd/m}^2$	1,01 cd/m^2	1,01 cd/m^2
U_o	$\geq 0,40$	0,60	0,60
U_i	$\geq 0,60$	0,88	0,88
TI	$\leq \%15$	$\%7$	$\%7$
R_{EI}	$\geq 0,30$	0,49	0,49

3.3. Yol-2 Yatırım Maliyetleri İçin Simülasyon

Yol-2 için yatırım maliyetlerinin belirlenmesi için öncelikle Tablo 2’de fotometrik özellikleri belirtilen 1. armatür ile simülasyon yapılmıştır. EN 13201 standardının gereklilikleri 41 metre direk açıklığında sağlanmıştır. Daha sonra yine Tablo 2’de fotometrik özellikleri belirtilen 2. armatür ile Yol-2 için simülasyon yapılmıştır. EN 13201 standardının gereklilikleri 45 metre direk açıklığında sağlanmıştır. Simülasyonlar sonucunda oluşan veriler Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6: Yol-2 1. ve 2. armatür simülasyon sonuçları

Büyüklik	Nominal	1. Armatür Hesaplanan	2. Armatür Hesaplanan
L_m	$\geq 0,75 \text{ cd/m}^2$	0,76 cd/m^2	0,76 cd/m^2
U_o	$\geq 0,40$	0,71	0,69
U_i	$\geq 0,60$	0,79	0,74
TI	$\leq \%15$	$\%5$	$\%5$
R_{EI}	$\geq 0,30$	0,74	0,74

3.4. Yol-2 İşletme Maliyetleri İçin Simülasyon

İşletme maliyetlerinin belirlenmesi için öncelikle Yol-2 için Tablo 2’de fotometrik özellikleri belirtilen 3. armatür ile simülasyon yapılmıştır. EN 13201 standardının gereklilikleri 44 metre direk açıklığında sağlanmıştır. Daha sonra yine Tablo 2’de fotometrik özellikleri belirtilen 4. armatür ile Yol-2 için simülasyon yapılmıştır. EN 13201 standardının gereklilikleri 44 metre direk açıklığında sağlanmıştır. Simülasyonlar sonucunda oluşan veriler Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7: Yol-2 3. ve 4. armatür simülasyon sonuçları

Büyüklik	Nominal	3. Armatür Hesaplanan	4. Armatür Hesaplanan
L_m	$\geq 0,75 \text{ cd/m}^2$	0,76 cd/m^2	0,76 cd/m^2
U_o	$\geq 0,40$	0,70	0,70
U_i	$\geq 0,60$	0,88	0,88
TI	$\leq \%15$	$\%6$	$\%6$
R_{EI}	$\geq 0,30$	0,80	0,80

4. Maliyet Analizleri

4.1. Yatırım Maliyet Analizleri

Yatırım maliyetlerinde kablo, enerji altyapısı gibi maliyetler proje bazlı değişiklik gösterebileceği için armatür miktarına göre sabit adetli ekipmanlar maliyeti olarak kabul edilmiştir. Bu ekipmanlar ve birim maliyetleri için TEDAŞ 2025 yılı birim fiyat listesi referans alınmıştır.^[17] Maliyet analizinin uluslararası geçerliliğin de olabilmesi için birim fiyatlar, 02.05.2025 tarihli TCMB (Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası) döviz alış kuru olan 38,3695 ile Amerikan dolarına çevrilmiştir.^[18]

Yatırım maliyetinin hesaplanabilmesi için kullanılacak toplam armatür sayısının da belirlenmesi gereklidir. Yol-1 için 1. Armatür ile yapılan simülasyonda direk açıklığı 32 metre olarak belirlendiği için referans yol olan 60 km için 1.875 adet, 2. armatür ile yapılan simülasyonda direk açıklığı 35 metre olarak belirlendiği için 1.715 adet armatür ihtiyacı hesaplanmıştır. Yol-1 için, 1. Armatür için yapılan maliyet analizi Tablo 8'de, 2. armatür için yapılan maliyet analizi Tablo 9'da verilmiştir.

Yol-2 için 1. Armatür ile yapılan simülasyonda direk açıklığı 41 metre olarak belirlendiği için referans yol olan 50 km için 1.220 adet, 2. armatür ile yapılan simülasyonda direk açıklığı 45 metre olarak belirlendiği için 1.112 adet armatür ihtiyacı hesaplanmıştır. Yol-2 için, 1. Armatür için yapılan maliyet analizi Tablo 10'da 2. armatür için yapılan maliyet analizi Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 8: Yol-1 1.Armatür Yatırım Maliyet Analizi

Poz Tanımı	Birim	Miktar	Birim Fiyat (USD)	Toplam Fiyat (USD)
209 Kg Pol. Ayd. Direği	Adet	1.875	522,85	980.344,16
Armatür (Sınıfı 11)	Adet	1.875	103,92	194.858,35
220 V/6A AOS	Adet	1.875	7,48	14.009,95
3 X 2.5 mm ² Kablo	Metre	22.500	3,72	83.800,99
Genel Toplam (USD)				1.273.013,45

Tablo 9: Yol-1 2.Armatür Yatırım Maliyet Analizi

Poz Tanımı	Birim	Miktar	Birim Fiyat (USD)	Toplam Fiyat (USD)
209 Kg Pol. Ayd. Direği	Adet	1.715	522,85	896.688,13
Armatür (Sınıfı 11)	Adet	1.715	103,92	178.230,44
220 V/6A AOS	Adet	1.715	7,48	12.814,44
3 X 2.5 mm ² Kablo	Metre	20.580	3,72	76.649,97
Genel Toplam (USD)				1.164.382,97

Tablo 10: Yol-2 1.Armatür Yatırım Maliyet Analizi

Poz Tanımı	Birim	Miktar	Birim Fiyat (USD)	Toplam Fiyat (USD)
287 Kg Pol. Ayd. Direği	Adet	1.220	717,98	875.936,73
Armatür (Sınıfı 13)	Adet	1.220	93,93	114.599,89
220 V/6A AOS	Adet	1.220	7,48	9.115,81
3 X 2.5 mm ² Kablo	Metre	18.300	3,72	68.158,14
Genel Toplam (USD)				1.067.810,56

Tablo 11: Yol-2 2.Armatür Yatırım Maliyet Analizi

Poz Tanımı	Birim	Miktar	Birim Fiyat (USD)	Toplam Fiyat (USD)
287 Kg Pol. Ayd. Direği	Adet	1.112	717,98	798.394,79
Armatür (Sınıfı 13)	Adet	1.112	93,93	104.454,98
220 V/6A AOS	Adet	1.112	7,48	8.308,83
3 X 2.5 mm ² Kablo	Metre	16.680	3,72	62.124,47
Genel Toplam (USD)				973.283,07

4.1. İşletme Maliyet Analizleri

İşletme maliyetlerinin en önemli kısmı olan elektrik tüketiminin belirlenebilmesi için armatürün günlük çalışma saatinin de belirlenmesi gerekmektedir. Bu süre, İstanbul'daki yıllık güneş doğuş ve batış saatleri referans alınarak elde edilmiştir. Armatürlerin güneş batımında çalışmaya başladığı, güneş doğumunda da kapandığı varsayıldığında, günlük ortalama 12,2 saat aydınlatma sisteminin çalışacağı hesaplanmıştır.^[19]

Enerji birim maliyeti için ise 05.04.2025 tarih ve 32861 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanan EPDK (Enerji Piyasası Denetleme Kurulu) Tarafından Onaylanan ve 5 Nisan 2025 Tarihinden İtibaren Uygulanacak Faaliyet Bazlı Tarifeler tablosundaki alçak gerilim – tek zamanlı – aydınlatma tarifesinde belirtilen 488,9349kr/kWh değeri baz alınmıştır.^[20] Bu değer 02.05.2025 tarihli TCMB (Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası) döviz alış kuru olan 38,3695 ile Amerikan dolarına çevrilmiştir.^[20]

Enerji tüketiminin hesaplanabilmesi için kullanılacak toplam armatür sayısının da belirlenmesi gerekmektedir. Yol-1 için armatür ihtiyacı 34 metre direk aralığında 1.765 adet olarak hesaplanmıştır. Yol-2 için armatür ihtiyacı ise 44 metre direk aralığında 1.137 adet olarak hesaplanmıştır.

Tüm bu parametreler eşliğinde Tablo 2’de verilen 3. Ve 4. armatürlerin elektriksel özellikleri kullanılarak Yol-1 için yapılan hesaplamalar sonucunda Tablo 12, Yol-2 için Tablo 13 oluşturulmuştur.

Tablo 12: Yol-1 İşletme maliyet analizi

Kod	Parametre	3. Armatür	4. Armatür
A	Armatür Miktarı (Adet)	1.765	
B	Armatür Gücü (W)	104,1	100,6
C	Günlük Çalışma Süresi (Saat)	12,2	
D	Armatür Enerji Tüketimi (kWh/gün)	1,270	1,227
E	Toplam Enerji Tüketimi (kWh/yıl)	818.178,63	790.670,23
F	Toplam Enerji Bedeli (USD/kWh)	0,127	
G	Yıllık Toplam Enerji Bedeli (USD)	104.258,87	100.753,53

Tablo 13: Yol-2 İşletme maliyet analizi

Kod	Parametre	3. Armatür	4. Armatür
A	Armatür Miktarı (Adet)	1.137	
B	Armatür Gücü (W)	104,1	100,6
C	Günlük Çalışma Süresi (Saat)	12,2	
D	Armatür Enerji Tüketimi (kWh/gün)	1,270	1,227
E	Toplam Enerji Tüketimi (kWh/yıl)	527.064,65	509.343,94
F	Toplam Enerji Bedeli (USD/kWh)	0,127	
G	Yıllık Toplam Enerji Bedeli (USD)	67.162,80	64.904,68

$$D = B \cdot C \quad (1)$$

$$E = A \cdot D \cdot 365 \quad (2)$$

$$G = E \cdot F \quad (3)$$

5. Sonuçlar ve Değerlendirme

5.1. Çevresel ve Kullanıcı Etkilerinin Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen literatür araştırması sonucunda, yol aydınlatma sistemlerinde kullanılan ışık kaynaklarının yalnızca enerji verimliliği değil, aynı zamanda insan görsel algısı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Özellikle ışık renk sıcaklığının, sürüş konforu, göz yorgunluğu, karanlığa adaptasyon ve görsel dikkat gibi birçok işlevi üzerinde doğrudan etkilediği görülmüştür. Yüksek Kelvin değerine sahip LED aydınlatmalar, mavi spektrum yoğunlukları nedeniyle gece görüşünde kamaşma etkisini artırabilmekte, insan gözünün karanlığa uyum yeteneğini baskılayarak görsel rahatsızlık oluşturabilmektedir. Buna karşılık, düşük Kelvin değerine sahip ışık kaynakları daha az kamaşma yaratmakta ve sürücülerde daha yumuşak bir görsel deneyim sağlamaktadır.

Yol aydınlatmalarının çevresel etkisi ile ilgili literatür araştırmaları incelendiğinde ise tıpkı insan üzerinde olduğu gibi ışık renk sıcaklığının yaban hayat üzerinde de etkisi olduğu görülmüştür. Yüksek Kelvin değerine sahip ışık renk sıcaklıklarının yaban hayatı olumsuz etkilediği, denge ve uyku bozukluklarına sebep olabildiği tespit edilmiştir.

Yol aydınlatma sistemleri ile ilgili olarak değerlendirilen bir diğer husus ise sis oluşumunda ışık renk sıcaklığıdır. Yapılan araştırma Kelvin değeri düştükçe sis içerisinde ışığın daha fazla geçtiğini göstermiştir. Buradan hareketle, yol aydınlatma sistemlerinde düşük Kelvin değerine sahip LED armatürlerin, sisli hava koşullarında daha etkin bir görüş sağlayarak sürüş güvenliğine katkı sağladığı sonucuna varılabilir.

Aydınlatma sistemlerinin yalnızca aşağı yönlü değil, yukarı yönlü ışık yayılımı da çevresel etkiler açısından önemlidir. DarkSky International, gökyüzü kirliliğini azaltmak amacıyla 3000 K ve altı ışık renk sıcaklığı kullanımını tavsiye etmektedir.^[21] Bu öneri, düşük Kelvin değerli ışık kaynaklarının, yüksek Kelvin değerli ışık kaynaklarına göre gökyüzünde daha az yayılarak ışık kirliliğine daha az sebep olması ile ilişkilendirilmiştir.^[22] Bu yönüyle değerlendirildiğinde, düşük Kelvin değerine sahip LED armatürler yalnızca sisli hava koşullarında değil, aynı zamanda gökyüzü koruma stratejilerinde de avantaj sağlar.

Işık renk sıcaklığının küresel bir çevresel etki olarak sera gazı salımına da etki edebileceği belirlenmiştir. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı elektrik tüketim noktası emisyon faktörlerine ^[23] ve Birleşik Krallık Department for Energy Security and Net Zero ^[24] verilerine göre Tablo-2’de bulunan B marka armatürlerin Yol-1 için sera gazı emisyon salımları Tablo-14’te verilmiştir.

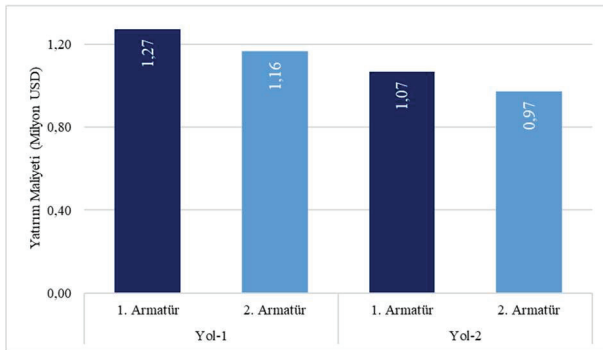
Tablo 14: Yol-1 için alternatif armatürlerin sera gazı salımları

Parametre	3. Armatür	4. Armatür
Işık Renk Sıcaklığı (K)	3.000	4.000
Işık Akısı (lm)	11.903	11.901
Armatür Gücü (W)	104,10	100,60
Toplam Enerji Tüketimi (kWh/yıl)	818.178,63	790.670,23
T.C. Emisyon Katsayısı (tCO ₂ e/MWh)	0,478	
U.K. Emisyon Katsayısı (tCO ₂ e/MWh)	0,207	
T.C. Emisyon Miktarı (tCO ₂ e)	391,09	377,94
U.K. Emisyon Miktarı (tCO ₂ e)	169,40	163,71
kWh: Kilowattsaat MWh: Megawattsaat tCO ₂ e: Ton Eşdeğer Karbondioksit		

Tablo incelendiğinde, aynı yol için teknik gerekliliklerin karşılanması koşulunda 4.000 K lambaların 3.000 K lambalara göre daha az enerji tüketmesi sebebi ile daha az sera gazı salımına sebep olacaktır.

5.2. Finansal Etkilerin Değerlendirilmesi

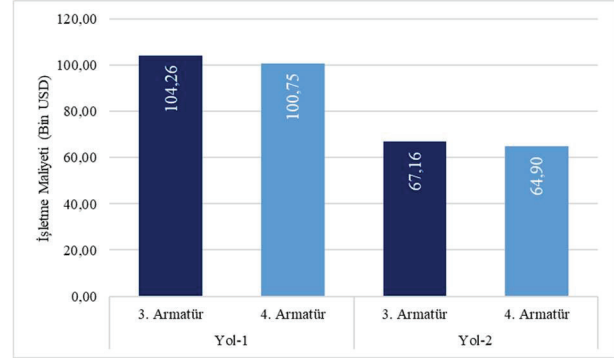
Yatırım maliyetleri için yapılan simülasyonlar sonucunda modellenen Yol-1 ve Yol-2 için M3 sınıfı aydınlatma gerekliliklerinin karşılandığı gözlemlenmiştir. Yol-1 için yatırım maliyetlerini içeren Tablo 9 ve Tablo 10 karşılaştırıldığında 108.630,48 USD maliyet farkı olduğu hesaplanmıştır. Yöntemin doğrulanması için yapılan Yol-2 yatırım maliyetlerini içeren Tablo 11 ve Tablo 12 karşılaştırıldığında 94.527,49 USD maliyet farkı olduğu hesaplanmıştır. Bu da Yol-1 için 4.000 K armatür kullanmanın yaklaşık %9,3 Yol-2 için yaklaşık %9,7 tasarruflu olacağı anlamına gelmektedir. Yatırım maliyetleri karşılaştırması Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: Yatırım maliyetleri grafiği

İşletme maliyetlerini içeren Tablo 13 ve Tablo 14 incelendiğinde, yıllık enerji tüketim farkının Yol-1 için, 27.508,41 kWh, maliyet farkının 3.505,34 USD olduğu hesaplanmıştır. Yol-2 için ise enerji tüketim farkının 17.720,71 kWh, maliyet farkının 2.258,12 USD olduğu hesaplanmıştır. Bu

da Yol-1 ve Yol-2 için 4.000 K armatür kullanmanın yaklaşık %3,5 tasarruflu olacağı anlamına gelmektedir. İşletme maliyetleri karşılaştırması Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4: İşletme maliyetleri grafiği

Bu çalışma kapsamında modellenen yollar yalnızca 50-60 km uzunluğundadır. Ülke çapında yapılan yol aydınlatma projeleri veya LED dönüşüm çalışmaları dikkate alındığında, yalnızca ışık renk sıcaklığından elde edilebilecek enerji tasarrufu daha büyük ölçekte olacaktır. Örneğin, 25.000 armatürün olduğu bir projede Yol-1 referans alındığında 3000 K ile 4000 K ışık renk sıcaklığı arasında yıllık enerji tüketiminde 389.637,50 kWh ve 49.650,73 USD işletme maliyet farkı elde edilebilir. Bir diğer örnek olarak yol uzunluğunu Yol-2 olarak belirlenen 50 km yerine 300 km olarak incelersek 567.164,95 USD yatırım maliyet farkı oluşacaktır.

İşletme maliyetlerinin hesaplanmasında en etkili faktörler olan lambaların gücü ve çalışma zamanlarının değişiklik göstermesi durumu da değerlendirilmiştir. Bunun için 500 farklı senaryo oluşturulmuştur. Senaryonun ilk girdisi olan armatür güç tüketimi için 3. ve 4. armatürde, $\pm 5\%$ aralığında rastgele değer ataması yapılmıştır. Çalışma süresinin de $\pm 10\%$ değişiklik gösterebileceği senaryonun ikinci girdisi olarak belirlenmiştir. Verilerin karşılaştırılabilmesi için her yol tipinde armatürlerin çalışma süreleri aynı kabul edilmiştir. Bu senaryo ile oluşturulan Yol-1 için yıllık elektrik enerjisi tüketimleri Tablo 15'te Yol-2 için yıllık elektrik enerjisi tüketimleri Tablo-16'da verilmiştir. Yapılan analiz ile 4.000 K armatürün 3.000 K armatüre göre daha az enerji tüketimine sahip olduğu teyit edilmiştir.

Tablo 15: Yol-1 değişken senaryo analizi

Parametre	3. Armatür	4. Armatür
Armatür Miktarı (Adet)	1.765	
Ortalama Armatür Gücü (W)	103,69	100,82
Ortalama Günlük Çalışma Süresi (Saat)	12,17	
Ortalama Toplam Enerji Tüketimi (kWh/yıl)	813.079,68	790.211,64

Tablo 16: Yol-2 değişken senaryo analizi

Parametre	3. Armatür	4. Armatür
Armatür Miktarı (Adet)	1.137	
Ortalama Armatür Gücü (W)	103,98	100,56
Ortalama Günlük Çalışma Süresi (Saat)	12,12	
Ortalama Toplam Enerji Tüketimi (kWh/yıl)	522.936,53	505.941,52

İki farklı yol tipinde yapılan simülasyonlar, hesaplamalar ve değişken parametre senaryoları ile ışık renk sıcaklığının maliyetlere etkisinin olduğu kanıtlanmıştır.

5.3. Sonuç

Sonuç olarak, ışık renk sıcaklığının yalnızca estetik bir unsur olmadığı yaban hayatına, çevresel konulara, sürüş güvenliğine ve finansal hususlara kadar birçok alana etki ettiği tespit edilmiştir. Tüm finansal verilere rağmen ışık renk sıcaklığı seçimi yalnızca maaliyet ile ilişkilendirilmemeli, projenin meteorolojik koşulları, çevredeki yaban hayatı, kullanıcıların güvenliği, sürdürülebilirlik ve karbon salımı gibi konular detaylı olarak değerlendirilerek ışık kirliliklerinden kaçınılacak ihtiyaçlara uygun ışık renk sıcaklığı tercih edilmelidir.

6. Kaynakça

- [1] National Highways, URL: <https://nationalhighways.co.uk/media/uxjpf0b1/net-zero-highways-our-2030-2040-2050-plan.pdf> (Erişim Zamanı; 05,16,2025)
- [2] Yavuz Sultan Selim Köprüsü Ve Kuzey Çevre Otoyolu İşletmesi URL: <https://www.ysskoprusuveotoyolu.com.tr/TR/detay/enerji-tasarrufu-hedefledigimiz-led-donum-proje-mizde-sona-yaklasiyoruz-220> (Erişim Zamanı; 05,16,2025)
- [3] T.C. Hazine ve Maliye Bakanlığı URL: https://ms.hmb.gov.tr/uploads/2024/05/SN-BAKAN_KAMUDA-TASARRUF-VE-VERİMLİLİK-PAKETİ.pdf (Erişim Zamanı; 05,16,2025)
- [4] P.Nteziyaremye, ve M.Sinclair, "Investigating the effect of ambient light conditions on road traffic crashes: The case of Cape Town, South Africa", *Lighting Res. Technol.* Vol. 56: 443-468, 2024
- [5] S.Fotios, ve R.Gibbons, "Road lighting research for drivers and pedestrians: The basis of luminance and illuminance recommendations", *Lighting Res. Technol.* Vol. 50: 154-186, 2018
- [6] M. Jackett, ve W.Frith, "Quantifying the impact of road lighting on road safety — A New Zealand Study", *IATSS Research*, Vol. 36: 139-145, 2013
- [7] TEDAŞ MLZ/2010-057.D "LED Işık Kaynaklı Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi", 2020
- [8] TEDAŞ MLZ/2010-057.E "(Taslak) LED Işık Kaynaklı Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi", 2025
- [9] Q.Chen, Z.Pan, J.Wu ve C. Xue, "An Investigation into the Effects of Correlated Color Temperature and Illuminance of Urban Motor Vehicle Road Lighting on Driver Alertness", *Sensors* 2024
- [10] H.Jin, S.Jin, L.Chen, S.Cen, ve K.Yuan, "Research on the Lighting Performance of LED Street Lights With Different Color Temperatures", *IEEE Photonics Journal*, 2015, Vol.7 Num.6
- [11] D.Khoury, M.Millet, Y.Jabali ve O.Delhomme, "Fog Water: A General Review of Its Physical and Chemical Aspects", *Environments*, 2023
- [12] S.Moaraf, R.Heiblum, Y.Vistoropsky M.Okuliarová, M.Zeman ve A.Barnea, "Artificial Light at Night Increases Recruitment of New Neurons and Differentially Affects Various Brain Regions in Female Zebra Finches" *International Journal of Molecular Sciences*, 2020
- [13] A.Schirmer, C.Gallemore, T.Liu, S.Magle, E.DiNello, H.Ahmed ve T.Gilday "Mapping Behaviorally Relevant Light Pollution Levels To Improve Urban Habitat Planning", *Scientific Reports* 9, 2019
- [14] California Department of Transportation, "Effects of LED Lighting on Terrestrial Wildlife" 2023
- [15] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), "Global Warming of 1.5 °C" Chapter 1, 2018
- [16] TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim A.Ş.) Türkiye Brüt Elektrik Üretiminin Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Aylık Dağılımı URL: <https://www.teias.gov.tr/aylik-elektrik-uretim-tuketim-raporlari> (Erişim Zamanı; 05,20,2025)
- [17] TEDAŞ (Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş.) "Birim Fiyat Kitabı", 2025
- [18] Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası, URL: https://www.tcmb.gov.tr/kurlar/kurlar_tr.html, Bülten No: 2025/83 (Erişim Zamanı; 05,16,2025)
- [19] turkishastro.space, URL: <https://turkishastro.space/sun/istanbul/> (Erişim Zamanı; 02,28,2025)
- [20] EPDK (T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu), URL: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalar-ina-esas-tarife-tablolari> (Erişim Zamanı; 05,16,2025)
- [21] DarkSky URL: <https://darksky.org/news/the-promise-and-challenges-of-led-lighting-a-practical-guide/> (Erişim Zamanı; 05,16,2025)
- [22] International Dark-Sky Association, "Visibility, Environmental, and Astronomical Issues Associated with Blue-Rich White Outdoor Lighting", 2010
- [23] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü Bilgi Formu" 2022

[24] U.K. Department for Energy Security and Net Zero
“Greenhouse Gas Reporting: Conversion Factors 2024”, 2024

[25] TSE CEN/TR 13201-1, “Yol Aydınlatması-Bölüm 1:
Aydınlatma sınıflarının seçimiyle ilgili kılavuz bilgiler”,
Ankara, 2015

Özgeçmiş



Kerem Can Yıldırım, 1990 yılında İstanbul’da doğdu. Dumlupınar Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü’nden 2012 yılında mezun oldu. 2013 yılında profesyonel iş hayatına başladı. 2017 yılından itibaren ulaştırma sektöründe çalışmaktadır. Türkiye’nin en büyük otoyol ve tünel projelerinin hem yapım hem işletme aşamalarında görev almıştır. Ulaştırma sektöründe aydınlatma, enerji sistemleri konusunda faaliyet göstermektedir. Aydınlatma sistemlerine olan ilgisi akademik eğitimde başlamış sonrasında profesyonel çalışma hayatında da devam etmiştir. Tüm bu sistemler yanında enerji yönetim sistemleri ve karbon ayak izi hesaplamalarında da görev almaktadır.

Sentinel-2 Multispektral Zaman Serileri Kullanarak 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremi Sonrası Tarımda Değişim Tespiti

Change Detection in Agriculture Following the February 6, 2023 Kahramanmaraş Earthquake Using Sentinel-2 Multispectral Time Series

Tuğcan Dündar

 0000-0003-1374-8651

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi
Mersin Üniversitesi, Mersin, Türkiye
tugcandundar@mersin.edu.tr

Özet

6 Şubat 2023'te gerçekleşen Kahramanmaraş depremleri, çok sayıda can kaybına ve hasara neden olmuştur. Bunlara bağlı olarak, depremden etkilenen bölgelerde tarımsal faaliyetler azalmıştır. Bu çalışmada, Hatay ilinin Kumlu ilçesinde yer alan bir tarım bölgesinin, deprem öncesi ve sonrası kullanımı incelenerek resmi veriler ile karşılaştırılmıştır. 2022-2024 yıllarının Nisan-Eylül arası aylarına ait Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılarak, ilgili ay ve yıllardaki ekim durumları karşılaştırılmıştır. İlk aşamada, hesaplanan NDVI indekslerine k-ortalamlar++ kümeleme algoritması uygulanarak araziler boş veya ekili olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Ardından, ekili kategorisindeki pikseller hesaplanarak ay ve yıl bazında karşılaştırılmıştır. Son olarak, simetrik yerel eş-kayıt ayarlaması (SYEKA) adı verilen yöntem ile değişim haritaları oluşturulmuştur. Elde edilen sayısal gözlemler, 2022-2023 ve 2023-2024 yılları arasında bölgedeki tarımsal faaliyetlerde sırasıyla % 8.28'lik bir azalma ve % 0.80'lik bir artış olduğunu; ayrıca bu bulguların resmi verilerle uyumlu olduğunu doğrulamıştır. Sayısal verilerle birlikte değişim haritaları, aynı aylara ait yıllar arasında tarımsal faaliyetlerde tutarlılık olmadığını göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Sentinel-2, Multispektral, Değişim Tespiti, Deprem, Tarım

Abstract

The Kahramanmaraş earthquakes that occurred on February 6, 2023 caused numerous loss of life and damages. Consequently, agricultural activities declined in the regions affected by the earthquake. In this study, the pre- and post-earthquake usage of an agricultural area located in Kumlu district of Hatay province was examined and compared with official data. Sentinel-2 satellite images from April to September for the years 2022–2024 were used to compare the cultivation status across corresponding months and years. In the first stage, the k-means++ clustering algorithm was applied to the calculated NDVI indices, and the lands were divided into two classes as vacant or cultivated. Subsequently, pixels in the cultivated category were quantified and compared on a monthly and yearly basis. Finally, change maps were created with the method called symmetric local co-registration adjustment (SLCRA). The obtained numerical observations confirmed that there was a decrease of 8.28%

and an increase of 0.80% in agricultural activities of the region between the years 2022-2023 and 2023-2024, respectively; and these findings are also consistent with official data. The change maps together with the numerical data showed that there was no consistency in agricultural activities across the years for the same months.

Keywords: Sentinel-2, Multispectral, Change Detection, Earthquake, Agriculture

1. Giriş

Bilindiği üzere, yeryüzündeki tektonik ve volkanik hareketlilikler depremlere sebep olmaktadır [1]. Levhalarda biriken enerjinin ve stresin boşalmasıyla meydana gelen tektonik depremler, oldukça yıkıcı güçteki enerjilere sahip olabilmektedir [2]. Sırasıyla $M_w = 7.7$ ve $M_w = 7.6$ moment büyüklüklerine sahip olan 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri de tektonik yapıdaki depremlerdir [3]. Birkaç saat ara ile gerçekleşen ve 11 ili etkileyen bu depremler, çok fazla sayıda binanın yıkılmasına ve binlerce can kaybına sebep olmuştur [4]. Bahsi geçen doğrudan sonuçların yanı sıra, depremler dolaylı olarak da çeşitli etkilere sebep olmuştur. Bunlar ekonomik, sosyal ve çevresel faktörler [5] olarak genelleştirilebilir. Kahramanmaraş depremleri sonrası kırsal bölgelerde olan can kayıpları ve hasarlı yapıdaki yerlerden göç dolayısıyla tarımsal faaliyetler de ciddi ölçüde etkilenmiştir [6]. Kamu Araştırmaları Vakfı tarafından yayımlanan raporda [7], tarım bölgelerinde depremlerin sebep olduğu can kayıpları, ekonomik zararlar ve altyapı tahribatları ile bu etkilerin azaltılmasına yönelik alınması gereken önlemler kapsamlı bir şekilde ele alınmaktadır. Depremlerin, tarım sektörü üzerinde yaklaşık olarak 5 milyar dolarlık ekonomik zarara, tahminen 270 bin çiftçinin olumsuz yönde etkilenmesine ve tarımsal üretimde %30 dolayında azalmalara neden olduğu belirtilmektedir [8]. Aynı zamanda, hasar ve kayıplardan kaynaklı etkilerin yanında yaralanmalar, üretimde isteksizlik ve psikolojik etkenlerin de çiftçiler üzerinde etkili olduğu ve bu unsurların da üretimde azalmaya yol açtığı vurgulanmaktadır. Altyapı tahribatları açısından incelendiğinde [9], toplanan mahsullerin işlendiği ve depolandığı tesislerin ağır, orta veya az hasarlı olarak etkilenmesinden kaynaklı üretim kayıplarının da olduğu belirtilmiştir.

Depremin etkili olduğu illerin başında gelen Hatay'da ise çok fazla sayıdaki yıkım ve hasar durumundan dolayı can kayıpları

ve başka illere göçler olmuştur [10]. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) web sitesinden erişilen verilere göre [11] 2022, 2023 ve 2024 yıllarında Hatay toplam nüfusu sırasıyla 1.686.043, 1.544.640 ve 1.562.185 olarak belirlenmiştir. Yine bu yıllarda net göç hızları yıllara göre sırasıyla % -4.77, % -79.08 ve %1.51 olarak tespit edilmiştir. Görüldüğü üzere özellikle 2023 yılında toplam nüfus sayısı ve net göç hızında ciddi değişiklikler olup 2024 yılında ufak artışlar başlamıştır. Bunlarla paralel olarak Hatay iline ait tarımsal veriler incelendiğinde ise örtü altı sebze ve meyve üretim miktarı belirtilen yıllara göre sırasıyla 58.225, 46.205 ve 50.866 ton iken tahıllar ve diğer bitkisel ürünlerin üretim miktarı 1.126.180, 1.005.983 ve 1.017.947 ton olarak rapor edilmiştir. Sayısal veriler incelendiğinde, toplam nüfus ve net göç hızları ile benzer şekilde 2023 yılında bir önceki yıla göre azalmalar varken, 2024 yılında artışların başladığı anlaşılmaktadır. Bu yıllarda Türkiye'nin toplam örtü altı sebze ve meyve üretim miktarı incelendiğinde ise sırasıyla 9.329.382, 8.956.951 ve 8.984.760 ton iken tahıllar ve diğer bitkisel ürünlerin üretim miktarı sırasıyla 137.422.726, 147.147.025 ve 141.861.299 ton olarak belirlenmiştir.

Hatay İl Tarım ve Orman Müdürlüğü tarafından yayınlanan 2022, 2023 ve 2024 tarımsal veriler faaliyet raporlarına göre [12] Hatay ili toplam 120.222 hektar (ha) tarımsal ova alanına sahip olup bunun büyük çoğunluğu (%87) Amik Ovası üzerindedir. Bu verimli topraklarda ise genellikle ülke üretiminde ilk üç sırada Hatay ilinin bulunduğu tatlı patates, pazu, maydanoz, dere otu, mandalina, limon, portakal, havuç ve yeni dünya gibi meyve ve sebzelerin üretimi yapılmaktadır. Bunların haricinde arpa, buğday, nohut, fasulye, mercimek ve mısır gibi tahıl ürünlerinin ekimi de yapılmaktadır. Bu üretimlerin büyük bir kısmı ise yüzölçümüne (19.300 ha) kıyasla %77 (14.703 ha/19.300 ha * %100) tarım alanı oranına sahip Kumlu ilçesinde basınçlı sulama sistemleri kullanılarak yapılmaktadır. Kumlu nüfusu incelendiğinde [13], 2022-2024 yılları arasında sırasıyla 13.333, 14.971 ve 15.155 olarak kaydedilmiştir. Hatay ilinin genel durumunun aksine, 2023 yılında bir önceki yıla kıyasla nüfusta önemli bir artış olmuştur. 2024 yılında ise bu artış çok az da olsa devam etmiştir. Bunun olası iki nedeni; şehir merkezinde hasar gören konutları bulunan ve güvenlik açısından varsa Kumludaki evlerine taşınan bireyler ile bu bölgede inşa edilen deprem konutlarına yerleşen kişiler olarak değerlendirilebilir. Fakat, TÜİK Merkezi Dağıtım Sistemi (MEDAS) [13] tarafından sağlanan tarımsal veriler incelendiğinde ise popülasyonun artmasıyla beraber özellikle 2023 yılında dekar (daa) cinsinden ekili tarım arazisi alanının azaldığı gözükmemektedir. Tablo 1'de sunulduğu üzere 2022 yılında 113.260 daa olan ekili alanlar toplamı, 2023 yılında 108.572 daa düşerken, 2024 yılında az bir artışla 109.581 daa yükselmiştir. Bu sayısal veriler de Hatay ilinin 2022-2024 yılları arası toplam nüfus ve net göç hızı değişimleri ile örtüşmektedir.

Son zamanlarda, uzaktan algılama alanındaki çalışmalar sayesinde uydu görüntüleri kullanılarak sınıflandırma, hedef tespiti ve değişim analizi gibi çalışmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda, Kahramanmaraş depremleri sonrası yapılan çalışmalar [14], [15], [16], [17], çoğunlukla hasarlı binaların tespiti üzerinedir. Bu araştırmalarda, uydu görüntüleri üzerinde algoritmalar uygulanarak, hasar alan veya yıkılan binaların tespiti yapılmaktadır. Literatür incelendiğinde, Kahramanmaraş depremlerinin tarımsal üretimdeki değişim analizini uzaktan algılama yöntemleriyle inceleyen çalışmaların [18], [19] sınırlı sayıda olduğu gözlemlenmiştir. Hatay ilinin Antakya ilçesine ait arazi kullanım ve arazi örtüsü

Tablo 1: Kumlu ilçesi 2022-2024 yılları arası ekili alanlar cinsinden bitkisel üretim istatistikleri

2022 yılı ekili alanlar - Dekar	
Meyveler, içecek ve baharat bitkileri alanı	8.013
Sebze alanı	7.374
Tahıllar ve diğer bitkisel ürünlerin alanı	97.873
TOPLAM:	113.260
2023 yılı ekili alanlar - Dekar	
Meyveler, içecek ve baharat bitkileri alanı	9.457
Sebze alanı	10.410
Tahıllar ve diğer bitkisel ürünlerin alanı	88.705
TOPLAM:	108.572
2024 yılı ekili alanlar - Dekar	
Meyveler, içecek ve baharat bitkileri alanı	9.786
Sebze alanı	12.103
Tahıllar ve diğer bitkisel ürünlerin alanı	87.692
TOPLAM:	109.581

değişimleri, hazır bir platform tarafından işlenen Sentinel-2 uydu görüntüleri sayesinde [18]'de tespit edilmiştir. Çalışmada, 2022 ve 2023 yıllarına ait Mart ayı uydu görüntüleri kullanılarak, deprem öncesi ve sonrasını kapsayacak şekilde değişim analizi yapılmıştır. Elde edilen bulgular, Antakya ilçesindeki tarım alanları kullanımının deprem öncesi yıla göre önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Benzer bir çalışma [19] ise, depremlerden etkilenen 11 ili kapsayacak şekilde 2022-2023 yılları arasındaki arazi kullanımı ve arazi örtüsündeki değişimleri analiz etmektedir. Söz konusu çalışmada analizler, hazır bir platform ve önceden sınıflandırılmış bir veri seti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, tarımsal değişimin iller arasında farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. 2022 ve 2023 yıllarına ait verilerin karşılaştırılması sonucunda, Adana-Hatay illerinde herhangi bir değişiklik tespit edilemezken, Adıyaman-Elazığ-Kahramanmaraş-Osmaniye illerinde tarım alanı kullanımında azalma gözlemlenmiştir. Buna karşılık, Diyarbakır-Malatya-Gaziantep-Şanlıurfa-Kilis illerinde ise artış eğilimlerinin olduğu belirlenmiştir. Bahsi geçen çalışmalarda, seçilen referans bölgeler için değişim analizi yapılmakta, fakat, elde edilen veriler ile resmi veriler arasında bir bağlantı bulunmamaktadır. Yalnızca, çalışma kapsamında elde edilmiş olan deprem öncesi ve sonrası sonuçlar arasında karşılaştırma yapılmaktadır. Bu durum ise, önerilen metodların uygulanabilirliğini kısıtlamaktadır. Ayrıca, 2023 yılında gerçekleşen depremlerden sonraki döneme dair herhangi bir analiz çalışmalarda bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, resmi veriler ile önerilen yöntem arasındaki sonuçların tutarlılık durumunu karşılaştırmak amacıyla, Kumlu ilçesi sınırları içerisinde bulunan bir tarım bölgesi referans çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Deprem öncesi ve sonrası değişimin tespiti için ise ekim ve hasat zamanının yoğun olduğu Nisan-Eylül arasındaki ayları kapsayan 2022, 2023 ve 2024 yıllarına ait açık erişimli Sentinel-2 multispektral uydu görüntüleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında ilk olarak, her görüntünün bitki örtüsü yoğunluk durumunu analiz etmek amacıyla spektral bant kombinasyonları kullanılarak normalleştirilmiş fark bitki örtüsü indeksi (normalized difference vegetation index, NDVI) [20] hesaplanmıştır. Bu sayede tarım alanları ekim yoğunluğu durumlarına göre farklı yansıma/piksel değerlerine atanmıştır. NDVI indeksi, yakın kızılötesi ve kırmızı spektral bant bilgilerini kullanarak hesaplanan tek bantlı bir indeks

olup bitki örtüsü haritalaması ve sınıflandırması çalışmalarında kullanılır. Örneğin, uydu görüntüleri kullanarak arazi örtüsü sınıflandırması için [21]'de, görüntülere ait NDVI indeksleri oluşturulmuş ve basit yapıdaki bir derin öğrenme ağı ile yüksek doğrulukta bir sınıflandırma işlemi yapılmıştır. [22]'de yapılan çalışmada çok zamanlı Sentinel-2 verilerine ait NDVI indeksleri hesaplanarak orman haritası oluşturulmuştur. Gazzea vd. [23] ise mevcut spektral bantlara ek olarak NDVI indeksini hesaplamış ve eğitilen bir derin öğrenme ağı ile ağaç türlerini sınıflandırmışlardır.

Önerilen yöntemin ikinci kısmında ise her görüntü için elde edilen NDVI bantları üzerinde k -ortalamalar++ (k -means++) [24] algoritması uygulanmıştır. Bu yöntem, veri kümesi içerisinde rastgele bir başlangıç noktası seçerek, verileri yinelemeli olarak gruplamaktadır. Literatür incelendiğinde, söz konusu algoritmanın uzaktan algılama çalışmalarında farklı amaçlar için kullanıldığı gözükmemektedir. Çalışma [25]'de, belirlenen bir Sentinel-2 görüntüsü üzerinde algoritma uygulanarak tarım arazilerinin segmentasyon işlemi yapılmıştır. Piksellere ait farklı özneliliklerin çıkartıldığı [26]'de ise bu öznelilikler kullanılarak pikseller, algoritma yardımıyla gruplandırılmıştır. Başka bir çalışmada [27], spektral eşleştirme ve k -ortalamalar yöntemleri kullanarak uydu görüntüleri üzerinde mineral haritalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında ise elde edilen ilgili ay ve yıla ait NDVI görüntüsündeki pikseller, k -ortalamalar++ algoritması yardımıyla boş veya ekili olmak üzere 2 kategoriye ayrılmıştır. Ekili kümesi bitkisel yoğunluğun olduğu ekim yapılan arazileri temsil ederken, boş kümesi ekim yapılmayan tarım arazilerini temsil etmektedir. Bu gruplandırma işlemi sonucunda, ekili kategorisine ait piksellerin toplam sayısı belirlenmiş ve bu değer, görüntü boyutlarına oranlanarak söz konusu kategorinin yüzdelik dağılımı hesaplanmıştır. Daha sonra, bu yüzdelik değerler ilgili ay için yıllar bazında karşılaştırılarak deprem öncesi ve sonrası analizlerde kullanılmıştır.

Son olarak, SYEKA [28] değişim tespiti yöntemi yardımıyla, ilgili ay için yıl bazlı değişim haritaları oluşturulmuş ve nicel verilerin yanında görsel çıktılar da analiz için sunulmuştur. Bu yöntem, bir konumun iki farklı zamana ait görüntüsü arasındaki lokal değişimleri tespit edebilmek amacıyla, piksellerin çevrelerinde lokal pencereler oluşturarak değişim analizi gerçekleştirmektedir. Aynı zamanda, iki görüntü arasındaki olası lokal kayma hataları algoritma tarafından optimize edilmekte ve dolayısıyla değişim tespiti hataları en aza indirilmektedir. Bu sebeple, literatürdeki çalışmalar [29], [30] tarafından kullanılmakta olup, basit fakat etkili bir yöntem olduğu vurgulanmaktadır.

Bu makalenin kalanı şu şekilde devam etmektedir. Deneyisel çalışmalarda kullanılan veriseti hakkında bilgiler ve görseller Bölüm 2'de verilmiştir. NDVI indeksinin hesaplanması, k -ortalamalar++ algoritması ve SLCRA yöntemine ait teorik bilgiler Bölüm 3'de anlatılmıştır. Bölüm 4 nicel ve nitel verilerin elde edilerek yorumlandığı ve tartışıldığı deneyel çalışmaları kapsamaktadır. Genel sonuçlar ve ileriye yönelik planlanan çalışmalar ise Bölüm 5'de sunulmuştur.

2. Veriseti

Şekil 1'den görüldüğü üzere, Hatay ili toplamda 15 ilçeden oluşmaktadır. Belirtildiği gibi, çalışma kapsamında Amik Ovası üzerinde geniş tarım arazilerine sahip olan Kumlu ilçesi ele alınmaktadır. Bu ilçeyi kapsayan Sentinel-2 uydu görüntülerine, Copernicus Veri Uzay Ekosistemi tarafından

sağlanan tarayıcı [31] üzerinden erişim sağlanmıştır. 2022-2024 yılları arasında, Nisan-Eylül arasındaki ayları kapsayacak şekilde ve her ayın ortasına denk gelecek tarihler esas alınarak, çalışma alanına ait Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılmıştır. Tarayıcı üzerinden görüntülere erişim sağlanırken, bulutluluk oranı için %15 üst sınırı belirlenmiş ve sistem tarafından Sen2Cor ile atmosferik düzeltilmesi otomatik olarak gerçekleştirilmiş veriler kullanılmıştır.



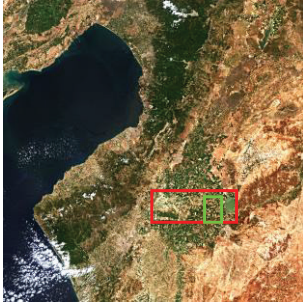
Şekil 1: Hatay ilinde bulunan ilçeler [32].

Sentinel-2 sistemi [33], Avrupa Uzak Ajansı (European Space Agency, ESA) tarafından sağlanmaktadır. Bu sistem, aynı yörüngede bulunan iki özdeş uydudan (Sentinel-2A ve Sentinel-2B) oluşmakta olup ilk olarak Sentinel-2A ile 23 Haziran 2015 tarihinde faaliyetlerine başlamıştır. Daha sonra ise 7 Mart 2017 tarihinde özdeş Sentinel-2B uydusu ile beraber veri alma sıklığı artırılmıştır. Yakın zamanda (5 Eylül 2024) ise üçüncü özdeş uydu olan Sentinel-2C göreve başlamış olup henüz tarayıcı üzerinden erişimi bulunmamaktadır. Bu uydular elektromanyetik spektrumun 443 nm-2190 nm aralığında 5 günlük ziyaret sıklığıyla veriler toplamakta olup toplamda 13 adet spektral bant sağlamaktadırlar. Sentinel-2 uydusunun bantları, üç farklı mekânsal çözünürlük seviyesine sahiptir. Tablo 2'den görüleceği üzere, bantlar 10, 20 ve 60 metre mekânsal çözünürlük değerlerine sahiptir.

Tablo 2: Sentinel-2 uydusu spektral bant bilgileri

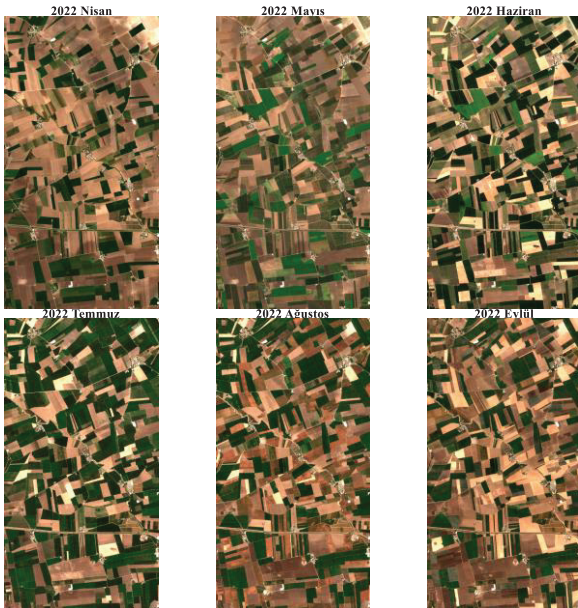
Bant İsmi	Dalga Boyu (nm)	Uzamsal Çözünürlük (m)
B1 - Kıyı aerosol	443	60
B2 - Mavi	490	10
B3 - Yeşil	560	10
B4 - Kırmızı	665	10
B5 - Kırmızı kenar	705	20
B6 - Kırmızı kenar	740	20
B7 - Kırmızı kenar	783	20
B8 - Yakın kızılötesi	842	10
B8A - Kırmızı kenar	865	20
B9 - Su buharı	945	60
B10 - Kısa dalga kızılötesi sirus	1375	60
B11 - Kısa dalga kızılötesi	1610	20
B12 - Kısa dalga kızılötesi	2190	20

Sentinel-2 uyduları, 290 km'lik şerit genişliği sayesinde tek seferde oldukça geniş bir alanı görüntüleme kapasitesine sahiptir. Bu nedenle, çalışmanın yapılacağı referans bölgenin uydu görüntüsünün alt bölgesine denk gelmesi halinde, analiz öncesinde ilgili bölgenin, görüntüden uygun şekilde kırılması

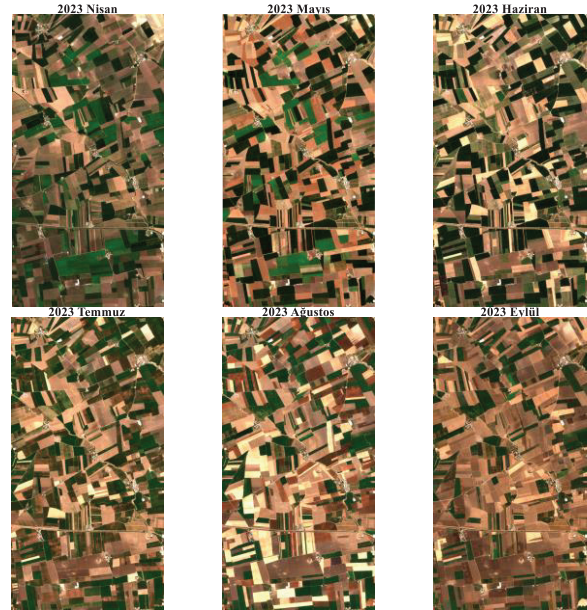


Şekil 2: Kumlu ilçesini kapsayan Sentinel-2 uydu görüntüsü, yaklaşık ilçe sınırları (kırmızı) ve çalışma yapılacak referans tarım bölgesi (yeşil).

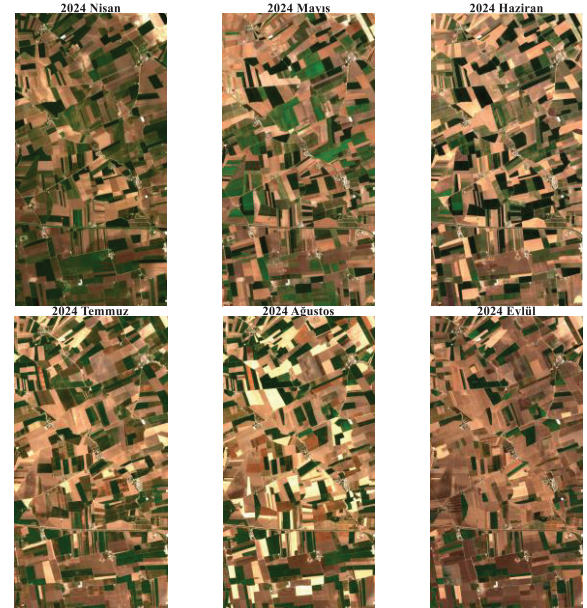
gerekmektedir. Örneğin Şekil 2, Sentinel-2 tarafından kaydedilen gerçek renkli görüntüyü (B4 + B3 + B2) temsil etmektedir. Kırmızı olarak gösterilen alan ise Kumlu ilçesinin yaklaşık sınırlarını belirtmektedir. Esas çalışmanın yapılacağı ve tarım arazilerinin yoğun olduğu bölge ise yeşil olarak işaretlenmiştir. Dolayısıyla, sadece bu alanın kırılarak Nisan-Eylül arası 2022-2024 yılı görüntülerinin oluşturulması gerekmektedir. Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te sırasıyla 2022, 2023 ve 2024 yıllarına ait, 1300×680 piksel boyutunda kırılarak elde edilmiş referans tarım alanı görüntüleri sunulmaktadır. Şekillerden gözüktüğü üzere, bu çalışma kapsamında seçilen referans bölge tamamen tarım arazilerinden oluşmakta olup verilen her ay için arazilerde mahsuller bulunmaktadır. Çalışma kapsamında, belirtilen aylar haricindeki görüntülerin kullanılmama sebepleri ise mevsimlerden dolayı hem ekili alan sayısının oldukça az olması hem de uydu görüntülerinde oldukça fazla bulutluluk olmasıdır. Elde edilen görüntüler ve spektral bant yansıma bilgileri sayesinde, seçilen alan içerisinde ekim yapılan veya boş bırakılan alanların sayısal ve yüzdesel dağılımları ay ve yıl bazlı olarak tespit edilerek incelenebilir. Ek olarak, nicel verilerin yanında değişim haritaları da çıkartılarak ilgili ayların deprem öncesi ve sonrası karşılaştırmaları yapılabilir.



Şekil 3: Kumlu ilçesi referans tarım bölgesi için 2022 yılı Nisan-Eylül arası Sentinel-2 uydu görüntüleri.



Şekil 4: Kumlu ilçesi referans tarım bölgesi için 2023 yılı Nisan-Eylül arası Sentinel-2 uydu görüntüleri.



Şekil 5: Kumlu ilçesi referans tarım bölgesi için 2024 yılı Nisan-Eylül arası Sentinel-2 uydu görüntüleri.

3. Yöntem

Bu bölüm NDVI, k -ortalamalar++ ve SYEKA ile ilgili teorik bilgileri ve detaylı açıklamaları içermektedir.

3.1. NDVI Hesaplaması

Yöntem kısmının ilk aşamasında, ilgili ay ve yıllara ait verilere erişimin ardından, görüntülerdeki bitkisel yoğunluğu gözlemleyebilmek amacıyla NDVI indeksleri hesaplanmaktadır. Bu indeks değeri -1 ile 1 arasında değişmekte olup, bitki yoğunluğunun görece az olduğu yerler -1 değerine ve çok olduğu yerler 1 değerine yakınsamaktadır.

NDVI indeksi, B8 (yakın kızılötesi) ve B4 (kırmızı) bantları yardımıyla elde edilen bir indeks olup, takip eden denklem kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4} \quad (1)$$

Denklem (1) sayesinde 13 adet spektral banta ek olarak, aynı uzamsal boyutlarda yeni bir indeks bilgisi elde edilmiş olur. Bahsedildiği üzere, bu indekse ait yeni piksel değerleri bitkisel yoğunluk durumunu yansıtmaktadır. Çalışmanın devamında ise bu piksel değerleri, k -ortalamalar++ algoritması yardımıyla iki kümeye ayrıştırılmaktadır. Bu sayede, bir küme boş olan arazileri temsil ederken, diğer küme bitkisel yoğunluğa bakmaksızın ekim yapılan arazileri içermektedir.

3.2. k -ortalamalar++ Kümeleme Algoritması

Girdi olarak sağlanan verileri, herhangi bir eğitim verisine gerek duymaksızın kümelerle ayrıştıran k -ortalamalar++ algoritması, temel k -ortalamalar algoritmalarının [34], [35] geliştirilmiş bir versiyonudur. Klasik k -ortalamalar algoritmalarının aksine, optimum başlangıç merkezi seçimi sayesinde, ayrıştırma sonuçlarının daha etkili ve kararlı yapıda olmasını sağlamaktadır. İlk zamanlarda önerilen k -ortalamalar algoritmalarının başlıca sorunu, başlangıç küme merkezlerinin rastgele seçilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum ise, verilerin yanlış kümelerle atanmasına neden olabilmektedir. Bahsedilen soruna bir çözüm üretebilmek için k -ortalamalar++ algoritması, başlangıç merkez noktalarını rastgele seçmek yerine, olasılıksal bir yaklaşımla seçmektedir. Bu sayede veriler, tanımlanan k parametresi kadar kümeye optimum düzeyde ayrılmaktadır. Klasik k -ortalamalar yöntemleri ile karşılaştırıldığında, kümeler daha düşük varyans değerine sahip olmaktadır. Takip eden kısımda, k -ortalamalar++ yöntemine ait hesaplamalar ve bilgiler detaylı olarak sunulmuştur.

Denklem (1) yardımıyla elde edilen NDVI indeksine ait gözlem $\mathbf{M}_{NDVI} \in \mathbb{R}^{rc}$ olarak gösterilsin. Burada $\mathbf{M}_{NDVI}$ notasyonu elde edilen NDVI haritasını, r ve c ise sırasıyla satır ve sütun sayısını göstermektedir. k -ortalamalar++ algoritması uygulanmadan önce, matris formatındaki $\mathbf{M}_{NDVI}$ vektörel forma ($\mathbf{m}_{NDVI} \in \mathbb{R}^{rc \times 1}$) dönüştürülmekte ve ardından z -skoru normalizasyonu yapılmaktadır. Dolayısıyla bu vektör, NDVI haritasındaki normalize edilen piksel değerlerini içermekte olup, $\mathbf{m}_{NDVI} = (m_1, m_2, \dots, m_{rc})^T \subset \mathbb{R}^1$ olarak gösterilebilir.

Kümeleme algoritmasının amacı ise bu verileri, parametre olarak tanımlanan k adet kümeye atamaktır. Çalışma kapsamında, tarım arazileri ekili veya boş olmak üzere iki kümeye ayrıştırılacağı için k parametresi, $k = 2$ olarak belirlenmiştir. İlgili ön işlem adımlarından sonra, k -ortalamalar++ algoritması, ilk olarak $\mathbf{m}_{NDVI}$ içerisinde bir adet veriyi başlangıç merkezi (p_1) olarak rastgele seçmektedir. Sonrasında ise, $\mathbf{m}_{NDVI}$ içerisindeki her veri noktası ile p_1 merkezi arasında olan uzaklık, aşağıdaki denklem aracılığıyla hesaplanmaktadır:

$$D(m_i, p_1) = (m_i - p_1)(m_i - p_1)^T \quad (2)$$

Burada $D(m_i, p_1)$ ifadesi, veri noktaları ile p_1 merkezi arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. Transpoz gösterimi ise

$(\bullet)^T$ ile sembolize edilmektedir. Daha sonra, elde edilen uzaklıklar yardımıyla veri noktaları için olasılık dağılımları (3) ile bulunmaktadır:

$$P(m_i) = \frac{(D(m_i, p_1))^2}{\sum_{i=1,2,\dots,rc} (D(m_i, p_1))^2} \quad (3)$$

Denklemde $P(m_i)$ ifadesi, her veri noktası için hesaplanan olasılık değerini temsil etmektedir. Denklem (2) ile hesaplanan merkeze olan uzaklıkların karesi, her bir veri noktası için toplam uzaklıkların karesel oranlarıyla normalize edilerek, bir olasılık dağılımı elde edilmiştir. Bu denklemden şu çıkarım yapılabilir. Bir veri noktası mevcut merkeze yakınsa, seçim olasılığı daha düşük olurken; merkezden uzak olan veri noktaları, daha yüksek seçim olasılıklarına sahip olmaktadır. Başka bir deyişle, mevcut merkeze en uzak konumda bulunan veri noktası, yeni merkez seçimi için optimum aday olmaktadır. Bu prensibi baz alarak çalışan k -ortalamalar++ algoritması, bir sonraki merkez noktasını (p_2) belirlerken rastgele seçmek yerine, en yüksek olasılık değerine sahip olan veriyi seçmektedir. Bu yöntemle, küme merkezlerinden en uzakta yer alan veriler tercih edilerek farklı kategorilere ait olma olasılığı artırılmış olur. Bir sonraki p_2 merkez noktası seçiminin ardından, $k = 2$ olarak belirlenen parametre kriteri sağlanmış olacaktır.

Merkezler belirlendikten sonra algoritmanın kalan kısmı, klasik k -ortalamalar algoritması ile aynı şekilde devam etmektedir. Veri noktaları ile merkezler arasındaki mesafe (2) numaralı denklemde olduğu gibi hesaplanarak, veriler kendilerine en yakın merkeze atanmaktadır. Bu işlemin ardından, her bir küme içerisindeki verilerin ortalaması alınarak kümelerin merkez noktaları güncellenmektedir. Daha sonra, veriler ve yeni merkezler arasındaki mesafeler tekrar hesaplanarak minimum mesafeye göre yeni kümeler oluşturulmaktadır. İşlemler, merkez noktalarında gözlemlenen yer değiştirmeleri ihmal edilebilir düzeye ulaşana kadar yinelenmektedir. Kullanılan k -ortalamalar++ algoritmasının k -ortalamalar yöntemine göre avantajı, başlangıçtaki merkez noktalarının rastgele seçilmesi yerine bir kural düzeninde belirlenmesidir. İlk aşamada merkez noktaları daha doğru belirlendiği için, sonraki atamaların daha doğru olma olasılığı artmakta ve kümeleme işlemi daha hızlı olmaktadır.

Kümeleme süreci tamamlandıktan sonra, veri setinde yer alan farklı zamanlara ait her bir NDVI haritası iki kümeye ayrılarak, ilgili kümeleme haritaları oluşturulmuştur. Bu haritalarda pikseller, boş {Küme 1} ve ekili {Küme 2} alanları temsil etmektedir. Ekili alan yoğunluğu ise yüzdesel olarak takip eden formülle hesaplanmaktadır:

$$\% \{Küme 2\} = \frac{\sum_{i=1,2,\dots,rc} \mathbb{I}_{\{Küme 2\}}}{rc} \times \%100 \quad (4)$$

Denklem (4)'de $\% \{Küme 2\}$ ifadesi {Küme 2}'ye ait yüzdesel dağılımı, $\mathbb{I}_{\{Küme 2\}}$ gösterimi $\mathbb{I}_{\{Küme 2\}} \in \{1,2\}$ olmak üzere her bir pikselin hangi kümeye ait olduğunu, $\sum_{i=1,2,\dots,rc} \mathbb{I}_{\{Küme 2\}}$ ifadesi {Küme 2}'ye atanan toplam piksel sayısını ve $rc = r \times c$ ise toplam piksel sayısını göstermektedir. Verilen denklem, tüm kümeleme haritalarına uygulanarak 2022-2024 yılları arasındaki Nisan-Eylül aylarına

ait ekim yoğunlukları yüzde cinsinden hesaplanmıştır. Bu değerler, resmi verilerle karşılaştırma yapmak amacıyla kullanılmaktadır.

3.3. Simetrik Yerel Eş-Kayıt Ayarlaması (SYEKA)

İki farklı zamanda veya cihazla çekilmiş görüntüler karşılaştırıldığında, aynı nesne ya da bölge tam olarak aynı yerde bulunmayabilir. Başka bir tabirle, küçük konum farklılıkları meydana gelebilir. Bu türden uyumsuzluklara, literatürde kayıt katası (misregistration) [36] adı verilir ve SYEKA [28] metodu, bu hataların tespitinde kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, ilgili ay ve yıllara göre tarım arazisi örtüsündeki değişimi analiz edebilmek amacıyla, değişim tespiti yöntemi olarak SYEKA tercih edilmiştir. Çünkü, bir görüntü içerisinde boş durumda olan bir tarım arazisi, başka bir görüntüde ekili halde olabilir. Bu durum, konumsal bir farklılık şeklinde ele alınarak, SYEKA yöntemi aracılığıyla değişim tespiti gerçekleştirilebilir. Bazı anomali tespiti yöntemleri, hizalama hatalarını bir değişim gibi algılamaktadır. SYEKA ise, geometrik kayma hatalarını minimize ederek değişim tespiti yapmaktadır. SYEKA, görüntüdeki her bir piksel ve çevresindeki komşuluk bölgesi için, karşılaştırma yapılacak diğer görüntüye kıyasla ilgili bölgedeki konumsal kaymayı en aza indirecek yerel düzeltmeler uygulamaktadır. Bu yerel ayarlamalar sonrasında, kayıttan kaynaklı hatalar azaltılarak daha doğru bir değişim haritası elde edilmektedir. Yönteme ait teorik altyapı ve bilgiler takip eden kısımda açıklanmaktadır. Farklı zamanlara ait 3-boyutlu Sentinel-2 multispektral verileri, sırasıyla $\mathcal{M}_1 \in \mathbb{R}^{r \times c \times 13}$ ve $\mathcal{M}_2 \in \mathbb{R}^{r \times c \times 13}$ olarak gösterilsin. Veriler içerisinde, (x, y) koordinatlarında bulunan $\mathbf{s}$ ve $\mathbf{t}$ pikselleri ise vektörel olarak $\mathcal{M}_1(x, y) = \mathbf{s} \in \mathbb{R}^{13 \times 1}$ ve $\mathcal{M}_2(x, y) = \mathbf{t} \in \mathbb{R}^{13 \times 1}$ olarak temsil edilmektedir. Değişim tespiti yöntemlerinin amacı, iki farklı veri içerisinde bulunan pikseller arasındaki değişimi belirleyerek, bir değişim haritası oluşturmaktır. Bu işlemi yapan bir operatör ve oluşturulan değişim haritası sırasıyla $\mathcal{F}(\mathbf{s}, \mathbf{t})$ ve $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{r \times c}$ olmak üzere, ifade

$$\mathbf{H}(x, y) = \mathcal{F}(\mathbf{s}, \mathbf{t}) \quad (5)$$

olarak verilebilir. Burada $\mathbf{H}(x, y)$ gösterimi, (x, y) koordinatlarındaki değişim değerini temsil etmektedir. $\mathcal{F}(\mathbf{s}, \mathbf{t})$ operatörü ise $\mathbf{s}$ ve $\mathbf{t}$ pikselleri arasındaki benzerliği Öklid uzaklığı ile hesaplamaktadır. $\mathcal{M}_1(x, y) = \mathbf{s}$ pikseli koordinatında bulunan bir nesnenin, $\mathcal{M}_2(x, y) = \mathbf{t}$ pikseli konumunda yer almaması durumunda, $\mathbf{H}(x, y)$ değeri büyük olacaktır. SYEKA, bir değişim olduğu takdirde değişimin sadece ilgili pikseller arasında olmadığını, piksel komşuluklarının da bundan etkileneceğini önermektedir. Dolayısıyla, piksel komşuluklarındaki değişim değerleri de büyük olmak durumundadır. Ancak bu yaklaşım, görüntüler arasında herhangi bir kayıt hatasının (kaymanın) bulunmadığı varsayımı altında geçerliliğini korumaktadır.

Bahsedildiği üzere SYEKA yöntemi, aynı bölgeye ait iki farklı görüntü arasındaki kayma hatalarını en aza indirmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan multispektral görüntüler arasında kaymalar olabileceği için SYEKA metodu tercih edilmiştir. Olası bir kayma durumunda, değişimin

olduğu $\mathcal{M}_1$ verisinin (x, y) konumundaki bir piksel, $\mathcal{M}_2$ verisinde (x, y) koordinatına denk gelmesi gerekirken, komşuluğundaki başka bir piksele karşılık gelmektedir. Bu durum, yüksek düzeyde bir değişim tespit edilse bile, kayma etkisi nedeniyle bazı komşuluk bölgelerinde düşük değişim değerlerinin elde edilmesine ve dolayısıyla hatalı değişim tespitine yol açabilir. SYEKA yöntemine göre, kayıt hatasından kaynaklı gerçek dışı bir değişim olduğu takdirde, minimizasyon işleminin yönünden bağımsız olarak, her iki görüntü yönünde $(\mathcal{M}_1 \rightarrow \mathcal{M}_2; \mathcal{M}_2 \rightarrow \mathcal{M}_1)$ değişim değeri düşük olmalıdır. İlgili optimizasyon işlemi takip eden denklemde verilmektedir:

$$\mathbf{H}(x, y) = \max \left\{ \min_{(k, l) \in \omega} \mathcal{F}(\mathcal{M}_1(x, y), \mathcal{M}_2(x + k, y + l)), \min_{(k, l) \in \omega} \mathcal{F}(\mathcal{M}_1(x + k, y + l), \mathcal{M}_2(x, y)) \right\} \quad (6)$$

Burada (k, l) gösterimi, merkezinde (x, y) olan kare bir pencere (ω) içerisindeki komşu piksel noktalarını belirtmektedir. Denklem (6) incelendiğinde, her iki görüntü içerisinde (x, y) pozisyonunda bulunan piksel ile $(x + k, y + l)$ koordinatlarında yer alan pikseller arasındaki benzerlikler $\mathcal{F}$ operatörü ile hesaplanmaktadır. Daha sonra, her iki operatörün hesaplamış olduğu benzerlik sonuçları arasından, minimum olan değerler belirlenmektedir. Son aşamada, elde edilen iki minimum değer arasından maksimum olanı seçilerek değişim tespiti yapılmaktadır. Bu sayede, görüntüler arasındaki piksel ve piksel komşulukları arasındaki ilişkiler karşılıklı olarak incelenerek, kaymalardan kaynaklanabilecek değişim tespiti hataları en aza indirgenmektedir.

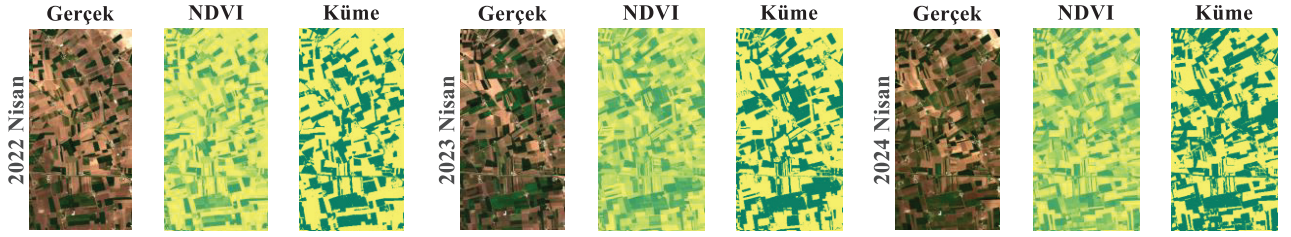
SYEKA yönteminde ayarlanması gereken tek parametre, kare bir pencere olan ve piksel komşuluklarını kapsayan ω 'nin boyutudur. [28]'de bahsedildiği üzere pencere boyutunun büyük seçilmesi, hem hesaplama zamanının artmasına hem de gerçek değişimlerin tespit edilememesine sebep olmaktadır. Bu nedenle ω için en ideal boyut 3×3 olarak belirtilmiş olup, önerilen çalışma kapsamında bu değer kullanılmıştır.

4. Deneysel Bulgular ve Tartışma

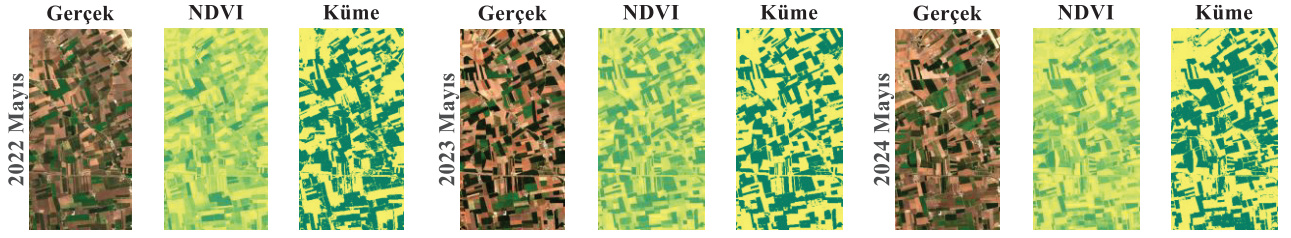
Bu bölümde, NDVI indeksi yardımıyla oluşturulan haritalar ve k -ortalamalar++ ile elde edilen kümeleme sonuçları görsel olarak sunulmuştur. Kümelennmiş veriler kullanılarak ekili alanların yüzdesel dağılımları ve yıllara göre değişimleri verilmiştir. Sayısal verilere ek olarak, SYEKA ile elde edilen yıl bazlı değişim haritaları da bulunmaktadır.

4.1. NDVI Haritalarının Oluşturulması ve Kümelennmesi

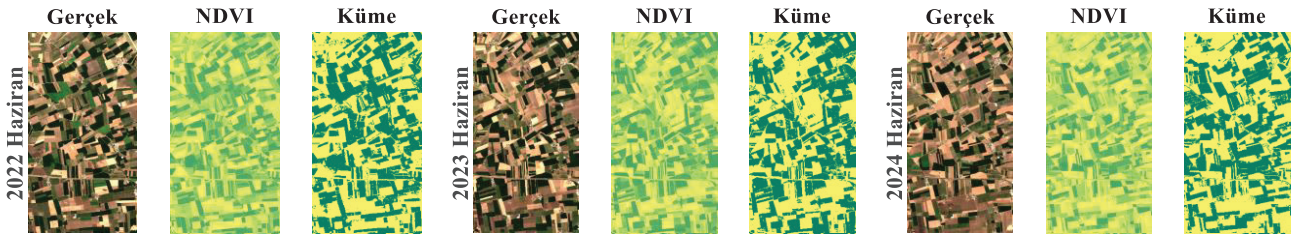
İlgili aylarda yıl bazlı olarak oluşturulan NDVI haritaları ve bu haritalardan yola çıkarak k -ortalamalar++ ile kümelendirilen tarım alanları Şekil 6 ile Şekil 11 arasında bulunmaktadır. NDVI haritalarından görüleceği üzere tarım arazilerinin boş, seyrek veya dolu olmasına göre sarıdan yeşil renge doğru bir renklendirme bulunmaktadır. Buradan yola çıkarak, NDVI indeksinin bitkisel/tarımsal durum analizi ile ilgili önemli bir bilgi olduğu anlaşılmaktadır. NDVI indeksinin -1 ile 1 arasında değişen değerlerinin k -ortalamalar++ algoritması ile kümelennmesi neticesinde, 2 ayrı kümenin ($\{Küme\ 1\}$ ve $\{Küme\ 2\}$) elde edildiği gözükmemektedir.



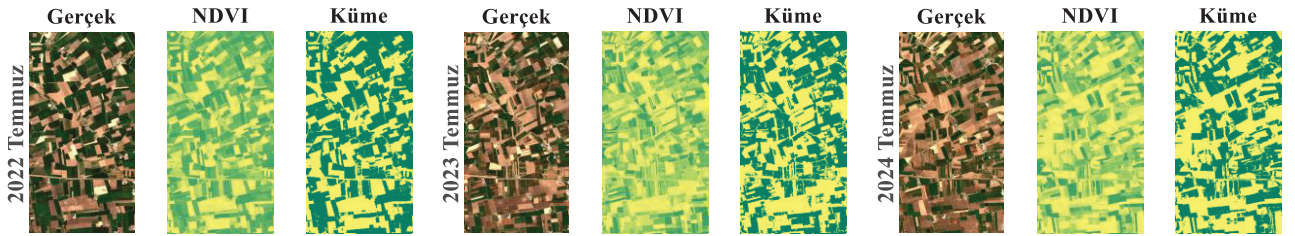
Şekil 6: 2022-2024 yılları arasında Nisan ayına ait gerçek Sentinel-2 uydu görüntüleri, NDVI ve kümeleme haritaları.



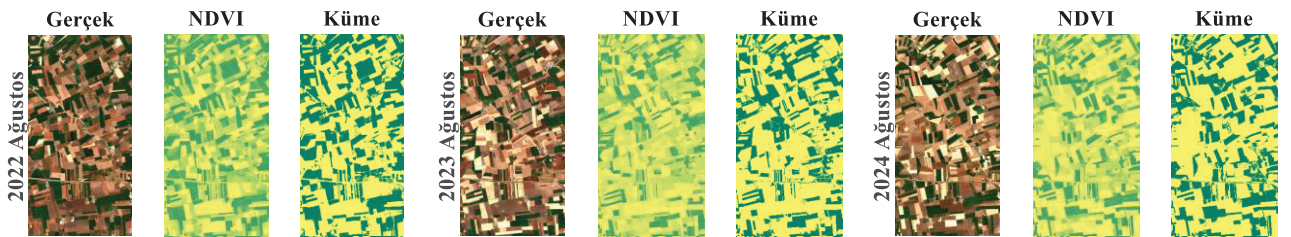
Şekil 7: 2022-2024 yılları arasında Mayıs ayına ait gerçek Sentinel-2 uydu görüntüleri, NDVI ve kümeleme haritaları.



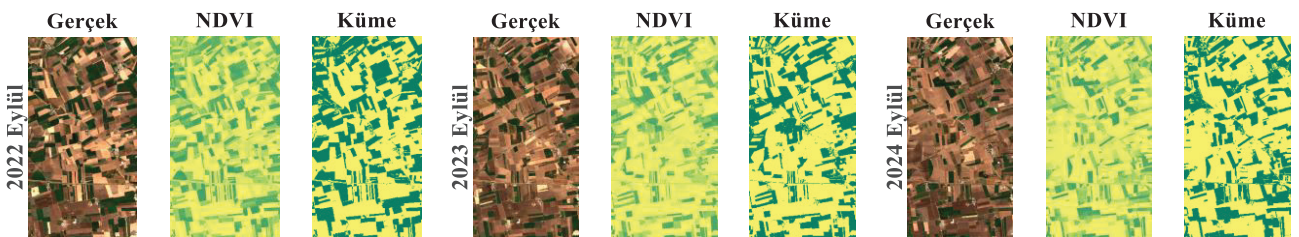
Şekil 8: 2022-2024 yılları arasında Haziran ayına ait gerçek Sentinel-2 uydu görüntüleri, NDVI ve kümeleme haritaları.



Şekil 9: 2022-2024 yılları arasında Temmuz ayına ait gerçek Sentinel-2 uydu görüntüleri, NDVI ve kümeleme haritaları.



Şekil 10: 2022-2024 yılları arasında Ağustos ayına ait gerçek Sentinel-2 uydu görüntüleri, NDVI ve kümeleme haritaları.



Şekil 11: 2022-2024 yılları arasında Eylül ayına ait gerçek Sentinel-2 uydu görüntüleri, NDVI ve kümeleme haritaları.

Sarı ile gösterilen bölgeler boş alanları {Küme 1} simgelerken, yeşil ile belirtilen kısımlar ekili durumda {Küme 2} olan arazileri temsil etmektedir. Görüldüğü üzere, seyrek veya yoğun şekilde ekili olan araziler ekili kümesine atanırken, henüz ekili olmayan araziler boş kümesine atanmıştır. Ay ve yıl bazında ekili kümesinde olan piksellerin sayıları ve yüzdelikleri, (4) numaralı denklem yardımıyla hesaplanarak Tablo 3’de sunulmuştur. Burada yüzdelik hesapları yapılırken, kırılan referans tarım bölgesinin boyutunun 1300×680 olduğu dikkate alınmalıdır. Tablo 4’de 2022-2024 yılları arasında Hatay ilinin örtü altı sebze ve meyve üretimi ile tahıllar ve diğer bitkisel ürünlerin üretim tonajlarının toplamı, Kumlu ilçesinin dekar cinsinden sebze, meyve, içecek, baharat bitkileri, tahıllar ve diğer bitkisel ürünlerin alanları toplamı ve son olarak önerilen yöntem neticesinde Kumlu ilçesinin bir referans tarım bölgesindeki yalnızca Nisan-Eylül ayları arasında tespit edilen ekili alanların piksel cinsinden toplamaları verilmiştir. Son olarak ise, sayısal verilerin yüzdesel olarak yıl bazlı değişimleri ise Tablo 5’te bulunmaktadır.

Tablo 3: Nisan-Eylül ayları ve 2022-2024 yılları arası ekili kümesinde olan piksel sayıları ve yüzdelikleri

	2022	2023	2024
Nisan	324.900 % 36.7533	365.605 % 41.3580	416.123 % 47.0727
Mayıs	433.046 % 48.9871	398.313 % 45.0580	394.071 % 44.5781
Haziran	419.492 % 47.4538	420.730 % 47.5938	393.097 % 44.4679
Temmuz	504.907 % 57.1161	440.938 % 49.8798	415.997 % 47.0584
Ağustos	379.391 % 42.9175	303.132 % 34.2909	320.375 % 36.2415
Eylül	371.381 % 42.0114	303.210 % 34.2997	310.181 % 35.0883
Toplam piksel sayısı	2.433.117	2.231.928	2.249.844

Tablo 4: Yıllara göre tarımsal veriler

	2022	2023	2024
Hatay toplam üretim (ton)	1.184.405	1.052.188	1.068.813
Kumlu ekili alan (dekar)	113.260	108.572	109.581
Referans bölge ekili kümesindeki piksel sayısı	2.433.117	2.231.928	2.249.844

Tablo 5: Yıllara göre tarımsal verilerin yüzdesel değişimleri

	2022→2023	2023→2024	2022→2024
Hatay toplam üretim (ton)	% -11.17 (▼)	% 1.58 (▲)	% -9.75 (▼)
Kumlu ekili alan (dekar)	% -4.14 (▼)	% 0.93 (▲)	% -3.25 (▼)
Ekili kümesindeki piksel sayısı	% -8.28 (▼)	% 0.80 (▲)	% -7.53 (▼)

4.2. Arazi Kullanımı Değişim Tespiti

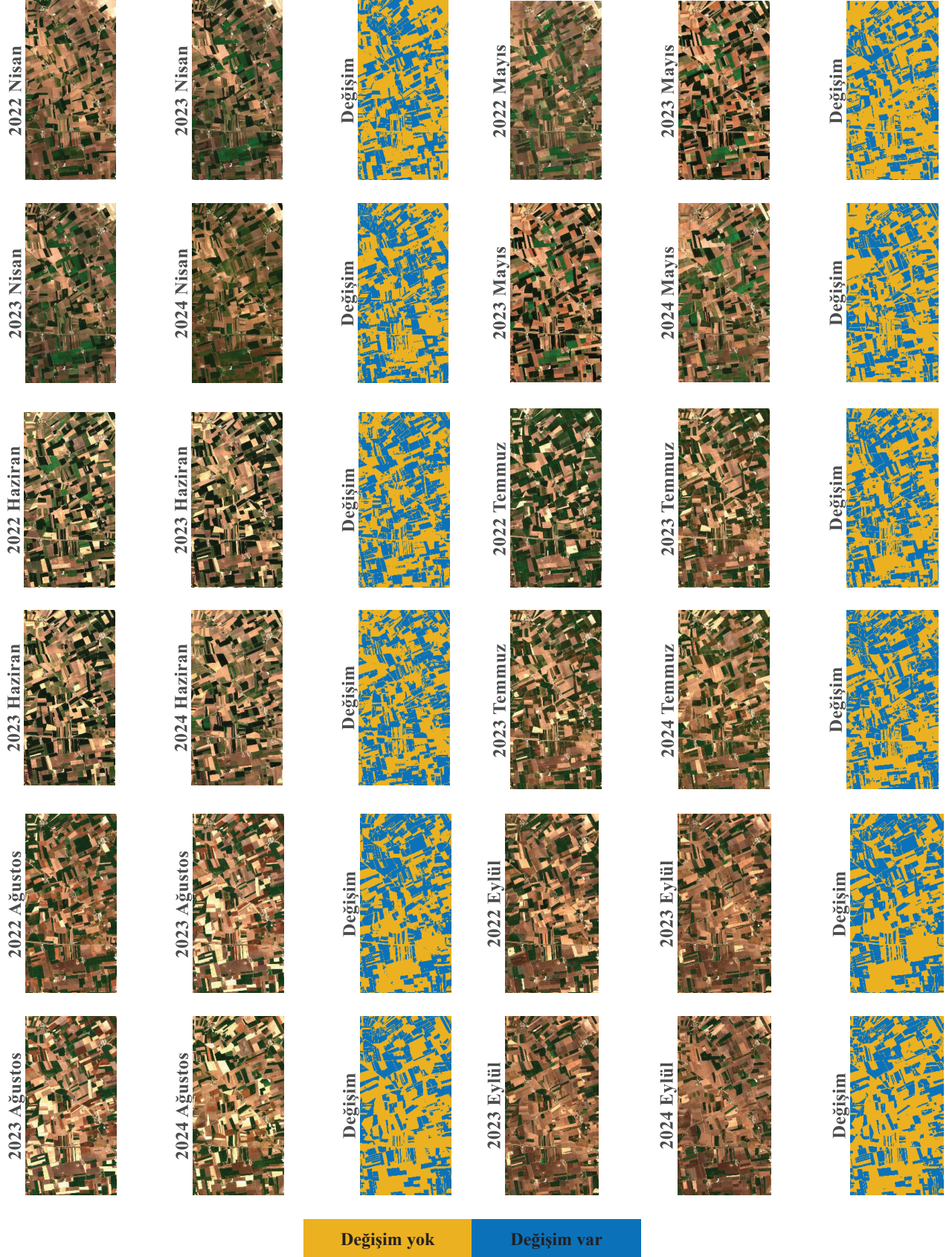
Sayısal olarak elde edilen bulgular neticesinde, ekim durumları ilgili aylar için yıl bazlı incelendiğinde, düzenli bir artış veya azalmanın olmadığı gözlemlenmiştir. Yalnızca sayısal verilere dayanarak, seçilen bir aya ait bir arazinin bir önceki yıla kıyasla ekilip ekilmediğine ya da boş bırakıldığına dair kesin bir bilgiye ulaşmak mümkün değildir. Bu durumun tespit edilebilmesi için değişim tespiti yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Çalışma kapsamında, SYEKA metodu yardımıyla değişim haritaları çıkartılarak bahsedilen durum hakkında gözlemler yapılmıştır. Daha önce bahsedildiği üzere, SYEKA yöntemi iki farklı multispektral veri arasındaki değişimi, spektral bantların bilgisini kullanarak tespit edebilmektedir. Multispektral verilere ait gerçek görüntüler ve değişim haritaları Şekil 12’de bulunmaktadır.

4.3. Değerlendirme ve Tartışma

Tablo 3, önerilen yöntemle tespit edilen ekili alan kategorisine ait piksel sayılarını ve bunlara karşılık gelen yüzdelik değerleri sunmaktadır. Görüldüğü üzere, Nisan ayında ekili alan sayısı 2022-2024 yılları arası artış göstermiştir. Mayıs ve Temmuz aylarında ise düzenli bir azalma gözükmektedir. Haziran ayında ise 2022 ve 2023 yılları ekim durumları benzer iken, 2024 yılında azalma olmaktadır. Ağustos ve Eylül ayları ise yüzdesel dağılım olarak birbirlerine benzemekte olup 2022-2023 arası azalma olurken, 2023-2024 arasında artış olmaktadır. Bu verilerden yola çıkarak, aylara göre yıl bazında standart bir durum olmadığı, bazı aylarda yıllara göre artış veya azalmalar olurken, bazı aylarda ise hem azalma hem artış durumlarının olduğu söylenebilir. Literatürde vurgulanan başlıca etkenler doğrultusunda [5], [6], [7], [8], [9], söz konusu durumun olası nedenleri aşağıda maddelenmiştir.

- Depreme Bağlı Etkiler
 - Altyapı ve sulama sistemleri hasarı
 - İşgücü ve göç etkisi
 - Psikolojik ve sosyal etki
 - Can kayıpları
- Tarımsal ve Çevresel Etkenler
 - İklim koşulları (kuraklık, don, aşırı yağış vb.)
 - Ürün deseni ve ekim tercihleri
 - Tarım desteklerindeki değişiklikler

Dolayısıyla, üretimde tespit edilen düzensizlikler sadece deprem faktörüne bağlanmamalıdır. Fakat genel olarak incelendiğinde, 2022 ile 2023 yılları arasındaki dönemde Mayıs-Temmuz-Ağustos-Eylül aylarındaki azalmaların, diğer etkenlerin yanında yüksek oranda deprem kaynaklı olduğu söylenebilir. 2023’ten 2024 dönemine geçişte bazı aylarda gözlemlenen artışlar, alternatif bir geçim kaynağının bulunmaması nedeniyle çiftçilerin yeniden ekim faaliyetlerine yönelmesi şeklinde değerlendirilebilir. Bu etkenler olası nedenler olarak değerlendirilse de, daha doğru gözlemler için saha araştırmalarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Çalışmanın başlangıcında sunulan Hatay ili ve Kumlu ilçesine ait tarımsal verilerle karşılaştırma yapabilmek amacıyla Tablo 4’e yer verilmiştir. Görüldüğü üzere, Hatay ili genelinde 2022-2023 yılları arasında üretim miktarında belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Kumlu ilçesindeki ekili alanlar da benzer şekilde azalma eğilimi göstermektedir. Aynı dönemde, önerilen yöntemle elde edilen sonuçlar incelendiğinde, ekili kategorisine karşılık gelen piksel sayısında da bir düşüş gözlemlenmektedir. 2023’ten 2024 yılına geçişte, Hatay ili genelindeki toplam tarımsal üretimde ve Kumlu ilçesindeki ekili alanlarda hafif bir artış meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 12: Kumlu ilçesi referans bölgedeki tarım arazisi kullanımının Nisan-Eylül ve 2022-2024 arası görsel değişimleri.

Önerilen yönteme ilişkin veriler değerlendirildiğinde, ekili alan kategorisinde bulunan piksel sayılarında az düzeyde bir artış olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, önerilen yöntem ile resmi veriler arasında anlamlı bir tutarlılık olduğu görülmektedir.

Son olarak, Tablo 4'te sunulan sayısal verilerdeki değişimlerin yüzdelik karşılıkları Tablo 5'te yer almaktadır. 2022-2023 yılları arasında Hatay ilindeki toplam üretim tonajında % 11.17 azalma olurken, Kumlu ilçesindeki ekili alanlarda % 4.14 azalma meydana gelmiştir. Bunlara karşılık, önerilen yöntem neticesinde elde edilen ekili alan kategorisindeki piksel sayılarında % 8.28 azalma tespit edilmiştir. 2023-2024 dönemi arasında ise bir önceki yıldaki azalmaların aksine, hafif artışlar meydana gelmiştir. Deprem öncesi ve sonrasındaki yıllara ait 2022 ve 2024 verileri karşılaştırıldığında ise, Hatay genelindeki toplam üretim tonajı % 9.75, Kumlu ilçesindeki ekili alanlar toplamı % 3.25 ve önerilen yönteme ait ekili sınıftaki piksel sayıları toplamı % 7.53 azalmıştır. Tablo 4'e dair gözlemlerde belirtilmiş olduğu üzere, Tablo 5'te yer alan bulgular da önerilen yöntemle resmi veriler arasındaki tutarlılığı göstermektedir. Elde edilen sayısal bulgular neticesinde şu çıkarımlar yapılabilir:

- Resmi kaynaklar ve önerilen yöntem yardımıyla elde edilen veriler, bir önceki yıla kıyasla depremin gerçekleştiği 2023 senesinde üretimlerin azaldığını, fakat 2024 yılında ise hafif artışların başladığını göstermektedir.
- Hatay ilindeki toplam üretim tonajı değişimlerine kıyasla, Kumlu ilçesinin ekili alan değişimleri daha az yüzdeliklerle gerçekleşmiştir.
- Daha önceden belirtildiği üzere, önerilen yöntemde kullanılan çalışma alanı, Kumlu ilçesi sınırları içerisindeki bir tarım alanı bölgesini kapsamaktadır. Tablo 4 ve Tablo 5 incelendiğinde, Kumlu ilçesine ait resmi verilerle, önerilen yöntem arasındaki sonuçların arasında farklılık olduğu görülmektedir. Bu durum, Kumlu ilçesindeki tüm tarım arazilerinin çalışma kapsamında kullanılmamasından kaynaklanmaktadır. Ancak, yalnızca seçilen bölgeye ait uydu görüntülerine dayalı olarak gerçekleştirilen uzaktan algılama çalışmasıyla dahi, resmi verilerle benzer artış ve azalış eğilimlerinin tespit edilebildiği görülmektedir. Bu durum, önerilen yöntemin tutarlı ve geçerli olduğunu doğrulamaktadır. Resmi verilerle daha yüksek düzeyde örtüşmenin sağlanabilmesi için, ilçeye ait sınırların kesin olarak belirlenip uydu görüntüleri üzerinden elde edilmesi ve ayrıca görüntülerde yer alan tarım arazisi dışındaki alanların görüntü ön işleme teknikleri kullanılarak çıkarılması gerekmektedir. Ayrıca, ekim yoğunluğunun görece düşük olduğu Nisan-Eylül dönemi dışındaki aylara ait verilerin de analiz edilmesi, elde edilen sonuçların doğruluk ve güvenilirliğini artırmaya katkı sağlayacaktır.

Tablo 3'ten görüldüğü üzere, tarım arazilerinin kullanım durumları ilgili aylarda yıl bazlı olarak değişiklik göstermektedir. İlgili bir ayda boş bırakılan tarım arazisi diğer senelerde ekilebilmektedir veya ekili olan bir alan diğer yıllarda boş kalabilmektedir. Dolayısıyla Tablo 3'te ay bazlı verilen ekili alanların yüzdelik dağılımları ve Tablo 5'teki yıllık yüzdelik değişimler, sadece aynı tarım arazilerinin kullanım durumlarının değişiminden kaynaklanmamakta olup, başka tarım arazilerinin ekim durumlarının değişikliğinden de kaynaklanabilmektedir. Bunun sebepleri ise daha önceden

açıklandığı üzere çiftçilerin tarım arazilerini nadasa bırakması, maddi sorunlardan dolayı arazisinin belirli bir kısmını ekebilmesi, deprem durumundan kaynaklı olarak tarım arazisini işleyebilecek durumda bireylerin kalmamış olması veya depremden dolayı su ile altyapı kaynaklarının etkilenmesi olarak değerlendirilebilir. Bu durumu daha iyi gözlemleyebilmek adına, Şekil 12'de bulunan değişim haritaları oluşturulmuştur. Görsellerden anlaşılabileceği üzere, tarım arazilerinin kullanımında bir düzen söz konusu değildir. Başka bir ifadeyle, ilgili ay ve yılda ekim yapılan bir tarım arazisi, takip eden yılda boş durumda olabilir. Bu tespitlerin yanında, değişim haritaları sayesinde aylar arasındaki ekim faaliyetleri de incelenebilir. Örneğin, Tablo 3 verileri incelendiğinde, Ağustos ve Eylül aylarında bulunan ekili alan sınıftaki piksel yoğunluklarının oldukça benzer olduğu görülmektedir. Şekil 12 üzerinden bu aylara ait değişim haritaları incelendiğinde, birbirlerine oldukça benzer değişim haritalarının elde edildiği görülmektedir.

Yapılan değerlendirmeler neticesinde, önerilen çalışmanın literatüre katkıları şu şekilde sıralanabilir:

- Önceki literatür çalışmalarında, yalnızca önerilen yöntemler doğrultusunda elde edilen sonuçlar karşılaştırılırken, bu çalışmada resmi verilerle de kıyaslama yapılarak bulguların tutarlılığı ve güvenilirliği güçlendirilmiştir.
- Belirtildiği üzere, mevcut çalışmalar 2022 ve 2023 yılları arasındaki değişimleri incelemekte olup, deprem sonrası yılı kapsayan değişimler kapsam dışında bırakılmıştır. Önerilen çalışmada bu durum da dikkate alınarak, 2024 yılına ait veriler de analiz edilmiştir.
- Oluşturulan değişim haritaları sayesinde, arazi kullanım ve arazi örtüsü değişimlerinin izlenebilir olması sağlanmıştır.

5. Sonuç

Bu çalışmada, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin tarım üzerine olan etkileri Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılarak incelenmiştir. Referans bölge olarak Hatay ili Kumlu ilçesinin bir kısmındaki tarım arazileri seçilmiştir. Tarım faaliyetlerinin yoğun olduğu Nisan-Eylül arası aylara ve 2022-2024 arası yıllara ait uydu görüntüleri toplanmıştır. Bitkisel faaliyetlerinin analizi için kullanılan NDVI indeksi ile arazilerin bitkisel yoğunluk durumları belirlenmiştir. Daha sonra k -ortalama++ algoritması ile NDVI değerleri boş veya ekili olmak üzere iki kategoriye bölünmüştür. Ekili kümesindeki piksellerin tüm görüntüye olan yüzdelik dağılımları her bir veri seti için hesaplanmıştır. Elde edilen sayısal bulgular ile Hatay ili ve Kumlu ilçesine ait resmi tarım verileri karşılaştırılmıştır. Resmi verilere uyumlu olarak, uydu görüntüleri ve önerilen yöntem ile bulunan sonuçlar, bir önceki yıla kıyasla 2023 senesinde tarımsal faaliyetlerde önemli sayılabilecek düzeyde bir azalma olduğunu doğrulamıştır. 2024 yılında ise bir önceki yıla kıyasla tarımsal faaliyetlerde az bir artış olduğunu göstermiştir. Sayısal verilere ek olarak, SYEKA algoritması yardımı ile Nisan-Eylül arası ayların yıl bazındaki tarımsal durum değişimleri tespit edilmiştir. Elde edilen değişim haritaları, tarımsal faaliyet değişimlerinin yalnızca belirli araziler üzerinden olmadığını göstermiştir. Deprem, nadasa bırakma veya ekonomik sebepler yüzünden yıllara göre ekim faaliyetlerinin değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir.

Yapılan analizler ve elde edilen bulgular doğrultusunda, araştırmanın kapsamı gelecekteki çalışmalarla genişletilecektir. Mevcut haliyle yalnızca tek bir bölgeye odaklanan çalışma, ilerleyen süreçte depremden etkilenen diğer illerdeki tarım bölgeleri için de uygulanacaktır. Ayrıca, resmi verilerle daha yüksek düzeyde örtüşme sağlamak amacıyla, güncel makine öğrenimi ve derin öğrenme tabanlı

algoritmalar tercih edilecektir. Gerçekleştirilecek kapsam genişletme ve sonuç iyileştirme çalışmalarıyla beraber, uzaktan algılama temelli tarımsal değişim tespiti deprem öncesi ve sonrası analizlerde genelleştirilebilir bir yaklaşım olarak kullanılması hedeflenmektedir.

6. Kaynaklar

- [1] G. Beroza, "Investigating the Causes and Consequences of Earthquakes", *Journal of Geography & Natural Disasters*, c. 13, sy 1, ss. 1-1, Mar. 2023, doi: 10.35841/2167-0587.23.13.266.
- [2] H. Yang ve S. Yao, "Shallow destructive earthquakes", *Earthquake Science*, c. 34, sy 1, ss. 15-23, Şub. 2021, doi: 10.29382/eqs-2020-0072.
- [3] A. Demir vd., "Destructive impact of successive high magnitude earthquakes occurred in Türkiye's Kahramanmaraş on February 6, 2023", *Bull Earthquake Eng*, c. 23, sy 3, ss. 893-919, Şub. 2025, doi: 10.1007/s10518-024-01865-5.
- [4] Y. A. Arıkan ve U. Arıkan, "Kahramanmaraş'ta Meydana Gelen Depremlerin Saha İncelemesi ve Değerlendirilmesi", *OneHealth P.*, c. 2, sy 1, Art. sy 1, Haz. 2024.
- [5] M. Marangoz ve Ç. İzci, "Doğal Afetlerin Ekonomik, Sosyal ve Çevresel Etkilerinin 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Merkezli Depremler Bağlamında Girişimciler Açısından Değerlendirilmesi", *SOBBİAD*, c. 24, sy 52, Art. sy 52, Haz. 2023.
- [6] B. Aydın Can, S. Gerdan, ve R. Aslan, "The Effects of 6 February 2023 Earthquakes on the Production and Marketing Process of Firms in the Agriculture and Food Sector: The Case of Malatya Province, Türkiye", *Sustainability*, c. 16, sy 21, Art. sy 21, Oca. 2024, doi: 10.3390/su16219479.
- [7] "KAV_DDR_2023-1-1.pdf". Erişim: 17 Haziran 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.kav.org.tr/wp-content/uploads/2023/02/KAV_DDR_2023-1-1.pdf
- [8] "6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Merkezli Depremler Sonrası Tarım ve Gıda Arz Güvenliğinin Değerlendirilmesi", ResearchGate. Erişim: 17 Haziran 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/371959825_6_Subat_2023_Kahramanmaraş_Merkezli_Depremler_Sonrası_Tarım_ve_Gıda_Arz_Guvenliginin_Degerlendirilmesi
- [9] M. Paksoy, "Bir Felaketin Anatomisi: Kahramanmaraş Depremlerinin Ekonomi ve Tarım Üzerine Etkileri".
- [10] M. Duruel, "Afetlerde Göçmen Olmak: 6 Şubat Depremi Hatay Örneği", *Mukaddime*, c. 14, sy 2, Art. sy 2, Kas. 2023, doi: 10.19059/mukaddime.1381750.
- [11] "TÜİK Gösterge". Erişim: 22 Nisan 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://biruni.tuik.gov.tr/ilgosterge/?locale=tr>
- [12] "Tarımsal Veriler". Erişim: 22 Nisan 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://hatay.tarimormn.gov.tr/Menu/55/Tarimsal-Veriler>
- [13] "biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=95&locale=tr". Erişim: 22 Nisan 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=95&locale=tr>
- [14] X. Wang vd., "Evaluating Urban Building Damage of 2023 Kahramanmaraş, Turkey Earthquake Sequence Using SAR Change Detection", *Sensors*, c. 23, sy 14, Art. sy 14, Oca. 2023, doi: 10.3390/s23146342.
- [15] Z. Hong vd., "Rapid Fine-Grained Damage Assessment of Buildings on a Large Scale: A Case Study of the February 2023 Earthquake in Turkey", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, c. 17, ss. 5204-5220, 2024, doi: 10.1109/JSTARS.2024.3362809.
- [16] E. Altunsu, O. Güneş, S. Öztürk, S. Sorosh, A. Sarı, ve S. T. Beeson, "Investigating the structural damage in Hatay province after Kahramanmaraş-Türkiye earthquake sequences", *Engineering Failure Analysis*, c. 157, s. 107857, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107857.
- [17] A. Demir vd., "Destructive impact of successive high magnitude earthquakes occurred in Türkiye's Kahramanmaraş on February 6, 2023", *Bull Earthquake Eng*, c. 23, sy 3, ss. 893-919, Şub. 2025, doi: 10.1007/s10518-024-01865-5.
- [18] N. CiVelek, M. İnAlpulat, ve L. Genç, "Evaluation of Earthquake Impacts on Land Use and Land Cover (LULC) Using Google Earth Engine (GEE), Sentinel-2 Imageries, and Machine Learning: Case Study of Antakya", *JAES*, Eyl. 2023, doi: 10.35229/jaes.1349826.
- [19] C. Yağcı ve M. G. Gümüş, "Provincial-level analysis of land use changes following the 2023 Kahramanmaraş earthquakes using sentinel-2 land use/land cover time series data", *NÖHÜ Müh. Bilim. Derg.*, c. 14, sy 2, ss. 775-790, Nis. 2025, doi: 10.28948/ngumuh.1653751.
- [20] F. J. Kriegler, W. A. Malila, R. F. Nalepka, ve W. Richardson, "Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition", *Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, ss. 97-131, 1969.
- [21] T. T. Sasidhar, S. K., V. M.T., S. V., ve S. K.P., "Land Cover Satellite Image Classification Using NDVI and SimpleCNN", içinde *2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, Tem. 2019, ss. 1-5. doi: 10.1109/ICCCNT45670.2019.8944840.
- [22] G. L. Spadoni, A. Cavalli, L. Congedo, ve M. Munafò, "Analysis of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) multi-temporal series for the production of forest cartography", *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, c. 20, s. 100419, Kas. 2020, doi: 10.1016/j.rsase.2020.100419.
- [23] M. Gazzea, L. M. Kristensen, F. Pirotti, E. E. Ozguven, ve R. Arghandeh, "Tree Species Classification Using High-Resolution Satellite Imagery and Weakly Supervised Learning", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, c. 60, ss. 1-11, 2022, doi: 10.1109/TGRS.2022.3210275.
- [24] D. Arthur ve S. Vassilvitskii, "k-means++: the advantages of careful seeding", içinde *Proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*, içinde SODA '07. USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, Oca. 2007, ss. 1027-1035.

- [25] M. A. Hamada, Y. Kanat, ve A. E. Abiche, "Multi-Spectral Image Segmentation Based on the K-means Clustering", *IJITEE*, c. 9, sy 2, ss. 1016-1019, Ara. 2019, doi: 10.35940/ijitee.K1596.129219.
- [26] A. SAĞLAM ve N. BAYKAN, "Evaluating the attributes of remote sensing image pixels for fast k-means clustering", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, c. 27, sy 6, ss. 4188-4202, Oca. 2019, doi: 10.3906/elk-1901-190.
- [27] Z. Ren, L. Sun, ve Q. Zhai, "Improved k-means and spectral matching for hyperspectral mineral mapping", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, c. 91, s. 102154, Eyl. 2020, doi: 10.1016/j.jag.2020.102154.
- [28] J. Theiler ve B. Wohlberg, "Local Coregistration Adjustment for Anomalous Change Detection", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, c. 50, sy 8, ss. 3107-3116, Ağu. 2012, doi: 10.1109/TGRS.2011.2179942.
- [29] P. C. Hytla, E. J. Balster, J. R. Vasquez, ve R. M. Neuroth, "Multi-ratio fusion change detection", içinde *2016 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON) and Ohio Innovation Summit (OIS)*, Tem. 2016, ss. 54-61. doi: 10.1109/NAECON.2016.7856774.
- [30] C. Wu, Y. Lin, B. Du, ve L. Zhang, "A Study for Hyperspectral Anomaly Change Detection on 'Viareggio 2013 Trial' Dataset", içinde *2019 10th International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (MultiTemp)*, Ağu. 2019, ss. 1-4. doi: 10.1109/Multi-Temp.2019.8866969.
- [31] "Copernicus Browser", Copernicus Browser. Erişim: 24 Nisan 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>
- [32] "Genel Bilgiler". Erişim: 24 Nisan 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://hatay.ktb.gov.tr/TR-201494/genel-bilgiler.html>
- [33] "Sentinel-2". Erişim: 24 Nisan 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2
- [34] J. MacQueen, "Some methods for classification and analysis of multivariate observations", içinde *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1: Statistics*, c. 5.1, University of California Press, 1967, ss. 281-298.
- [35] S. Lloyd, "Least squares quantization in PCM", *IEEE Transactions on Information Theory*, c. 28, sy 2, ss. 129-137, Mar. 1982, doi: 10.1109/TIT.1982.1056489.
- [36] X. Dai ve S. Khorram, "The effects of image misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, c. 36, sy 5, ss. 1566-1577, Eyl. 1998, doi: 10.1109/36.718860

Özgeçmişler



Tuğcan DÜNDAR, 1993 yılında Gaziantep'te doğmuştur. Lisans eğitimi 2016 yılında Gaziantep Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. 2019 yılında “İnsansız hava araçları için hiperspektral görüntü sınıflandırma algoritmalarının geliştirilmesi” başlıklı tezi ile Gaziantep Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. Doktora eğitimini ise 2024 senesinde “Uzaktan algılanan hiperspektral görüntülerin iyileştirilmesi ve sınıflandırılması için makine öğrenmesi algoritmalarının geliştirilmesi” başlıklı tez ile Gaziantep Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. 2017-2019 yılları arasında Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Havacılık ve Uzay Mühendisliği bölümü ve Gaziantep Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmıştır. 2021-2024 yılları arasında Gaziantep Üniversitesi Naci Topçuoğlu Meslek Yüksekokulu Kontrol ve Otomasyon Teknolojisi programında Öğretim Görevlisi olarak çalışmıştır. 2025 yılından itibaren Mersin Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde Dr. Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır. Çalışma alanları arasında uzaktan algılama, makine öğrenmesi, sinyal ve görüntü işleme konuları yer almaktadır.

Kritik Altyapıların Savunmasında Yeni Nesil Yöntemler: Siber Saldırıların Tespitinde Yapay Zekâ Uygulamaları

New Generation Methods in the Defense of Critical Infrastructures: Artificial Intelligence Applications in Detecting Cyber Attacks

Mehmet Akif Özgül¹, Şevki Demirbaş²

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği(TF) Bölümü, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, mehmet_akif_ozgul@icloud.com,  0009-0000-0625-5192

²Elektrik Elektronik Mühendisliği(TF) Bölümü, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, demirbas@gazi.edu.tr,  0000-0001-9111-684X

Öz

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemleri, kritik altyapıların yönetiminde önemli bir rol oynamaktadır. Bu derleme makale, SCADA sistemlerini hedef alan siber saldırıları yapay zekâ destekli yöntemlerle tespit etme potansiyelini değerlendirmek amacıyla hazırlanmıştır. Çalışmada, son yıllardaki literatür incelenerek SCADA sistemlerinin yapısı, uygulamaları ve güvenlik zafiyetleri detaylı bir şekilde ele alınmış, SCADA sistemlerine yönelik siber saldırı türleri gözden geçirilerek bu saldırıların tespitinde yapay zekâ uygulamalarının potansiyeli değerlendirilmiş ve makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmalarının bu alandaki uygulamaları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bulgular, makine öğrenmesi algoritmalarının diğer algoritmalarla kıyasla siber saldırıları tespit etmede daha geniş çapta kullanıldığını göstermektedir. Bu bulgular, geliştirilecek yapay zekâ tabanlı siber saldırı tespit modellerinin SCADA sistemlerinin güvenliğini güçlendirmede kritik bir rol oynayabileceğini ortaya koyarken aynı zamanda yeni araştırmacılar için siber saldırı tespiti alanındaki gelişmeleri daha derinlemesine incelemelerine olanak tanıyacak teknik bir rehber niteliği taşımaktadır.

Anahtar kelimeler: Kritik altyapı, SCADA, siber güvenlik, siber saldırı, yapay zekâ ve makine öğrenmesi

Abstract

SCADA systems play a crucial role in the management of critical infrastructures. This review article has been prepared to evaluate the potential of artificial intelligence-based methods for detecting cyber attacks targeting SCADA systems. In this study, by reviewing the literature of recent years, the structure, applications, and security vulnerabilities of SCADA systems were examined in detail; various types of cyber attacks targeting SCADA systems were analyzed; the potential of artificial intelligence applications in detecting these attacks was evaluated; and the applications of machine learning and deep learning algorithms in this domain were comparatively analyzed. The findings indicate that machine learning algorithms are more widely utilized in detecting cyber attacks compared to other algorithms. These findings reveal that the artificial intelligence-based cyber attack detection models to be developed can play a critical role in strengthening the security

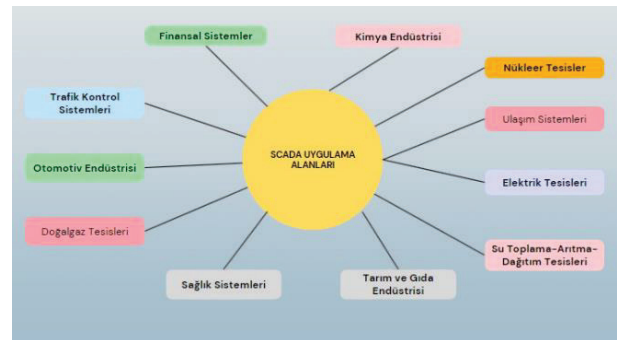
of SCADA systems and can also serve as a technical guide for new researchers who want to examine the developments in the field of cyber attack detection in more depth.

Keywords: Critical infrastructure, SCADA, cyber security, cyber attack, artificial intelligence and machine learning

1. Giriş

SCADA, elektrik üretimi, petrol, gaz ve üretim tesisleri gibi endüstriyel sektörlerde kritik altyapıların yönetiminde hayati öneme sahip bir kontrol sistemi yapısını ifade etmektedir [1]. Bu sistem, üretim tesisleri ve fabrikalar gibi kritik altyapılarda operatörlerin uzaktan erişim sağlayarak ayar noktalarını değiştirebilmesine, anahtarları ve vanaları kontrol etmelerine, alarm durumlarını takip etmelerine ve ölçüm verilerini toplayabilmelerine imkân tanımaktadır [2]. Gerçek zamanlı verilerin ve süreçlerin yerel veya uzaktan kontrolünü sağlayan SCADA sistemleri operasyonel etkinliği artırmak amacıyla sensörler, aktüatörler, anahtarlar ve vanalar gibi çeşitli bileşenleri kullanmaktadır [1]. Örneğin, belediyeler SCADA sistemlerini kullanarak şebeke suyu dağıtım tesislerindeki su tanklarının su seviyelerini, boru basınçlarını ve sıcaklıklarını izleyebilmektedir [3].

SCADA sistemleri, enerji üretimi ve dağıtımı, su ve atık su yönetimi, petrol ve gaz sektörü, kimyasal süreçler ve hatta akıllı şehirler gibi geniş bir yelpazede uygulama alanına sahip olup, bu alanlarda büyük bir öneme sahiptir (Şekil 1).



Şekil 1. SCADA sistemlerinin kullanıldığı temel uygulama alanları

Şekil 1’den de görüldüğü üzere farklı uygulama alanları bulunan SCADA sistemlerinin siber güvenliği, birçok kritik altyapı sisteminin güvenli ve kesintisiz işleyişini sağlamak için temel bir gereklilik haline gelmiş ve kuruluşların, bireylerin ve devletlerin varlıklarını koruma açısından hayati önem kazanmıştır.

Uluslararası Telekomünikasyon Birliği, siber güvenlik kavramını, bilgi ve sistemleri siber ortamda bulunan tehditlere karşı korumak için kullanılan araç, politika, kural, önlem, eylem, risk yönetimi stratejisi, eğitim, yöntem ve altyapıdan oluşan teknolojilerin bir bileşimi olarak tanımlamaktadır [4]. Siber güvenlik genel anlamda, bilgi sistemlerini ve bu sistemde barındırdıkları verileri, yetkisiz erişim, siber saldırılar ve kötü amaçlı kullanımdan korunmayı amaçlayan bir disiplindir [5].

Siber suçlular, çeşitli saldırı teknikleri ve zafiyetlerden yararlanarak özellikle kritik altyapıları kendi çıkarları doğrultusunda kullanmak için hedef almaktadırlar. Enerji, su, ulaşım, iletişim, finans, sağlık, gıda ve güvenlik kurumları gibi hayati önem arz eden temel sistemler bir ülkenin veya kurumun varlığını ve işleyişini ayakta tutan kritik altyapıları oluşturmaktadır. Bu sistemler, zorlu çalışma ortamlarına uyum sağlayabilecek ve aralıksız çalışabilecek şekilde tasarlanmış bileşenlerden oluşmaktadır. Kritik altyapıların hem yerel hem de uzaktaki bileşenlerinin izleme ve kontrol işlemleri SCADA sistemleri aracılığıyla gerçekleştirilmektedir [2].

EKS'lerde (Endüstriyel Kontrol Sistemi) bulunan SCADA ve DCS (Distributed Control System) gibi izleme ve kontrol sistemlerine yönelik gerçekleştirilen siber saldırılar, sistemlerin yetkisiz kişiler tarafından ele geçirilmesine, fonksiyonlarının ve işleyişinin bozulmasına veya değiştirilmesine neden olarak önemli güvenlik sorunları oluşturmaktadır [6]. Bu nedenle, kritik altyapılarda SCADA sistemlerinin siber saldırılara karşı korunması en yüksek önceliklerden biridir. Siber saldırılar sonucunda oluşabilecek hizmet kesintilerinin yıkıcı etkileri ve günlük yaşamın akamasına yol açması nedeniyle SCADA sistemlerinin siber güvenliğine diğer sistemlere kıyasla daha fazla önem verilmesi gerekmektedir [7].

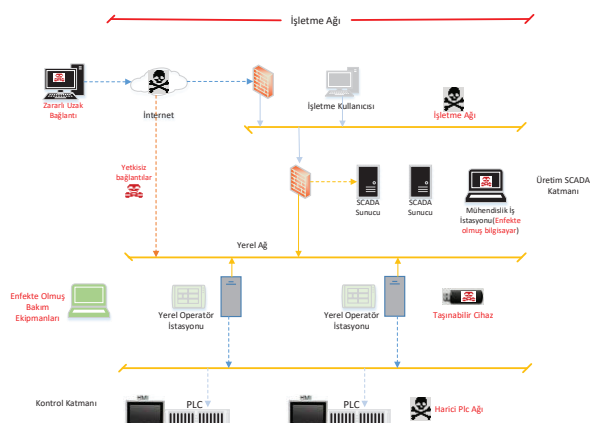
doğrudan yollarla sızışmışlardır [8]. Tesis ağı ile kurumsal ağ arasında sağlanacak doğrudan bağlantılar, yetkisiz kişilerin verilere erişim sağlamasına, sistemlerde değişiklik yapmasına, kötü amaçlı yazılımlar yüklemesine veya tesis ekipmanlarını kötü amaçlarla işletmesine olanak tanıyabilmektedir. Bu tür eylemler, üretimde kesintilere neden olarak ticari kayıplara yol açabileceği gibi, en kötü senaryoda ciddi güvenlik olaylarının ortaya çıkmasına da neden olabilmektedir. Ayrıca, USB aygıtları, kasten zararlı yazılımlarla enfekte edilebilmekte ve doğrudan ya da dolaylı yollarla hedeflere ulaştırılabilmektedir. Yanlış yapılandırılmış bir güvenlik duvarı, saldırganların koruma altındaki dâhili ağlara ve kaynaklara yetkisiz erişim elde etmesine yol açabilmektedir. Buna ek olarak tesis ağına bağlı bir PLC (Programmable Logic Controller), yeterli güvenlik önlemlerine sahip olmayan bir harici ağa bağlı olabilir ve bu durum, saldırganın tesis ağına erişim sağlamasına zemin hazırlayabilmektedir. Bu bağlantı, ciddi bir güvenlik tehdidi oluşturarak potansiyel saldırılar için zafiyet yaratabilmektedir. Bununla beraber, harici kullanılan bir düzüstü bilgisayar zararlı yazılımlarla enfekte olmuş olabilir ve işletme veya proses ağına bağlandığında bu zararlı yazılım ağı olumsuz etkileyebilir. Uzaktan destek bağlantılarının da yeterince güvenli olmaması, tesis ağını olumsuz etkileyebilmekte ve saldırganların koruma altındaki dâhili ağlara ve kaynaklara yetkisiz erişim sağlamasına yol açabilmektedir. Bu tür siber saldırı senaryoları, Şekil 2’de gösterilen siber saldırı vektörlerinin sistemler üzerinde nasıl etkiler doğurabileceğine dair bir çerçeve sunmaktadır. Bu sistemlerin güvenlik açıklarının kapatılması ve giderilmesi, kritik altyapıların siber güvenliğini sağlamak için öncelikli adımlardan biri olmakla birlikte siber saldırıları tespit edip engellemek de en az o kadar önemlidir. Siber saldırı tespit ve engelleme sistemleri, ülkelerin kritik altyapılarının siber tehditlere karşı dayanıklılığını artırarak bu sistemlerin kesintisiz ve güvenli bir şekilde çalışmasına katkıda bulunmaktadır.

Günümüzde kritik altyapılara yapılan siber tehditlerin karmaşıklığı ve sayısı artarken büyük veri miktarları ve işlem hızı nedeniyle siber savunma için yalnızca insan odaklı yöntemler yetersiz kalmaktadır. Siber saldırıların dinamikliği ve karmaşıklığı arttıkça, geleneksel sabit algoritmalar kullanılarak yazılım geliştirmenin siber savunmada etkili bir çözüm sağlayamadığı açıkça görülmektedir [9]. Bu bağlamda, kritik altyapıların siber güvenliğini artırmak için YZ (Yapay Zekâ) tabanlı siber saldırı tespit sistemlerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Bu derleme çalışması, kritik altyapılarda siber saldırı tespiti için kullanılan yapay zekâ yöntemlerini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Bölüm 2, kritik altyapıların işleyişinde merkezi bir rol oynayan SCADA sistemlerine genel bir bakış sunmaktadır. Bölüm 3, SCADA sistemi uygulamaları ve sistemin güvenlik açıkları hakkında öz bilgiler vermektedir. Bölüm 4, özellikle kritik altyapılardan “Enerji” sektörüne odaklanarak SCADA sistemlerine yapılan siber saldırılardan bahsetmektedir. Bölüm 5, siber saldırıların tespiti ve bu saldırıların tespitinde yapay zekânın rolünü açıklamaktadır. Son olarak Bölüm 6’da bu araştırmanın sonuçları açıklanmaktadır.

2. SCADA Sistemi

İnsanların büyük kentlere göç etmesi sonucunda şehirlerin nüfusu hızla artmış ve bu nüfus artışıyla birlikte, insanların



Şekil 2. Endüstriyel kontrol sistemlerine yönelik olası siber saldırı vektörleri

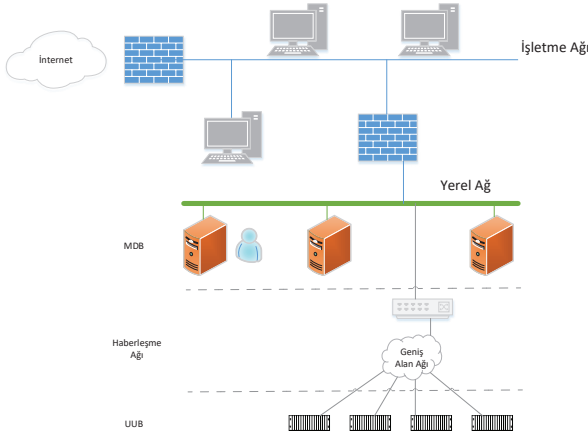
Şekil 2’de endüstriyel kontrol sistemlerine yönelik siber saldırılarda kullanılabilecek bazı yöntemler gösterilmektedir. SCADA sistemlerinde meydana gelen olayların büyük çoğunluğunda saldırganlar ve zararlı yazılımlar, sistemlere

ihtiyaç duyduğu ışık, ısı ve enerji gibi temel gereksinimlere olan talepler de hızla artış göstermiştir. Bu artan taleplere karşılık vermek için sunulan sistemler hantal kalmış, işletmeleri yönetme, denetleme ve kontrol etme süreçleri zorlaşmıştır. Bu zorluklar karşısında SCADA sistemi bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır.

1980'lerden beri var olan SCADA sistemi, sahadan veri toplama ve saha ekipmanlarını kontrol etme imkânı sunan, alarm bazlı izleme ve kontrol prensiplerine dayalı bir sistemdir [10]. Zamanla, SCADA sistemlerinde kullanılan PLC'lerin tedarikçileri arasında standart farklılıkları artmış, bu da iletişim problemlerine neden olmuştur. Bu sebeple, 1980'lerde bazı standartlar üzerinde anlaşmaya varılmış ve günümüzde çoğu tedarikçi, daha fazla pazar payı elde etmek amacıyla UUB'lerini (Uzak Uç Birimi) standart iletişim arayüzleri ile donatmıştır [11]. Bu sistemler, zamanla kritik altyapıların işleyişinde önemli rol oynamaya başlamıştır.

Otomasyon teknolojisi perspektifinden bakıldığında SCADA, kontrol altına alınmak istenen sistemin özel işlevlerini yerine getirebilen, fiziksel altyapılarla iletişim kurabilen ve gerekli hesaplamalar yapabilen sistemler olarak tanımlanmaktadır [2].

SCADA sistemleri, hangi operasyonel alanda kullanıldığına bakılmaksızın temel olarak Merkezi Denetleyici Birimi (MDB), uzak uç birimleri ve haberleşme ağı olmak üzere veri toplama ve kontrol işlevlerini yerine getiren üç ana bileşenden oluşmaktadır [3]. Bu temel bileşenlere ayrıca İşletme ağı da dâhil edilebilir (Şekil 3).



Şekil 3. SCADA sistemlerinin temel bileşenleri

Şekil 3'te SCADA sistemine dair temel bileşenler gösterilmektedir. Her bir bileşenin kendine has bir işlevi bulunmakla birlikte, hizmet edilen hedefe bağlı olarak bileşenlerin sayısı ve çeşitliliği değişkenlik gösterebilmektedir. MDB, sistemin durumunun anlık olarak izlendiği ve herhangi bir aksaklık veya anormallik meydana geldiğinde sisteme müdahale edilen yerdir. UUB'ler ise izlenen sistemle ilgili verileri toplar, kaydeder ve gerektiğinde bu verileri MDB'ye aktarır. MDB'ler ayrıca, verilerin kaydedilmesi ve ilgili bileşene komut gönderilmesi gibi işlevleri de gerçekleştirmektedir.

3. SCADA Sistemi Uygulamaları ve Güvenlik Zafiyetleri

Enerji santralleri, havayolları, gemi sistemleri, su arıtma tesisleri, gaz boru hatları ve demiryolları gibi kritik altyapıların işleyişini yöneten SCADA sistemleri, akademik araştırmaların odak noktasında yer almaktadır.

Endi ve arkadaşları, endüstriyel otomasyon ve proses kontrolü alanlarında kullanılmak üzere açık sistem teknolojilerinden yararlanarak üç katmanlı bir SCADA sistem mimarisi sunmuşlardır. Bu mimari; denetim kontrol katmanı, proses kontrol katmanı ve saha enstrüman katmanından oluşmakta ve gerçek zamanlı bir endüstriyel süreci simule eden eksiksiz bir üç katmanlı yapıya sahiptir. Araştırmacılar, tasarladıkları açık sistem teknolojisine bağlı bu üç katmanlı mimarinin, geleneksel SCADA sistemlerinin sınırlamalarını aştığını ifade etmişlerdir [12].

Lahti ve ekibi, çeşitli web tabanlı teknolojileri otomasyon ve SCADA sistemleri açısından incelemiş ve analiz etmişlerdir. Çalışmalarında, santral otomasyonu ve SCADA sistemlerinde web kullanıcı arayüzü teknolojisinin uygunluğunu değerlendirmişlerdir. Ayrıca, enerji santrali sistem satıcıları için teknik çözümlerin temeli olarak kullanılan çeşitli web tabanlı kontrol ekranlarının son teknoloji kontrol uygulamalarına da odaklanmışlardır [13].

Chauhan ve arkadaşları [14], enerji üretimi ve dağıtımı, petrol, gaz, su ve atık yönetimi gibi çeşitli sektörlerdeki kritik altyapıların kontrol ve izlenmesi için kullanılan SCADA sistemlerini incelemişlerdir. Araştırmalarında, SCADA sistemlerinin denetleyici kontrol ve veri toplama fonksiyonlarına odaklanmışlar ve dış dünyaya bireysel mesaj veya komut gönderme yeteneği olan sistemleri değerlendirmişlerdir.

İbrahim, Irak-Kerkük'te ulaştırma sektöründe kullanılan şehir içi ve şehirlerarası yolların aydınlatma sistemini izlemek ve kontrol etmek için bir SCADA yazılımı geliştirmiştir. Çalışmasında, otomasyon ve SCADA sistemini yazılım, donanım, iletişim protokolleri ve bağlantı türleri açısından analiz etmiştir. Analizlerinin sonucunda geliştirdiği SCADA yazılımı ile aydınlatma sistemlerindeki tüm olayları izlemeyi ve kontrol etmeyi mümkün kılmıştır. Ayrıca bu yazılım ile günlük veri takibi, güvenlik ve alarm yönetimi, veri arşivi oluşturma ve raporlama gibi işlevler de sağlanmıştır. Araştırmacı, yazılımının şehir içi ve şehirlerarası yolların aydınlatma sistemlerini kontrol etmede kusursuz, senkronize ve verimli çalıştığını, aydınlatma direklerinden gelen bilgileri kullanıcılarla etkin bir şekilde paylaştığını ve aydınlatma sisteminin işletme maliyetlerini azalttığını belirtmiştir [15].

EKS/SCADA sistemleri yaygın olarak kullanılmasına rağmen sistemlerin çoğunun eski veya güncellenmemiş işletim sistemleri ve yazılım sürümleri barındırması nedeniyle güvenlik zafiyetleri bulunmaktadır. Bu durum, saldırganların güvenlik açıklarını kullanarak sisteme sızma ve kontrolü ele geçirme olasılığını artırmaktadır. SCADA sistemlerinde karşılaşılan bir başka güvenlik açığı ise standart parola güvenliği uygulamalarıdır. SCADA sistemlerinde kullanıcıların zayıf ve varsayılan parolalar kullanması yetkisiz erişime zemin hazırlamaktadır. Ek olarak, SCADA sistemleri

internete bağlı cihazlarla iletişim kurabildiğinden ve günümüzde sistemlere uzaktan erişim gibi yöntemler kullanılabildiğinden siber saldırganlar için potansiyel bir hedef hâline gelmektedir.

EKS/SCADA sistemleri günümüzde bilişim, iletişim ve internet teknolojilerinin artan kullanımıyla birlikte bilişim teknolojileriyle entegre bir şekilde çalışmaya yönelik bir eğilim göstermektedir. Bu eğilim doğrultusunda, EKS veya SCADA sistemlerinin ana bileşenleri arasında veri transferini gerçekleştirmek için özel olarak tasarlanmış haberleşme protokolleri kullanılmaktadır [16]. Amerikan Gaz Birliği'nin AGA-12 standardına göre, yaklaşık 150-200 SCADA protokolü bulunmaktadır. Modbus TCP/IP, DNP3, Ethernet/IP, Profibus ve Fieldbus en popüler ve yaygın kullanılan haberleşme protokollerindendir [17]. SCADA sistemlerinde saha cihazları ile MDB arasındaki veri iletişimini sağlayan haberleşme protokolleri, bilgi ve iletişim teknolojilerindeki güvenlik açıklarına karşı savunmasız hâle gelebilmektedir.

Haberleşme protokollerinin siber güvenlik analizleri yapıldığında, çeşitli güvenlik zafiyetlerinin olduğu bilinmektedir. Bu protokollerin güvenlik zafiyetlerinden faydalanılarak siber saldırı gerçekleştirilmesi muhtemeldir. Protokollerdeki güvenlik zafiyetlerinin sömürülmesiyle gerçekleştirilebilecek siber saldırılar amacına ve şiddetine bağlı olarak verilerin çalınması, SCADA sistemlerinin ele geçirilmesi ve devre dışı bırakılması gibi çeşitli olumsuz sonuçlara neden olabilmektedir. Örneğin, yetkilendirme ve kimlik doğrulama mekanizmalarında eksiklik bulunan protokoller çeşitli saldırılara karşı savunmasız kalmaktadır. Bu protokollerin özellikleri baz alınarak tekrarlama saldırısı, yığın tabanlı arabellek taşması, yetkisiz komut yürütme ve Dağıtılmış Hizmet Reddi (DDoS – Distributed Denial of Service) saldırısı gibi saldırılar yapılabilmektedir [18]. Bazı SCADA protokolleri, güvenlik zafiyetleri nedeniyle siber saldırılara karşı savunmasızdır. Bu tür saldırılar, endüstriyel sistemlerin verimliliğini, güvenilirliğini ve güvenliğini riske atabilmektedir.

4. SCADA Sistemlerine Yönelik Siber Saldırıları

Kritik altyapılarda kullanılan SCADA ve DCS sistemlerine yönelik gerçekleştirilen saldırılar, siber terör eylemleri olarak nitelendirilebilir [3]. Bu eylemlerin hedefleri, politik, sosyokültürel ve ekonomik boyutlarda yoğunlaşmakta ve bu alanların kesişim noktasında, tüm alanları etkileyen saldırıların özellikle kritik altyapılara yöneleceği anlaşılmaktadır [19]. Bu tür saldırılar, ekonomik dengeleri alt üst etmenin yanı sıra toplumsal hizmetlerde kesintilere yol açabilir. Bu derlemenin ilgili bölümünde, kritik altyapılar açısından büyük önem taşıyan “Enerji” sektörüne vurgu yapılmaktadır. Kritik enerji altyapısı; elektrik santralleri, iletim hatları, dağıtım şebekeleri, petrol ve doğal gaz boru hatları, depolama tesisleri ve diğer ilgili tesisler gibi enerjinin üretimi, iletimi, dağıtımı, tedariki ve

depolanmasında kullanılan tüm sistemleri kapsamaktadır. Enerji sektörüne yönelik gerçekleştirilen siber saldırılar, elektrik, gaz ve ısı gibi temel hizmetlerin kesintiye uğramasına sebep olabilmektedir. Enerji kesintilerine yol açan siber saldırılar, ülkelerde toplumsal ve ekonomik istikrarı ciddi şekilde bozan kaotik bir ortam oluşturabilmektedir.

SCADA sistemleri bugüne kadar birçok siber saldırıya maruz kalmıştır. 2007, 2010 ve 2014 yıllarında farklı versiyonlarıyla ortaya çıkan BlackEnergy adlı kötü amaçlı yazılım, öncelikle DDoS saldırılarında kullanılmıştır. Son sürümünde ise, VPN (Virtual Private Network) kimliklerine erişerek şirket içi ağlarda hareket edebilir hale gelmiştir [20, 21].

2013 yılında Havex RAT adlı bir casus yazılımın birçok kritik altyapı sektöründeki endüstriyel kontrol sistemlerini hedef alan bir zararlı yazılım olarak kullanıldığı keşfedilmiştir [20, 22, 23]. Saldırganlar, kötü niyetli yazılımı SCADA sistemlerine yönelik yazılım dağıtımını yapan platformlara sızdırdılar. Bu yazılım, web sitesi üzerinden indirildikten ve kurulduktan sonra sisteme bulaşmakta ve yayıldığı kontrol ağına dâhil olan cihazlarda endüstriyel protokolleri ve portları taramaktadır.

2016 yılında Ukrayna’da gerçekleşen kötü amaçlı yazılım enjeksiyonu saldırısında zararlı yazılım, iletim trafo merkezi kontrol sistemlerine izinsiz girmiştir. Saldırı sonucunda gecenin o saatinde güç kullanımında beşte bir azalma olmuştur [24].

2016 yılı Temmuz ayında Türkiye’de enerji sektörüne yönelik gerçekleşen bir diğer önemli siber saldırı, Anonymous adlı hacker grubu tarafından İzmir Gaz firmasına karşı düzenlenmiştir. Doğal gaz dağıtım ve tedariki sağlayan firmanın internet sitesi saldırı sonrası erişime kapatılmış; kullanıcı şifreleri, faturalama bilgileri, bakım raporları ve bütçe verileri gibi kritik bilgiler ele geçirilmiştir [25].

Tablo 1, son dönemlerde dünya genelinde enerji sektörüne yönelik gerçekleştirilen çeşitli siber saldırı örneklerini sunmaktadır.

Tablo 1. Enerji sektöründe gerçekleşen önemli siber saldırılar

Ülke	Yıl	Siber Saldırı Adı	Siber Saldırı Türü	Hedef	Siber Saldırı Sonucu	Siber Saldırının Etkisi	Referans
Rusya	1982	Sibiry gaz boru hattı saldırısı	Kod manipülasyonu	Gaz boru hattı kontrol	Başarılı	3 kiloton TNT eşdeğeri patlama	Avcı [26]

				sistemi yazılımı		meydana gelmiştir.	
Litvanya	1992	Ignalia nükleer santrali siber saldırısı	Kötü amaçlı yazılım	Reaktör	Başarılı	Sistemin belirli işlevlerinde aksaklık yaşanmıştır.	Masood [27]
ABD	1999	Bellingham boru hattı felaketi	Kod manipülasyonu	SCADA sistemi	Başarılı	3 kişi öldü, birçok kişi yaralandı ve çevresel hasar meydana geldi.	Yohanandhan ve ark. [24]
ABD	2003	SQL Slammer	Kötü amaçlı yazılım enjeksiyonu	Otomasyon segmenti	Başarılı	Hizmetin kesintiye uğraması	Yadav ve ark. [28]
ABD	2007	Idaho ulusal laboratuvarı saldırısı	Yanlış veri enjeksiyonu	Dizel jeneratör	Başarılı	Dizel jeneratörün devre kesicisi manipüle edildi ve jeneratör patladı.	Yağcı ve ark. [20]
Türkiye	2008	Türkiye Petrol boru hattı saldırısı	Yanlış veri enjeksiyonu	Kontrol sistemi vanaları	Başarılı	Petrol boru hattının kontrol sistemi parametreleri manipüle edildi, petrol patlaması gerçekleşti ve 30.000 varil suda hecelendi.	Yohanandhan ve ark. [24]
İran	2010	Stuxnet	Kötü amaçlı yazılım enjeksiyonu	Santrifüjleri kontrol eden SCADA sistemi	Başarılı	Stuxnet solucanı SCADA sistemlerine sızarak santrifüjlerin normal işleyişini bozdu ve İran'da bir uranyum zenginleştirme tesisi de dâhil olmak üzere en az 14 sanayi bölgesi enfekte oldu.	Thapliyal ve ark. [29]
Katar ve Suudi Arabistan	2012	Aramco ve RasGas saldırısı	Kötü amaçlı yazılım enjeksiyonu	SCADA sistemi	Başarılı	Enerji üretimi ve dağıtım etkilenmiştir.	Yohanandhan ve ark. [24]
Ukrayna	2015	Ukrayna Elektrik Sistemi Kesintisi	Yanlış veri enjeksiyonu	3 dağıtım şirketinde kesici ayarlarına saldırı	Başarılı	30 trafo merkezi devre dışı bırakılmış ve 230.000'den fazla kişi altı saat süreyle elektriksiz kalmıştır.	Sevim [30]
Suudi Arabistan	2017	Triton	Kötü amaçlı yazılım enjeksiyonu	Endüstriyel kontrol sistemleri	Başarılı	Kontrolörlere kötü amaçlı yazılım yüklendi ve operatörlerin erişimi engellendi.	Yağmur [31]
Dünya Geneli	2017	Dragonfly 2.0	Ağa sızma	SCADA sistemleri	Tam olarak ne kadar başarılı olduğu bilinmiyor	Endüstriyel tesislerin üretim süreçlerini etkilemeye çalıştılar.	Yağmur [31]

ABD	2019	DDoS	Hizmet reddi	İletişim ağı	Kısmen başarılı	Kısa bir süre için elektrik sisteminin işleyişi kesintiye uğradı ancak bu bir elektrik kesintisine neden olmadı.	Yohanandhan ve ark. [24]
Hindistan	2019	Kudankulam nükleer santrali siber saldırısı	Ortadaki adam saldırısı	Santraldeki sistemler	Kısmen başarılı	Etkilenen sistemler hayati iç ağdan ayrıldı ve sistemin geri kalan işlevselliği etkilenmedi.	Yohanandhan ve ark. [24]
Rusya	2020	Bad Rabbit	Fidye yazılımı saldırısı	SCADA sistemi	Başarısız	Sisteme bulaştığında kullanıcıların dosyalarına erişimini şifreleyerek engelliyordu ancak saldırı başarıyla sonuçlanmadı. Eğer saldırı başarılı olsaydı, şirketin enerji üretim ve dağıtımını felç ederek büyük bir enerji krizine yol açabilirdi.	Yağmur [31]
ABD	2021	Colonial boru hattı saldırısı	Fidye yazılımı saldırısı	Petrol boru hattı işletim ağı	Başarılı	Şirketin sunucuları kilitlendi, ülkenin doğu yakasında benzin tedariki kesintiye uğradı. Fidye olarak 4,4 milyon dolar değerinde bitcoin ödendi.	Alomari ve ark. [32]
Ukrayna	2022	Industroyer2 saldırısı	Zararlı yazılım	Elektrik iletim ve dağıtım altyapısı	Kısmen başarılı	Planlı infaz önlenmiş olsa da, operasyonel sistemler hedef alınmış ve ülke genelinde enerji kesintisi riski oluşturmuştur.	Kozak ve ark. [33]
Danimarka	2023	Danimarka enerji altyapısı saldırısı	Güvenlik açığından yararlanma (Zyxel güvenlik duvarı zafiyeti)	22 enerji kuruluşu	Kısmen başarılı	Bilgisayar korsanları, sistemler üzerinde tam kontrol sahibi oldu. Saldırı, enerji arzını kesintiye uğratmasa da, yamalanmamış sistemlerin oluşturduğu riskleri ve kritik altyapıya önemli zarar verme	Diaba ve ark. [34]

						potansiyelini vurguladı.	
Avustralya ve Birleşik Krallık	2023	Energy One siber saldırısı	Kurumsal ağ ihlali	Energy One şirketinin Avustralya ve Birleşik Krallık' taki kurumsal sistemleri	Kısmen başarılı	Sistemlere sızma gerçekleşti. Şirket, saldırının etkisini sınırlamak için bazı sistem bağlantılarını devre dışı bıraktı ve ilgili otoriteleri bilgilendirdi. Veri sızıntısı olup olmadığı ve etkilenen unsurlar kamuoyuna açıklanmamıştır.	Diaba ve ark. [34]
ABD	2024	Halliburton saldırısı	Yetkisiz uzaktan erişim	Petrol ve doğalgaz sektörü	Başarılı	Halliburton firması operasyonel sistemlerinde yetkisiz erişim tespit etti. Bu nedenle, bazı sistemlerini devre dışı bıraktı. Finansal ve operasyonel zarar oluştu.	Kerner [35]

Tablo 1'den de anlaşılacağı üzere kritik altyapı sistemlerinde yaşanan bu tür kesintilerin etkilerinin ne kadar ciddi olduğu anlaşılmıştır. Su, elektrik, doğalgaz gibi temel hizmetlere erişimi sağlayan SCADA sistemlerinin güvenliği, milyonlarca insanın günlük yaşamını sürdürebilmesi için hayati öneme sahiptir [2]. Bu nedenlerden dolayı kritik altyapıların siber güvenliğinin sağlanması ile ilgili çalışmaların yapılması, kritik altyapıların potansiyel tehditlere karşı istikrarını ve bütünlüğünü korumak açısından elzemdir.

5. Siber Saldırı Tespitinde Yapay Zekâ Uygulamaları

SCADA sistemlerinin kritik altyapılar için oldukça maliyetli olması nedeniyle bu sistemlere yönelik siber saldırıların sebep olabileceği kesintilerin önlenmesi, hem kuruluşun hem de hizmetten yararlanan toplumun güvenliği açısından SCADA sistemlerine yönelik güvenlik tedbirlerinin alınmasını zorunlu kılmaktadır. Aslında bir bakıma, kritik altyapıların güvenliğinin sağlanması SCADA sistemlerini korumaktan geçmektedir [2].

SCADA sistemleri için gerekli önlemler alınmalı ve sistemlerin güvenliği için siber saldırı tespit sistemleri geliştirilmelidir. Siber saldırıların sıklığı ve bu saldırılardan ekonomik olarak zarar görenlerin sayısına dair net verilere ulaşmak saldırıların gizlenmesi ve suçluların yakalanmaması gibi faktörler nedeniyle zordur [36].

Literatürde siber saldırı tespiti ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Angin, çalışmada askeri otonom ağ sistemlerini siber saldırılara karşı korumaya odaklanmıştır.

Angin blokzincir tabanlı bir iletişim mimarisi kullanarak veri bütünlüğü ihlalleri, kimlik doğrulama sahtekârlığı, gizli mesaj saldırıları ve ortadaki adam saldırıları gibi yaygın saldırı türlerini tespit etmeyi ve engellemeyi amaçlamıştır. Araştırmacı, bu çalışmanın veri bütünlüğü ihlalleri ve kimlik doğrulama sahtekârlığına karşı koruma sağladığını belirtmiştir [37].

Süzen ve arkadaşları [37], Endüstri 4.0'ın temel taşlarından biri olan nesnelerin kablosuz iletişimde ağa sızma, kırma ve taklit etme yeteneklerinin veri güvenliğini nasıl etkilediğini ve bu saldırılara karşı güvenlik için hangi yöntemlerin gerektiğini değerlendirmişlerdir. Çalışmada, kablosuz ağlara ve bu ağlardaki cihazlara yönelik üç farklı saldırı senaryosu ele alınmıştır. WPA, WEB, WPA2 gibi güvenlik önlemlerinin tek başına yeterli olmadığı ve güvenlik politikaları, gizlilik, yetkilendirme ve şifreleme sistemleri gibi unsurlarla güçlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Çelik ve ark. [38], 1989 ile 2017 yılları arasında GPCoder, CryptoLocker, Winlock, Reveton, Locky, Cryptowall, Keranger, WannaCry ve Petya gibi siber saldırıları inceleyen kapsamlı bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Bu saldırılara karşı çözüm yöntemi olarak antispam/malware, eğitim, ağ yapısı ve yönetilmesi, yeni nesil güvenlik sistemleri, yedekleme ve veri kurtarma, operasyonel temizleme gibi bir dizi yöntem önermişlerdir.

Miciolino ve ark. [39], küçük bir şehrin su sistemini simüle eden bir siber-fiziksel test ortamında çeşitli siber saldırılar gerçekleştirerek SCADA iletişim ağının bütünlüğünü ve doğruluğunu değerlendirmişlerdir. Deneyisel bulgular, endüstriyel kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan

Modbus protokolünün güvenlik açıklarını ortaya koymuştur. Araştırmacılar, bir saldırganın sistem hakkında yeterli bilgiye sahip olması durumunda, aktüatör komutlarını veya sensör okumalarını değiştirerek kötü niyetli amaçlarına ulaşabileceği sonucuna varmışlardır.

Bu ve buna benzer çalışmalar, siber saldırıların tespitinde kullanılmış olsa da, günümüzde saldırıların giderek karmaşık hale gelmesi tespit sürecini zorlaştırmıştır. Bu nedenle, güvenliği sağlamak için yazılım geliştirme öncelikli olmalı ve güçlü yasal düzenlemelerle desteklenmelidir.

Günümüzde, geleneksel saldırı tespit yöntemlerinin yerine büyük veri setlerini analiz ederek anormallikleri tanımlayabilen yapay zekâ tekniklerine yönelik eğilim artmıştır. Yapay zekânın kesin bir şekilde tanımlanması güçtür [40]. Yapay zekâ, bilgisayarlar veya dijital sistemler tarafından insan benzeri davranışları taklit eden ve belirli görevleri başarabilen bir yetenek olarak tanımlanabilir [41]. Yapay zekâ sistemlerinin bu yetenekleri kazanmasında, temelinde yatan yaklaşımlar büyük rol oynamaktadır. Bu yaklaşımların temelini yapay zekânın alt dallarından olan makine öğrenmesi ve derin öğrenme kavramları oluşturmaktadır. Bu iki kavram tamamen birbirinden bağımsız değildir ve derin öğrenme, nispeten daha yeni bir yaklaşım olarak makine öğrenmesinin bir alt kümesini temsil etmektedir [42]. Çoğu siber saldırı anlık olarak gerçekleştiği için en kısa sürede tespit edilmesi gerekmektedir. Yapay zekâ algoritmaları, büyük veri kümelerini gerçek zamanlı olarak analiz edebilir ve hızlı bir şekilde cevap verebilir.

Bununla birlikte, yapay zekâ sistemleri insan hatalarını en aza indirirken farklı türdeki siber saldırıları tanımlama ve savunma stratejileri geliştirme konusunda esneklik sağlamaktadır. Bu nedenle, yapay zekâ sistemleri siber güvenlik için kritik bir rol oynamakta olup siber saldırıları tespit etme ve engelleme konusunda temel bir araç haline gelmiştir.

Tablo 2. Siber saldırı tespitinde geleneksel yöntemler ve yapay zekâ yöntemlerinin karşılaştırılması [41,43]

Kriter	Geleneksel Yöntemler	Yapay Zekâ Yöntemleri
Tehdit tespiti	Sadece bilinen tehditleri tanır.	Bilinen ve yeni tehditleri tanıyabilir.
Uyarı ve analiz	Veriyi analiz etme ve ilişkilendirme yeteneği düşüktür.	Veriyi analiz eder, ilişkilendirir ve hızlı tepki verir.
Esneklik ve öğrenme	Dinamik tehditlere karşı esneklik gösteremez.	Öğrenerek tehditlere uyum sağlar.
Gerçek zamanlı tepki	Yalnızca tanımlı kalıpları eşzamanlı tespit eder, analiz yeteneği yoktur.	Bilinmeyen tehditleri anlık olarak tespit eder.
İnsan müdahalesi	Sürekli izleme ve manuel müdahale gerektirir.	Otomatik karar verir ve müdahale ihtiyacını azaltır.

Tablo 2, siber saldırı tespitinde kullanılan geleneksel ve yapay zekâ tabanlı yöntemleri karşılaştırarak yapay zekânın sunduğu teknik avantajları ve esneklik olanaklarını literatür ışığında özetlemektedir.

Yapay zekâ yöntemleri ile potansiyel tehditleri erken aşamada tespit edip tanımlamaya yönelik çalışmalar kritik altyapıların işleyişinde önemli bir rol oynayan SCADA sistemlerinin güvenliğini sağlamak için katkı sunabilir. Bu doğrultuda, SCADA sistemlerine yönelik çeşitli siber saldırıları önceden yüksek doğrulukla tespit edebilecek yapay zekâ tabanlı yöntemler geliştirmek büyük önem taşımaktadır.

Tablo 3'te, kritik altyapılar üzerindeki siber saldırıların yapay zekâ yöntemleriyle tespitine yönelik literatürde yer alan çalışmalar geniş bir yelpazede sunulmakta ve karşılaştırılmaktadır.

Tablo 3. Yapay zekâ yöntemleri ile siber saldırıların tespitine yönelik literatürdeki çalışmaların karşılaştırılması

Yıl	Veri Seti	Çalışmanın Amacı	Kullanılan Yöntem	Referans
2016	İçme suyu dağıtım tesisi gerçek veri seti	Siber saldırıları ve izinsiz girişleri tespit etme	Makine öğrenmesi tek sınıflı sınıflandırma	Nader ve ark. [44]
2016	Kendi oluşturdukları endüstriyel kontrol sistemleri sürece duyarlı algılama veri seti	Siber saldırıları gerçek zamanlı olarak tespit etmek	Destek vektör makinesi	Keliris ve ark. [45]
2017	Endüstri kontrol sistemi test yatağı	Anormal izinsiz giriş olaylarını tespit etme	Makine öğrenimi tabanlı bir şema	Lin ve ark. [46]
2017	Gaz boru hattı sistemi gerçek veri seti	Endüstriyel ağ paketi içeriklerinin analizini birleştiren anomalileri algılama	Bloom filtre paketi anomali algılayıcısı ve Uzun kısa süreli bellek ağ tabanlı zaman serisi düzeyi anomali algılayıcısı	Feng ve ark. [47]
2017	NSL-KDD veri seti	Endüstriyel kontrol ağlarındaki siber saldırıları tespit etme	Derin öğrenme, makine öğrenmesi	Potluri ve ark. [48]
2017	Güç sistemi saldırı veri seti	Optimizasyona dayalı olarak bir SCADA ağındaki izinsiz girişleri tespit etmek ve sınıflandırmak	İzinsiz giriş ağırlıklı parçacık tabanlı guguk kuşu arama optimizasyonu, hiyerarşik nöron mimarisi tabanlı sinir ağı	Shitharth ve Winston [49]
2017	Mississippi Eyalet Üniversitesi'nde geliştirilen bir endüstriyel kontrol sistemi veri seti	SCADA ağlarında anomali tabanlı saldırı tespiti	Makine öğrenmesi yaklaşımı kullanılarak hibrit model	Ullah ve Mahmud [50]
2018	Güvenli su arıtma test yatağı veri seti	Endüstriyel kontrol sistemlerine yönelik siber saldırıları tespit etme	Evrişimsel sinir ağları	Kravchik ve Shabtai [51]
2018	Elektrik yük tahmini veri seti	Akıllı şebekeler için siber saldırıları tespit etme	Derin öğrenme yığılmış otomatik kodlayıcı	Wang ve ark. [52]
2018	Su depolama tankı kontrol sistemi test yatağı veri seti	Su arıtma ve dağıtma süreci kontrol sistemi siber saldırıları tespit etme	Rastgele orman, karar ağacı, lojistik regresyon, Naive Bayes ve KNN algoritmaları	Teixeira ve ark. [53]
2018	Güvenli su arıtma veri seti	SCADA sistemleri tarafından kontrol edilen su şebekelerinde anomali tespiti	Lojistik regresyon, Gaussian Naive Bayes, destek vektör makinaları, KNN, karar ağacı, rastgele orman	Hindy ve ark. [54]
2018	Gaz boru hattı sisteminden toplanan gerçek veri seti	SCADA sistemlerinde izinsiz giriş tespiti	Destek vektör makinesi, rastgele orman	Perez ve ark. [55]
2019	IEC ve CyberGym SCADA laboratuvarı veri seti, Negev Ben-Gurion Üniversitesi gerçek SCADA veri seti	SCADA sisteminde tespit edilmesi zor olarak bilinen meşru işlevleri tespit etme	Zamansal örüntü tanıma dayalı gizli markov modeli ve yapay sinir ağlarına dayalı iki algoritma	Kalech [56]

2019	KDDCup'99 veri seti	SCADA sistemlerini DDoS saldırılarına karşı korumak için 3 farklı makine öğrenimi algoritması kullanarak bir çerçeve geliştirmek	J48, Naive Bayes ve rastgele orman algoritmaları	Alhaidari ve AL-Dahasi [57]
2020	Scriptler kullanarak kendi oluşturdukları iki adet veri seti	SCADA ağları için saldırı tespit sistemi	İleri beslemeli sinir ağı, uzun kısa süreli bellek	Gao ve ark.[58]
2020	Su depolama sisteminin ağ saldırıları veri seti	SCADA ağlarındaki saldırıların belirlenmesi ve sınıflandırılması	Kümeleme, STS tabanlı geliştirilmiş guguk kuşu arama optimizasyon, genetik makine öğrenmesi tabanlı sinir ağı	Benisha ve Ratna [59]
2020	Gerçek bir trafo merkezinden elde edilen veri seti	DNP3 protokolünü kullanan SCADA sistemleri için saldırı tespit ve önleme sistemi	Denetimli ve denetimsiz makine öğrenimi algılama modelleri	Grammatikis ve ark. [60]
2020	Gaz boru hattı kontrol sistemine ait veri seti	Modbus protokolüne yönelik SCADA sistemlerine yapılan siber saldırıların analizi	Veri madenciliği, karar ağacı	Söğüt ve Erdem [16]
2021	VirusTotal ve Windows işletim sistemlerinden kendilerinin elde ettikleri veri seti	SCADA kontrollü elektrikli araç şarj istasyonunda fidye yazılımı algılama	Derin sinir ağı, 1D evrişimli sinir ağı, uzun kısa süreli bellek	Basnet ve ark[61]
2022	Gerçek zamanlı bir SCADA test yatağı veri seti	Endüstriyel process kontrol sistemleri SCADA ağında saldırı tespiti	Destek vektör makinesi, KNN, rastgele orman, NB	Rajesh ve Satyanarayana [62]
2023	WADI (Water Distribution) – Singapur Teknoloji ve Tasarım Üniversitesi	Genetik algoritma ile zenginleştirilen Naive Bayes yaklaşımı ile siber saldırıların hassas ve etkili şekilde tespiti	Genetik algoritma, NB	Tanyıldız ve ark. [63]
2024	SWaT (Secure Water Treatment) – Singapur Teknoloji ve Tasarım Üniversitesi	Endüstriyel kontrol sistemlerinde siber saldırıların sınıflandırılması	Rastgele orman, KNN, destek vektör makinesi, LSTM	Jaradat ve ark. [64]
2024	BATADAL	Su dağıtım sistemlerinde siber saldırıların tespiti	Ekstra ağaç sınıflandırıcısı ve regresyon analizi	Rustam ve ark. [65]
2025	CSE – CIC – IDS2018	IoT ortamlarında siber saldırıların tespiti	Autoencoder (AE), Deep Belief Network (DBN), Dingo Optimizer (DO)	Yarram [66]

6. Sonuçlar

SCADA sistemlerinin, enerji sektörü başta olmak üzere çeşitli endüstriyel süreçlerde geniş bir uygulama alanına sahip olmaları, bu sistemleri siber güvenlik açısından önemli bir hale getirmektedir. Yapay zekâ yöntemleri siber tehditleri gerçek zamanlı olarak tespit etmede etkili çözümler sunmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar, saldırı tespit sistemlerinin geliştirilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu derlemede, kritik altyapılardaki SCADA sistemlerine yönelik siber saldırılar ve bu saldırıların tespiti için kullanılan yapay zekâ algoritmaları son yılların literatürü ışığında incelenmiş ve

karşılaştırılmıştır. Literatür taraması ve karşılaştırılmalı analiz sonucunda, siber saldırıların tespitinde makine öğrenmesi algoritmalarının diğer yöntemlere kıyasla daha yaygın bir şekilde kullanıldığı belirlenmiştir.

Literatürdeki çalışmalar, yapay zekâ yöntemlerinin kritik altyapıların siber güvenliğini sağlamak için çeşitli uygulama alanlarında kullanıldığını göstermektedir. Bu çalışmaların çoğu belirli veri kümelerine dayanmakta ve farklı yapay zekâ algoritmalarıyla gerçekleştirilmektedir. Gerçekleştirilen araştırmaların odak noktaları, yöntemleri ve uygulama yaklaşımları önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bazı çalışmalar daha çok algoritma temelli teknik çözümler

sunarken, bazıları uygulama bağlamına odaklanarak farklı sistemler için uyarlanabilir modeller geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu durum, yapay zekâ yöntemlerinin kritik altyapıların çeşitli bileşenlerine özgü şekillendiğini göstermektedir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, yapay zekânın siber güvenlik alanında önemli bir araç olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle, SCADA sistemleriyle uyumlu güvenlik çözümleri geliştirmeye odaklanan hibrit modellerin ve gelişmiş algoritmaların kullanımının artmasının kritik altyapıların siber güvenliğini güçlendirmede önemli bir rol oynayacağı anlaşılmaktadır. Bu gelişmelerin, toplumun temel hizmetlere kesintisiz erişimini sağlama açısından da kritik bir katkı sunacağı öngörülmektedir.

7. Kaynaklar

- [1] A. Wali and F. Alshehry, "A survey of security challenges in cloud-based SCADA systems," *Computers*, vol. 13, no. 4, p. 97, 2024.
- [2] Ş. Sağıroğlu, "Siber güvenlik ontolojisi-I," *Siber Güvenlik ve Savunma Kitap Serisi 6: Siber güvenlik ontolojisi, tehditler ve çözümler*, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 2021.
- [3] E. Söğüt, "SCADA sistemlerine yönelik siber saldırıların tespiti için yeni bir hibrit makine öğrenmesi yöntemi," *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2023.
- [4] R. Von Solms and J. Van Niekerk, "From information security to cyber security," *Computers & Security*, vol. 38, pp. 97-102, 2013.
- [5] J. Srinivas, A. K. Das, and N. Kumar, "Government regulations in cyber security: Framework, standards and recommendations," *Future generation computer systems*, vol. 92, pp. 178-188, 2019.
- [6] E. Irmak ve İ. Erkek, "Endüstriyel kontrol sistemleri ve SCADA uygulamalarının siber güvenliği: Modbus TCP protokolü örneği," *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 1-16, 2018.
- [7] L. A. Maglaras *et al.*, "Cyber security of critical infrastructures," *Ict Express*, vol. 4, no. 1, pp. 42-45, 2018.
- [8] E. J. Byres and P. Eng, "Cyber security and the pipeline control system," *Pipeline & Gas Journal*, vol. 236, no. 2, pp. 58-59, 2009.
- [9] E. Şeker, "Yapay zeka tekniklerinin/uygulamalarının siber savunmada kullanımı," *Uluslararası Bilgi Güvenliği Mühendisliği Dergisi*, vol. 6, no. 2, pp. 108-115, 2020.
- [10] M. Karaçor ve K. Keleş, "Otomasyon sistemlerinin bileşenleri," *VI. Otomasyon Sempozyumu*, Samsun, 2007.
- [11] S. Dransfeld, "Measurement and supervision in automated production," Thesis for the Degree of Doktor Ingenior, Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Science & Technology, Trondheim. 2007.
- [12] M. Endi and Y. Elhalwagy, "Three-layer PLC/SCADA system architecture in process automation and data monitoring," in *2010 the 2nd international conference on computer and automation engineering (ICCAE)*, 2010, vol. 2. pp. 774-779.
- [13] J. P. Lahti, A. Shamsuzzoha, and T. Kankaanpää, "Web-based technologies in power plant automation and SCADA systems: A review and evaluation," in *2011 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, IEEE, 2011, pp. 279-284.
- [14] R. K. Chauhan, M. Dewal, and K. Chauhan, "Intelligent SCADA system," *International Journal on power system optimization and Control*, vol. 2, no. 1, pp. 143-149, 2010.
- [15] M. H. İbrahim, "SCADA Sistemi: Şehir İçi ve Şehirlerarası Yolların Aydınlatma Sisteminin Kontrolü ve Otomasyonu," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 37, no. 3, pp. 653-662, 2022.
- [16] E. Söğüt ve O. A. Erdem, "Endüstriyel kontrol sistemlerine (SCADA) yönelik siber terör saldırı analizi," *Politeknik Dergisi*, vol. 23, no. 2, pp. 557-566, 2020.
- [17] V. M. Iğure, S. A. Laughter, and R. D. Williams, "Security issues in SCADA networks," *computers & security*, vol. 25, no. 7, pp. 498-506, 2006.
- [18] P. Kamal, A. Abuhussein, and S. Shiva, "Identifying and scoring vulnerability in SCADA environments," in *Future Technologies Conference (FTC)*, 2017, vol. 2017, pp. 845-857.
- [19] E. Kıran ve İ. Soğukpınar, "Kritik Altyapılarda Siber Risk Analizi ve Yönetimi," *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, vol. 14, no. 1, pp. 15-33, 2021.
- [20] M. Y. Yağcı, "SCADA sistemler için güvenli model oluşturulması," *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2020.
- [21] R. Khan, P. Maynard, K. McLaughlin, D. Laverty, and S. Sezer, "Threat analysis of blackenergy malware for synchrophasor based real-time control and monitoring in smart grid," in *4th International Symposium for ICS & SCADA Cyber Security Research 2016*, BCS, 2016, pp. 53-63.
- [22] S. Abe, Y. Tanaka, Y. Uchida, and S. Horata, "Tracking attack sources based on traceback honeypot for ICS network," in *2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, IEEE, 2017, pp. 717-723.
- [23] S. Abe, Y. Tanaka, Y. Uchida, and S. Horata, "Developing deception network system with traceback honeypot in ICS network," *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, vol. 11, no. 4, pp. 372-379, 2018.
- [24] R. V. Yohanandhan, R. M. Elavarasan, R. Pugazhendhi, M. Premkumar, L. Mihet-Popa, and V. Terzija, "A holistic review on Cyber-Physical Power System (CPPS) testbeds for secure and sustainable electric power grid-Part-I: Background on CPPS and necessity of CPPS testbeds," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 136, p. 107718, 2022.
- [25] S. Akçalı ve M. B. K. Önaçan, "Türkiye'de siber saldırı olayları ve siber savunma yeteneklerinin gelişimi," *The Journal of Academic Social Science Studies*, no. 78, pp. 351-369, 2024.

- [26] İ. Avcı, "Akıllı doğal gaz şebekelerinde siber güvenlik açıklarının araştırılması ve olgunluk modeli geliştirilmesi," Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2021.
- [27] R. Masood, "Assessment of cyber security challenges in nuclear power plants security incidents, threats, and initiatives," *Cybersecurity and Privacy Research Institute the George Washington University*, 2016.
- [28] G. Yadav and K. Paul, "Architecture and security of SCADA systems: A review," *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 34, p. 100433, 2021.
- [29] N. Thapliyal and S. Dhariwal, "Protecting A Nuclear Power Plant Against A Stuxnet Attack: Power Of Computer Security," in *2023 International Conference on Communication, Security and Artificial Intelligence (ICCSAI)*, 2023: IEEE, pp. 598-603.
- [30] C. Sevim, "Yeni Enerji Jeopolitiğine Genel Bakış," *İzmir Sosyal Bilimler Dergisi*, vol. 2, no. 2, pp. 57-63, 2020.
- [31] E. Yağmur, "SCADA sistemlerinde dağıtık hizmet disi bırakma saldırılarının derin öğrenme ve makine öğrenmesi yöntemleri ile tespiti," Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya, 2023.
- [32] M. A. Alomari *et al.*, "Security of Smart Grid: Cybersecurity Issues, Potential Cyberattacks, Major Incidents, and Future Directions," *Energies*, vol. 18, no. 1, p. 141, 2025.
- [33] P. Kozak, I. Klaban, and T. Šlajs, "Industroyer cyber-attacks on Ukraine's critical infrastructure," in *2023 International Conference on Military Technologies (ICMT)*, 2023: IEEE, pp. 1-6.
- [34] S. Y. Diaba, M. Shafie-khah, and M. Elmusrati, "Cyber-physical attack and the future energy systems: A review," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 2914-2932, 2024.
- [35] S. M. Kerner. "Halliburton cyberattack explained: What happened?" TechTarget. <https://www.techtarget.com/whatis/feature/Halliburton-cyberattack-explained-What-happened> (accessed 17 May, 2025).
- [36] C. Hatipoğlu ve T. Tunacan, "Türkiye'de Siber Saldırı ve Tespit Yöntemleri: Bir Literatür Taraması," *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 8, no. 1, pp. 430-445, 2021.
- [37] A. A. Süzen, M. A. Şimşek, K. Kayaalp, ve R. Gürfidan, "Endüstri 4.0'da Nesnelerin Kablosuz Etki Alanlarına Yapılan Saldırı Metodolojisi," *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 8, pp. 143-151, 2019.
- [38] S. Çelik ve B. Çelikaş, "Güncel Siber Güvenlik Tehditleri: Fidyeye Yazılımlar," *CyberPolitik Journal*, vol. 3, no. 5, pp. 105-132, 2018.
- [39] E. E. Miciolino, G. Bernieri, F. Pascucci, and R. Setola, "Communications network analysis in a SCADA system testbed under cyber-attacks," in *2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, 2015: IEEE, pp. 341-344.
- [40] X. Du-Harpur, F. Watt, N. Luscombe, and M. Lynch, "What is AI? Applications of artificial intelligence to dermatology," *British Journal of Dermatology*, vol. 183, no. 3, pp. 423-430, 2020.
- [41] M. M. Mijwil, E. Sadıkoğlu, E. Cengiz, ve H. Candan, "Siber güvenlikte yapay zekanın rolü ve önemi: bir derleme," *Veri Bilimi*, vol. 5, no. 2, pp. 97-105, 2022.
- [42] U. Altınmakas, "Üretken Yapay Zekâ Tarafından Üretilen Fikri Ürünlerde Yapay Zekânın Eser Sahipliği ve Telif Hakkı," *Anadolu Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, vol. 11, no. 1, pp. 457-480, 2025.
- [43] E. Şeker, "Yapay Zekâ Tekniklerinin/Uygulamalarının Siber Savunmada Kullanımı," *Uluslararası Bilgi Güvenliği Mühendisliği Dergisi*, vol. 6, no. 2, pp. 108-115, 2020.
- [44] P. Nader, P. Honeine, and P. Beausery, "Detection of cyberattacks in a water distribution system using machine learning techniques," in *2016 Sixth International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC)*, 2016: IEEE, pp. 25-30.
- [45] A. Keliris, H. Salehghaffari, B. Cairl, P. Krishnamurthy, M. Maniatakos, and F. Khorrami, "Machine learning-based defense against process-aware attacks on industrial control systems," in *2016 IEEE International Test Conference (ITC)*, 2016: IEEE, pp. 1-10.
- [46] C.-T. Lin, S.-L. Wu, and M.-L. Lee, "Cyber attack and defense on industry control systems," in *2017 IEEE Conference on Dependable and Secure Computing*, 2017: IEEE, pp. 524-526.
- [47] C. Feng, T. Li, and D. Chana, "Multi-level anomaly detection in industrial control systems via package signatures and LSTM networks," in *2017 47th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN)*, 2017: IEEE, pp. 261-272.
- [48] S. Potluri, N. F. Henry, and C. Diedrich, "Evaluation of hybrid deep learning techniques for ensuring security in networked control systems," in *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2017: IEEE, pp. 1-8.
- [49] S. Shitharth, "An enhanced optimization based algorithm for intrusion detection in SCADA network," *Computers & Security*, vol. 70, pp. 16-26, 2017.
- [50] I. Ullah and Q. H. Mahmoud, "A hybrid model for anomaly-based intrusion detection in SCADA networks," in *2017 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 2017: IEEE, pp. 2160-2167.
- [51] M. Kravchik and A. Shabtai, "Detecting cyber attacks in industrial control systems using convolutional neural networks," in *Proceedings of the 2018 workshop on cyber-physical systems security and privacy*, 2018, pp. 72-83.
- [52] H. Wang *et al.*, "Deep learning-based interval state estimation of AC smart grids against sparse cyber attacks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 11, pp. 4766-4778, 2018.
- [53] M. A. Teixeira, T. Salman, M. Zolanvari, R. Jain, N. Meskin, and M. Samaka, "SCADA system testbed for cybersecurity research using machine learning approach," *Future Internet*, vol. 10, no. 8, p. 76, 2018.

- [54] H. Hindy, D. Brosset, E. Bayne, A. Seeam, and X. Bellekens, "Improving SIEM for critical SCADA water infrastructures using machine learning," in *International Workshop on Security and Privacy Requirements Engineering*, 2018: Springer, pp. 3-19.
- [55] R. L. Perez, F. Adamsky, R. Soua, and T. Engel, "Machine learning for reliable network attack detection in SCADA systems," in *2018 17th IEEE international conference on trust, security and privacy in computing and communications/12th IEEE international conference on big data science and engineering (TrustCom/BigDataSE)*, 2018: IEEE, pp. 633-638.
- [56] M. Kalech, "Cyber-attack detection in SCADA systems using temporal pattern recognition techniques," *Computers & Security*, vol. 84, pp. 225-238, 2019.
- [57] F. A. Alhaidari and E. M. Al-Dahasi, "New approach to determine DDoS attack patterns on SCADA system using machine learning," in *2019 International conference on computer and information sciences (ICCCIS)*, 2019: IEEE, pp. 1-6.
- [58] J. Gao *et al.*, "Omni SCADA intrusion detection using deep learning algorithms," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 951-961, 2020.
- [59] D. S. R. R. R.B. Benisha, "Detection of Intrusion using Enhanced Machine Learning Model in SCADA Wireless Network," *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, Research vol. 13, no. 1, 1, pp. 85-98, 2020.
- [60] P. Radoglou-Grammatikis, P. Sarigiannidis, G. Efstathiopoulos, P.-A. Karypidis, and A. Sarigiannidis, "DIDEROT: An intrusion detection and prevention system for DNP3-based SCADA systems," in *Proceedings of the 15th International Conference on Availability, Reliability and Security*, 2020, pp. 1-8.
- [61] M. Basnet, S. Poudyal, M. H. Ali, and D. Dasgupta, "Ransomware detection using deep learning in the SCADA system of electric vehicle charging station," in *2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)*, 2021: IEEE, pp. 1-5.
- [62] L. Rajesh and P. Satyanarayana, "Evaluation of machine learning algorithms for detection of malicious traffic in scada network," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 17, no. 2, pp. 913-928, 2022.
- [63] H. Tanyıldız, C. B. Şahin, and Ö. B. Dinler, "Effective Cyber Attack Detection Based on Augmented Genetic Algorithm with Naive Bayes," *NATURENGS*, vol. 4, no. 2, pp. 30-35, 2023.
- [64] S. Jaradat, M. M. Komol, M. Elhenawy, and N. Dong, "Cyberattack detection on SWaT plant industrial control systems using machine learning," *Artif. Intell. Auto. Syst.*, 2024.
- [65] F. Rustam, M. Salauddin, U. Saeed, and A. D. Jurcut, "Dual-Approach Machine Learning for Robust Cyber-Attack Detection in Water Distribution System," in *Proceedings of the 14th International Conference on the Internet of Things*, 2024, pp. 248-254.
- [66] S. Yarram, "An Optimized Deep Learning Approach for Intrusion Detection: AE-DBN Hybrid Model with Dingo Feature Selection on CSE-CIC-IDS2018," in *2025 International Conference on Computing for Sustainability and Intelligent Future (COMP-SIF)*, 2025: IEEE, pp. 1-9.

Özgeçmişler



Mehmet Akif ÖZGÜL, Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 2015 yılında lisans derecesi ile mezun olmuştur. Ayrıca Anadolu Üniversitesi İşletme Bölümü'nü 2020 yılında bitirmiş ve 2025 yılında Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. 2017-2018 yılları arasında San-El Mühendislik'te saha mühendisi olarak altyapı ve enerji projelerinde görev almış, 2018'de Atlas Yapı Denetim'de kontrol mühendisi olarak çeşitli binaların elektrik projelerinin denetiminde çalışmıştır. 2018-2019 döneminde Torunlar GYO'da teknik müdür olarak enerji yönetimi, bakım-onarım süreçleri ve teknik ekiplerin koordinasyonundan sorumlu olmuştur.

2019 yılından itibaren Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ) Genel Müdürlüğü'nde görev yapmakta olup; bilgi güvenliği yönetim sistemleri, SCADA ve otomasyon güvenliği, OT güvenliği, siber güvenlik operasyonları, penetrasyon testleri ve iletişim altyapısı projelerinde yer almıştır. 2023 yılından bu yana Başmühendis - OT & Siber Güvenlik unvanıyla çalışmalarına devam etmektedir.

Araştırma ve uzmanlık alanları arasında endüstriyel kontrol sistemleri, SCADA ve OT güvenliği, bilgi güvenliği yönetim sistemleri, yapay zekâ tabanlı siber saldırı tespit yöntemleri ve kritik altyapıların korunması yer almaktadır. Bu konularda çeşitli projelerde görev almış ve ulusal/uluslararası yayınlar gerçekleştirmiştir.



Şevki DEMİRBAŞ, Lisans Eğitimini 1993 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliğinde tamamlamıştır. Yüksek Lisans ve Doktora eğitimlerini sırası ile 1996 ve 2001 yıllarında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi alanında tamamlamıştır. 1994 - 1998 yılları arasında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi'nde Araştırma Görevlisi, 1998 - 2002 tarihleri arasında Öğretim Görevlisi, 2002 - 2011 tarihleri arasında Yardımcı Doçent olarak görev yapmıştır. 2011'de Doçent ünvanı almış, 2011 - 2017 tarihleri arasında Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde doçent olarak görev yapmıştır. 2017 yılından itibaren aynı bölümde Profesör olarak görev yapmaktadır.

Single-Image HDR Reconstruction with Attention-Driven Autoencoder

Cevher RENK¹,



0009-0000-4023-3683

Serdar ÇİFTÇİ¹



0000-0001-7074-2876

¹Department of Computer Engineering, Harran University
Sanliurfa, Turkey

cevherrenk@harran.edu.tr, serdarciftci@harran.edu.tr

Abstract

High Dynamic Range (HDR) imaging captures fine details in both bright and dark regions, closely mimicking the sensitivity of human vision. Traditional HDR methods rely on multiple exposures but often face motion artifacts, hardware constraints, and high computational costs, limiting their real-world use. This study proposes an attention-augmented autoencoder (AE) with a U-Net-like structure for reconstructing HDR images from a single Low Dynamic Range (LDR) input. Five attention mechanisms Spatial, Channel, Bottleneck, Squeeze-and-Excitation (SE), and Self-Attention were individually integrated, forming distinct model variants. Experiments on the DrTMO dataset show that Spatial Attention achieves the best performance, improving SSIM from 0.9130 to 0.9310, PSNR from 21.50 dB to 22.30 dB, and reducing LPIPS from 0.1090 to 0.0928. These results highlight the effectiveness of attention mechanisms in enhancing both structural fidelity and perceptual quality for single-image HDR reconstruction.

Keywords: HDR Reconstruction, Autoencoder, Attention Mechanisms

1. Introduction

Visual scenes in the real world are characterized by broad luminance ranges, often containing both intense highlights and deep shadows within the same frame. Capturing this complexity requires imaging systems that exceed the limitations of standard sensors. High Dynamic Range (HDR) techniques have emerged as essential tools in modern vision applications, enabling enhanced detail retention across diverse lighting conditions. Low Dynamic Range (LDR) images often fail to preserve subtle contrast, while HDR imaging offers superior visual fidelity. This makes HDR crucial in areas like digital cinema, medicine, automotive vision, and surveillance [1–3]. Traditional HDR synthesis pipelines are based on fusing multiple exposures of the same scene. Although effective in static environments, these methods struggle with dynamic content, often suffering from motion-induced artifacts and hardware constraints [4–5]. Recent advances in deep learning have introduced multi-exposure HDR models that mitigate ghosting, but they still depend on multiple aligned inputs. As a more practical alternative, single-image HDR reconstruction has gained momentum by eliminating exposure alignment and sensor requirements while maintaining computational efficiency [6–

7]. One of the pioneering models in this domain utilizes a Convolutional Neural Network (CNN) to predict HDR scenes from a single low-exposure LDR image [7]. Encoder-decoder structures, especially autoencoders, have shown promise in extracting compact representations for HDR restoration [8]. Symmetric autoencoder (AE) architectures, such as U-Net, have become popular for minimizing detail loss by enriching feature flow through skip connections [9–10]. However, traditional AE models often fail to assign appropriate attention to semantically important regions in the scene, resulting in color distortion, contrast loss, and the omission of critical details. Recent works have enhanced AE-based models with attention layers, enabling more selective focus on semantically rich image regions. In this context, five distinct attention mechanisms spatial, channel, bottleneck, squeeze-and-excitation, and self-attention have been individually integrated into the proposed model, each forming a separate variant.

In this study, a U-Net like AE architecture is designed by extending a previously proposed baseline model [1]. Five attention mechanisms Spatial, Channel, Bottleneck, SE, and Self-Attention were added individually and evaluated separately. Experimental results on the DrTMO dataset demonstrate that the Spatial Attention variant outperforms the others across SSIM, PSNR, and LPIPS metrics. The main contributions of this work are summarized as follows:

- Five different attention mechanisms (Channel, Spatial, SE, Bottleneck, and Self-Attention) were independently integrated into a U-Net like autoencoder architecture. Each variant was tested separately to complete missing scene details and improve HDR reconstruction quality.
- The integration of spatial and channel attention mechanisms effectively preserved critical visual content in both bright and dark regions of the scene, directly enhancing color consistency, brightness balance, and structural coherence.
- Self-attention, bottleneck, and SE modules helped the model better capture long-range dependencies, compress representations, and enhance channel-wise information flow. These improvements led to higher contextual awareness and better learning capacity.

2. Related Works

HDR imaging is a key topic in image processing. It aims to generate visuals that match human perception by representing both bright and dark areas together. As a result, HDR synthesis

techniques especially with the rise of deep learning have gained substantial attention in tasks such as image generation, quality enhancement, and scene representation [1]. Traditional HDR synthesis methods are typically based on fusing multiple images captured at different exposure levels. While these approaches yield satisfactory results in static scenes, their applicability is limited due to sensitivity to motion, exposure synchronization issues, and hardware dependencies [2-3]. Single-image HDR methods have emerged as practical alternatives, with lower computational cost and no need for extra hardware [4-5]. One of the earliest deep learning-based methods in this domain aimed to reconstruct missing brightness and detail components from a single low-exposure LDR image. Using CNNs, this method enabled more accurate estimation of scene illumination [5]. Following this advancement, autoencoder (AE)-based architectures built on encoder-decoder designs have gained popularity as powerful tools for learning compact scene representations and recovering missing information. In AE-based models, symmetric structures and skip connections allow joint processing of high- and low-level features, improving reconstruction accuracy. In this context, U-Net is widely used in image processing. It can convert abstracted encoder features into detailed representations [6]. Moreover, segmentation-inspired architectures have been employed to capture semantic relationships within a scene, contributing to improved contextual consistency in HDR synthesis [7]. Recent studies have also introduced HDR synthesis approaches guided by scene-derived semantic information, showing significant improvements in terms of color fidelity, structural consistency, and visual realism [8]. These models enable multi-scale contextual representation learning, allowing for the generation of more detailed HDR scenes. Furthermore, AE-based architectures enhanced with attention mechanisms have shown notable improvements in preserving details in semantically dense regions [9]. Some recent approaches have proposed multi-task HDR systems that jointly handle inverse tone mapping and super-resolution. Such frameworks offer flexible and comprehensive solutions by simultaneously addressing various aspects of image quality [10]. Additionally, deep neural networks used for general image enhancement such as contrast stretching and low-light restoration have also provided a foundational basis for HDR reconstruction tasks [11].

In summary, many existing HDR generation models incorporate attention mechanisms such as spatial, channel, squeeze, bottleneck, and self-attention either in a limited capacity or in isolated configurations. In contrast, the proposed method systematically integrates each attention type into the architecture as a separate model variant, enabling a comparative evaluation of their individual contributions. The proposed framework offers deeper architecture and more complete comparisons than previous works.

3. Proposed Method

In this study, we propose a multi-module deep learning architecture enhanced with attention mechanisms for generating high-quality High Dynamic Range (HDR) scenes from a single Low Dynamic Range (LDR) image. The core framework is built upon a U-Net like autoencoder structure [1] and comprises three primary sub-networks: HDR Encoding Network ($\mathcal{N}_1$), Up-Exposure Network ($\mathcal{N}_2$), and Down-Exposure Network ($\mathcal{N}_3$). These sub-networks are designed to simulate virtual exposure diversity of a scene and reconstruct

accurate HDR representations [6]. To address the common limitations observed in the literature, such as contextual awareness deficiency and loss of detail, five different attention mechanisms have been integrated into the architecture: Spatial Attention, Channel Attention, Bottleneck Attention, Squeeze-and-Excitation (SE) Attention and Self-Attention. To analyze their individual contributions, five attention types were applied separately within the encoder and decoder blocks, resulting in modular model variants. The performance of each variant was systematically evaluated [9]. Additionally, the training of the proposed model was guided by four complementary loss functions aimed at preserving both structural and perceptual consistency: reconstruction loss, perceptual loss, total variation loss, and representation loss. This combination of losses improves pixel fidelity while enhancing visual realism and semantic consistency.

3.1. General Structure of the Model

The proposed architecture is designed around three dedicated modules to address information loss associated with exposure variability. Each sub-network targets the recovery of scene details corresponding to different exposure conditions, thereby contributing to the final HDR synthesis.

3.1.1. HDR Encoding Network ($\mathcal{N}_1$)

The HDR Encoding Network is an encoder-decoder architecture that transforms an input LDR image into an exposure-independent scene representation. Exposure-normalized feature representations are obtained by scaling encoded features relative to their corresponding exposure times (Δt), enabling consistent modeling across varying lighting conditions. The encoder compresses feature information via convolutional layers into latent representations, which the decoder then reconstructs into exposure-sensitive intermediate forms.

Given two differently exposed input images I_1 and I_2 , encoding is performed as follows:

$$\hat{X}_1 = \mathcal{N}_1(I_1) \quad (1)$$

$$\hat{X}_2 = \mathcal{N}_1(I_2) \quad (2)$$

These encoded features are normalized based on their exposure ratios to simulate exposure diversity:

$$Z_1 = \hat{X}_1 \left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \right) \quad (3)$$

$$Z_2 = \hat{X}_2 \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right) \quad (4)$$

Here, Δt_i represents the exposure time of the corresponding image. The encoder utilizes Conv + ReLU + BatchNorm layers, while the decoder uses upsampling + convolution + activation structures. Attention modules are integrated to enhance spatial awareness in the encoder and preserve contextual and structural integrity in the decoder.

3.1.2. Up-Exposure Network ($\mathcal{N}_2$)

The Up-Exposure Network aims to recover details lost in underexposed (dark) regions. It receives as input the exposure-normalized representation $\hat{X}_1$, derived from the HDR Encoding Network:

$$\hat{I}_2 = \mathcal{N}_2 = \mathcal{N}_2 \left(\hat{X}_1 \left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \right) \right) \quad (5)$$

This sub-network, based on an encoder-decoder design, enhances dark scene features in the encoder, while the decoder synthesizes brighter representations with improved clarity. Skip-connections similar to those in U-Net help preserve fine-grained detail.

3.1.3. Down-Exposure Network ($\mathcal{N}_3$)

The Down-Exposure Network addresses information saturation in overexposed regions. It takes as input the normalized high-exposure representation $\hat{X}_2$ from the HDR Encoding Network:

$$\hat{I}_1 = \mathcal{N}_3 = \mathcal{N}_3 \left(\hat{X}_2 \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right) \right) \quad (6)$$

The encoder re-encodes structural features from saturated regions, while the decoder restores balance by integrating these features into the HDR output. U-Net-inspired skip-connections are also employed here.

In summary, the architecture composed of these three modules reconstructs HDR scenes more accurately by utilizing multiple exposure levels generated from a single LDR image. The overall model structure is illustrated in Figure 1.

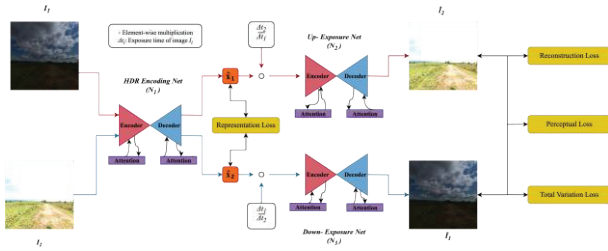


Figure 1. Overall architecture of the HDR Attention Network (HDR-AttNet).

Overview of the proposed HDR-AttNet architecture composed of three interconnected modules HDR Encoding, Up-Exposure, Down-Exposure. Attention modules are highlighted in purple.

3.2. Integration of Attention Mechanisms

In this study, five different attention mechanisms Spatial, Channel, Bottleneck, Squeeze-and-Excitation (SE), and Self-Attention were integrated into the architecture to enhance contextual awareness and reduce detail loss. These mechanisms were individually applied to the encoder and decoder layers, resulting in independent model variants [12]. The five attention mechanisms employed in this study were deliberately selected to represent a diverse set of attention strategies with proven success in various vision-related tasks. Instead of using one attention type, this study examines how each affects single-image HDR reconstruction. Spatial and Channel Attention were chosen due to their widespread effectiveness in enhancing local and global feature representations in convolutional networks. Bottleneck Attention was included to evaluate the role of compact feature modulation, especially relevant in encoder-decoder transitions. SE modules are well-regarded for their lightweight yet powerful channel-wise recalibration, while Self-Attention, inspired by Transformers, offers insights into global dependency modeling. By evaluating these varied mechanisms

within a unified architecture, this study seeks to provide a well-rounded understanding of the practical contributions of attention in HDR synthesis and identify which strategies yield the most significant improvements.

3.2.1. Spatial Attention

The spatial attention mechanism enhances the modeling of structurally prominent regions within the scene by emphasizing local details. It operates by concatenating average and maximum pooled feature maps along the channel axis and applying a convolutional operation. The mechanism is formulated as follows:

$$M_{spatial} = \sigma(f_{3 \times 3}([AvgPool(F); MaxPool(F)])) \quad (7)$$

Here $f_{3 \times 3}$ denotes a 3x3 convolution filter, $[]$ represents concatenation along the channel dimension, and σ is the sigmoid activation function. This design strengthens the representation of spatially salient areas within the scene [13-14].

3.2.2. Channel Attention

The channel attention mechanism models the relative importance of each feature channel to improve color fidelity and brightness accuracy. It utilizes global average pooling to extract channel descriptors and is defined as:

$$Z = \sigma(W_2 \cdot ReLU(W_1 \cdot s)) \quad (8)$$

In this expression, s is the channel-wise pooled descriptor, W_1 and W_2 are the weight matrices of fully connected layers, and σ represents the sigmoid activation function [15].

3.2.3. Bottleneck Attention

Bottleneck attention aims to suppress redundant information by reducing feature dimensionality and emphasizing critical representations. This mechanism is especially effective at encoder-decoder transitions and is expressed as:

$$M_{bottleneck} = \sigma(W_2 \cdot ReLU(W_1 \cdot M)) \quad (9)$$

It provides an efficient way to filter out noise and irrelevant features, ensuring a more focused information flow [16].

3.2.4. Squeeze-and-Excitation (SE) Attention

The SE module adaptively recalibrates channel-wise feature responses by learning the relative importance of each channel. It is mathematically defined as:

$$M_{SE} = M \odot \sigma(f_{dense}(M)) \quad (10)$$

Here, f_{dense} denotes the fully connected network responsible for the squeeze and excitation operations, and $\odot$ represents element-wise multiplication along the channel dimension. This mechanism contributes to improved color consistency and luminance balance [17-18].

3.2.5. Self-Attention

The self-attention mechanism captures long-range dependencies between distant pixels in a scene, thereby enabling global contextual awareness. Based on the Transformer architecture, it is defined by the following equation:

$$\begin{aligned} & \text{Attention}(Q, K, V) \\ &= \text{softmax}\left(\frac{Q \cdot K^T}{\sqrt{d_k}}\right) V \end{aligned} \quad (11)$$

Where:

-Q (Query): linear projection of the current spatial location in the feature map

-K (Key): encodes the semantic content of all positions in the feature map

-V (Value): provides the contextual feature vectors used for weighted aggregation

In the context of image data, these matrices are derived via 1×1 convolutions over the input feature map and enable global pixel-level interaction across the spatial domain. Here, Q , K , and V are the query, key, and value matrices, respectively, and d_k is a scaling factor. This approach allows the network to build a more holistic representation by considering the entire scene context [19].

3.3. Loss Functions

In this study, four different loss functions were jointly utilized during training to ensure structural consistency, perceptual accuracy, and smooth reconstructions. Each loss function targets a different aspect of HDR synthesis, contributing to both pixel-level fidelity and global perceptual realism.

3.3.1. Reconstruction Loss

The reconstruction loss evaluates the pixel-wise similarity between the predicted LDR image and the ground truth LDR image with the target exposure. To this end, the ℓ_1 (Mean Absolute Error) is employed:

$$\mathcal{L}_{rec} = \|\hat{I} - I\|_1 \quad (12)$$

Here, $\hat{I}$ denotes the pseudo LDR image generated by the model, while I represents the ground truth LDR image with the target exposure. The pseudo LDR image refers to the model's output that approximates an LDR exposure level, used for training supervision in lieu of ground-truth HDR data. This approach is widely used in HDR image reconstruction literature for its robustness and simplicity.

3.3.2. Perceptual Loss

Perceptual loss targets both pixel accuracy and visual distinctiveness of generated images. It utilizes feature maps extracted from pre-trained layers of the VGG-19 network to compute perceptual differences:

$$\mathcal{L}_{perc} = \sum_l \|\phi_l(\hat{I}) - \phi_l(I)\|_2^2 \quad (13)$$

Here, ϕ_l denotes the feature map extracted from the l^{th} layer of the VGG network. This loss encourages the generated images to maintain semantic and structural consistency.

3.3.3. Total Variation Loss

Total variation loss aims to reduce sharp transitions and undesired artifacts in the reconstructed image, resulting in smoother outputs. It is particularly effective in minimizing checkerboard patterns and artificial noise in HDR reconstructions:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{tv} = \sum_{i,j} & \left(|\hat{I}_{i+1,j} - \hat{I}_{i,j}|^2 \right. \\ & \left. + |- \hat{I}_{i,j}|^2 \right) \end{aligned} \quad (14)$$

This formulation minimizes brightness discontinuities between neighboring pixels in both horizontal and vertical directions.

3.3.4. Representation Loss

Representation loss is defined to ensure consistency between the latent features extracted by the HDR Encoding Network ($\mathcal{N}_1$) from two inputs captured at different exposure levels. It penalizes deviations between the encoded representations using the ℓ_2 norm:

$$\mathcal{L}_{rep} = \|\hat{X}_1 - \hat{X}_2\|_2^2 \quad (15)$$

where $\hat{X}_1 = \mathcal{N}_1(I_1)$ and $\hat{X}_2 = \mathcal{N}_1(I_2)$. This constraint ensures semantic coherence and structural alignment between feature representations from the HDR Encoding module.

4. Experimental Results

This section presents the experimental results of the proposed HDR-AttNet model, trained with different attention mechanism variants. The training configurations, quantitative metric comparisons, qualitative visual analyses, and ablation studies are thoroughly examined.

4.1. Training Configuration and Computational Environment

The HDR-AttNet model, designed for high dynamic range (HDR) scene reconstruction, was trained on the DrTMO dataset [1]. The dataset was synthesized from 1,043 collected HDR images with nine exposure values, resulting in 46,935 LDR images for training and 6,210 LDR images for testing, each with a resolution of 512×512 pixels. During training, random pairs of differently exposed images were sampled from the dataset. The training process was configured to run for a total of 200,000 steps, spanning approximately 6 epochs, with each epoch consisting of around 31,500 steps on average. The training durations for each model variant were measured under the same hardware configuration (NVIDIA Tesla V100-SXM2 GPU, 16 GB). The results showed notable differences in time efficiency among the attention mechanisms. The Self-Attention variant required the longest training time at approximately 28.5 hours, followed by Squeeze-and-Excitation 24.7 hours, Bottleneck Attention 21.3 hours, Spatial Attention 19.5 hours, and Channel Attention 18.2 hours. These outcomes reflect the computational complexity of each mechanism, with Self-Attention demanding more resources due to its global context modeling capabilities. The entire training pipeline was implemented using the PyTorch deep learning framework. The Adam optimizer was employed for model optimization, and four distinct loss functions were incorporated with specific

weights. The training configuration and selected hyperparameters are summarized in Table 1.

Table 1. Training Configuration and Hyperparameter Settings

Parameter	Value
Training Dataset	DrTMO
Total Training Steps	200,000
Total Epochs	6
Steps per Epoch	~31,500
Batch Size	8
Optimizer	Adam
Learning Rate	0.0001
Loss Weights	$\lambda_1=100.0, \lambda_2=1.0, \lambda_3=0.1, \lambda_4=0.00001$
Hardware	NVIDIA Tesla V100-SXM2 (16 GB)
Framework	PyTorch

Each sub-network in the proposed model (HDR Encoding Net, Up-Exposure Net, Down-Exposure Net) adopts a 7-level U-Net-like encoder-decoder architecture. At each level, two convolutional layers (3×3 kernels) are applied, followed by batch normalization and ReLU (or Leaky ReLU) activation. The input features are progressively increased from 16 to 256 channels (HDR Encoding Net) and from 32 to 512 channels (Up/Down-Exposure Nets). Sub-pixel convolution is used for upsampling, which is more efficient than traditional deconvolution. The total number of layers per sub-network is 28, excluding skip connections and normalization layers. Although the exact GFLOPs were not calculated, the architecture is designed to be lightweight and suitable for real-time inference.

4.2. Performance Evaluation and Metric Comparisons

To objectively evaluate the quality of the generated HDR scenes, several metrics were employed that assess both structural and perceptual fidelity. In this study, three primary metrics were used to analyze the accuracy of model outputs: PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio), SSIM (Structural Similarity Index), and LPIPS (Learned Perceptual Image Patch Similarity) [20-22]. Each metric focuses on evaluating different aspects of the HDR results generated from a single LDR input image. PSNR quantifies the pixel-level difference between the predicted and reference HDR images, offering a measure of structural fidelity [20]. This metric is particularly indicative of brightness accuracy and overall structural consistency. In contrast, SSIM evaluates visual coherence by simultaneously considering luminance, contrast, and structural components in a manner more aligned with human visual perception [21]. On the other hand, LPIPS is computed using deep feature representations learned by neural networks, providing a perceptual similarity assessment that better reflects human visual judgment. This metric plays a crucial role in evaluating visual realism and the preservation of scene details [22].

4.2.1. PSNR-Based Performance Evaluation

PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) is a widely used objective metric that measures the pixel-level fidelity between a reconstructed image and its reference counterpart. It is derived from the Mean Squared Error (MSE) and expressed in decibels (dB). A higher PSNR value indicates better image quality with

less distortion.

The PSNR score between a reference image I and a reconstructed image $\hat{I}$ is defined as:

$$PSNR(I, \hat{I}) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{(MAX_I)^2}{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I(i, j) - \hat{I}(i, j))^2} \right) \quad (16)$$

where:

- $I(i, j)$ is the pixel value at position (i, j) in the reference HDR image.
- $\hat{I}(i, j)$ is the corresponding pixel in the reconstructed image.
- m and n are the image dimensions (height and width).
- MAX_I is the maximum possible pixel value (e.g., 1.0 for normalized images or 255 for 8-bit images).

The denominator represents the Mean Squared Error (MSE) between I and $\hat{I}$. As PSNR increases, the reconstructed image is considered to have higher visual accuracy and lower pixel-wise distortion relative to reference. The average PSNR performance of each model variant enhanced with different attention mechanisms is illustrated in Figure 2. Higher PSNR values indicate that the reconstructed HDR images are structurally more similar to the reference scenes and contain less distortion. This reflects the model's effectiveness in brightness preservation and noise reduction.

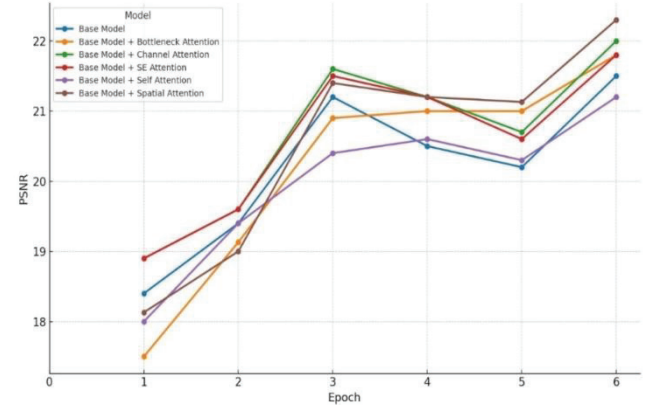


Figure 2. Comparison of average PSNR performance across model variants.

4.2.2. SSIM-Based Structural Consistency Analysis

SSIM (Structural Similarity Index Measure) is an advanced image quality metric that measures perceptual similarity by comparing the structural information between a reference and a reconstructed image. Unlike PSNR, which only considers pixel-wise differences, SSIM evaluates luminance, contrast, and structural components, providing a perceptually relevant assessment of visual fidelity.

The SSIM score between a reference image I and a reconstructed image $\hat{I}$ is defined as:

$$SSIM(I, \hat{I}) = \frac{(2\mu_I\mu_{\hat{I}} + C_1)(2\sigma_{II} + C_2)}{(\mu_I^2 + \mu_{\hat{I}}^2 + C_1)(\sigma_I^2 + \sigma_{\hat{I}}^2 + C_2)} \quad (17)$$

where:

- $\mu_I, \mu_{\hat{I}}$: mean intensities of the reference and reconstructed images.
- $\sigma_I^2, \sigma_{\hat{I}}^2$: variances of the respective images.
- σ_{II} : covariance between I and $\hat{I}$.
- C_1 and C_2 : constants to stabilize the division in case of weak denominators.

SSIM values range from 0 to 1, where a value closer to 1 indicates higher structural similarity and better perceptual alignment with the reference image.

The structural consistency of each model variant within the scene was evaluated using average SSIM scores, and the results are presented in Figure 3. The model configured with the spatial attention mechanism demonstrated a clear advantage in preserving local details and achieved the highest performance in this metric.

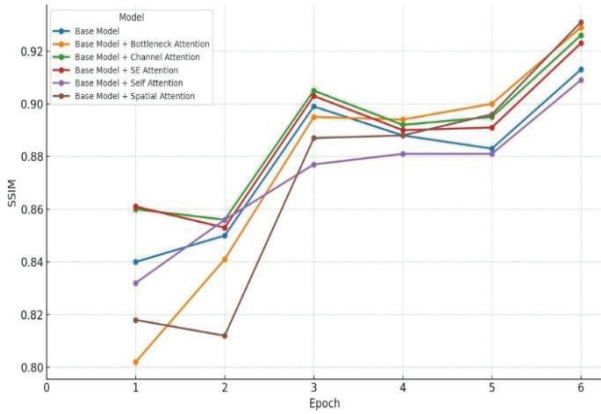


Figure 3. Comparative distribution of average SSIM scores across model variants.

4.2.3. LPIPS-Based Perceptual Similarity Evaluation

LPIPS (Learned Perceptual Image Patch Similarity) is a perceptual similarity metric that compares high-level feature representations extracted from pre-trained deep neural networks. Unlike PSNR and SSIM, which evaluate pixel-level differences, LPIPS operates in the feature space and reflects how similar images appear to the human visual system. It is considered more robust for evaluating perceptual quality in deep learning-based image generation tasks.

The LPIPS score between a reference image I and a reconstructed image $\hat{I}$ is defined as:

$$LPIPS(I, \hat{I}) = \sum_l \frac{1}{H_l W_l} \sum_{h=1}^{H_l} \sum_{w=1}^{W_l} \left\| w_l \odot (\phi_l(I)_{hw} - \phi_l(\hat{I})_{hw}) \right\|_2^2 \quad (18)$$

where:

- $\phi_l(\cdot)$: feature maps at layer l from a pre-trained network (e.g., VGG).
- H_l, W_l : spatial dimensions of the feature map at layer l .
- w_l : learned linear weights that calibrate channel

importance.

- $\odot$: element-wise multiplication.

A lower LPIPS score indicates that the reconstructed image is perceptually more similar to the reference, aligning more closely with human subjective evaluations.

The LPIPS results, which measure perceptual similarity, assess the alignment of model outputs with the human visual system. Lower LPIPS values indicate that the scenes are reconstructed in a more natural and visually pleasing manner. The corresponding comparisons are presented in Figure 4.

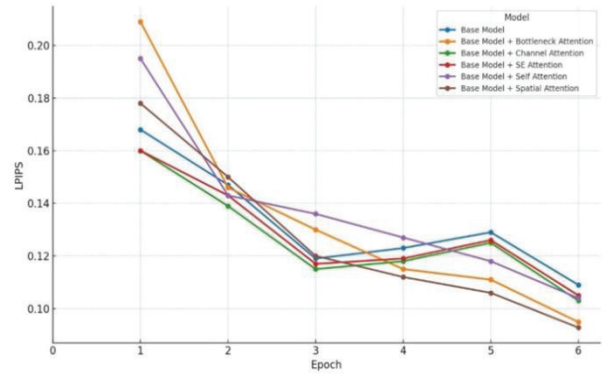


Figure 4. Comparative graph of average LPIPS scores across model variants.

The results show that integrating attention mechanisms significantly improves model performance across all metrics. Among them, the spatial attention module achieved the highest scores in PSNR, SSIM, and LPIPS. This indicates the model's ability to produce HDR scenes that are both structurally accurate and perceptually faithful. PSNR confirms high reconstruction quality, and its alignment with LPIPS shows that this also reflects improved visual realism. To evaluate the effectiveness of the proposed architecture, HDR-AttNet was compared both qualitatively and quantitatively with several state-of-the-art HDR reconstruction methods.

The comparative analysis indicates that HDR-AttNet consistently delivers superior performance in terms of visual fidelity and structural consistency. Unlike traditional approaches (e.g., HDRCNN, HDR-DANet, HDRUNet, etc.), the integration of attention mechanisms within HDR-AttNet enables more precise feature selection and improved contextual modeling, which leads to better preservation of fine textures and perceptual details. As a result, the model produces more balanced and clearer HDR reconstructions, particularly in challenging regions affected by overexposure or deep shadows. These findings highlight the strength of the proposed attention-driven design and confirm its advantages over baseline methods in high dynamic range image synthesis tasks.

4.3. Ablation Studies

In this section, the impact of the five different attention mechanisms integrated into the proposed HDR-AttNet architecture is comparatively analyzed. Each attention mechanism was individually embedded into the base model to create distinct model variants. These variants were evaluated

using three objective metrics: PSNR, SSIM, and LPIPS. The results of the comparative analysis are presented in Table 3.

Table 3. Comparison of model variants based on PSNR, SSIM, and LPIPS performance metrics

Model	PSNR ($\uparrow$)	SSIM ($\uparrow$)	LPIPS ($\downarrow$)
Base Model	21.50	0.9130	0.1090
Base Model + Spatial Attention	22.30	0.9310	0.0928
Base Model + Channel Attention	<u>22.00</u>	0.9260	0.1030
Base Model + Bottleneck Attention	21.80	<u>0.9290</u>	<u>0.0949</u>
Base Model + SE Attention	21.80	0.9230	0.1050
Base Model + Self-Attention	21.20	0.9090	0.1040

Quantitative results across datasets and methods for PSNR, SSIM, and LPIPS. The best scores are bolded, and the second best scores are underlined.

The results indicate that the spatial attention mechanism delivers the highest performance in terms of both structural similarity (SSIM) and perceptual quality (LPIPS). In particular, the low LPIPS score demonstrates that this module preserves visual consistency more effectively. PSNR values further support this observation, showing that the spatial attention variant achieves the closest reconstruction to the reference HDR scenes. Although other attention mechanisms contribute positively in specific aspects, the spatial attention module consistently provides superior results across all evaluation metrics.

4.4. Visual Comparison

In addition to the metric-based evaluation, the visual quality of HDR images produced by each model variant was also examined. Figure 5 presents the HDR outputs produced by different attention-based model variants alongside their corresponding LDR inputs. Visual enhancements can be clearly observed across various regions of the scenes. For instance, in the first row, the Spatial Attention variant (column c) preserves sharper foliage textures and improves shadow detail, offering more natural transitions compared to the baseline and other variants. In contrast, the Self-Attention model (column g) in the third row appears to underperform in reconstructing cloud structures, resulting in a flatter and less dynamic sky. In the fourth row, the Channel Attention variant (column d) maintains well-defined road edges and smooth luminance gradients, contributing to better color stability. Similarly, in the fifth row, the SE-integrated model (column f) achieves balanced illumination over wooden textures while avoiding overexposed highlights and preserving fine detail.

These visual findings align with the overall qualitative and quantitative performance trends observed in earlier sections, reinforcing the impact of attention mechanisms on perceptual quality. While channel attention demonstrates strong performance in color balance, the self-attention module delivers superior results in maintaining global scene consistency. The preservation of visual details is valuable not only from a numerical metrics perspective but also in terms of

human perceptual quality, underlining the model’s potential for practical deployment.

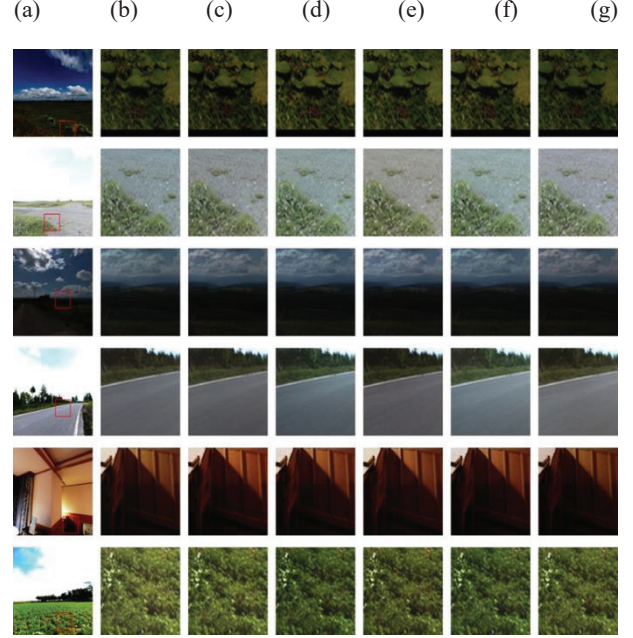


Figure 5. Comparative visualization of HDR outputs from different model variants, highlighting visual quality differences. Each column corresponds to: (a) Original LDR input, (b) Base Model, (c) Base + Spatial Attention, (d) Base + Channel Attention, (e) Base + Bottleneck Attention, (f) Base + SE Attention, and (g) Base + Self Attention. The first row displays the full-sized images with selected regions marked by red rectangles, while the second row presents the cropped regions corresponding to those selections.

5. Discussion

In this section, the performance of the HDR-AttNet architecture under five different attention configurations is comprehensively discussed based on both quantitative metrics and qualitative visual analysis. Each attention mechanism contributed to the overall model performance in distinct ways.

The Spatial Attention variant demonstrated the most consistent and superior performance across all evaluation metrics. It achieved the highest SSIM (0.9310), PSNR (22.30 dB), and the lowest LPIPS (0.0928), indicating its strong ability to preserve edges, textures, and fine details. Its localized focus helped reinforce salient regions without compromising overall scene structure.

The Channel Attention module exhibited strong performance in terms of color consistency and brightness calibration. Especially in scenes with high color saturation, it maintained perceptual clarity by re-weighting feature channels based on semantic importance.

The Squeeze-and-Excitation (SE) mechanism improved the model’s channel-wise feature recalibration, resulting in stable luminance mapping under diverse lighting conditions. It maintained above-average performance across all metrics.

The Bottleneck Attention variant contributed by reducing redundant feature dimensions, which improved computational efficiency and reduced noise. However, its gains in fine-

grained detail and visual sharpness were relatively limited compared to spatial or channel-based approaches.

Although the Self-Attention mechanism theoretically excels at modeling long-range dependencies, its performance in this context was comparatively weaker. This may be due to the relatively shallow depth of the encoder-decoder architecture, which limits the scope for capturing global relationships. The wide context focus of self-attention may weaken essential local structures needed for quality HDR reconstruction. As a result, it underperformed in SSIM (0.9090) and LPIPS (0.1040) metrics, highlighting the importance of local attention in tasks requiring fine spatial fidelity.

5.1. Limitations and Future Directions

While the HDR-AttNet architecture demonstrates high-quality HDR reconstruction through the integration of various attention mechanisms, there remain certain areas for potential enhancement. Since the model was trained exclusively on synthetic HDR data (DrTMO), its generalizability to real-world scenarios may be limited. Future work could benefit from incorporating datasets that include real HDR scenes for improved robustness. Additionally, training five separate attention-based variants independently has increased computational cost. This may require careful consideration in terms of scalability. However, this overhead can potentially be reduced by employing hybrid or lightweight attention modules. Lastly, increasing the depth of the encoder-decoder structure and integrating Transformer-based components may offer opportunities to enhance global context modeling in future architectural designs.

6. Conclusion

In this study, we introduced HDR-AttNet, a novel multi-branch encoder-decoder architecture tailored for single-image HDR reconstruction. The proposed model integrates three parallel subnetworks HDR Encoding Net, Up-Exposure Net, and Down-Exposure Net which collectively emulate the inverse exposure process to recover lost information due to overexposure or underexposure. In addition, five distinct attention mechanisms were independently incorporated to investigate their influence on visual fidelity and structural consistency. This modular integration allowed for a detailed comparative analysis and revealed that spatial attention, in particular, yielded the most visually coherent and perceptually faithful results. The outcomes of this work underscore the utility of attention mechanisms beyond classification or detection tasks, highlighting their relevance in complex image reconstruction pipelines. The attention-driven design adopted in HDR-AttNet contributes to enhanced detail preservation, improved scene balance, and more realistic HDR synthesis. Overall, the results validate our method and offer insights for designing future HDR systems that balance quality, efficiency, and modularity.

7. References

- [1] P.-H. Le, Q. Le, R. Nguyen, and B.-S. Hua, "Single-image HDR reconstruction by multi-exposure generation," in Proc. IEEE/CVF Winter Conf. Appl. Comput. Vis. (WACV), 2023, pp. 4063–4072.
- [2] Z. Liu, Y. Wang, B. Zeng, and S. Liu, "Ghost-free high dynamic range imaging with context-aware transformer," in Proc. Eur. Conf. Comput. Vis. (ECCV), Cham, Switzerland: Springer, Oct. 2022, pp. 344–360.
- [3] Y.-L. Liu, W.-S. Lai, Y.-S. Chen, Y.-L. Kao, M.-H. Yang, Y.-Y. Chuang, and J.-B. Huang, "Single-image HDR reconstruction by learning to reverse the camera pipeline," in Proc. IEEE/CVF Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR), 2020, pp. 1651–1660.
- [4] X. Chen, Y. Liu, Z. Zhang, Y. Qiao, and C. Dong, "HDRUNet: Single image HDR reconstruction with denoising and dequantization," in Proc. IEEE/CVF Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR), 2021, pp. 354–363.
- [5] K.-Y. Chen and J.-J. Leou, "Low light image enhancement using autoencoder-based deep neural networks," in Image Processing, Computer Vision, and Pattern Recognition and Information and Knowledge Engineering, Las Vegas, NV, USA: Springer, 2025, pp. 73–84. doi: 10.1007/978-3-031-85933-5_6.
- [6] A. Sharif, S. M. Naqvi, M. Biswas, and S. Kim, "A two-stage deep network for high dynamic range image reconstruction," in Proc. IEEE/CVF Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR), 2021, pp. 550–559.
- [7] S. Zheng, J. Lu, H. Zhao, X. Zhu, Z. Luo, Y. Wang, et al., "Rethinking semantic segmentation from a sequence-to-sequence perspective with transformers," in Proc. IEEE/CVF Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR), 2021, pp. 6881–6890.
- [8] Q. Yan, T. Hu, G. Chen, W. Dong, and Y. Zhang, "Boosting HDR image reconstruction via semantic knowledge transfer," arXiv preprint arXiv:2503.15361, 2025.
- [9] J. Ma and H. Zhang, "HDR-DANet: Single HDR image reconstruction via dual attention," *Multimedia Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 1–12, 2025.
- [10] S. Y. Kim, J. Oh, and M. Kim, "JSI-GAN: GAN-based joint super-resolution and inverse tone-mapping with pixel-wise task-specific filters for UHD HDR video," in Proc. AAAI Conf. Artif. Intell., vol. 34, no. 7, Apr. 2020, pp. 11287–11295.
- [11] Y. I. Park, J. W. Song, and S. J. Kang, "65 - 3: Invited paper: Deep learning - based image enhancement for HDR imaging," in *SID Symp. Dig. Tech. Papers*, vol. 53, no. 1, Jun. 2022, pp. 865–868.
- [12] A. de Santana Correia and E. L. Collobini, "Attention, please! A survey of neural attention models in deep learning," *Artif. Intell. Rev.*, vol. 55, no. 8, pp. 6037–6124, 2022.
- [13] J. Shen and T. Wu, "Learning spatially-adaptive squeeze-excitation networks for few-shot image synthesis," in Proc. IEEE Int. Conf. Image Process. (ICIP), Oct. 2023, pp. 2855–2859.
- [14] Z. Zhang, Z. Xu, X. Gu, and J. Xiong, "Cross-CBAM: A lightweight network for scene segmentation," arXiv preprint arXiv:2306.02306, 2023.

- [15] S. Mekruksavanich and A. Jitpattanakul, “Hybrid convolution neural network with channel attention mechanism for sensor-based human activity recognition,” *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 12067, 2023.
- [16] A. Srinivas, T.-Y. Lin, N. Parmar, J. Shlens, P. Abbeel, and A. Vaswani, “Bottleneck transformers for visual recognition,” in *Proc. IEEE/CVF Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, 2021, pp. 16519–16529.
- [17] H. Y. Lin, Y. R. Lin, W. C. Lin, and C. C. Chang, “Reconstructing high dynamic range image from a single low dynamic range image using histogram learning,” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 21, p. 9847, 2024.
- [18] H. Zhang, K. Zu, J. Lu, Y. Zou, and D. Meng, “EPSANet: An efficient pyramid squeeze attention block on convolutional neural network,” in *Proc. Asian Conf. Comput. Vis. (ACCV)*, 2022, pp. 1161–1177.
- [19] B. Zhang, S. Gu, B. Zhang, J. Bao, D. Chen, F. Wen, et al., “StyleSwin: Transformer-based GAN for high-resolution image generation,” in *Proc. IEEE/CVF Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, 2022, pp. 11304–11314.
- [20] Y. Al Najjar, “Comparative analysis of image quality assessment metrics: MSE, PSNR, SSIM and FSIM,” *Int. J. Sci. Res. (IJSR)*, vol. 13, no. 3, pp. 110–114, 2024.
- [21] M. Azimi, “PU21: A novel perceptually uniform encoding for adapting existing quality metrics for HDR,” in *Proc. Picture Coding Symp. (PCS)*, Jun. 2021, pp. 1–5.
- [22] A. Ghildyal and F. Liu, “Shift-tolerant perceptual similarity metric,” in *Proc. Eur. Conf. Comput. Vis. (ECCV)*, Cham, Switzerland: Springer, Oct. 2022, pp. 91–107.

Özgeçmişler



Cevher Renk received his B.Sc. degree in Computer Engineering from Harran University in 2020 and has been pursuing an M.Sc. degree in the same department since 2022. Before his academic career, he gained nearly four years of professional experience as a full-stack developer in the private sector, where he effectively used .NET Core and Spring Boot for back-end development, and React.js and Next.js for front-end development. His professional contributions included e-commerce platforms, CRM solutions, enterprise systems, and AI-based applications.

Since 2024, he has been working as a Research Assistant at Harran University, where he focuses on image processing, deep learning, and artificial intelligence-based methods for computer vision. His research interests include high dynamic range (HDR) image reconstruction and attention-enhanced autoencoder architectures. Throughout both his industry and academic career, he has demonstrated strong teamwork skills, a passion for learning, and a research-driven mindset.



Serdar Çiftçi received the B.Sc. degree in computer engineering from Selçuk University in 2007 and the M.Sc. and Ph.D. degrees in computer engineering from Middle East Technical University in 2011 and 2017, respectively. He is an Assistant Professor with the Department of Computer Engineering, Harran University, Türkiye. During his Ph.D., he was a Visiting Researcher at the École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland, in 2015, and later at the Rochester Institute of Technology (RIT), USA, in 2022. From 2018 to 2021, he was the Department Chair of the Department of Computer Engineering, Harran University. His research interests focus on computer vision and deep learning. He is a member of the Chamber of Computer Engineers of Turkey and served as the Vice President of its Executive Board from 2012 to 2014. His doctoral work was recognized with the Thesis of the Year Award by the Parlar Foundation in 2017.

Farklı Topolojiler Altında Robotik Kablosuz Sensör Ağlarında Sınırlı Kapasiteli Bataryalı bir İHA Aracılığıyla Verimlilik ve Enerji Farkında Veri Toplama

Efficiency and Energy-Aware Data Collection via a UAV with Limited Capacity Battery in Robotic Wireless Sensor Network under Various Topologies

Ömer Melih Gül^{1,2,*}, Aydan Müşerref Erkmen¹
ID 0000-0002-0673-7877 ID 0000-0002-5194-1121
¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ)
omgul@metu.edu.tr, aydan@metu.edu.tr

²Bilişim Enstitüsü
İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ)
omgul@itu.edu.tr

Özet

Enerji farkında veri toplama, robotik ve kablosuz sensör ağları için büyük önem taşır. Statik havuz destekli küme tabanlı protokoller enerji açısından verimli çözümler sunsa da, insansız hava aracı (İHA) destekli yaklaşımlar, statik havuzlara kıyasla veri toplama sırasında enerji tüketimini azaltmak için daha iyi alternatifler olarak düşünülebilir. Mevcut İHA odaklı çözümlerin çoğu, pratik bir şekilde dikkate alınması gereken İHA'nın pil kapasitesi üzerinde bir sınır dikkate almamıştır. Bu makale, robot ağı kümelerinde enerji farkında veri toplamayı incelemektedir. Her kümede, bir küme başı (KB) robotu, her küme üyesi (KÜ) robotuna bir işbirlikçi görev atar ve KÜ'lerden veri toplarken, bir İHA, pil sınırlaması nedeniyle KB robotlarının bir alt kümesini ziyaret ederek onlardan veri toplar. Son durumu tamamlamak için, İHA'nın KB alt kümesini ziyaret etme kararı, artık pil kapasitesi ve tüm KB robotlarının konumları ve veri kaliteleri dahil olmak üzere birden fazla faktörle sınırlıdır. Ziyaret edilmeyen KB robotları, veri iletimi için röle düğümleri olarak KB robotlarını kullanır. Bunu takiben, bu makale, veri atlama kısıtlamaları altındaki problemi ele alarak, farklı topolojilerde ve farklı sayıda KB robotu ile bir hassasiyet analizi de sunmaktadır. Simülasyonlar, önerilen politikanın sıfır toplam ortak maliyete ulaştığını, en son yaklaşımların ise önemli ölçüde yüksek toplam ortak maliyetlere yol açtığını göstermektedir. Dahası, önerilen politika, toplam ortak maliyeti geleneksel yaklaşımlara kıyasla %50'ye kadar azaltmaktadır.

Anahtar kelimeler: insansız hava aracı, yol planlama, kablosuz sensör ağı

Abstract

Energy-aware data collection is of paramount importance for robotic and wireless sensor networks. Although static sink-aided cluster-based protocols provide energy-efficient solutions, unmanned aerial vehicle (UAV)-aided approaches can be considered as better alternatives to reduce energy

consumption while data acquisition compared with static sinks. Most of the existing UAV-driven solutions have not considered a limit on the battery capacity of the UAV, which needs to be considered in a practical manner. This article investigates energy-aware data collection in robot network clusters. In each cluster, a cluster head (CH) robot allocates one collaborative task to each cluster member (CM) robot and collects data from CMs whereas a UAV collects data from CH robots by visiting a subset of them due to its battery limitation. To complement the state-of-the-art, UAV decision for visiting the subset of CHs is constrained to multiple factors including residual battery capacity, as well as locations and data qualities of all CH robots. Nonvisited CH robots use CH robots as relay nodes for data forwarding. Following upon this, by considering the problem under data hopping constraints, this article also presents a sensitivity analysis under different topologies with various number of CH robots. Simulations show that the proposed policy achieves zero total joint cost whereas the state-of-the-art approaches result in significantly high total joint costs. Furthermore, the proposed policy reduces the total joint cost by up to 50% with respect to the conventional approaches.

Keywords: unmanned aerial vehicle, path planning, wireless sensor networks

1. Giriş

Nesnelerin İnterneti (IoT) fikri, dijital ve fiziksel alanları birbirine bağlamak için büyük bir vaat taşımaktadır. Bir IoT çerçevesinde, kablosuz sensörler [1] genellikle etkili veri toplama ve taşımayı etkinleştirmek için her cihaza yerleştirilir [2]. Kablosuz sensör ağı (KSA), akıllı tarım, akıllı şehirler, don izleme, ortam havası izleme, sağlık izleme ve diğerleri dahil olmak üzere çeşitli alanlarda uygulamalara sahiptir [3], [4]. WSN ve robotlar, onlarca yıldır derinlemesine bağımsız araştırmaların odak noktası olmuştur. Robotik ve KSA'nın birleştiği noktada, robotik kablosuz sensör ağı (RKSA) [5] olarak bilinen, robotların ve KSA'nın kişisel dezavantajlarını telafi etmeye yardımcı olmak için çeşitli araştırma fırsatları vardır. Robotlar, KSA'lara sensör bakımı-onarımı ve pil şarjı

konusunda yardımcı olabilir [6]. Robotlar ayrıca veri taşıyıcı olarak da hareket edebilir, ancak bu, verilerin büyük mesafeler boyunca seyahat etmesine neden olabilir. Bu bekleme sürelerini kısaltmak için, [7]'deki çalışmada veri taşıyıcıları arasında bir kümeleme tekniği önerilmektedir. KSA, robotikte robot yerleştirme, planlama, haritalama ve yol algılamayı etkinleştirmek için kullanılabilir. Otonom sürüş, askeri kullanım, madencilik, sağlık hizmetleri, arama ve kurtarma, trafik izleme, hava durumu tahmini gibi sayısal uygulama alanları, KSA'lar ve robotların birleşimiyle olası hale gelir [5]. Genel enerji tüketimini düşürme girişiminde, araştırmacılar son zamanlarda mobil lavabolarla enerji farkında veri toplama sorununu incelediler [8]- [10]. Literatürdeki birçok çalışma, bu problemleri gezgin satıcı problemi (GSP) [11] açısından ele almaktadır; burada mobil lavabo, veri edinmek için sabit bir KB düğüm yüzdesini ziyaret etmek için yeterli enerjiye sahiptir. Bununla birlikte, pil kapasitesi KB robotlarının konumlarına göre değiştiği için belirli bir KB düğüm yüzdesini ziyaret edemez. Bir İHA'nın pil kalıntı kapasitesi kısıtlaması problemini ele alarak ve sezgisel bir çözüm sunarak, [12]'deki çalışma bu boşluğu kapatır; yine de, bu tür evrimsel algoritma tabanlı yöntemler yavaştır. Bu nedenle, bu sorunu ele almak için güvenilir ve etkili yollara ihtiyaç var. Pil kapasitesine sahip İHA'nın, her kümenin sensörler, KÜ robotları ve KB robotlarından oluştuğu kümelenmiş robot ağını ziyaret ettiği veri toplama sorununu araştırılmaktadır. KÜ robotlarının her birine bir KB robotu tarafından bir görev verilir. Tam şarjlı bir pille bile, bir İHA'nın sınırlı kalan enerjisi, her robotun konumuna bağlı olarak her KB robotunu ziyaret etmesini engelleyebilir. Bu koşullarda, her KB robotunu ziyaret etmek için gereken enerji, İHA'nın pil ömrünü aşmaktadır. Sorunumuz pille sınırlıdır, yani İHA, ünlü NP-hard GSP [11] mimarisinin aksine, her KB robotunu ziyaret etmek için gerçekten yeterli pil kapasitesine sahip olamaz. Ayrıca ziyaret edilmeyen KB robotlarının genel enerji tüketimini de dahil edilmektedir. Pil ömrü her KB robotunu ziyaret etmesini engellediği için, İHA, ziyaret edilmeyen bir KB robotundan diğerine veri aktarmak için veri atlama kullanır.

1.1. Motivasyon (Güdüleme)

Son yıllardaki gelişmelerle beraber birçok uygulama alanı bulunan robot ağlarındaki robotların batarya değişimi (çevresel zorluklara bağlı olarak) zor olduğundan enerji tüketiminde dikkatli olmak gerekir. Bu nedenle bu robot ağlarında küme başı robotları diğer robotların tamamladığı görevler sonucu oluşan veriyi yukarı değerlendirir ve son veriyi üst seviyedeki veri merkezine iletir. Bu veri merkezi, eski çalışmalarda durgun olarak düşünülürken robot ağlarındaki kümebaşlarının enerji tüketimini azaltmak için yeni çalışmalarda hareketli (mobil) olarak düşünülmektedir. Mobil bir veri toplama merkezi küme başı robotların tamamını ya da bir kısmını ziyaret ederek küme başı robotların daha yakın mesafeden veri merkezine veri iletilmesini ve böylece enerji tüketimlerini azaltmayı amaçlamaktadır. İlgili literatürde farklı çalışmalarda, robotik ve kablosuz sensör ağlarında İHA ile veri toplarken İHA'nın enerji verimliliğini en iyiye yakın sağlayabilen çözümler önerilmiştir ama bu algoritmalar metasezgisel algoritma tabanlı olması nedeniyle biraz yavaş çalışabilir. Bu makalenin amacı, robotik ve kablosuz sensör ağlarında çok önemli olan bir mobil veri merkezi (insansız hava aracı) aracılığıyla veri toplama problemini incelemektir ve ilgili literatüre göre daha hızlı bir çözüm elde edilmesini sağlamaktır. Bir İHA, KB robotlarının genel enerji tüketimini azaltmak için

bir grup KB robotunu ziyaret eder (ilgili literatürün aksine, tüm KB robotlarından veya yarısından farklı olabilir), İHA'nın hangi robotları ziyaret edeceğine karar verirken konumları ve pil ömrü dikkate alınır. Bu makalede, En Yakın Komşu Algoritmasına dayalı yeni yaklaşımımız Algoritma yalnızca benzer toplam enerji tüketimini elde etmekle kalmaz, aynı zamanda genetik algoritma tabanlı yaklaşımlardan yaklaşık otuz kat daha hızlı performans göstermektedir.

1.2. Ana Katkılar

Bu çalışma literatüre şu şekilde katkıda bulunmaktadır:

- Bu makale, her robotun veri toplama problemi içindeki konumunu ve İHA'nın kalan enerji kısıtlamasını ele almaktadır.
- Bu makalede, konumlara ve İHA'nın KB robotlarının bir alt kümesini ziyaret etme niyetine dayalı bir çözüm önerilmektedir. Bu çözüm yönteminin, ziyaret edilmeyen her KB robotu için en uygun veri gönderme protokollerini de içerdiği gösterilmiştir. Ayrıca, önerilen yaklaşımın, bir İHA'nın genel enerji tüketimini azaltmak için bir KB robot grubunu ziyaret ettiğinde ne kadar iyi çalıştığını tartışılmaktadır.
- Bu makale, veri atlama kısıtlamaları altındaki problemi ele alarak, farklı topolojilerde ve farklı sayıda KB robotu ile bir hassasiyet analizi de sunmaktadır.

1.3. Teşkil

Bu araştırma makalesinin raporu geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir. Bölüm 2, ilgili literatürü vermektedir. Bölüm 3 ele alınan problemi ve sistem modelini açıklamaktadır. Bölüm 4'te hem İHA'lar hem de KB robotları tarafından tüketilen enerjiyi dikkate alan düşük karmaşıklıkta yeni bir yöntem önerilmektedir. Bölüm 5'te verilen stratejileri sayısal performansları açısından değerlendirilmektedir. Bölüm 6, makalenin sonuçlarını ve gelecekteki çalışmalar için önerileri sunmaktadır.

2. İlgili Literatür

Statik bir havuzla enerjiye duyarlı veri toplama problemi ilk kez [31] çalışmasında ele alındı; burada kablosuz sensör ağı, sensörlerden veri toplamak ve statik havuza iletmek için bir küme başı seçilerek kümelendirilir. [17] çalışmasında LEACH protokolünün farklı varyantları sunulmaktadır. [18], [19] ve [20]'deki çalışmalar, su altı kablosuz sensör ağlarında enerjiye duyarlı veri toplama problemini ele alan üç yeni çalışmadır. Bir grup KB robot, sınırlı pil ömrüne sahip bir İHA'ya veri gönderir. Sonuç olarak, enerji verimliliğini dikkate alan mobil havuzlarla yönlendirme için kullanılan temel yöntemlerin bir özetini sunuyoruz. Problemin formülasyonumuz, hedefin bir yol uzunluğu kısıtlamasını hesaba katarak maksimum ödül elde etmek olduğu klasik oryantiring problemine (OP) [21] benzerdir. Bazı araştırma çalışmaları farklı KB robotlarının elde ettiği veri kalitesindeki farklılıkları da dikkate aldığından, OP'yi inceleyen diğer araştırmaları incelenmektedir. [22]'de yazarlar, mobil alıcının bir veya daha fazla siteyi seçebileceği ve yörünge planlamasıyla veri toplamaya orada başlayabileceği EAPC algoritmasını kullanan bir veri toplama tekniği sunmaktadır. Çalışma, EAPC'nin ağırlıklı buluşma noktaları (ABN)'dan az enerji yoğun olduğunu ileri sürmektedir. Çalışma [24], buluşma sensörlerinin yükünü dengeleyen ve çoklu hedefli parçacık sürüşü optimizasyonu kullanarak rotayı azaltan enerji açısından verimli yörünge planlama (EETP) için bir teknik sunar. EETP'nin daha az enerji kullandığı ve

ABN'den daha uzun bir ağ ömrüne sahip olduğu bildirilmektedir. Tek bir mobil alıcı, sensör verilerini toplamak için buluşma sitelerini (RP) ziyaret eder, [25]'te mevcut yaklaşımlardan daha düşük bir yörünge uzunluğuna sahip PSO tabanlı RP seçim yöntemini sunar. Benzer bir paradigmayı kullanarak, [26]'nın yazarları ağ ömrünü artırmak için yüksek seviyeli bir sezgisel yöntem önermektedir.

[27], bu sorun için KSA ve İHA odaklı çözümler önermektedir. Sensörler, verileri KB'sine göndermek için KSA odaklı bir yöntem kullanır. İHA daha sonra KB'den KB'ye hareket ederek veri toplar. Bilgileri lavaboya göndererek, İHA odaklı strateji işlev görür. Sonuç olarak, İHA yalnızca lavaboya ziyaret eder, uçuş süresinden tasarruf sağlar ancak sistemin genel enerji tüketimini artırır.

Bu probleme yönelik literatürdeki çözümlerin çoğu, sınırsız pil kapasitesine sahip mobil lavaboları içerir. Geleneksel modellere göre, lavabo önceden belirlenmiş bir seçime bağlı olarak tüm KB düğümlerini veya yarısını ziyaret edebilir. Bununla birlikte, İHA'nın aynı sayıda KB düğümüne ulaşması için, farklı ağ topolojileri farklı enerji gereksinimlerine neden olur. İHA'nın enerji gereksinimi pil kapasitesinden fazlaysa, İHA kalan enerji kısıtlaması nedeniyle görevini tamamlayamayabilir. [12]'deki önceki çalışma, bu sorunu sınırlamak için İHA'lar için sınırlı pil kapasitesini de ele alarak literatürdeki bir boşluğu doldurur. Benzer sorun, birkaç KB robot öncelik listesini hesaba katarak [14]'te ele alınmıştır. Sorun daha sonra yayında [13] çeşitli KB robotları için çeşitli veri kaliteleri dikkate alınarak ele alınmıştır. Daha sonra, [15] aynı sorunu aynı atlama kısıtlamalarıyla inceler.

Uçak seyir kontrolü ve ağ veri kaybını önlemek için veri toplamanın ortak bir optimizasyon sorunu [28]'de ele alınmıştır, burada İHA herhangi bir IoT düğümünün durumunu bilmeyen POMDP olarak işlev görmektedir. Bu araştırma, verileri planlamak için derin Q-ağ tabanlı bir teknik ve ağ durumlarının güncel olmaması durumunda İHA optimizasyonu sunmaktadır. Bu çalışmada, veri toplama sırasında tüm KB robotları için aynı veri kalitesiyle İHA'nın pil kapasitesi ve KB robotlarının harcadığı enerji üzerindeki bir kısıtlamayı ele alıyoruz. Veri kaliteleri farklı KB robotları için farklı olsaydı, araştırılan sorun, kısıtlanmış yol uzunluğuna sahip ödül maksimizasyonu sorunu olarak da adlandırılan ve ilk olarak [21]'de sunulan klasik OP ile karşılaştırılabilir olurdu. Belirli bir düğüm kümesi arasındaki en kısa yol, bu düğümler seçildikten sonra belirlenir. OP [29] bu iki süreci birleştirir. Amaç, mobil lavabonun ulaşılabilir her düğümü ziyaret etmek için yeterli zamanı olmadığında belirli düğümleri seçerek genel ödülü en üst düzeye çıkarmaktır.

Son zamanlarda yapılan bir çalışmada [30], İHA yörünge tasarımı problemini OP olarak ele alarak, İHA sınırlı sürede maksimum kullanıcıya hizmet etmek için birçok yerin üzerinden uçar. Bu problemi karma tamsayı doğrusal programlama problemi olarak formüle eder; ardından açgözlü bir çözüm sunar. Önerilen yöntemin ne kadar hızlı ve neredeyse mükemmel bir şekilde performans gösterdiğini gösterilmektedir.

Sınırlı kapasiteli pille çalışan İHA'mız, ziyaret edilecek bir KB robot kümesini seçmek için yenilikçi ve sağlam bir teknik kullanır ve böylece ziyaret edilmeyen KB robotlarının ziyaret edilen bir KB robotuna ulaşana kadar başka bir ziyaret edilmeyen KB robotuna veri aktarması için kullanılan genel enerjiyi azaltır. Bu makalede, hangi KB robotlarına karar verirken pil kapasitesini, her KB robotunun konumunu ve veri kalitelerini dikkate alınır.

3. Sistem Modeli ve Problem Tanımı

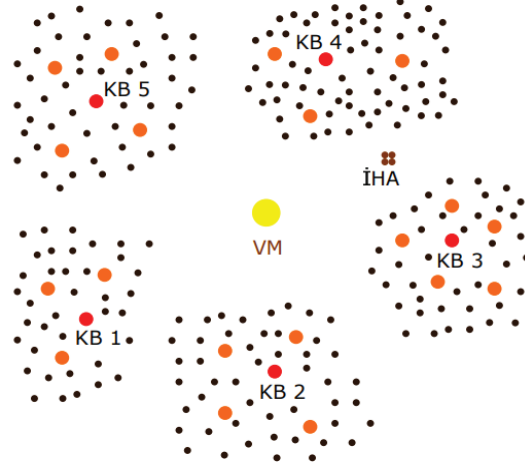
Bu bölüm problemimizi tanımlamaya odaklanmakta ve sistem yaklaşımımızı oluşturmaktadır.

3.1. Sistem Modeli

Burada motive edici bir senaryo sunulmaktadır ve problemi bu motivasyona dayanarak formüle edilmektedir.

Bu makalede, M kümelenmiş bir robotik ağ ve sınırlı kapasiteli bataryaya sahip bir İHA'yı ele almaktadır. Bu ağ, çevreyi izleyen sensörlerden veri toplamaktan sorumludur.

Her kümede, bir küme başı (KB) robotu, atanan görevleri yürüten ve elde edilen verileri (çevre izleme verileri) kendi KB robotlarına gönderen küme üyesi (KÜ) robot düğümlerine görevler tahsis eder. KB robotları, CM robotlarından verileri toplayarak İHA'ya göndermekten sorumludur. İHA, konumlarına, veri verimliliklerine ve batarya kapasitesine bağlı olarak KB robotlarının değişen bir bölümünü ziyaret eder (Şekil 1). İHA her KB robotunu ziyaret etmediği sürece, ziyaret edilmeyen her KB robotu verilerini birden fazla atlama yoluyla ziyaret edilmeyen bir komşu KB'ye gönderir.



Şekil 1: KB robotlarının endeks kümesini belirtir. B, İHA'nın pil kapasitesini belirtir. KB robotları, verilerini toplamak ve iletmek için büyük miktarda enerji tüketir.

KB robotları, İHA tarafından ziyaret edilmedikleri takdirde, verilerini toplayıp komşu KB robotlarına veya İHA'lara iletmek için büyük miktarda enerji tüketir. Bir KB robotu KÜ robotu gibi hareket ederse, o KB robotunun bataryasında kalan enerji hızla kritik enerji seviyesinin altına düşer ve bu da çok fazla enerji ve zaman tüketen sık KB seçimine neden olur. Bu nedenle, KÜ robotlarına çok verimli bir şekilde görev atayan KB robotlarının KB robotu olarak hizmet vermeyi bırakmasına neden olabilir. Dolayısıyla, aşağıdaki varsayım yapılmıştır. Ek enerji tüketiminden kaçınmak için, KB robotları KB olarak çalışırken hareket etmezler. Her KB robotunun, İHA'ya göndermek veya başka bir KB robotuna gecikme olmadan iletmek için aynı miktarda verisi vardır.

$\xi_0 = (x_0, y_0)$, İHA'nın başlangıç konumunu belirtir. $\xi_i = (x_i, y_i)$, KB robot i'nin konumunu belirtir. İHA'nın kat ettiği mesafeyle orantılı enerji tükettiğini varsayıyoruz.

KB robot i'den j'ye kadar enerji tüketimi şu şekilde tanımlanır:

$$E_{UAV}(i, j) \triangleq C_{UAV} \|\xi_i - \xi_j\|$$

$$= C_{UAV} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

Burada C_{UAV} , kat ettiği mesafe ile İHA tarafından tüketilen enerji arasındaki sabit orandır. Diğer yandan, bir KB robotunun tükettiği enerjinin, kendisi ile bir sonraki sıçrama arasındaki mesafenin karesiyle orantılı olduğunu varsayılmaktadır. Örneğin, KB robot i'nin KB robot j'ye veri göndermek için tükettiği enerji şu şekilde tanımlanır:

$$E_{CH}(i, j) \triangleq C_{CH} \|\xi_i - \xi_j\|^2 \\ = C_{CH} [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2]$$

Burada C_{CH} , bir KB robotunun enerji tüketimi ile bir sonraki atlama noktası arasındaki mesafenin karesi arasındaki sabit orandır. İlgili literatür, her KB düğümünün verilerini baz istasyonuna ve İHA'nın başlangıç konumuna iletmek için yeterli enerjiye sahip olduğunu varsayar. İHA, yol boyunca bir KB robotunun yakınından geçebilir. En kötü durumda, bazı KB robotları, yörüngeye başlamadan önce baz istasyonunda duran İHA'ya verilerini gönderebilir.

İHA baz istasyonundaki başlangıç konumunda duruyorsa, KB robotları verilerini doğrudan İHA'ya göndermek için yeterli enerjiye sahiptir. KB robotları, verileri İHA'ya veya başka bir KB robotuna sabit bir hızla gönderir.

3.2. Problem Tanımı

Sınırlı kapasiteli batarya ile İHA'nın uçuş rotasını planlamayı hedeflenmektedir. Optimum uçuş rotası planlamasıyla İHA, veri verimliliği ve enerji tüketiminin toplam ortak maliyetini en aza indirmeyi hedeflenmektedir. Problemimizi doğru bir şekilde formüle etmek için aşağıdaki tanımları yapılmaktadır.

Tanım 1. İHA'nın stratejisi, π , İHA'nın veri toplamak için izlediği doğrusal yollar kümesi olarak tanımlanır, yani $\pi \subseteq P$.

Tanım 2. π stratejisine sahip İHA'nın enerji tüketimi, E_{UAV}^π , π stratejisine sahip İHA tarafından tüketilen enerjidir, yani örn.,

$$E_{UAV}^\pi \triangleq \left[\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^M C_{UAV} \|\xi_i - \xi_j\| I_{\{p(\xi_i, \xi_j) \in \pi\}} \right]$$

$I_{\{X\}}$, X doğru olduğunda 1 olan bir gösterge fonksiyonudur.

Tanım 3. π stratejisi altındaki ziyaret edilmemiş KB robotları kümesi, π stratejisi altındaki ziyaret edilmemiş KB robotları kümesi olarak tanımlanır ve S_{non}^π ile gösterilir.

Tanım 4. π stratejisi altındaki KB robotu i'nin verilerini iletmek için tüketilen enerji, $E_i^\pi(u_i)$ ile gösterilir, ziyaret edilmemiş KB robotu i'nin veri iletmeye stratejisi u_i olan ziyaret edilmiş bir KB robotuna birim verileri iletmek için tüketilen enerjidir.

Problemimizde, tüm KB robotları, kümelerindeki diğer küme üyesi (KÜ) robotlarından veri toplar ve bu CM robotları sensörden veri toplayabilir. Çevrelerindeki düğümler. Burada, verilerin kalitesi farklı bölgelerdeki sensörlere ve CM robotlarına bağlı olarak değişebilir. Her KB robotu, CM üyelerinden farklı kalitede veri toplayabildiğinden, her KB robotu topladığı verileri değerlendirdikten sonra verilerin verimliliği farklı KB robotları için farklı olabilir. Bu çalışmada, hem KB robotları tarafından tüketilen enerjiyi hem de KB robotlarındaki verilerin kalitesini ele alıyoruz. Bu nedenle aşağıdaki tanım yapılmaktadır.

Tanım 5. KB robot i'nin veri verimliliği η_i ile gösterilir ve KB robot i tarafından değerlendirilen verilerin kalite ölçüsüdür; 0 (%0 verimlilik) ile 1 (%100 verimlilik) arasında bir değer alır.

Tanım 6. $J(u, \pi)$ ile gösterilen stratejiler altında KB robotlarının toplam maliyeti şu şekilde tanımlanır:

$$J(u, \pi) \triangleq \sum_{i \in S_{non}^\pi} (\eta_i \times E_i^\pi(u_i))$$

Problem 1. Sınırlı kapasiteli bataryaya sahip İHA ile ziyaret edilmeyen KB robotlarının toplam ortak enerji tüketim maliyetini ve veri verimliliğini en aza indirme

$$\min_{\pi, u \subseteq P} J(u, \pi) \\ s.t. \quad E_{UAV}^\pi \leq B$$

Bu problemde, İHA'nın her bir KB robotunu ziyaret etmek için yeterli pil kapasitesi yoksa, İHA, veri iletimi için birbirlerine yakın enerji tüketen KB robotları arasında, kümelerinden toplanan verinin verimliliği daha düşük olan KB robotlarını ziyaret etmekten vazgeçme eğilimindedir. Başka bir deyişle, İHA, KB robot i'nin veri verimliliği ve enerji tüketiminin birleşik maliyeti KB robot j'den daha düşükse, daha düşük veri verimliliğine sahip daha uzaktaki KB robot i'yi ziyaret etmekten vazgeçer; bu problemi ilgili literatürdeki problemlerden ayırır.

4. Önerilen Yaklaşım

Öncelikle, her bir KB robotunu ziyaret etmek için yeterli minimum pil kapasitesini bulmak amacıyla bir gezgin satıcı problemi (GSP) olarak modelleyerek bu problemi ele alınmaktadır. Bu pil kapasitesini bulmak için problem NP-zor bir problem olan GSP (faktöryel karmaşıklıkta çözümü olan) ele alınıp genetik algoritma (GA) uygulanmaktadır [31]. GA, 100'den az düğümlü durumlarda bir GSP problemi için eniyi çözümü pratik verebilir. Ama özellikle 200'den fazla düğümlü oldukça geniş durumlarda GA, en iyi altı başarımlar gösterir. [32]. Bu veri toplama problem için, KB düğümlerinin tüm düğümlere en uygun oranının %3 ile %5 arasında olması gerektiğini gösterir [33]. [34] ise bu problemi gezgin bir veri toplayıcı kullanarak ele alırken bu oran için %1-%5 aralığını kullanır. [35], bu oranın %6 olduğunu belirtir. Bu nedenle, bu makalede bu oran yaklaşık 5% alınır; bu durumda 100 KB robotun olduğu durum, toplamda 2000 KÜ robotunun olduğu durum anlamına gelir; bu oldukça büyük bir robotik ağ sistemidir. 2000 robottan daha büyük bir robot ağı için bugünün pratik koşullarında finansal maliyette düşünüldüğünde pek mümkün değildir. Bu durumda GA eldeki GSP problem için etkili bir çözüm üretir.

İHA, ziyaret edilecek KB robotlarının optimal bir alt kümesini seçerek, ziyaret edilmeyen KB robotlarının veri verimliliği ve enerji tüketiminin toplam ortak maliyetlerini en aza indirmeyi hedeflenmektedir. Bu robotlar, ziyaret edilen bir KB düğümüne ulaşana kadar diğer ziyaret edilmeyen KB'ler üzerinden birden fazla atlama yaparak veri iletecek. Bu bölüm, yalnızca İHA'nın pil kapasitesindeki ve KB robotlarının veri iletmeye için tükettiği toplam enerjideki kısıtlamayı değil, aynı zamanda farklı KB robotları için farklı veri verimliliklerini de ele alınmaktadır.

4.1. KB Robotları için Veri İletme Stratejisi

Ziyaret edilen bir KB robotu i, veri iletmeye stratejisine ihtiyaç duymaz ve bu nedenle $u_i = 0$. Ancak, ziyaret edilmeyen bir KB robotu i, ziyaret edilen her KB robotuna en kısa yolu aramalı ve en azını kullanmalıdır (KB robotları arasında en kısa yolları bulmak için KB robotları arasında mesafelerin kareleri dikkate alınır.). Bu nedenle, en iyi veri iletmeye stratejileri elde edebilirler. Ziyaret edilmeyen her KB robotunun, ziyaret edilen her KB robotunu olası hedef olarak gördüğü dikkate edilmelidir. Ziyaret edilmeyen robotlar verilerini diğer robotlara En Kısa Yol yaklaşımıyla Dijkstra Algoritması ile iletmektedir.

4.2. İHA için En İyi Strateji

İHA, her bir KB robotunu ziyaret etmek için yeterli pil kapasitesine sahip olmadığında, hem İHA tarafından tüketilen

enerjiyi hem de ziyaret edilmeyen her KB robotunun tükettiği enerji ve veri verimliliği maliyeti en azaltma düşünülmelidir.

B_{TSP} , her bir KB robotunu ziyaret etmek için yeterli minimum pil kapasitesini gösterebilir. Pil kapasitesi $B < B_{TSP}$ olan bir İHA, bazı KB robotlarını ziyaret etmeden gitmeyi gerektirir. Problemimiz, ziyaret edilmeyen KB robotlarının tükettiği enerji ve veri verimliliği maliyetinin toplamını en azaltmak için, bu KB robotlarını ziyaret etmeden gidecek KB robotlarını seçmektir. Bu probleme önerilen Algoritma 1'i daha iyi açıklamak için Tanım 7 yapılmaktadır.

Tanım 7. KB robotlarının K-eleman kombinasyonları, S_a^K ile gösterilir ve tüm KB robotlarının M-eleman kümesinin K-eleman altkümeleridir, yani $S_a^K \subseteq S$ ve $1 \leq a \leq \binom{M}{K}$ için $|S_a^K| = K$. $S^K(B)$, pil kapasitesinde İHA'nın ziyaret edebileceği tüm olası K-eleman kombinasyonlarının kümesini gösterir.

Algorithm 1 Verimlilik ve Enerji-Farkında Veri Toplama Stratejisi (VEFVTS)

#Yorum: İHA'nın pil kapasitesi tüm CH robotlarını ziyaret etmek için yeterlidir, yani, $B \geq B_{TSP}$.#

if $B \geq B_{TSP}$ **then**

Problemi GSP olarak ele alarak en iyi stratejiyi arayın.

Çıktı: π^{QEADCS} , GSP için İHA'nın tüm CH robotlarını ziyaret ettiği genetik algoritma tabanlı bir strateji haline gelir.

#Yorum: İHA'nın pil kapasitesi tüm CH robotlarını ziyaret etmek için yetersizdir, yani, $B < B_{TSP}$.#

else

for $K = (M - 1) : 1$ **do**

KB robotlarının tüm $\binom{M}{K}$ kombinasyonlarını bulun.

for $a = 1 : \binom{M}{K}$ **do**

if $\min_{\pi} E_{UAV}^{\pi} \leq B$ **for** S_a^K **then**

Yorum: S_a^K , bataryasında B enerjiye sahip olan İHA'nın ziyaret edebileceği olası (feasible) bir kümedir. #.

$S_a^K \subset S^K(B)$

Her KB robotu $i \in S - S_a^K$ için en az (minimum) enerjili en kısa yol stratejisini uygulayın.

$\sum_{i \in S - S_a^K} \gamma_i^{\pi}$ yi bulun.

else

Yorum: S_a^K kümesi, bataryasında B enerjiye sahip olan İHA'nın tüm CH robotlarını ziyaret edemeyeceği bir olanaksız (infeasible) kümedir. #.

$S_a^K \not\subset S^K(B)$

end if

end for

if $S^K(B) \neq \emptyset$ **then**

$\min_{S_a^K \in S^K(B)} \sum_{i \in S - S_a^K} \gamma_i^{\pi}$ bul.

end if

end for

$\min_K \left[\min_{S_a^K \in S^K(B)} \sum_{i \in S - S_a^K} \gamma_i^{\pi} \right]$ bul.

Çıktı: π^{VEFVTS} , GSP için İHA'nın bir önceki adımda bulunan S_a^K kombinasyonundaki KB robotlarını ziyaret ettiği genetik algoritma tabanlı bir stratejidir.

end if

5. Sayısal Sonuçlar

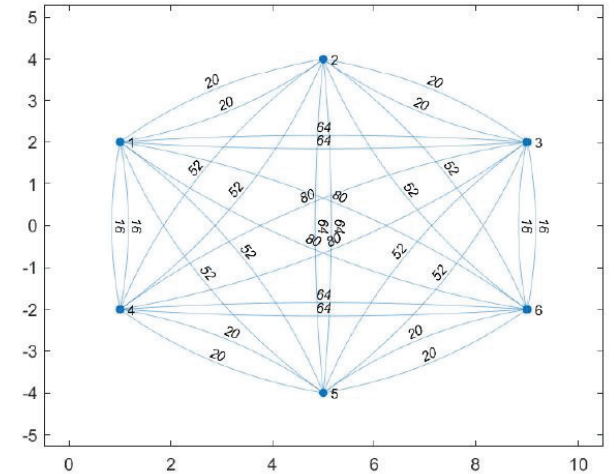
Stratejileri test etmek için çeşitli sayıda KB robotu ve çeşitli derecelerde artık pil kullanılır. Bu problem için statik bir batma ölçütü, KB düğümlerinin en uygun oranının %3 ile %5 arasında olması gerektiğini gösterir [33]. İkinci bir çalışma [34], bu sorunu mobil bir batma kullanarak ele almak için ağdaki KB düğümü kesri için %1-%5 aralığını kullanır. [35], KB düğümlerinin oranının %6 olduğunu belirtir. Sonuç olarak, ilgili çalışmalardaki düğümlerin yaklaşık %5'i KB olarak hizmet etmek üzere seçilir. 6-KB, 8-KB ve 9-KB robotlu üç senaryoyu analiz ediyoruz. Parametre değerini korumak için C_{UAV} ve C_{CH} birimleri bir olarak kabul edilir.

Benzetimlerimizde, her KB robotunun ayrı veri kalitesi vardır. Bu durumlarda, İHA'nın her KB robotunu ziyaret etmek için toplam yörünge uzunluğunun elli birimden az olduğu keşfedilir. Başka bir deyişle, tüm KB robotlarını ziyaret etmek için gereken maksimum pil kapasitesi miktarı $50 \times C_{UAV}$ 'dir. Önceki çalışmalarımızın performanslarını değerlendiriyoruz: [13], [15]'teki QEADCS, [12]'deki GAMEDFS, READCS (bu çalışmada önerilen teknik) ve [27]'deki İHA odaklı yaklaşım.

5.1. Dairesel Topoloji (6-KB Robotlu Durum)

Şekil 2, 6 KB robotunun yerlerini ve aralarındaki bağlantıların ağırlıklarını göstermektedir. Bu senaryoda bir dairessel topoloji incelenmektedir (Bu topolojide KB robotları düzgün çokgen oluşturduğu için bu topoloji dairessel topoloji olarak ele alınmıştır).

KB robotlarının konumları $(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5, \xi_6) = ((1, 2), (5, 4), (9, 2), (1, -2), (5, -4), (9, -2))$ m'dir; burada (0, 0), İHA'nın başlangıç konumudur. KB robotlarının veri verimlilikleri $(\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6) = (0.95, 0.90, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70)$ m olarak alınmıştır.



Şekil 2: Düğümler, 6 KB robotunun konumlarını gösterir. Bir bağlantının ağırlığı, bağlantıyla birbirine bağlı iki düğüm arasındaki mesafenin karesini gösterir.

5.1.1. İHA-Odaklı Strateji

İHA Odaklı strateji uygulandığında, İHA sadece KB robot 2'yi ziyaret eder ($\xi_2 = (5, -4)$) ve $B = 12.81 \times C_{UAV}$ ise KB robotlarının tüm verilerini oradan toplar; bu sayede, İHA Odaklı strateji altında ziyaret edilmeyen her KB robotunun veri verimliliği ve tükettiği enerjinin toplam birleşik maliyetini aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$J(u, \pi^{UAV-O}) = 162 \times C_{CH}$$

$B = 5, 10$ ise, İHA KB robot 1'e ($\xi_1 = (1,2)$) gidebilir; bu da KB robot 2'den daha yakın bir başlangıç noktasına sahip olur ve bu da şu sonucu verir:

$$J(u, \pi^{UAV-O}) = 180.2 \times C_{CH}$$

5.1.2. GAMEDFS

Bu alt bölümde, Şekil 2'deki yapılandırmada $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar değişen pil kapasiteleriyle ilgili literatürde önerilen GAMEDFS'nin performansına ilişkin sayısal sonuçları elde edilmektedir.

Şekil 3'de, GAMEDFS uygulandığında, $B = 30 \times C_{UAV}$ veya $B = 35 \times C_{UAV}$ veya $B = 40 \times C_{UAV}$ veya $B = 45 \times C_{UAV}$ veya $B = 50 \times C_{UAV}$ 'lı İHA tüm KB robotlarını ziyaret edebilir, yani $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 0$.

Şekil 2'deki yapılandırmada, İHA'nın tüm KB robotlarını ziyaret etmesi için gereken enerji $E_{UAV}^{\pi}(u) = 26.36 \times C_{UAV}$ 'dir.

$B = 25 \times C_{UAV}$ 'lı İHA, KB robot 5 ve 6'yı ziyaret etmeden diğer robotları ziyaret eder; $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 26.2 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 22.36 \times C_{UAV}$ enerji tüketimi ile sonuçlanır.

$B = 20 \times C_{UAV}$ 'lı İHA KB robot 3, 5 ve 6'yı ziyaret etmeden diğer robotları ziyaret eder; bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 57.2 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 16.16 \times C_{UAV}$ enerji tüketimi ile sonuçlanır.

$B = 15 \times C_{UAV}$ olan İHA, KB robot 3, 4, 5 ve 6'yı ziyaret etmeden gider ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 76.2 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 13.41 \times C_{UAV}$ enerji tüketimi ile sonuçlanır.

$B = 10 \times C_{UAV}$ olan İHA, KB robot 2, 3, 5 ve 6'yı ziyaret etmeden gider ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 95 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 8.47 \times C_{UAV}$ enerji tüketimi ile sonuçlanır.

$B = 5 \times C_{UAV}$ olan İHA sadece KB 1 robotunu ziyaret eder ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 106.3 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 4.47 \times C_{UAV}$ enerji tüketimi ile sonuçlanır.

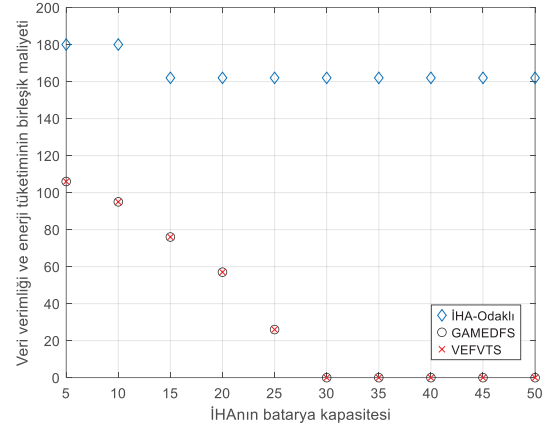
5.1.3. VEFVTS

VEFVTS, Şekil 2'teki yapılandırmada $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar değişen tüm pil kapasitesi değerleri için GAMEDFS ile aynı kararları almıştır. Şekil 3'te VEFVTS, GAMEDFS ve İHA Odaklı Strateji altında veri verimliliği ve enerji tüketiminin toplam ortak maliyeti, $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar İHA'nın pil kapasitesine göre kıyaslanmıştır.

KB 4, tüm KB robotları arasında düşük veri verimliliğine sahip olmasına rağmen, İHA, $B = 5, 15$ hariç düşük pil kapasitesi değerleri için KB 4'ü ziyaret etmeyi tercih eder, çünkü İHA'nın enerji tüketimi için çok önemli olan KB 5, KB 6'dan veri iletebilir. KB 1 en yüksek veri verimliliğine sahip olduğu ve orijine yakın olduğu için, İHA tüm pil kapasiteleri için burayı ziyaret eder.

Tüm KB robotlarının veri verimliliklerinin eşit olması durumunda, GAMEDFS'nin önceki çalışmalarda optimum olduğu gösterilmiştir. $\eta_i = 1 - i/20$ formülüyle üretilen verimliliklerle, stratejilerin performansı hala KB robotlarının konumlarına daha fazla bağlıdır. Bir rotanın İHA'nın pil kapasitesi nedeniyle uygulanabilir olmaması durumunda, ziyaret edilmeyen KB robotlarının veri verimliliğinin toplamını en aza indirmenin önemi kaybolacağından, bu beklenebilir. Burada, KB robotlarının veri verimliliği, KB robotlarının

konumlarının aksine, İHA'nın pil kapasitesinin katı kısıtlaması üzerinde bir etkiye sahip değildir.



Şekil 3: Şekil 2'deki 6 KB robotunun İHA-Odaklı strateji, GAMEDFS ve VEFVTS altında veri verimliliği ve enerji tüketiminin toplam ortak maliyeti, $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar İHA'nın pil kapasitesine göre. İHA'nın enerji tüketimi ve KB robotlarının toplam ortak maliyeti için kullanılan birimler sırasıyla C_{UAV} ve C_{CH} 'dir. Bu sabitler, İHA ve KB robotlarının türüne bağlıdır.

5.1.4. Performans Kıyaslaması

Tablo 1, Şekil 2'de ziyaret edilmeyen KB robotlarının endekslerini sunmaktadır. Benzer şekilde, Tablo 2, ziyaret edilmeyen KB robotlarının toplam ortak enerji tüketimi maliyetini ve veri verimliliğini göstermektedir. Bu tablolardan, Şekil 2'de İHA'nın pil kapasitesine bağlı olarak bir KB robot alt kümesini ziyaret etmeden nasıl hareket etmeye karar verdiğini gözlemleyebiliriz. Ayrıca, ziyaret edilmeyen KB robotlarının tüketilen enerji maliyeti ve veri verimliliğinin toplamı, İHA'nın pil kapasitesine ve dolayısıyla İHA tarafından verilen vazgeçme kararlarına göre değişmektedir. Ayrıca, ziyaret edilmeyen KB robotlarının ortak maliyetleri, KB robotlarının konumlarına ve veri verimliliklerine bağlıdır.

Tablo 1: Tablo, Şekil 2'de İHA'nın pil kapasitesine bağlı olarak ziyaret edilmeyen KB robotlarının endekslerini göstermektedir. "Hiçbiri", $B = 30$ veya $B = 35$ veya $B = 40$ veya $B = 45$ veya $B = 50$ ise İHA'nın tüm KB robotlarını ziyaret ettiği anlamına gelir.

Strateji	B=5	B=10	B=15	B=20	B=25
İHA-Odaklı	2-6	2-6	1,3-6	1,3-6	1,3-6
GAMEDFS	2-6	2,3,5,6	3-6	3,5,6	5,6
VEFVTS	2-6	2,3,5,6	3-6	3,5,6	5,6

Strateji	B=30	B=35	B=40	B=45	B=50
İHA-Odaklı	1,3-6	1,3-6	1,3-6	1,3-6	1,3-6
GAMEDFS	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir
VEFVTS	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir

Tablo 2: Tablo, Şekil 2'de İHA'nın pil kapasitesine bağlı olarak ziyaret edilmeyen KB robotlarının toplam birleşik enerji tüketim maliyetini ve veri verimliliğini göstermektedir. "X", İHA odaklı stratejinin o pil kapasitesi için uygulanamaz olduğunu ifade etmektedir.

Strateji	B=5	B=10	B=15	B=20	B=25
İHA-Odaklı	180.2	180.2	162	162	162
GAMEDFS	106.3	95	76.2	57.2	26.2
VEFVTS	106.3	95	76.2	57.2	26.2

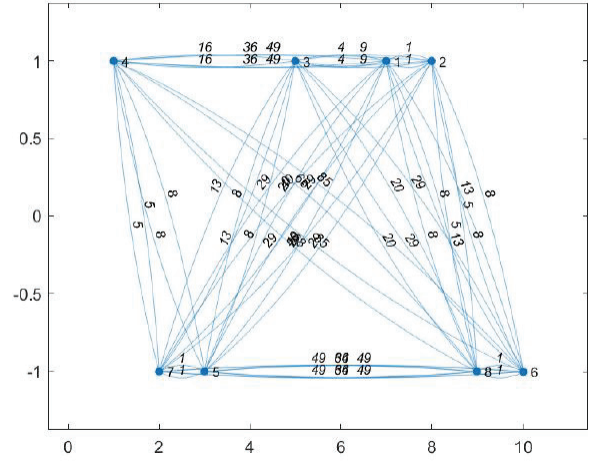
Strateji	B=30	B=35	B=40	B=45	B=50
İHA-Odaklı	162	162	162	162	162
GAMEDFS	0	0	0	0	0
VEFVTS	0	0	0	0	0

5.2. Dikdörtgensel Topoloji (8-KB Robotlu Durum)

Şekil 4, 8 KB robotunun yerlerini ve aralarındaki bağlantıların ağırlıklarını göstermektedir. Bu senaryoda bir dikdörtgensel topoloji incelenmektedir. (Bu topolojide KB robotları birbirine paralel iki sıra oluşturduğu için bu topoloji yaklaşık olarak bir dikdörtgen olarak düşünülmüş ve bu topoloji dikdörtgensel topoloji olarak ele alınmıştır).

KB robotlarının konumları $(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5, \xi_6, \xi_7, \xi_8) = ((7, 1), (8, 1), (5, 1), (1, 1), (3, -1), (10, -1), (2, -1), (9, -1))$ 'dir; burada $(0, 0)$, İHA'nın başlangıç konumudur. KB robotlarının veri verimlilikleri

$(\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6, \eta_7, \eta_8) = (0.95, 0.90, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70, 0.65, 0.60)$ m olarak alınmıştır.



Şekil 4: Dğümler, 8 KB robotunun konumlarını gösterir. Bir bağlantının ağırlığı, bağlantıyla birbirine bağlı iki düğüm arasındaki mesafenin karesini gösterir.

5.2.1. İHA-Odaklı Strateji

İHA Odaklı strateji uygulandığında, İHA sadece KB robot 3'ü ziyaret eder $(\xi_3 = (5,1))$ ve $B = 10.2 \times C_{UAV}$ ise KB robotlarının tüm verilerini oradan toplar; bu sayede, İHA Odaklı strateji altında ziyaret edilmeyen her KB robotunun veri verimliliği ve tükettiği enerjinin toplam birleşik maliyetini aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz.

$$J(u, \pi^{UAV-O}) = 67.1 \times C_{CH}$$

$B = 10$ ise, İHA KB robot 5'e gidebilir; bu da KB robot 3'den daha yakın bir başlangıç noktasına sahip olur ve bu da şu sonucu verir:

$$J(u, \pi^{UAV-O}) = 114.9 \times C_{CH}$$

$B = 5$ ise, İHA KB robot 7'e gidebilir; bu da KB robot 3 ve 5'den daha yakın bir başlangıç noktasına sahip olur ve bu da şu sonucu verir:

$$J(u, \pi^{UAV-O}) = 153.6 \times C_{CH}$$

5.2.2. GAMEDFS

İlgili literatürde önerilen GAMEDFS'nin performansına ilişkin sayısal sonuçları, Şekil 4'teki yapılandırmada $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar değişen pil kapasiteleriyle elde ediyoruz. Şekil 5'te, GAMEDFS'yi uygulayarak, $B = 25, 30, 35, 40, 45, 50 \times C_{UAV}$ 'lı İHA tüm KB robotlarını ziyaret edebilir, yani

$$J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 0$$

Şekil 4'de, İHA'nın tüm KB robotlarını ziyaret etmesi için gereken enerji $E_{UAV}^{\pi}(u) = 21.48 \times C_{UAV}$.

$B = 20 \times C_{UAV}$ 'lı İHA, KB robot 6'yı ziyaret etmeden gider, bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 0.7 \times C_{CH}$ ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 19.89 \times C_{UAV}$ ile sonuçlanır.

$B = 15 \times C_{UAV}$ 'lı İHA, KB robot 2, 4, 6 ve 8'i ziyaret etmeden gider ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 13.6 \times C_{CH}$ ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 14.81 \times C_{UAV}$ ile sonuçlanır.

$B = 10 \times C_{UAV}$ 'lı İHA, yalnızca KB 4, 5, 7'yi ziyaret eder ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 71.7 \times C_{CH}$ ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 7.48 \times C_{UAV}$ ile sonuçlanır.

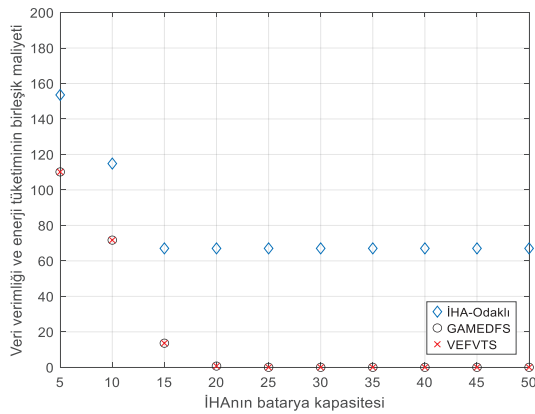
$B = 5 \times C_{UAV}$ 'lı İHA, yalnızca KB 7'yi ziyaret eder ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 110.2 \times C_{CH}$ ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 4.46 \times C_{UAV}$ ile sonuçlanır.

5.2.3. VEFVTS

VEFVTS, Şekil 4'teki yapılandırılmada $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar değişen tüm pil kapasite değerleri için GAMEDFS ile aynı kararları almıştır. Şekil 5'te VEFVTS, GAMEDFS ve İHA Odaklı Strateji altında veri verimliliği ve enerji tüketiminin toplam ortak maliyeti, $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar İHA'nın pil kapasitesine göre kıyaslanmıştır.

KB 5, tüm KB robotları arasında düşük veri verimliliğine sahip olmasına rağmen, İHA yine de daha düşük pil kapasiteli KB 5'i ziyaret etmeyi tercih eder çünkü birçok KB robotu, İHA'nın daha düşük pil kapasiteleri için verilerini KB 5 robotuna iletir. KB 2 orijinden çok uzakta ve KB 7 orijine en yakın KB robotu olduğundan (0, 0), $B = 5$ 'li İHA yine de KB 2 yerine KB 7'yi tercih eder. CH 4, (1, 1) yerine (2, 1) konumunda olsaydı, $B = 15$ 'li İHA, CH robotlarının veri verimliliği ve enerji tüketiminin ortak maliyetini düşürmek için KB 7 yerine CH 4'ü tercih ederdi.

Tüm KB robotlarının veri verimliliklerinin eşit olması durumunda, GAMEDFS'nin optimal olduğu önceki çalışmalarda gösterilmiştir. $\eta_i = 1 - i/20$ formülüyle üretilen verimliliklerle, stratejilerin performansı hala KB robotlarının konumlarına daha fazla bağlıdır. Bir rota, İHA'nın pil kapasitesi nedeniyle uygulanamıyorsa, ziyaret edilmeyen KB robotlarının veri verimliliklerinin toplamını en aza indirmenin önemi kalmadığı için bu beklenebilir. Burada, KB robotlarının veri verimlilikleri, KB robotlarının konumlarının aksine, İHA'nın pil kapasitesinin katı kısıtlaması üzerinde bir etkiye sahip değildir.



Şekil 5: Şekil 4'teki 8 KB robotunun İHA-Odaklı strateji, GAMEDFS ve VEFVTS altında veri verimliliği ve enerji tüketiminin toplam ortak maliyeti, $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar İHA'nın pil kapasitesine göre. İHA'nın enerji tüketimi ve KB robotlarının toplam ortak maliyeti için kullanılan birimler sırasıyla C_{UAV} ve C_{CH} 'dir. Bu sabitler, İHA ve KB robotlarının türüne bağlıdır.

5.2.4. Performans Kıyaslaması

Tablo 3, Şekil 4'de ziyaret edilmeyen KB robotlarının endekslerini sunmaktadır. Benzer şekilde, Tablo 4, ziyaret edilmeyen KB robotlarının toplam ortak enerji tüketimi maliyetini ve veri verimliliğini göstermektedir. Bu tablolardan,

Şekil 4'de İHA'nın pil kapasitesine bağlı olarak bir KB robot alt kümesini ziyaret etmeden nasıl karar verdiğini gözlemleyebiliriz. Ayrıca, ziyaret edilmeyen KB robotlarının tüketilen enerji maliyeti ve veri verimliliğinin toplamı, İHA'nın pil kapasitesine ve dolayısıyla İHA tarafından verilen vazgeçme kararlarına göre değişmektedir. Ayrıca, ziyaret edilmeyen KB robotlarının ortak maliyetleri, KB robotlarının konumlarına ve veri verimliliklerine bağlıdır.

Tablo 3: Tablo, Şekil 4'de İHA'nın pil kapasitesine bağlı olarak ziyaret edilmeyen KB robotlarının endekslerini göstermektedir. "Hiçbiri", $B = 25$ veya $B = 30$ veya $B = 35$ veya $B = 40$ veya $B = 45$ veya $B = 50$ ise İHA'nın tüm KB robotlarını ziyaret ettiği anlamına gelir.

Strateji	B=5	B=10	B=15	B=20	B=25
İHA-Odaklı	1-6,8	1-4,6-8	1,2,4-8	1,2,4-8	1,2,4-8
GAMEDFS	1-6,8	1-3,6,8	2,4,6,8	6	Hiçbir
VEFVTS	1-6,8	1-3,6,8	2,4,6,8	6	Hiçbir
Strateji	B=30	B=35	B=40	B=45	B=50
İHA-Odaklı	1,2,4-8	1,2,4-8	1,2,4-8	1,2,4-8	1,2,4-8
GAMEDFS	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir
VEFVTS	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir

Tablo 4: Tablo, Şekil 4'de İHA'nın pil kapasitesine bağlı olarak ziyaret edilmeyen KB robotlarının toplam birleşik enerji tüketim maliyetini ve veri verimliliğini göstermektedir. "X", İHA odaklı stratejinin o pil kapasitesi için uygulanamaz olduğunu ifade etmektedir.

Strateji	B=5	B=10	B=15	B=20	B=25
İHA-Odaklı	153.6	114.9	67.1	67.1	67.1
GAMEDFS	110.2	71.7	13.6	0.7	0
VEFVTS	110.2	71.7	13.6	0.7	0

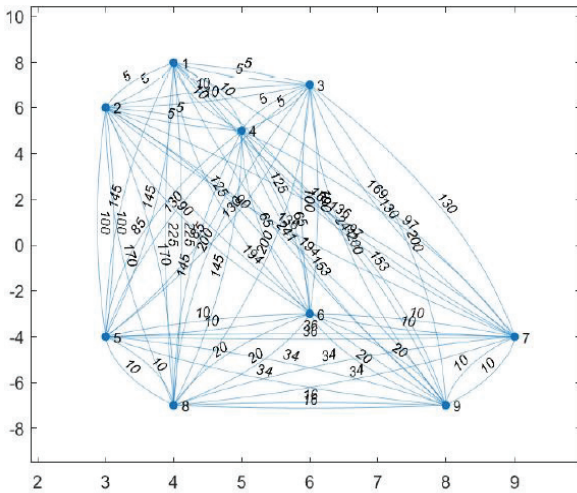
Strateji	B=30	B=35	B=40	B=45	B=50
İHA-Odaklı	67.1	67.1	67.1	67.1	67.1
GAMEDFS	0	0	0	0	0
VEFVTS	0	0	0	0	0

5.3. Dağıtık Topoloji (9-KB Robotlu Durum)

Şekil 6, 9 KB robotunun yerlerini ve aralarındaki bağlantıların ağırlıklarını göstermektedir. Bu senaryoda bir dağıtık topoloji incelenmektedir. (Bu topolojide KB robotları, diğer senaryolardaki topolojilere göre bu senaryoda robotların alana daha fazla dağıtıldığını gözlemlenmektedir; bu nedenle bu topoloji dairesel topoloji olarak ele alınmıştır).

KB robotlarının konumları $(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5, \xi_6, \xi_7, \xi_8, \xi_9) = ((4, 8), (3, 6), (6, 7), (5, 5), (3, -4), (6, -3), (9, -4), (4, -7), (8, -7))$ m'dir; burada $(0, 0)$, İHA'nın başlangıç konumudur. KB robotlarının veri verimlilikleri

$(\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6, \eta_7, \eta_8, \eta_9) = (0.95, 0.90, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70, 0.65, 0.60, 0.55)$ m olarak alınmıştır.



Şekil 6: Düzgünler, 9 KB robotunun konumlarını gösterir. Bir bağlantının ağırlığı, bağlantıyla birbirine bağlı iki düğüm arasındaki mesafenin karesini gösterir.

5.3.1. İHA-Odaklı Strateji

İHA Odaklı strateji uygulandığında, İHA sadece KB robot 6'yı ziyaret eder $(\xi_6 = (6, -3))$ ve $B = 13.41 \times C_{UAV}$ ise KB robotlarının tüm verilerini oradan toplar; bu sayede, İHA Odaklı strateji altında ziyaret edilmeyen her KB robotunun veri verimliliği ve tükettiği enerjinin toplam birleşik maliyetini aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$J(u, \pi^{UAV-O}) = 373.8 \times C_{CH}$$

$B = 10$ ise, İHA KB robot 5'e gidebilir; bu da KB robot 6'dan daha yakın bir başlangıç noktasına sahip olur ve şu sonucu verir:

$$J(u, \pi^{UAV-O}) = 850.3 \times C_{CH}$$

$B = 5$ ise, İHA odaklı strateji, hiçbir KB robotuna ulaşmadığı için uygulanamaz.

5.3.2. GAMEDFS

Bu alt bölümde, Şekil 6'daki yapılandırmada $B = 5$ ile $B = 50$ arasında değişen pil kapasiteleriyle ilgili literatürde önerilen GAMEDFS'nin performansına ilişkin sayısal sonuçları elde edilmektedir.

Şekil 7'de, GAMEDFS'i uygulayıp, $B = 40, 45, 50 \times C_{UAV}$ 'lı İHA tüm KB robotlarını ziyaret edebilir, yani

$$J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 0$$

Şekil 6'daki yapılandırmada, İHA'nın tüm KB robotlarını ziyaret etmesi için gereken enerji $E_{UAV}^{\pi}(u) = 39.97 \times C_{UAV}$ 'dir.

$B = 35 \times C_{UAV}$ 'lı İHA, KB robot 7 ve 9'u ziyaret etmeden gider, bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 17.5 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 34.11 \times C_{UAV}$ enerji tüketimi ile sonuçlanır.

$B = 30 \times C_{UAV}$ 'lı İHA, KB robot 7, 8 ve 9'u ziyaret etmeden gider ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 23.5 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 29.64 \times C_{UAV}$ sonucunu verir.

$B = 25 \times C_{UAV}$ 'lı İHA, KB robot 1, 3, 7, 8 ve 9'u ziyaret etmeden gider ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 32.5 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 23.71 \times C_{UAV}$ enerji tüketimi sonucunu verir.

$B = 20 \times C_{UAV}$ 'lı İHA, KB robot 3, 5, 6, 7, 8 ve 9'u ziyaret etmeden gider ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 118.30 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 19.18 \times C_{UAV}$ sonucunu verir.

$B = 15 \times C_{UAV}$ olan İHA yalnızca KB 2'yi ziyaret edebilir ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 127.1 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 13.41 \times C_{UAV}$ enerji tüketimi ile sonuçlanır.

$B = 10 \times C_{UAV}$ olan İHA yalnızca KB 5'i ziyaret edebilir ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 222.1 \times C_{CH}$ maliyeti ve $E_{UAV}^{\pi}(u) = 10.00 \times C_{UAV}$ ile sonuçlanır.

$B = 5 \times C_{UAV}$ olan İHA hiçbir KB robotunu ziyaret edemez ve bu da $J(u, \pi^{GAMEDFS}) = 303.3 \times C_{CH}$ maliyeti ile sonuçlanmaktadır.

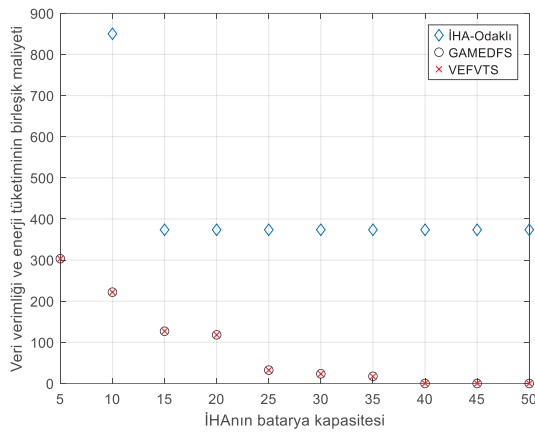
5.3.3. VEFVTS

VEFVTS, Şekil 6'daki konfigürasyonda $B = 5$ 'ten $B = 50$ 'ye kadar değişen tüm pil kapasitesi değerleri için GAMEDFS ile aynı kararları almıştır. Şekil 7'te VEFVTS, GAMEDFS ve İHA Odaklı Strateji altında veri verimliliği ve enerji tüketiminin toplam ortak maliyeti, $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar İHA'nın pil kapasitesine göre kıyaslanmıştır.

KB 6, tüm KB robotları arasında düşük veri verimliliğine sahip olmasına rağmen, İHA yine de $B = 20, 25, 30, 35$ için KB 6'yı ziyaret etmeyi tercih etmektedir çünkü KB 7, KB 8, KB 9'dan veri iletebilmektedir ve KB 1, KB 2, KB 3, KB 4 kümesine en yakın KB robotudur, bu da İHA'nın enerji tüketimi için çok önemlidir.

İHA yine de daha düşük pil kapasitelerine sahip KB 2 ve KB 5'i ziyaret etmeyi tercih etmektedir çünkü birçok KB robotu, İHA'nın daha düşük pil kapasiteleri için verilerini KB 2 veya KB 5 robotuna iletmektedir. Eğer $B = 15$ ise, İHA KB 2'yi KB 5'e tercih eder çünkü KB 2, KB 5'ten kökene daha uzaktır ve KB 1, KB 3 ve KB 4'ün verilerini iletir, bu da KB 6, KB 7, KB 8 ve KB 9'dan daha yüksek verimliliğe sahiptir. Eğer KB 2, KB

5'ten kökene çok daha yakın olsaydı, İHA toplam ortak maliyeti düşürmek için KB 5'i ziyaret etmeyi tercih edebilirdi. Tüm KB robotlarının veri verimliliklerinin eşit olması durumunda, GAMEDFS'nin Bölüm 3'te en uygun yöntem olduğu gösterilmiştir. $\eta_i = 1 - i/20$ formülüyle üretilen verimliliklerle, stratejilerin performansı hala KB robotlarının konumlarına daha fazla bağlıdır. Bir rota İHA'nın pil kapasitesi nedeniyle uygulanamıyorsa, ziyaret edilmeyen KB robotlarının veri verimliliklerinin toplamını en aza indirmenin önemini yitirmesi beklenebilir. Burada KB robotlarının veri verimlilikleri, KB robotlarının konumları gibi İHA'ların pil kapasitesinin zor kısıtı üzerinde bir etkiye sahip değildir.



Şekil 7: Şekil 6'daki 9 KB robotunun İHA-Odaklı strateji, GAMEDFS ve VEFVTS altında veri verimliliği ve enerji tüketiminin toplam ortak maliyeti, $B = 5 \times C_{UAV}$ 'dan $B = 50 \times C_{UAV}$ 'a kadar İHA'nın pil kapasitesine göre. İHA'nın enerji tüketimi ve KB robotlarının toplam ortak maliyeti için kullanılan birimler sırasıyla C_{UAV} ve C_{CH} 'dir. Bu sabitler, İHA ve KB robotlarının türüne bağlıdır.

5.3.4. Performans Kıyaslaması

Tablo 5, Şekil 6'te ziyaret edilmeyen KB robotlarının endekslerini sunmaktadır. Benzer şekilde, Tablo 6, ziyaret edilmeyen KB robotlarının toplam ortak enerji tüketimi maliyetini ve veri verimliliğini göstermektedir. Bu tablolardan, Şekil 5'te İHA'nın pil kapasitesine bağlı olarak bir KB robot alt kümesini ziyaret etmeden nasıl hareket etmeye karar verdiğini gözlemlenebilir. Ayrıca, ziyaret edilmeyen KB robotlarının tüketilen enerji maliyeti ve veri verimliliğinin toplamı, İHA'nın pil kapasitesine ve dolayısıyla İHA tarafından verilen vazgeçme kararlarına göre değişmektedir. Ayrıca, ziyaret edilmeyen KB robotlarının ortak maliyetleri, KB robotlarının konumlarına ve veri verimliliklerine bağlıdır.

Tablo 5: Tablo, Şekil 6'de İHA'nın pil kapasitesine bağlı olarak ziyaret edilmeyen KB robotlarının endekslerini göstermektedir. "Hiçbiri", $B = 40$, $B = 45$ veya $B = 50$ ise İHA'nın tüm KB robotlarını ziyaret ettiği anlamına gelir. "X", İHA odaklı Stratejinin o pil kapasitesi için uygulanamaz olduğu anlamına gelir.

Strateji	B=5	B=10	B=15	B=20	B=25
İHA-Odaklı	X	1-4,6-9	1-5,7-9	1-5,7-9	1-5,7-9
GAMEDFS	1-9	1-4,6-9	1,3-9	3,5-9	1,3,7-9
VEFVTS	1-9	1-4,6-9	1,3-9	3,5-9	1,3,7-9
Strateji	B=30	B=35	B=40	B=45	B=50
İHA-Odaklı	1-5,7-9	1-5,7-9	1-5,7-9	1-5,7-9	1-5,7-9
GAMEDFS	7-9	7,9	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir
VEFVTS	7-9	8,9	Hiçbir	Hiçbir	Hiçbir

Tablo 6: Tablo, Şekil 6'de İHA'nın pil kapasitesine bağlı olarak ziyaret edilmeyen KB robotlarının toplam birleşik enerji tüketim maliyetini ve veri verimliliğini göstermektedir. "X", İHA odaklı stratejinin o pil kapasitesi için uygulanamaz olduğunu ifade etmektedir.

Strateji	B=5	B=10	B=15	B=20	B=25
İHA-Odaklı	X	850.3	373.8	373.8	373.8
GAMEDFS	303.3	222.1	127.1	118.3	32.5
VEFVTS	303.3	222.1	127.1	118.3	32.5
Strateji	B=30	B=35	B=40	B=45	B=50
İHA-Odaklı	373.8	373.8	373.8	373.8	373.8
GAMEDFS	23.5	17.5	0	0	0
VEFVTS	23.5	17.0	0	0	0

5.4. Farklı Topolojilerde Genel Karşılaştırması

Bu altbölümde, 3 farklı topolojilerdeki robotik kablosuz sensör ağındaki KB robotlarını veri toplamak için ziyaret eden sınırlı pil kapasitesine sahip İHA'nın performansı incelenmektedir.

6-KB robotlu dairesel topolojide İHA bataryasındaki enerji seviyesine göre minimum maliyeti hem GAMEDFS hem de bu makalede sunulan VEFVTS ile yakalamakta ve bu maliyet en fazla $180.20 \times C_{CH}$ olmaktadır.

8-KB robotlu dikdörtgensel topolojide İHA bataryasındaki enerji seviyesine göre minimum maliyeti hem GAMEDFS hem de bu makalede sunulan VEFVTS ile yakalamakta ve bu maliyet en fazla $110.15 \times C_{CH}$ olmaktadır.

9-KB robotlu dağıtık topolojide İHA bataryasındaki enerji seviyesine göre minimum maliyeti hem GAMEDFS hem de bu makalede sunulan VEFVTS ile yakalamakta ve bu maliyet en fazla $303.30 \times C_{CH}$ olmaktadır.

Buradan şu çıkarımlar yapılabilir.:

- İHA'nın toplam maliyeti 8-KB robotlu dikdörtgensel topolojide 6-KB robotlu dairesel topolojiye göre biraz daha azdır.
- 9-KB robotlu dağıtık topolojide ise diğer topolojilere göre daha dağıtık bir topolojiye sahip olduğu için ziyaret edilmeyen robotların veri iletme maliyeti diğer topolojilere göre çok daha fazladır (6-KB robotlu topolojiye göre 2 kattan fazla, 8-KB robotlu topolojiye göre 3 kattan fazla).
- Her üç topolojide de VEFVTS İHA'nın değişen batarya (pil) seviyesine göre en az maliyeti yakalamaktadır.

6. Sonuçlar

Bu makale, KB robotlarının enerji verimliliğini göz önünde bulundurarak, kısıtlı pil kapasitesine sahip İHA kullanan kümelenmiş bir robot ağında veri toplama problemine odaklanmaktadır. Tek bir KB robotu, her kümedeki diğer robotlara görevler atamaktadır. KB robotu atanmış görevlerini tamamladığında, analiz ve birleştirme için veri toplamaktadır. Daha sonra üretilen verileri İHA'ya gönderir. İHA, pil kapasitesi ve konumu gibi faktörlere bağlı olarak tüm KB robotlarını veya belirli bir seçimi ziyaret eder. Ziyaret edilmeyen her KB robotu, verilerini belirli bir KB robotuna iletir. İHA'nın amacı, toplam enerji tüketimini en aza indirmektir.

Bu problemi GSP olarak ele almak için, bu çalışma başlangıçta İHA'nın pil kapasitesindeki kısıtlamaları ortadan kaldırır. Daha sonra, İHA, İHA'nın pil kapasitesinin getirdiği sınırlamayı göz önünde bulundurarak bu problem ele alınmaktadır. Pil kapasitesi her KB robotunu ziyaret etmek için yeterli değilse, enerji tüketiminin pilin sınırları içinde kalmasını sağlamak için belirli KB robot gezilerini seçici olarak atlar. Durumu değerlendirmek ve en uygun eylem planını belirlemek için yenilikçi bir yaklaşım gösterilmiştir. Daha sonra, önerilen yaklaşım, farklı küme miktarları dikkate alınarak literatürde daha önce yayınlanmış tekniklerle karşılaştırılır. Yaklaşımımız, nicel sonuçlarla doğrulandığı gibi, KB robotlarının değişen sayıları, İHA pil kapasitesi dahil olmak üzere birçok yapılandırma önceki metodolojilerden daha iyi performans gösterir. İHA, pil kapasitesi ve konumlar gibi faktörleri dikkate alarak KB robotlarının toplam enerji tüketimini en iyileştirir.

Bu makalede İHA'nın farklı topolojilerdeki robotik ağlardaki KB robotları en az maliyetle ziyaret ettiği gösterilmiştir.

Bu makale, çevresel belirsizlikleri değerlendirerek ve öngörülen belirsizlik seviyelerine göre İHA yol planlamasını yaparak önerilen çerçeveyi genişletmeyi amaçlamaktadır. Sunulan metodolojiyi geliştirebilecek gelecekteki bir diğer araştırma alanı da kablosuz güç aktarımıdır (KGA). Bu nedenle, yakın zamandaki stratejimiz, KGA bilgisini karar alma sürecine dahil etmek için önerilen politikayı iletmezdır. Gelecekte ayrıca, enerji eksikliklerinden kaynaklanan İHA arızalarını azaltma problemini araştırmaya öncelik verecektir.

Bu makalede probleme pratik bir yaklaşım hedeflenmiştir. Bu nedenle bu çalışmada literatürdeki GAMEDFS ve bazı klasik yaklaşımlar ile kıyaslama yapılmıştır. Diğer yandan öğrenme tabanlı yöntemlerle örneğin pekiştirmeli öğrenmenin ise çok yüksek bir hesaplama karmaşıklığı olduğu için bu makalede karşılaştırma amaçlı eklenmemiştir ama gelecekteki çalışmalarda bu yöntemlerin de uygulanabileceği durumlar ve problemler incelenecektir.

7. Kaynaklar

- [1] P. Kamalinejad, C. Mahapatra, Z. Sheng, S. Mirabbasi, V.C.M. Leung, Y.L. Guan, "Wireless Energy Harvesting for the Internet of Things", IEEE Communications Magazine, vol. 53, 2015, pp. 102-108.
- [2] C.W. Tsai, T.P. Hong, G.N. Shiu, "Metaheuristics for the lifetime of WSN: A review", IEEE Sensor Journal, vol. 16, 2016, pp. 2812-2831.
- [3] Y. Zhang, L. Sun, H. Song, X. Cao, "Ubiquitous WSN for Healthcare: Recent Advances and Future Prospects", IEEE Internet of Things Journal, vol. 1, no. 4, Aug. 2014.
- [4] C. Gomez, J. Paradells, "Urban Automation Networks: Current and Emerging Solutions for Sensed Data Collection and Actuation in Smart Cities", Sensors 2015, vol. 15, pp. 22874-22898.
- [5] Ghosh P., Gasparri A., Jin J., Krishnamachari B. (2019) Robotic Wireless Sensor Networks. Mission-Oriented Sensor Networks and Systems: Art and Science. Studies in Systems, Decision and Control, vol 164. Springer.
- [6] L. Xu, R. Falcon, A. Nayak, I. Stojmenovic, "Servicing wireless sensor networks by mobile robots", IEEE Communications Magazine, vol.50, no.7, pp.147-154, July 2012.
- [7] X. Mkhwanazi, L. Hanh, E. Blake, "Clustering between Data Mules for Better Message Delivery", WAINA 2012, 26-29 March 2012, pp.209- 214.
- [8] X. Liu, T. Wang; W. Jia; A. Liu; K. Chi, "Quick Convex HullBased Rendezvous Planning for Delay-Harsh Mobile Data Gathering in Disjoint Sensor Networks", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 51, no. 6, Dec. 2021, pp. 3844-3854.
- [9] M. Huang, A. Liu; N.N. Xiong; T. Wang, A. V. Vasilakos "A Low Latency Communication Scheme for Mobile Wireless Sensor Control Systems", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 49, no. 2, Feb. 2019.
- [10] C.-Y. Chang, G.-Jong Yu, TL Wang, and C.-Yu Lin. 2014. "Path construction and visit scheduling for targets by using data mules.", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 44, 10 (2014), 1289-1300.
- [11] E. L. Lawler, Jan Karel Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan, D. B. Shmoys, "The Traveling Salesman Problem: A Guided

Özgeçmişler



Ömer Melih Gül (SIEEE'17, MIEEE'21, SMIEEE'24), 2012, 2014 ve 2020 yıllarında Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ), Ankara, Türkiye Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden sırasıyla lisans, yüksek lisans ve 2020 yıllarında doktora derecelerini almış ve aynı bölümde araştırma görevlisi olarak çalışmıştır. Araştırma ilgi alanları arasında yapay zeka/makine öğrenimi uygulamaları, kablosuz güvenlik, ağ oluşturma, planlama, IoT, İHA, robotik ve blok zinciri yer almaktadır. 50'den fazla makale ve 4 kitap bölümünün ortak yazarıdır. IEEE Computer Society tarafından verilen 2019 Lance Stafford Larson Outstanding Student Paper Award ödülünde üçüncülük ödülüne layık görülmüştür. Ayrıca 2021 IEEE Yükselen Yıldızlar Küresel Konferansı'ndaki poster yarışmasında üçüncülük ödülüne layık görülmüştür. 2022 yılında Kanada Ottawa Üniversitesi Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimleri Fakültesi'nde doktora sonrası araştırmacı olarak çalışmıştır. 2022 yılında 48. Wireless World Research Forum'da (WWRF) en iyi bildiri ödülünün sahibi oldu. 2023 yılında, 4 Yüksek Lisans tezini yönettiği ve 1 tezin eş danışmanlığını yaptığı Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, Türkiye'deki Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde Yardımcı Doçent olarak çalıştı. Mart 2024'ten bu yana, 1 Doktora ve 4 Yüksek Lisans öğrencisine danışmanlık yaptığı İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), İstanbul, Türkiye'deki Bilişim Enstitüsü'nde Doçent olarak çalışmaktadır. Ayrıca, İTÜ Araştırma Dekanlığı'nda Büyük Veri Ofisi Koordinatörü olarak görev yapmaktadır. IEEE Open Journal of Computer Society, (Elsevier) Sustainable Computing: Informatics and Systems, (Springer-Nature) Scientific Reports, (Springer) Cluster Computing, (Springer) Wireless Networks, (Springer) Telecommunication Systems, ve International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence dergilerinde Editör olarak görev yapmaktadır. Eş başkan olarak, Estonya'daki IEEE Fog and Mobile Edge Computing (FMEC) 2023'te CIEAI çalıştayı düzenledi. Ayrıca, IEEE iThings 2024'te Tanıtım Başkanı oldu. EAI International Conference on Robotic Sensor Networks (ROSENET 2023, ROSENET 2024) konferansını iki yıl ardarda genel başkan olarak düzenledi.



Aydan M. Erkmen, 1978 yılında Boğaziçi Üniversitesi'nden Elektrik Mühendisliği alanında lisans derecesi, 1981 yılında ABD'de Philadelphia'da Drexel Üniversitesi'nden Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği alanında yüksek lisans derecesi ve 1989 yılında Fairfax'ta George Mason Üniversitesi'nden Bilişim Teknolojileri ve Mühendisliği alanında doktora derecesi aldı. Prof. Dr. Aydan Müşerref Erkmen, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ)'de Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak çalıştı. Bir devlet üniversitesi olan ODTÜ'de 2914 sayılı Yükseköğretim Personel Kanunu uyarınca 01 Eylül 1989 - 13 Ocak 1992 tarihleri arasında Yardımcı Doçent, 14 Ocak 1992 - 22 Mart 2004 tarihleri arasında Doçent ve 23 Mart 2004 - 17 Temmuz 2023 tarihleri arasında Profesör unvanıyla çalıştı. Prof.Dr. Aydan Müşerref Erkmen, 17 Temmuz 2023 tarihinde ODTÜ'deki görevinden emekli olmuştur. Araştırma ilgi alanları arasında mekatronik tasarım, arama kurtarma ve gözetleme robotiği, mobil sensör ağları, biyomimetik manipülasyon, yapılandırılmamış ortamlarda biyolojik olarak ilham edilen kontrol ve belirsizlik modellemesi yer almaktadır. IEEE Robotics and Automation Society (RAS) Yönetim Kurulu'nda görev yapmıştır; 2000-2003 yılları arasında IEEE RAS başkan yardımcılığı yapmıştır; Springer Verlag-Paladyn. Journal of Behavioral Robotics dergisinin editörüdür. IEEE Robotics and Automation Dergisi'nin yayın kurulunda 3 yıl görev yapmıştır. Türkiye Bilimsel ve Teknoloji Araştırma Kurumu'nda (TÜBİTAK) endüstriyel fonlardan sorumlu başkan yardımcısı olarak 4 yıl görev yapmıştır; 2007-2009 yılları arasında ODTÜ Mühendislik Fakültesi Dekan Yardımcılığı yapmıştır.

Grup Seyreklik ve Düşük Dereceli Modellerin Uzlaştırılmasıyla Çarpımsal Gürültünün Giderilmesi

Removal of Multiplicative Noise via Reconciliation of Group Sparsity and Low-Rank Models

Mehmet Demir¹

 0000-0002-3710-9515

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep Türkiye
mehmetdemir@gantep.edu.tr

Özet

Çarpımsal gürültü (benek gürültüsü olarak da bilinir) modelleri, sentetik açıklıklı radar ve sonar sistemleri ile ultrason ve lazer görüntüleme gibi koherent görüntüleme sistemlerinin analizinde merkezi bir role sahiptir. Bu gürültü türü, görüntü üzerinde bölümlene (segmentasyon) veya hedef tanıma gibi algoritmaların uygulanmasını önemli ölçüde zorlaştırır. Söz konusu algoritmaların etkili bir şekilde çalışabilmesi için öncelikle benek gürültüsünün giderilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, ilk aşamada homomorfik dönüşüm kullanılarak çarpımsal gürültü, toplamsal gürültüye dönüştürülmüştür. Ardından, çarpımsal gürültüye uygun istatistiksel yöntemlerle seçilen benzer yamalar üzerinde grup seyreklilik ve düşük dereceli modellerin entegrasyonuna dayalı yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yöntemde, benzer yamalar; uyarlanabilir sözlük seçimi, seyrek katsayıların öğrenilmesi ve düşük ranklı modellerin eğitimi amacıyla kullanılmıştır. Sentetik ve gerçek görüntülerle gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve karşılaştırmalar, önerilen benek gürültüsü giderme yönteminin etkinliğini kanıtlamıştır.

Anahtar kelimeler: Benek gürültü, grup seyreklilik, düşük-dereceli model.

Abstract

Multiplicative noise (also known as speckle noise) models play a central role in the analysis of coherent imaging systems such as synthetic aperture radar and sonar, as well as ultrasound and laser imaging. This type of noise significantly complicates the application of algorithms like image segmentation or target recognition on images. For these algorithms to work effectively, the speckle noise must first be removed. In this study, we first used homomorphic transformation to convert multiplicative noise into additive noise. Then, we proposed a novel approach based on the integration of group sparsity and low-rank models, using similar patches selected through statistical methods appropriate for multiplicative noise. In the proposed method, similar patches were utilized for adaptive dictionary selection, learning sparse coefficients, and training low-rank models. Experimental results and comparisons on synthetic and real images demonstrate the effectiveness of our proposed speckle noise reduction method.

Keywords: Speckle noise, group sparsity, low-rank model.

1. Giriş

Sentetik açıklıklı radar ve sonar, ultrason ve lazer görüntüleme sistemleri, doğaları gereği tutarlı (coherent) saçılma olayları nedeniyle oluşan görüntülerde benek gürültüsü meydana gelmektedir. Bu gürültü türü, görüntü analizi ve bilgi çıkarma algoritmalarının uygulanmasını zorlaştırmakta ve istenen sonuçların elde edilmesini engellemektedir [1,2]. Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) sistemlerinde benek gürültüsünün azaltmak için, azimut spektral bant genişliğinin bir kısmından elde edilen birden fazla görüntünün uyumsuz ortalaması alınarak gürültü varyansı azaltılır. Çok bakışlı SAR işleme, bu yöntemle örnek olarak verilebilir. Bu, kullanılan ilk yöntemlerden biridir ve SAR görüntüsü oluşturulurken çarpımsal gürültünün giderilmesi hedeflenir. Ancak bu yöntem, gürültüyü azaltırken görüntünün bulanıklaşmasına neden olmaktadır. Diğer bir klasik yöntem ise, görüntüler oluşturulduktan sonra istatistiksel teknikler kullanılarak beneklerin uzamsal alanda filtrelenmesine dayanır. Lee filtresi gibi yöntemler, bu istatistiksel yaklaşımlar kapsamında değerlendirilmiştir [3]. Benek giderme işlemi, yerel görüntü istatistiklerine göre minimum-ortalama-kare-hatası (MMSE) veya maksimum a posteriori (MAP) kriterleri temel alınarak gerçekleştirilir. Bu süreçteki performans büyük ölçüde yerel pencere parametrelerinin seçimine bağlıdır [1,4].

Öncü çalışmalarda, kısmi diferansiyel denklemlere dayanan toplam varyasyon (TV) tabanlı yöntemler ve bunların geliştirilmiş versiyonları, çarpımsal gürültünün neden olduğu gürültüleri gidermede ve keskin kenarları korumada başarılı sonuçlar vermiştir [5,6]. TV tabanlı yaklaşımlarla çözülen benek gürültü problemlerinde, çarpımsal Gama gürültüsü içeren görüntüleri iyileştirmek için I-divergence veri uyumu terimi ve TV veya lokal olmayan ortalamalar (NL-means) gibi kenar koruyucu düzenleştiriciler kullanılmıştır. Bu yöntem, genellikle Poisson gürültüsü için kullanılan I-divergence teriminin Gama gürültüsü için de uygun olduğunu savunarak TV veya NL-means gibi tekniklerle birleştirir [6]. Ayrıca, TV'nin kullanıldığı başka bir çalışmada [5], çarpımsal gürültüyü gidermek için logaritmik dönüşümle toplamsal modele dönüştürülen bir yaklaşım önerilmiştir. Değişken ayırma ve artırılmış Lagrangian kullanılarak geliştirilen MIDAL (Multiplicative Image Denoising by Augmented Lagrangian) algoritması, TV düzenlemesiyle hızlı ve etkili sonuçlar sunmuştur.

Benek gürültüsü, sinyal kaynaklı dalgalanmalardan oluşan ve doğası gereği çarpımsal karaktere sahip bir gürültü türüdür. Daha önceki çalışmalar, bu tür gürültünün bastırılmasında yerel olmayan (Nonlocal-NL) ortalamalar yaklaşımının etkili olduğunu göstermiştir [7]. NL-means yönteminin kullanıldığı araştırmalarda, yerel olmayan tekniklerin genişletilmesinin, görüntü çözünürlüğünü korurken benek gürültüsünü baskılamada esnek bir yöntem sunduğu vurgulanmaktadır. Bu yöntem, gürültüyü azaltmak için piksel benzerliğini temel alan genişletilmiş komşuluk bölgeleri oluşturur ve bu bölgelerdeki pikselleri ağırlıklı maksimum olabilirlik (weighted maximum-likelihood) tahminiyle işler [7]. Geleneksel NL-means algoritması, piksel benzerliğini ilgili piksellerin etrafındaki yamaların Öklid mesafesi üzerinden tanımlar. NL-means temelli bir başka çalışmada ise gürültünün istatistiksel dağılım modeline dayanan daha genel bir benzerlik ölçütü önerilmiştir. Bu yaklaşım, gürültü giderme sürecini ağırlıklı maksimum olabilirlik tahmini (Weighted Maximum Likelihood Estimation-WMLE) problemine dönüştürerek ağırlıkların veriye uygun şekilde belirlenmesini sağlar. Böylece yöntem, yalnızca toplamsal Gauss gürültüsüne değil, ultrason, lazer veya SAR görüntülerindeki çarpımsal benek gürültüsü gibi farklı gürültü türlerine de uyarlanabilmektedir [8]. Bunun yanı sıra, bir diğer çalışmada SAR-BM3-D adı verilen yeni bir algoritma önerilmiştir. Bu algoritma, toplamsal Gauss gürültüsü için oldukça başarılı olan BM3-D yöntemini temel almakla birlikte, SAR gürültüsünün çarpımsal yapısına uyum sağlamak için temel adımlarını önemli ölçüde değiştirmektedir. Standart BM3-D'de kullanılan Öklid mesafesi yerine, [8]'de olduğu gibi SAR verilerinin istatistiksel özelliklerine daha uygun olasılık temelli bir benzerlik ölçüsü kullanılarak görüntü blokları gruplandırılmıştır. Bu sayede blok eşleştirme işlemi daha doğru bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir [9]. Bu çalışmada, daha önce bahsedilen yöntemlere paralel olarak, benek gürültüsünün istatistiksel dağılım modeline dayalı bir benzerlik kriteri kullanılarak yamalar seçilmiştir.

Literatürde ayrıca, SAR ve ultrason gibi görüntülerdeki benek gürültüsünü azaltmak amacıyla makine öğrenmesine dayalı çeşitli yöntemler geliştirilmiş ve bu yöntemler umut vaat eden sonuçlar sunmuştur. Öne çıkan yaklaşımlar arasında düşük rank temsili yöntemler [10-13], seyrek kodlama teknikleri [14,15] ve derin evrişimli sinir ağları (CNN) [16-20] yer almaktadır.

Örneğin, [10]'de benzer görüntü yamalarının gruplanmasıyla düşük rank kısıtlaması uygulanmış ve performansı artırmak için öz-yinelemeli bir süreç kullanılmıştır. Güncel olan başka bir çalışmada, SAR görüntülerindeki benek gürültüsünü azaltmak için Fisher-Tippett dağılımından türetilen bir veri uyum terimini ve düşük ranklı yaklaşımları iyileştiren nükleer normdan Frobenius normun çıkarılmasıyla elde edilen regülerizasyon terimini kullanan yeni bir yöntem önermişlerdir [12]. [13]'de ise geleneksel düşük ranklı yöntemlerin aksine, Xu ve arkadaşları, bu modellerin gürültü olarak ele alıp attığı artık kısımdan değerli kenar bilgilerini çıkarmaya odaklanan yenilikçi bir SAR benek giderme yaklaşımı sunmuşlardır. Seyrek temsile (sparse representation) dayalı POTDF yönteminde [15] ise, görüntü yamalarının sıralanmasıyla iki aşamalı bir filtreleme gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada KSVD [21] algoritmasıyla aşırı tam bir sözlük öğrenilmiş, ardından 2-B dalgacık dönüşümüyle detaylı filtreleme yapılmıştır. Ancak bu yöntem, tüm görüntü için optimal olmayan kodlamalara yol açabilmekte ve aşırı yumuşatılmış sonuçlar üretebilmektedir.

Derin öğrenme tabanlı çözümlerden SAR-CNN [16], 17 katmanlı bir mimariyle artık gürültüyü logaritmik dönüşüm kullanarak bastırmayı hedeflemektedir. [17]'de homomorfik dönüşüm yerine, Öklid mesafesi ve toplam varyasyon kısıtlamalarıyla eğitilmiş uçtan uca bir CNN modeli önerilmiştir. [18]'de ise CNN'ye entegre edilen kılavuz filtreleme mekanizması sayesinde benek gürültüsünün etkili şekilde giderilmesi sağlanmıştır. Bu alandaki daha güncel yaklaşımlar, özellik çıkarımını zenginleştirmeye odaklanmıştır. Örneğin, Liu ve arkadaşları tarafından geliştirilen MFAENet [19], çok ölçekli bir mimari ve deformasyon olabilir evrişim kullanarak görüntü özelliklerine esnek bir adaptasyon sağlamıştır. Aynı araştırma ekibinin bir diğer çalışması olan LG-DBNet ise, CNN'lerin yerel ve öz-dikkat mekanizmalarının küresel modelleme yeteneklerini çift dallı bir ağ yapısında birleştirerek detay koruma performansını artırmayı hedeflemiştir [20]. Bu yöntemler, sentetik verilerde geleneksel tekniklere kıyasla üstün performans sergilemekle birlikte, denetimli öğrenmeyle eğitildikleri ve gerçek uygulamalardaki bilinmeyen gürültü dağılımlarına tam uyum sağlayamadıkları için bazen ideal olmayan sonuçlar verebilmektedir.

Yapılan çalışmalarda, yerel olmayan öz-benzerlik (Nonlocal self-similarity) özelliği, ortak seyreklik ve grup seyrek kodlama gibi farklı seyreklik modelleriyle sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak, mevcut yerel olmayan öz-benzerlik temelli seyreklik modelleri ya aşırı kısıtlayıcıdır (örneğin, tüm seyrek kodların aynı desteği paylaşmasını şart koşar) ya da fazla genel bir yaklaşım benimser (örneğin, yalnızca grup katsayıları üzerinde düz seyreklik uygular) [22]. Literatürdeki mevcut yöntemler, gürültü bastırma ve detay koruma arasındaki dengeyi kurmakta yetersiz kaldığı anlaşılmıştır. Bu durum, gerçek görüntülerin modellenmesinde bu yöntemlerin etkinliğini sınırlandırmaktadır [22]. Bu çalışmada, grup seyrek kodlama ile ortak seyreklik arasındaki boşluğu kapatmak amacıyla, [22] numaralı kaynakta önerilen yerel olmayan öz-benzerlik tabanlı seyreklik modeli, benek gürültüsünün giderilmesi için kritik bazı değişiklikler yapılarak uyarlanmıştır. Önerilen model, benzer yama gruplarının her biri için sözlük-alanı katsayılarının hem seyreklik hem de düşük ranklılık özelliklerini eş zamanlı olarak kullanmaktadır.

2. Problem Formülasyonu

SAR, ultrason ve lazer görüntüleme sistemlerinde karşılaşılan temel problemlerden biri olan benek gürültüsünün giderilmesi, bozulmuş gözlem verisi y 'den orijinal gürültüsüz görüntü x 'in elde edilmesi sürecini ifade etmektedir. Bu sistemlerde, benek gürültüsü n 'nin istatistiksel karakteristiği genellikle çarpımsal gürültü modeliyle tanımlanmaktadır. Bozulmuş görüntü y ile arzu edilen görüntü x arasındaki matematiksel ilişki, temel olarak şu şekilde modellenebilir:

$$y = x \odot n \quad (1)$$

buradaki $\odot$ işareti Hadamard çarpımını simgeler. Benek gürültüsünün şiddeti Gamma dağılımını takip eder. Böylece, gürültü matrisindeki her bir elemanın olasılık yoğunluk fonksiyonu şu şekilde tanımlanır:

$$p(n) = \frac{L^L n^{L-1}}{\Gamma(L)} \exp(-nL), \quad n \geq 0 \quad (2)$$

bu denklemden, L ve $\Gamma(\cdot)$ parametreleri sırasıyla eşdeğer bakış sayısını ve Gamma dağılım fonksiyonunu ifade etmektedir. L

parametresinin belirlenmesinde, [23] numaralı referansta önerilen denetimsiz yöntem kullanılabilir. L değerinin doğrudan tespiti, gerçek SAR veya ultrason görüntülerinde oldukça zordur. Çarpımsal gürültü modelini toplamsal gürültü formuna dönüştürebilmek amacıyla, öncelikle (1) numaralı denklemin logaritmik dönüşüme tabi tutulması, diğer bir ifadeyle homomorfik dönüşüm uygulanması gerekmektedir. Dönüşüm sonrası (1) numaralı denklem aşağıdaki duruma gelir:

$$\ln(y) = \ln(x) + \ln(n) \quad (3)$$

burada $\ln(n)$ beklenen değeri sıfırdan farklı olduğu için, (3) numaralı denklemde bir sapma düzeltme yapılması gerekmektedir.

$$y_c = \ln(y) - \psi^0(L) + \ln(L) = x_c + n_c \quad (4)$$

belirtilen denklemde $\psi^r(\cdot)$, r mertebeli polygamma fonksiyonunu ifade etmektedir. Logaritmik dönüşüm sonrası x_c ve n_c , (sırasıyla $\ln(x)$ ve $\ln(n)$ 'nin sapma düzeltmeli değerleri) homomorfik filtrelemede kullanılır. Burada $\psi^{(0)}$ digama fonksiyonudur ve gürültünün logaritmik uzaydaki ortalamasını sıfıra yaklaştırır. Düzeltilmiş gürültü n_c 'nin varyansı $\sigma_n^2 = \psi^{(1)}(L)$ trigama fonksiyonu olur. Sapma düzeltmeli gürültünün dağılımı L değerinin artması durumunda Gauss dağılımına yakınsamaktadır. Böylece, n_c elimine edilebilecek Gauss dağılımına sahip bir toplam gürültü olarak alınabilir.

3. Yama Gruplama

Önerilen yöntemde, daha önce de bahsettiğimiz gibi çarpımsal gürültülü görüntüler için uygun olan istatistiksel bir metotla benzer yamalar seçilir [8]. Görüntü, birbiriyle kesişen küçük yamalara bölünür. Görüntülerdeki doğal "kendine benzerlik" özelliğinden faydalananarak, her bir referans yama için ona en çok benzeyen diğer yamalar bulunur ve bir grup oluşturulur. İki yama (x_i ve x_j) arasındaki benzerlik, standart Öklid mesafesi yerine, doğası gereği SAR ve ultrason gibi benek gürültülü görüntülerin istatistiksel özelliklerine daha uygun olan şu mesafe ölçütü ile hesaplanır [8]:

$$d(x_i, x_j) = \sum_{k=1}^{p^2} \ln \left[\sqrt{\frac{x_i(k)}{x_j(k)}} + \sqrt{\frac{x_j(k)}{x_i(k)}} \right] \quad (5)$$

burada p^2 , yamanın piksel sayısıdır. Bu ölçüt, logaritmik dönüşüm uygulanmış görüntünün üssü alınarak (yani orijinal yoğunluk uzayında) hesaplanır.

4. Düşük-Rank Düzenileştirmeli Grup Seyrek Kodlama Optimizasyon Modeli

Benek gürültü giderilmesi için önerilen yeni yaklaşımda her bir yama grubu X_i için temel amaç, çarpımsal gürültüyü temizlemektir. Grup seyrekleştirme kodlama ile düşük-ranklı modellerin uzlaştırılmasıyla önerilen yaklaşım, bunu her grup için hem seyrekliliği hem de düşük-ranklılığı aynı anda kullanarak yapar. Modelin genel optimizasyon modeli aşağıdaki şekildedir [22]:

$$(\hat{x}, \{\hat{A}_i\}, \{\hat{B}_i\}) = \arg \min_{x, \{A_i\}, \{B_i\}} \frac{1}{2\sigma_n^2} \|y_c - Hx\|_2^2 + \lambda \sum_i \|A_i\|_1 + \tau \sum_i \|B_i\|_* \quad (6)$$

bizim yaklaşımımızda bu problem, her yama grubu için ayrı ayrı ve daha basit bir formda çözülür. H matrisi gürültü giderme problemlerinde birim matris olarak alınır. Bir yama grubu X_i için hedef, onu bir sözlük D_i ve seyrekleştirme katsayıları matrisi A_i cinsinden ifade etmektir: $X_i \approx D_i A_i$. Önerdiğimiz yöntem, bu ifadeye iki ceza terimi daha ekler:

1. Seyreklik: Katsayı matrisi A_i 'nin elemanlarının çoğunun sıfır olması istenir. Bu $\lambda \sum_i \|A_i\|_1$ terimi ile sağlanır.
2. Düşük ranklılık: A_i matrisinin kendisinin düşük ranklı olması istenir. Yani, A_i 'nin sütunları (her bir yamanın seyrekleştirme katsayıları) birbiriyle yüksek oranda ilişkili olmalıdır. Bu $\tau \sum_i \|B_i\|_*$ terimi ile sağlanır, burada B_i , A_i 'nin düşük ranklı bir yaklaşımıdır ve $\|\cdot\|_*$ nükleer normu ifade eder.

Bu iki hedefi birleştiren ve çözümü kolaylaştıran optimizasyon problemi şöyledir:

$$\{\hat{A}_i, \hat{B}_i\} = \arg \min_{A_i, B_i} \frac{1}{2} \|X_i - D_i A_i\|_F^2 + \lambda \sum_i \|A_i\|_1 + \frac{1}{2\eta} \|A_i - B_i\|_F^2 + \tau \sum_i \|B_i\|_* \quad (7)$$

burada X_i matrisi grup yamaları göstermektedir ve görüntüden benzer yamaların çıkarılıp grup oluşturulmasını $X_i = R_i y_c$ denklemiyle formalize edebiliriz. Ayrıca, $\|\cdot\|_F$ Frobenius normu ifade eder.

5. Problemin Çözümü

Ortaya çıkan bu karmaşık problem, değişkenleri ayrı ayrı optimize eden sıralı minimizasyon ("alternating minimization") yöntemiyle çözülebilir.

- a) Sözlük Öğrenme (D_i): İstatistiksel yöntemle oluşturulan her yama grubu için Temel Bileşenler Analizi (PCA) uygulanarak adaptif bir sözlük (yani D_i) öğrenilir. Bu, oluşturulan yama grubunun kovaryans matrisinin özvektörlerini bulmakla eşdeğerdir.
- b) Düşük Ranklı Yakınsama (B_i): A_i sabitken, B_i için problem basitleşir. Bu alt problemin çözümü, A_i 'nin Tekil Değer Ayrışımı (SVD) ve ardından tekil değerlere yumuşak eşikleme (soft-thresholding) uygulanmasıyla bulunur.
 - $A_0 = U_S \Sigma V^T$ (SVD ayrışımı)
 - Eşiklenmiş tekil değerler: $\hat{\Sigma} = \text{soft}(\Sigma, \text{threshold})$
 - $\hat{B}_i = U_S \hat{\Sigma} V^T$
- c) Seyrek Katsayıları Bulma (A_i): D_i ve B_i sabitken, A_i için problem çözülür. Bu standart bir "soft-thresholding" işlemiyle yapılır. Ayrıca, daha kaliteli gürültüden arındırabilmek için seyrekleştirme teriminin önüne ağırlık katsayısı eklenir [1]. Bu çalışmada, iyi sonuçlar elde edebilmek için ağırlık katsayısı seyrekleştirme terimine eklenmiştir. Oluşan yeni terim şu şekildedir: $\sum_i \|W_i \odot A_i\|_1$. Ağırlık değişkeni hem gürültü seviyesine hem de katsayıların varyansına göre adaptif bir şekilde ayarlanır.

$$W_i(k) = \frac{c \cdot 2\sqrt{2}\sigma_i^2}{\lambda_k}, \quad \lambda_k = \text{eigenvalues}$$

Tüm yamalar için bu işlemler yapıldıktan sonra gürültüsü azaltılmış yamalar elde edilmiş olur.

- Her bir yamanın nihai gürültüsüz hali, ait olduğu farklı gruplarda elde edilen sonuçların ortalaması alınarak bulunur:

$$x_c = (\sum_{i=1}^K R_i^T R_i)^{-1} (\sum_{i=1}^K R_i^T D_i A_i) \quad (8)$$

burada R_i matrisi benzer yamaların bulunarak düşük ranklı matris oluşturma işlemini tanımlar. R_i^T matrisi elde edilmiş temiz düşük ranklı matristen yamaların tekrar yerine yerleştirilme işlemini formülüz eder.

- Bu ortalaması alınmış yamalar, üst üste bindikleri bölgelerde tekrar ortalamaları alınarak tam bir görüntü oluşturulur.
- Son olarak, ilk adımdaki logaritmik dönüşümü tersine çevirmek için üstel dönüşüm (exponential transform) uygulanır ve nihai gürültüsüz görüntü elde edilir.

$$x = \exp(x_c) \quad (9)$$

Bu adımlar neticesinde grup seyrekliliğin ve düşük ranklılığın güçlü yönleri birleştirilip uzlaştırılarak yeni bir çarpımsal gürültü giderme yaklaşımı ortaya çıkarılmıştır. Grup seyreklilik ve düşük ranklılık doğal görüntülerin yapısında bulunan özelliklerdir. Grup seyrekleme kodlama tarafından uygulanan düz seyrekliliğin yanı sıra, grup benzerliğinden daha fazla yararlanmak için her bir grup seyrekleme katsayısı A_i üzerinde grup bazında düşük ranklılık önerilerek benek gürültü giderme için önemli bir algoritma geliştirilmiştir.

Grup seyreklilik ortak seyrekliliğe kıyasla daha esnek; çünkü her bir yama seyrekleme kodunun destek kümesi, grup içindeki güçlü korelasyona rağmen bağımsızdır [22]. Önerilen benek gürültü giderme modeli grup içi yama korelasyonundan daha fazla yararlanmak için grup seyrekleme kodlamanın standart seyrekliliğine ek olarak bir düşük rank ceza terimi getirir. Hafif bir varsayım altında, çarpımsal gürültü için uyarlanan yöntem [22], daha kısıtlayıcı, ama yine de ortak seyreklilikten daha geneldir.

Özetle, bu yöntem homomorfik dönüşüm ile SAR görüntülerinde ortaya çıkan benek gürültüsünün doğru bir şekilde işlenebilir hale getirmekte, ardından ağırlıklı seyreklilik ile özellikleri koruyarak gürültüyü temizlemekte ve düşük ranklılık ile de yapısal bütünlüğü güvence altına almaktadır. Bu üç unsurun birleşimi, modelin SAR gibi koherent görüntü restorasyonunda üstün bir performans sergilemesini sağlar.

Grup seyreklilik ile düşük ranklılığın uzlaştırıldığı önerilen yöntemin algoritması Tablo 1’de verilmiştir.

6. Deneyisel Sonuçlar

Bu bölümde, önerilen yöntemin performansını ve etkinliğini kapsamlı bir şekilde değerlendirmek amacıyla, kontrollü bir ortamda sentetik olarak oluşturulmuş benek gürültüsü ile bozulmuş test görüntüleri ve gerçek SAR görüntüsü kullanılarak deneyisel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak sentetik olarak oluşturulan çarpımsal gürültülü görüntülerden elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin öncü yöntemlerle kıyaslandığında daha iyi sonuç verdiğini Tablo 2 ve Tablo 3’te elde edilen PSNR/SSIM sonuçlarıyla ortaya

Tablo 1: Önerilen yöntemin kodu

Başlangıç:

- Girdi:** Gürültülü görüntü y , Tahmini Eşdeğer Bakış Sayısı ENL, L

Adım 1: Ön İşleme ve Gürültü Dönüşümü

- Giriş görüntüsüne logaritmik dönüşüm uygula.
- Sapma (bias) düzeltmesi yaparak y_c görüntüsünü elde et.
- Başlangıç tahmini olarak $x_c^{(0)} = y_c$ ata.

Adım 2: Ana İteratif Döngü ($k=1, 2, \dots, \text{MaxIter}$)

1. Görüntü Güncelleme (x Alt-Problemi):

- $\hat{x}_c^{(k)} \leftarrow \hat{x}_c^{(k-1)} + \gamma(y_c - \hat{x}_c^{(k-1)})$

2. Gürültü Seviyesi Tahmini:

- Güncel görüntü ile gürültülü görüntü arasındaki farka bakarak gürültünün standart sapmasını (σ_n) yeniden tahmin et.

3. Benzer Yama Gruplarını Oluşturma:

- Güncel görüntü $\hat{x}_c^{(k)}$ üzerinde referans yamaları seç.
- Her referans yama denklem (5)’i kullanarak en benzer m adet yamayı bul ve bir X_i grubu oluştur.

4. Her Grup için Çarpımsal Gürültü Giderme:

- Oluşturulan her bir X_i yama grubu için Sıralı Minimizasyon (Alternating Minimization) ile aşağıdaki adımları uygula:
 - Adaptif Sözlük Öğrenme (D_i):** PCA ile gruba özel D_i sözlüğünü öğren.
 - Düşük Ranklı Yakınsama (B_i):** Tekil Değer Eşikleme (SVD) ile B_i ’yi hesapla.
 - Ağırlıklı Seyrek Kodlama (A_i):** Adaptif ağırlıklı yumuşak eşikleme ile A_i ’yi hesapla.
 - Yamaları Yeniden Oluştur:** $\hat{X}_i = D_i \hat{A}_i$ ile temizlenmiş yama grubunu oluştur.

5. Görüntü Birleştirme (Aggregation):

- Tüm gruplardan elde edilen temizlenmiş yamaların ($\hat{X}_i$) ortalamasını alarak bir sonraki iterasyonun gürültüsüz görüntü tahmini olan $\hat{x}_c^{(k)}$ ’yi oluştur.

Adım 3: Son İşleme

- İterasyonlar bittiğinde elde edilen son logaritmik görüntü $\hat{x}_c^{(final)}$ ’e üstel (exponential) dönüşüm uygula.
- Çıktı:** Nihai gürültüsüz görüntü $\hat{x}_{final}$.

koyulmaktadır. Çalışmada sentetik benek gürültüsü içeren test görüntülerinin oluşturulması amacıyla, literatürde yaygın olarak kullanılan iki farklı referans görüntüsü (House, Monarch) seçilmiştir. Bu görüntülerin seçilmesindeki temel kriter, farklı yapısal özellikler (düzgün bölgeler, keskin kenarlar, ince dokular ve karmaşık detaylar) içermeleri ve böylece önerilen yöntemin çeşitli senaryolardaki performansının kapsamlı bir şekilde değerlendirilebilmesidir.

Sentetik benek gürültülü görüntüler, orijinal optik görüntülerin yoğunluk formatında simüle edilmiş benek gürültüsü ile çarpılması yoluyla üretilmiştir. Bu simülasyon işlemi, [5] numaralı referansta detaylı olarak açıklanan matematiksel modele uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup, süreçte L parametresi sırasıyla 1, 4, 8, 16 ve 32 değerlerine ayarlanarak farklı gürültü seviyelerindeki davranışın analiz edilmesi sağlanmıştır. Bu çeşitli L değerleri, yöntemin güçlü ($L = 1$) ile zayıf ($L = 32$) gürültü koşulları altındaki performansını sistematik olarak test etmeye olanak tanımaktadır.



Şekil 1: Test olarak kullanılacak referans House ve Monarch görüntüleri.

Önerilen yöntemin performansını değerlendirmek amacıyla, Şekil 1'deki referans görüntüler simüle edilerek, literatürde benek gürültüsü bastırma problemine yönelik olarak geliştirilmiş iki farklı yöntemle karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Birinci yöntem olarak, adaptif yerel istatistiklere dayalı Lee filtre seçilmiştir. Bu filtre, temel prensip olarak görüntüdeki her bir pikselin değerini, merkezinde bulunduğu yerel pencere (komşuluk bölgesi) içindeki piksellerin ortalaması ve varyansına bağlı olarak adaptif bir şekilde günceller. Bu sayede, gürültü baskılama işlemi sırasında kenar ve detay bilgilerinin korunması hedeflenir. İkinci karşılaştırma yöntemi ise,

çarpımsal gürültü azaltmada yaygın olarak kullanılan MIDAL algoritmasıdır. Bu yöntem, toplam varyasyon (TV-total variation) tabanlı bir optimizasyon yaklaşımı benimseyerek, görüntünün yapısal bilgilerini korurken gürültüyü etkili bir şekilde bastırmayı amaçlar. Bu iki referans yöntemle yapılan karşılaştırmalar, önerilen algoritmanın gürültü giderme kapasitesi, detay koruma yeteneği ve hesaplama verimliliği açısından kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. DeneySEL sonuçlar, önerilen yaklaşımın karşılaştırılan yöntemlere kıyasla daha iyi sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir.

DeneySEL Çalışmalar ve Parametre Optimizasyonu

Lee filtresinin implementasyonunda yerel istatistiklerin hesaplanması amacıyla 7×7 boyutunda kare pencere yapısı tercih edilmiştir. Söz konusu pencere boyutunun seçiminde, gürültü bastırma performansı ile görüntüdeki detay bilgisinin korunması arasındaki kritik denge göz önünde bulundurulmuştur. MIDAL algoritmasının parametreleştirilmesi aşamasında ise, düzenleştirme katsayısı λ değeri en iyi sonuç verecek şekilde optimize edilmiştir. Önerilen yönteme ait λ ve τ parametreleri de benzer şekilde en iyi sonuçları verecek şekilde ayarlanarak belirlenmiştir.

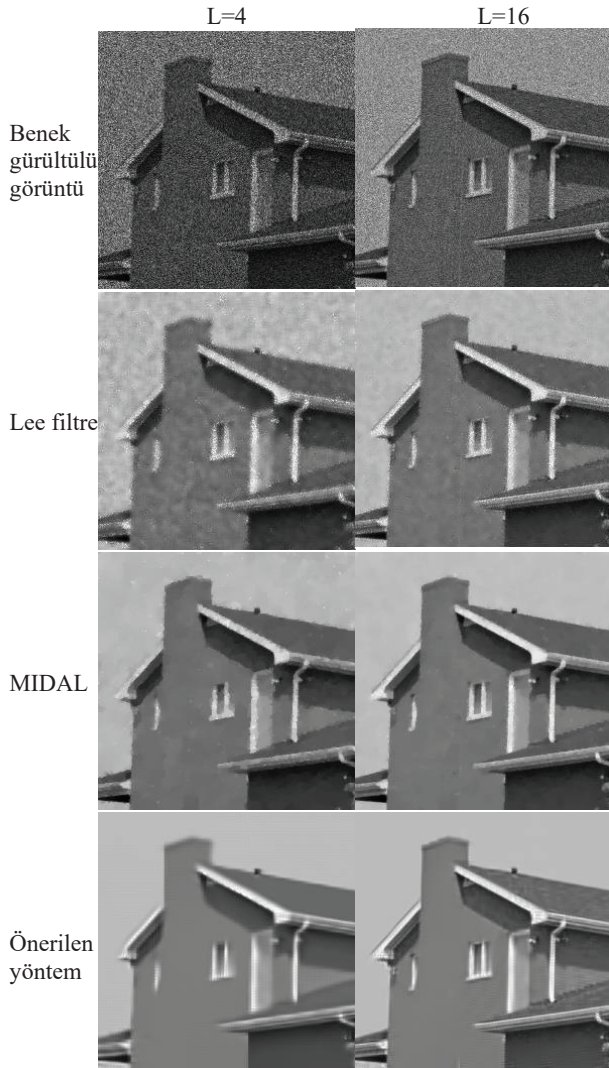
Şekil 2'de, önerilen yöntemin benek gürültüsü giderme performansı, literatürde yaygın olarak kullanılan diğer algoritmaların sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Çalışmada test görüntüsü olarak standart House görüntüsü kullanılmış ve bu görüntüye farklı seviyelerde benek gürültüsü eklenerek yöntemlerin performansı değerlendirilmiştir. DeneySEL sonuçlarda, görsel karşılaştırma için L parametresinin 4 ve 16 değerlerine karşılık gelen sonuçlar Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu seçim, düşük ve yüksek gürültü seviyelerinde yöntemlerin davranışını net bir şekilde ortaya koymak amacıyla yapılmıştır. Ayrıca, L değerinin 1'den 32'ye kadar değiştiği tüm aralık için nicel performans ölçümleri (PSNR, SSIM) Tablo 2'de detaylı olarak raporlanmıştır.

Tablo 2: House test görüntüsüne farklı L değerleri ile eklenen benek gürültünün Lee filtre, MIDAL ve önerilen yöntemle gürültüsü giderilmiş görüntülerin PSNR, SSIM sonuçları

	Lee Filtresi		MIDAL		Önerilen Yöntem	
	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM
L=1	23.6700	0.5069	23.8578	0.7352	24.2113	0.6591
L=4	26.5305	0.6697	28.5094	0.8087	29.2610	0.7985
L=8	28.1209	0.7412	29.4219	0.8250	31.2908	0.8302
L=16	29.8364	0.7983	31.7444	0.8534	33.1701	0.8689
L=32	31.7635	0.8511	33.5091	0.8706	34.9693	0.9074

Tablo 3: Monarch test görüntüsüne farklı L değerleri ile eklenen benek gürültünün Lee filtre, MIDAL ve önerilen yöntemle gürültüsü giderilmiş görüntülerin PSNR, SSIM sonuçları

	Lee Filtresi		MIDAL		Önerilen Yöntem	
	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM
L=1	21.1600	0.6169	20.3153	0.6730	22.4749	0.7083
L=4	24.2953	0.7634	26.1420	0.8478	27.2401	0.8717
L=8	26.2623	0.8221	28.4683	0.8783	29.3066	0.9057
L=16	28.3394	0.8689	30.1623	0.9171	31.1663	0.9300
L=32	30.6602	0.9062	32.6551	0.9385	33.4023	0.9527



Şekil 2: House test görüntüsünün 4 ve 16 L değerli farklı benek gürültü seviyeleri için Lee filtre, MIDAL ve önerilen yöntem sonuçları gösterilmiştir.

Şekil 2 ve Tablo 2’de sunulan benzetim sonuçlarının karşılaştırmalı analizi, farklı gürültü seviyelerinde yöntemlerin performans farklılıklarını ortaya koymaktadır. Yapılan değerlendirmelerde, önerilen yöntemin PSNR ve SSIM metrikleri açısından referans alınan yöntemlere göre daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir. Lee filtresinin benek gürültüyü tam bir şekilde filtreleyemediği MIDAL algoritmasında ise basamaklanma artefaktı olduğu gözlemlenmektedir.

Şekil 3 ve Tablo 3’te, Monarch (Kral kelebeği) test görüntüsü üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmanın sonuçları, farklı gürültü seviyelerine bağlı olarak yöntemlerin performanslarının karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Elde edilen bulgular, önerilen yöntemin hem PSNR hem de SSIM metrikleri açısından literatürde referans kabul edilen yöntemlerden ölçülebilir üstünlükler sergilediğini ortaya koymaktadır.

Önerilen yöntemin pratik uygulamalardaki etkinliğini göstermek amacıyla gerçek SAR görüntüleri kullanılarak da

deneyler yapılmıştır. British DRA SAR tarafından elde edilmiş Bedfordshire’den bir kırsal manzara sunan gerçek 256×256 “Field” SAR görüntüsü kullanılmıştır. Bu görüntüyle yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen görüntüler Şekil 4’te verilmiştir. Önceki benzetim çalışmalarında olduğu gibi bu görüntü için de önerilen yöntem Lee filtresi ve MIDAL yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, gerçek SAR görüntülerinde gürültüsüz referans görüntünün bulunmaması sebebiyle farklı gürültü giderme yöntemlerinin performansını değerlendirmek için ENL (Eşdeğer Görüntü Sayısı) ve orijinal ile gürültüsüzleştirilmiş SAR görüntüleri arasındaki oran görüntüsü kullanılmıştır. ENL görüntünün homojen bölgesi referans alınarak benek gürültünün gerçek SAR görüntülerinde ne kadar giderildiğini tespit edebilmek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir indekstir. ENL hesaplaması için seçilen homojen bölge görüntülerde kırmızı çerçeve içerisine alınmıştır. ENL indeksi aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$ENL = \left(\frac{4}{\pi} - 1\right) \left(\frac{\mu_{HR}}{\sigma_{HR}}\right) \quad (10)$$

μ_{HR} seçilen homojen bölgenin ortalama değeri ve σ_{HR} ise varyansdır. Gürültülü gerçek SAR görüntünün gürültüden temizlenmiş haliyle bölümünden elde edilen oran görüntüleri ise Şekil 5’te gösterilmektedir. Oran görüntüsünde ise ideal durumda tamamen benek gürültüyü gösterir bir görüntü elde etmek gerekir. Oran görüntüsünde görüntü içerisindeki kenarların belli olma derecesi yöntemin benek gürültü giderme performansını görsel olarak ortaya çıkarmaktadır. Bu yüzden biz de bu görsel karşılaştırmayı sunmak istedik. Şekil 5’te oran görüntüsü karşılaştırmaları sunulmaktadır.

Field görüntüsünde kırmızı çerçeve içerisine alınan homojen bölge için ENL değerleri: Lee filtresi için 87.0384, MIDAL için 182.2541 ve önerilen yöntem için 441.7678 olarak hesaplanmıştır. Buradaki ENL sonuçları önerdiğimiz yöntemin daha iyi sonuç verdiğini göstermektedir. Şekil 5’te verilen oran görüntüsü karşılaştırmalarından da önerilen yöntemin karşılaştırılan yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Önerilen yöntemin oran görüntüsünde kenar detayları hemen hemen belli olmamaktadır. Ayrıca, Şekil 4’te elde edilen sonuçlara bakıldığında önerilen yöntemin görüntü detaylarını daha iyi koruduğu görülmektedir.

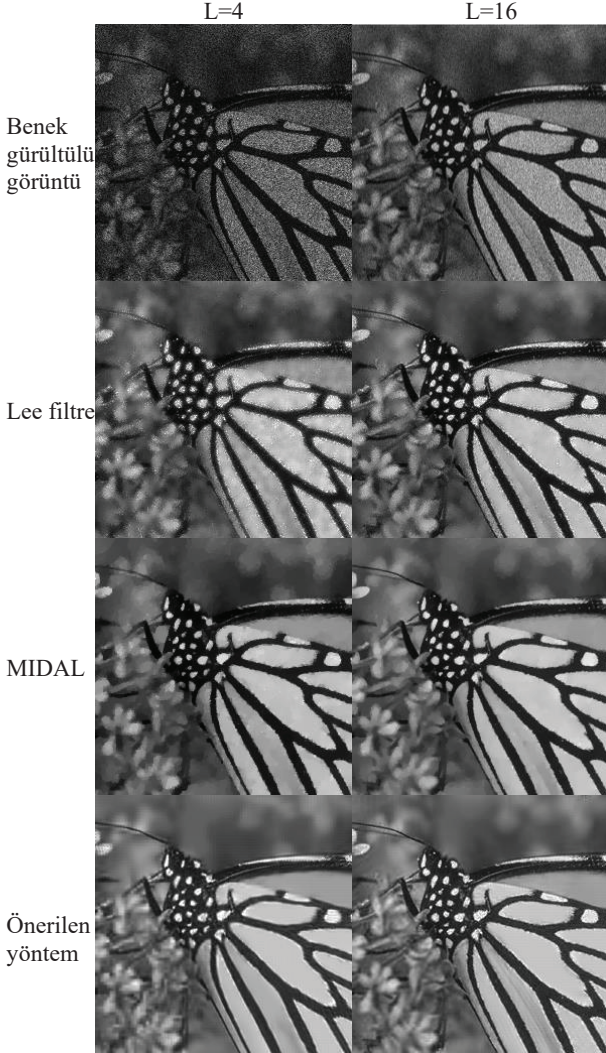
Yapılan bu deneysel çalışmaların çalışma süresi karşılaştırmaları da hesaplanmıştır. House, Monarch ve Field görüntülerinin boyutları birbiriyle aynıdır. House, Monarch ve Field görüntülerinin tümü 256×256 boyutunda olduğundan, her bir yöntemin işlem süresi test edilen görüntüye göre değişiklik göstermemiştir. Bu nedenle, belirli bir yöntemin her üç görüntü için hesaplanan çalışma süresi de aynıdır. Karşılaştırılan yöntemlerin algoritmaları Intel® Core™ i7-4700HQ (2.4 GHz) ve 16 GB RAM içeren bir bilgisayarda çalıştırılmıştır. Çalışma süreleri: Lee filtresi için 3.5250 sec, MIDAL için 51.4120 sec ve önerilen yöntem için 647.5913 sec olarak belirlenmiştir. Çalışma süreleri karşılaştırmalarına baktığımızda önerilen yöntemin diğer yöntemlere kıyasla daha yavaş olduğu ve hesaplama verimliliğinin daha düşük olduğu çıkarımı yapılabilir. Önerdiğimiz yöntemin bir GPU (Grafik İşlemci Birimi) üzerinde çalıştırılması hesaplama verimliliği dezavantajını elemine etmek için iyi bir yaklaşım olabilir.

7. Sonuç

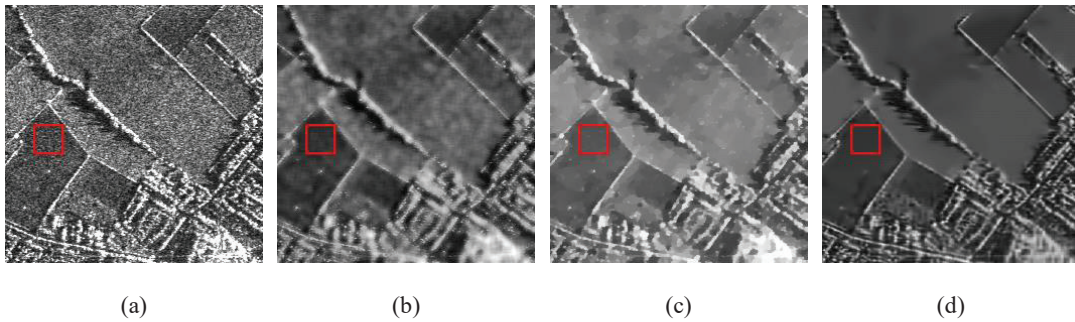
Bu çalışmada, çarpımsal benek gürültüsünün toplamsal forma dönüştürülmesi amacıyla homomorfik dönüşüm yaklaşımı benimsenmiştir. Geliştirilen yeni nesil çarpımsal gürültü giderme modeli, grup katsayılarının hem seyrek temsil hem de düşük rank özelliklerini sinerjistik olarak kullanmaktadır. Önerilen bu hibrit model, geleneksel grup seyrek kodlama (Group Sparse Coding) ve birleşik seyreklik (Joint Sparsity) modelleri arasında köprü oluşturan yenilikçi bir çerçeve sunmaktadır.

Modelin optimizasyonu için, adaptif parametre ayarlama mekanizmasına sahip bir sıralı minimizasyon algoritması tasarlanmıştır. Yerel-olmayan benzerlik prizması altında, küresel aşırı tam sözlükler yerine, benzer yama gruplarından türetilen adaptif kompakt sözlükler ve seyrek katsayı matrisleri öğrenilmektedir. Performans iyileştirmesi amacıyla uygulanan ağırlıklı düzenleme ve üstel geri dönüşüm adımları, yöntemin etkinliğini artıran kritik bileşenler olarak öne çıkmaktadır. Diğer taraftan, önerilen yöntemin iyi performans gösterebilmesi için algoritmada bulunan parametrelerin optimum değerlerinin seçilmesi gerekmektedir. Bu parametreler düzgün seçilmediği takdirde yöntem istenilen performansı göstermeyebilir.

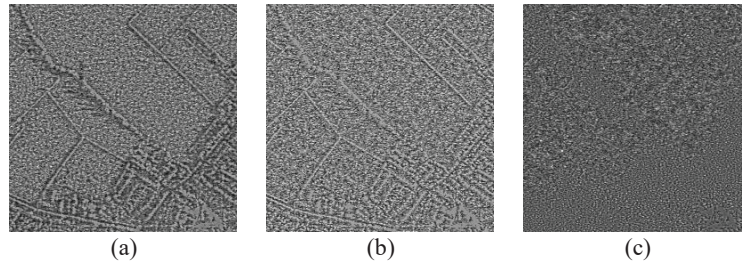
Önerilen yaklaşımın performans analizleri incelendiğinde sentetik ve gerçek SAR görüntüleriyle yapılan karşılaştırmalarda PSNR, SSIM ve ENL gibi görüntü karşılaştırma metrikleri açısından daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ancak, Lee filtresi ve MIDAL algoritmalarının çalışma süreleri önerilen yöntemden daha kısadır. Önerdiğimiz yöntemin çalışma süresini kısaltıp daha hızlı sonuçlar elde etmek için GPU üzerinde çalıştırılmasını daha sonraki çalışma olarak planlamaktayız.



Şekil 3: Monarch test görüntüsünün 4 ve 16 L değerli farklı benek gürültü seviyeleri için Lee filtre, MIDAL ve önerilen yöntem sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4: L değeri 2 olan Field SAR görüntüsünün karşılaştırılan üç yöntemle benek gürültüden temizlenmiş sonuçları (a) Gerçek SAR görüntüsü (b) Lee filtre, (c) MIDAL (d) Önerilen yöntem.



Şekil 5: Field SAR görüntüsünün oran görüntüsü karşılaştırmaları (a) Lee filtre, (b) MIDAL (c) Önerilen yöntem.

8. Kaynaklar

- [1] Zhang J., Chen J., Yu H., Yang D., Xu X. ve Xing M., "Learning an SAR Image Despeckling Model Via Weighted Sparse Representation," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 14., 7148-7158, 2021.
- [2] Huang S., Liu D., Gao G., Guo X., "A Novel Method for Speckle Noise Reduction and Ship Target Detection in SAR Images," *Pattern Recognition*, Vol. 42., 1533-1542, 2009.
- [3] Lee J.S., Jurkevich L., Dewaele P., Wambach P., Oosterlinck A., "Speckle Filtering of Synthetic Aperture Radar Images: A Review," *Remote Sensing Reviews*, Vol.8., 313-340, 1994.
- [4] Lee J-S., Grunes M.R., Grandi G., "Polarimetric SAR Speckle Filtering and Its Implication for Classification," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.37., 2363-2373, 1999.
- [5] Bioucas-Dias J. M., Figueiredo M. A. T., "Multiplicative Noise Removal Using Variable Splitting and Constrained Optimization," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 19., 1720-1730, 2010.
- [6] Steidl G., Teuber T., "Removing Multiplicative Noise by Douglas-Rachford Splitting Methods," *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, Vol. 36., 168-184, 2009.
- [7] Deledalle C-A., Denis L., Tupin F., Reigber A., Jäger M., "NL-SAR: A Unified Nonlocal Framework for Resolution-Preserving (Pol)(In)SAR Denoising," *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, Vol. 53., 2021-2038, 2015.
- [8] Deledalle C-A., Denis L., Tupin F., "Iterative Weighted Maximum Likelihood Denoising With Probabilistic Patch-Based Weights," *IEEE Transactions On Image Processing*, Vol. 18., 2661-2672, 2009.
- [9] Parrilli S., Poderico M., Angelino C.S., Verdoliva L., "A Nonlocal SAR Image Denoising Algorithm Based on LLMSE Wavelet Shrinkage," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.50., 606-616, 2012.
- [10] Fang J., Hu S., Ma X., "A Boosting SAR Image Despeckling Method Based on Non-Local Weighted Group Low-Rank Representation," *Sensors*, Vol.18., 2018, Art. no. 3448.
- [11] Chen G., Li G., Liu Y., Zhang X., Zhang L., "SAR Image Despeckling Based on Combination of Fractional-Order Total Variation and Nonlocal Low Rank Regularization," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol.58., 2056-2070, 2020.
- [12] F. Bo, X. Ma, Y. Cen and S. Hu, "SAR Image Speckle Reduction Based on Nuclear Norm Minus Frobenius Norm Regularization," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 62., 1-15, 2024.
- [13] Z. Xu, X. Feng, S. Tian, X.-J. Shen, H. Zhang and C. Wang, "Edge Preserved Low-Rank SAR Image Despeckling via Hierarchical Prior Knowledge Regulation," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 61., 1-17, 2023.
- [14] Xu B., Cui Y., Li Z., Yang J., "An Iterative SAR Image Filtering Method Using Nonlocal Sparse Model", *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, Vol.12., 1635-1639, 2015.
- [15] Xu B., Cui Y., Li Z., Zuo B., Yang J., Song J., "Patch Ordering-Based SAR Image Despeckling via Transform-Domain Filtering", *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, Vol.8., 1682-1695, 2015.
- [16] Chierchia G., Cozzolino D., Poggi G., Verdoliva L., "SAR Image Despeckling through Convolutional Neural Networks", in *Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, 2017, 5438-5441.
- [17] Wang P., Zhang H., Patel V.M., "SAR Image Despeckling using a Convolutional Neural Network", *IEEE Signal Process. Lett.*, Vol.24., 1763-1767, 2017.
- [18] Liu S. *et al.*, "Convolutional Neural Network and Guided Filtering for SAR Image Denoising", *Remote Sens.*, Vol.11., 2019, Art. no. 702.
- [19] S. Liu, L. Zhang, S. Tian, Q. Hu, B. Li and Y. Zhang, "MFAENet: A Multiscale Feature Adaptive Enhancement Network for SAR Image Despeckling," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 16., 10420-10433, 2023.
- [20] S. Liu, S. Tian, Y. Zhao, Q. Hu, B. Li and Y. -D. Zhang, "LG-DBNet: Local and Global Dual-Branch Network for SAR Image Denoising," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 62., 1-15, 2024.
- [21] Aharon M., Elad M., Bruckstein A., "K-SVD: An Algorithm for Designing Overcomplete Dictionaries for Sparse Representation", *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol.54., 4311-4322, 2006.
- [22] Zha Z., Wen B., Yuan X., Zhou J., Zhu C., "Image Restoration via Reconciliation of Group Sparsity and Low-Rank Models", *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 30., 5223-5238, 2021.
- [23] Cui Y., Zhou G., Yang J., Yamaguchi Y., "Unsupervised Estimation of the Equivalent Number of Looks in SAR Images", *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, Vol.8., 710-714, 2011.

Özgeçmiş



Dr. Mehmet DEMİR, Gaziantep Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden lisans derecesini 2009, yüksek lisans derecesini 2012 ve doktora derecesini 2019 yıllarında almıştır. Şu anda Gaziantep Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde doktor öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Araştırma alanları arasında sinyal işleme, görüntü işleme, sentetik açıklıklı radar görüntüleme ve makine öğrenmesi yer almaktadır.

Kısmi Rezonanslı İndüksiyonlu Ocaklarda Çalışma Limitleri

Operating Limits for Quasi Resonant Induction Hobs

Metin Öztürk ^{1,2}

 0000-0001-9369-8206

¹Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Esenyurt Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
metinozturk@esenyurt.edu.tr

²Mamur Teknoloji Sistemleri Sanayi A.Ş., İstanbul, Türkiye
metin.ozturk@mamurtech.com

Özet

Ev türü endüksiyon ile ısıtma (EI) sistemlerinde yüksek verimlilikleri ve yumuşak anahtarlama yetenekleri nedeniyle ağırlıklı olarak rezonanslı inverter devreleri kullanılmaktadır. EI sistemlerinde kullanılan rezonanslı inverterlerden tek anahtarlı kısmi rezonanslı (SSQR) inverter topolojisi düşük maliyet hedefli ve düşük güç gerektiren uygulamalar için tercih edilmektedir. Maliyet avantajına rağmen SSQR inverterin, yumuşak anahtarlama ile çalışabildiği çalışma aralığının dar oluşu, güç kontrolünün zorluğu, yarı iletken anahtarlar da oluşan akım ve gerilim zorlanmalarının diğer inverter uygulamalarına kıyasla yüksek olması gibi dezavantajları bulunmaktadır. Bu çalışmada EI'da kullanılan SSQR inverter için yarı iletken anahtarların maruz kalacağı aşırı akım ve aşırı gerilimler, çeşitli devre parametreleri kullanılarak önerilen hesaplama yöntemi ile hesaplanmıştır. Bu sayede devre elemanlarının akım ve gerilim zorlanması üzerinde ne kadar etkili olduğu tespit edilmiştir. Sonrasında ise simulasyon sonuçları ve uygulama sonuçları yardımıyla elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler—Endüksiyonlu ısıtma sistemleri, rezonanslı inverter, tek anahtarlı kısmi rezonanslı inverter, yarı iletken anahtar, aşırı akım ve aşırı gerilim.

Abstract

In residential induction heating (IH) systems, resonant inverter circuits are predominantly employed owing to their high efficiency and capability for soft switching. Among the resonant inverter topologies used in IH systems, the single-switch quasi-resonant (SSQR) inverter is preferred for applications requiring low power and targeting low cost. Despite its cost advantages, the SSQR inverter has several disadvantages, such as a limited operating range for soft switching, challenges in power control, and relatively higher current and voltage stresses on semiconductor switches compared to other inverter topologies. In this study, the overcurrent and overvoltage stresses experienced by the semiconductor switch in an SSQR inverter

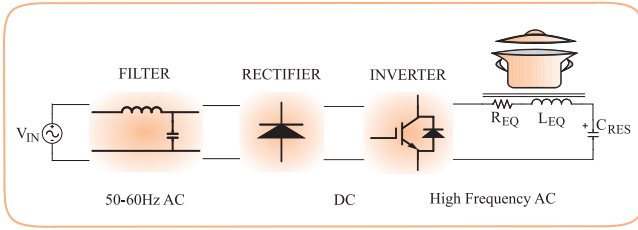
used in IH systems are calculated using a proposed analytical method based on various circuit parameters. Through this method, the influence of each circuit parameter on current and voltage stresses was identified. The validity of the results obtained was then confirmed by means of simulation and experimental measurements.

Keywords—Induction heating systems, resonant inverter, single switch quasi resonant inverter, semiconductor switch, over voltage and over current.

1. Giriş

Endüksiyonlu ısıtma (EI) sistemleri, yüksek verim, güvenlik, hızlı ısıtma ve bakım kolaylığı gibi özellikleri nedeniyle endüstriyel, evsel ve tıbbi uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır [1], [2]. Güç elektroniği, yarı iletken teknolojisi, kontrol teknolojileri ve elektronik alanındaki ilerlemeler, endüksiyon teknolojisine gelişimine katkıda bulunmuştur [3], [4]. Ev kullanımına uygun endüksiyonlu ocaklarda, bir veya daha fazla endüksiyon bobini, üzerine konulan tencereyi ısıtmak için vitro seramik cam bir yüzeyin altına yerleştirilir [5]. Endüksiyon bobini, tencereyi ısıtmak amacıyla aynı frekansta manyetik alan üreten bir alternatif akım ile beslenir. Tencere tabanında eddy akımlarının endüklmesi sonucu ısıtma işlemi gerçekleştirilir [6]. EI sistemlerinin başlıca bileşenleri, AC-DC dönüşümü için bir doğrultucu ünite ve rezonanslı inverter üniteleridir [7]. Şekil 1, ev türü endüksiyonlu ocaklar için genel bir güç transfer döngüsünü göstermektedir.

EI sistemleri, tek veya çoklu yük/bobin içerecek şekilde tasarlanabilir. Geçmiş yıllarda, tek bobinli sistemler endüstriyel ve evsel endüksiyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılmıştır. Son dönemlerde ise çok çıkışlı endüksiyon ısıtıcıları, ayarlanabilir pişirme yüzeyleri aracılığıyla performansı artırmaya yönelik öneriler getirmiştir [4], [8], [9]. Farklı bobin modellerinin seçimi, tasarım gereksinimleri, maliyet, çıkış gücü ve ocak geometrisi gibi faktörlere bağlıdır. Tencere boyutu ve bobin tasarımına dayalı olarak pişirme yüzeylerini yapılandırmak için çeşitli yaklaşımlar



Şekil 1: Genel güç transfer döngüsü.

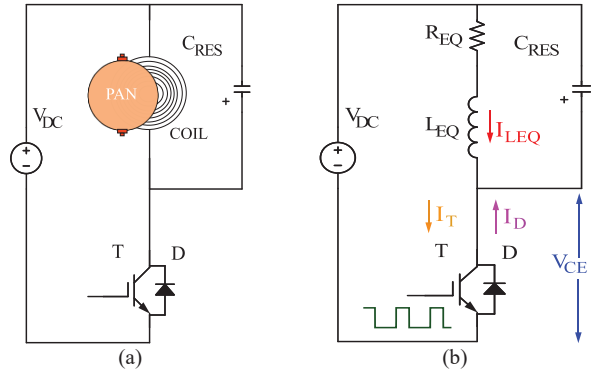
kullanılmaktadır [10]. Genellikle ferromanyetik malzemeden yapılmış tencereler yük olarak kullanılırken, son zamanlarda yapılan çalışmalar aynı zamanda ferromanyetik olmayan metal malzemeden yapılmış tencere modellerini de incelemiştir [11]–[13].

Maliyet ve performans arasındaki dengeye bağlı olarak farklı rezonanslı inverter topolojileri önerilmiştir. EI sistemlerinde kullanılan en yaygın inverter topolojileri yarım köprü seri rezonanslı (HBSR) [14]–[17] ve tek anahtarlı kısmi rezonanslı (SSQR) [18]–[20] inverterlerdir. SSQR inverterli EI uygulamaları, düşük güç ve düşük maliyet için güvenilir bir çözümdür. Ancak, SSQR inverterin temel dezavantajı, güç kontrolünün HBSR inverterde olduğu gibi frekans kontrollü yapılamamasıdır. Bu sınırlama, SSQR inverterin çalışma modlarının RL ve RLC devreleri arasında geçiş yapmasından kaynaklanmaktadır [18], [20]. Yarı iletken anahtarın iletimde olduğu RL çalışma anında kaynaktan çekilen akım, anahtarın kesime girmesi ile birlikte RLC devresinde rezonansa neden olmaktadır. Sonuç olarak hem güç kontrolü hem de güvenli çalışmanın sağlanabilmesi amacıyla kapalı çevrim kontrol algoritmaları kullanılmaktadır.

SSQR inverter kullanılan EI sistemlerinde yük parametreleri, yarı iletken anahtarın akım ve gerilim sınırları, yarı iletken anahtarın açma ve kapanma süreleri ile kapalı çevrim güç kontrol metodları arasında önemli bir ilişki bulunmaktadır. Dahası, SSQR inverterli EI sistemlerinde rezonant devre elemanlarının modellenmesi amacıyla kullanılan bobin eşdeğer endüktans ve eşdeğer direnç değerlerini belirlemek çok kolay değildir. Ayrıca, bu değerler, rezonanslı inverter devresinin çalışma frekansı, çevresel sıcaklık ve tencere ile bobin arasındaki hava boşluğu gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, geniş bir akademik araştırma yelpazesi, yalnızca tencere ve yük tanıma üzerine odaklanmaktadır [21]–[23]. Diğer taraftan, sadece bobin tasarımı bile tek başına kapsamlı bir akademik araştırmayı gerektirmektedir. Özellikle manyetik alan bağlamında birçok çalışma, bobin tasarımı üzerine yapılmıştır [24], [25].

Güç elektroniği devrelerindeki güvenli çalışma koşullarını zorlayan en önemli unsurlar, yarı iletken anahtarların maruz kalacağı yüksek gerilim ve yüksek akımlardır. Bununla birlikte elektronik devrelerin tüm bileşenleri aşırı akım ve aşırı gerilim stresinden etkilenir de, invertör uygulamalarında en savunmasız elemanlar yarı iletken anahtarlardır. Aşırı akımın ürettiği aşırı ısı, zorlamalı soğutma yöntemleriyle azaltılabilirse bile, yüksek gerilimlere maruz kalan yarı iletken anahtarlar, muhtemelen kısa devre olacak ve devre çalışamaz hale gelecektir.

EI sistemlerinde SSQR inverterler düşük maliyetli ve düşük güç gerektiren uygulamalar için tercih edilmektedir. Ancak, SSQR inverter, maliyet avantajına rağmen, yumuşak anahtarlama ile çalışabildiği güç aralığının dar oluşu, güç kontrolünün zorluğu ve yarı iletken anahtarlar arasında oluşan akım ve gerilim zorlanmalarının diğer inverter uygulamalarına kıyasla yüksek olması gibi dezavantajları barındırır. Bu çalışmada EI'da kullanılan SSQR inverter için yarı iletken anahtarların maruz



Şekil 2: SSQR inverter (a) devre diyagramı (b) devre şeması.

kalacağı aşırı akım ve aşırı gerilimler, çeşitli devre parametreleri kullanılarak önerilen hesaplama yöntemi ile hesaplanmıştır. Bu devre parametreleri arasında AC şebeke geriliminin doğrultulması ile elde edilen V_{DC} gerilimi, tencere ve bobinden oluşan sistemin eşdeğer direnci R_{EQ} ve eşdeğer endüktans değeri L_{EQ} , rezonans devresi kondansatörü C_{RES} bulunmaktadır. Bu sayede devre elemanlarının akım ve gerilim zorlanması üzerinde ne kadar etkili olduğu tespit edilmiştir.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde yapılandırılmıştır: Bölüm 2'de SSQR invertör dönüştürücü devre denklemleri yardımıyla anlatılmaktadır. Bölüm 3'te SSQR inverter için güvenli çalışma bölgesi ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Bölüm 4'te önerilen güvenli çalışma limitleri için hesaplama yöntemi anlatılmakta, sonrasında sırasıyla simülasyon çalışmaları ve deneysel sonuçlar gösterilmektedir. Bu çalışmanın sonucu Bölüm 5'te verilmektedir.

2. SSQR Inverterli Devrenin Tanımlanması

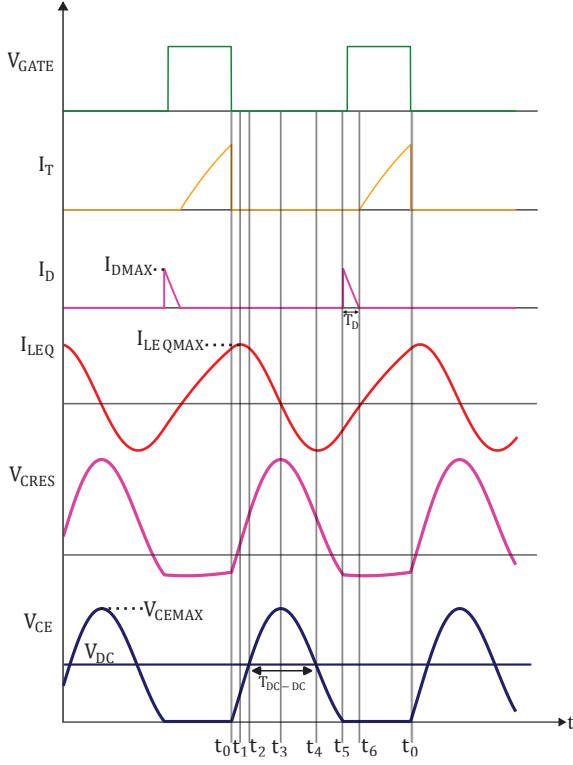
2.1. Genel

Tek anahtarlı yarı rezonanslı invertere ait devre diyagramı ve devre şeması, Şekil 2 'de ve invertere ait akım ve gerilim dalga şekilleri ise Şekil 3'te verilmektedir. Devre şeması incelendiğinde, T yarı iletken anahtarı, D serbest geçiş diyotunu, R_{EQ} eşdeğer direnci, L_{EQ} eşdeğer endüktansı ve C_{RES} rezonans kondansatörünü belirtmektedir. T anahtarı iletime girdiğinde, devre seri RL devresi gibi davranır. Bu aşamada bobin, anahtar iletim süresi t_{ON} boyunca R_{EQ} direnci üzerinden enerji biriktirir. Başka bir ifade ile yarı iletken anahtar devrede olduğu sürece süresi boyunca bobin, V_{DC} gerilim kaynağı tarafından sağlanan enerjiyi biriktirmektedir.

T yarı iletken anahtarı kesime götürüldüğünde devre, seri RLC devresi olarak çalışmaya başlar. Bu çalışma modunda, bobin ve kondansatör arasında rezonans oluşur ve enerji alışverişi sağlanır. Rezonans kondansatörü, C_{RES} tam olarak şarj olduğunda, T anahtarı gerilimi V_{CEMAX} değerine kadar şarj olur ve rezonansın sonunda deşarj olarak sıfır gerilim değerine ulaşır. Kondansatör tamamen deşarj olduktan kısa bir süre sonra, yarı iletken anahtar T yeniden etkinleştirilir [26]–[28].

2.2. Devre Çalışma Modları – Devre Denklemleri

SSQR inverterin çalışma modları, Şekil 4'te gösterilen dört temel kısımda incelenmektedir. T yarı iletkeninin iletimde olduğu $t_6 < t < t_0$ aralığı R_{EQ} ve L_{EQ} bileşenlerini içeren bir seri RL devresi olarak modellenmektedir. Buna ek olarak, $t_0 < t < t_5$ zaman aralığı, L_{EQ} ve C_{RES} arasındaki rezonanslı içeren bir seri RLC devresi olarak analiz edilmektedir. Son olarak, D serbest geçiş



Şekil 3: SSQR invertire ait akım ve gerilim dalga şekilleri.

diyotunun iletimde olduğu $t_5 < t < t_6$ aralığı seri RL devresi olarak modellenmektedir.

SSQR invertirin dört çalışma aralığından 2 ve 3 aralığının seri RLC devresi, 1 ve 4 aralığının ise seri RL devresi olarak modellenmesinden dolayı, HBSR inverterde olduğu gibi frekans domeninde incelemek yerine zaman domeninde değerlendirmek daha anlamlı olmaktadır. Devre analiz edilirken, sadeleştirme açısından sürekli hal analiz edilmekte, rezonans kondansatörünün deşarj akımı ve benzer geçici durumlar bilinçli bir şekilde göz ardı edilmektedir.

Aralık I ($t_6 - t_0$): Bu aralık, T yarı iletken anahtarının sıfır gerilim koşullarında iletime girmesi (ZVT) ile başlar ve T anahtarı kesime götürülene kadar devam eder. RL devresinin işleyişiyle ilgili olarak, aşağıdaki denklemler (1)-(3) şeklinde formüle edilebilir [29].

$$i_{LEQ}(t_6) = 0 \quad (1)$$

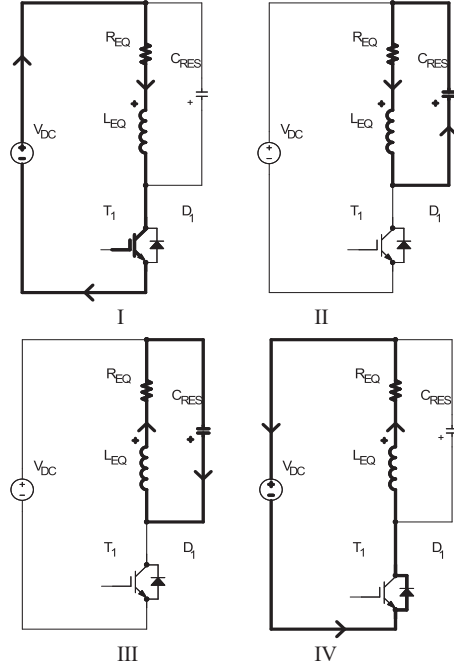
$$i_{LEQ}(t) = i_T(t) = V_{DC}/R_{EQ} \cdot (1 - e^{-\frac{R_{EQ}}{L_{EQ}}t}) \quad (2)$$

$$V_{DC} = V_{LEQ} + V_{REQ} \quad (3)$$

Aralık II-III ($t_0 - t_5$): Bu aralık, T yarı iletken anahtarının kesime götürülmesi ile başlar. L_{EQ} ve C_{RES} arasındaki rezonans olayı bir seri RLC devresi olarak analiz edilir. I_{LEQ} akımını analiz etmek üzere denklem (4)-(7) kullanılabilir [29]. Kaynaksız RLC devresi denklemlerinden yararlanılarak, öncelikle bobin akımı ve bobin akımının türevi elde edilmiştir [29].

$$i_{LEQ}(t) = e^{-\alpha t} (B_1 \cos(\omega_d t) + B_2 \sin(\omega_d t)) \quad (4)$$

$$di_{LEQ}(t)/dt = -e^{-\alpha t} [(B_1 \omega_d + B_2 \alpha) \sin(\omega_d t) + (B_1 \alpha - B_2 \omega_d) \cos(\omega_d t)] \quad (5)$$



Şekil 4: SSQR inverter için devre çalışma aralıkları.

Bobin akımı ve bobin akımının türevi için başlangıç koşulları kullanılarak, KVL (Kirchhoff'un Gerilimler Yasası) yardımıyla devre sabitleri elde edilmiştir.

$$i_{LEQ}(t_0) = i_{LEQ}(0) = B_1 = I_0 \quad (6)$$

$$\frac{di_{LEQ}(t_0)}{dt} = \frac{di_{LEQ}(0)}{dt} =$$

$$B_2 \omega_d - B_1 \alpha =$$

$$(-V_{CRES0} - V_{R0})/L_{EQ} = (V_{DC} - R_{EQ}I_0)/L_{EQ}$$

$$B_2 = ((V_{DC} - R_{EQ}I_0)/(L_{EQ}\omega_d) + (\alpha I_0)/\omega_d \quad (7)$$

Yine kaynaksız RLC devresi denklemlerinden yararlanılarak, kondansatör gerilimi ve kondansatör geriliminin türevi elde edilmiştir [29].

$$v(t) = v_{CRES}(t) = e^{-\alpha t} (A_1 \cos(\omega_d t) + A_2 \sin(\omega_d t)) \quad (8)$$

$$dv_{CE}(t)/dt = -e^{-\alpha t} [(A_1 \omega_d + A_2 \alpha) \sin(\omega_d t) + (A_1 \alpha - A_2 \omega_d) \cos(\omega_d t)] \quad (9)$$

Kondansatör gerilimi ve kondansatör geriliminin türevine ait başlangıç koşulları kullanılarak, Kirchhoff'un Gerilimler Yasası (KVL) yardımıyla devre sabitleri elde edilmiştir.

$$v_{CRES}(t_0) = v_{CRES}(0) = A_1 = -V_{DC} \quad (10)$$

$$\frac{dv_{CRES}(t_0)}{dt} = \frac{dv_{CRES}(0)}{dt} =$$

$$A_2 \omega_d - A_1 \alpha = I_0/C_{RES}$$

$$A_2 = (I_0/C_{RES} - \alpha V_{DC})/\omega_d \quad (11)$$

Devre denklemleri (8)-(11) yardımıyla elde edilen devre sabitleri kullanılarak Şekil 3'te gösterilen yarı iletken anahtarın uç gerilimi V_{CE} 'yi hesaplamaktadır.

$$v_{CE}(t) = V_{DC} + v_{CRES}(t)$$

$$v_{CE}(t) = V_{DC} + e^{-\alpha t} (A_1 \cos(\omega_d t) + A_2 \sin(\omega_d t)) \quad (12)$$

Aralık IV ($t_5 - t_6$): Bu aralık, T güç anahtarına ters paralel bağlı D diyotunun iletme girmesi ile başlar. Şekil 3'te gösterildiği gibi, enerji kaynağından geçen akım çevrimini D güç diyodu üzerinden tamamlar. RL devresinin işleyişiyle ilgili olarak denklemler (13)-(16) verilmektedir. Diyot iletim süresi, $t_D(t_6 - t_5)$ ve tepe diyot akımı I_{Dmax} olarak adlandırılır.

$$i_{LEQ}(t) = V_{DC}/R_{EQ} + (I_{Dmax} - V_{DC}/R_{EQ})e^{-\frac{R_{EQ}}{L_{EQ}}t} \quad (13)$$

$$i_{LEQ}(t_D) = 0 = \frac{V_{DC}}{R_{EQ}} + (I_{Dmax} - \frac{V_{DC}}{R_{EQ}})e^{-\frac{R_{EQ}}{L_{EQ}}t_D} \quad (14)$$

$$t_D = \ln \left[\frac{V_{DC}/R_{EQ}}{V_{DC}/R_{EQ} - I_{Dmax}} \right] \left(-\frac{L_{EQ}}{R_{EQ}} \right) \quad (15)$$

$$t_D = -\frac{L_{EQ}}{R_{EQ}} \cdot \ln \left(1 + \frac{I_{Dmax}}{V_{DC}/R_{EQ} - I_{Dmax}} \right) \quad (16)$$

3. SSQR Inverter İçin Güvenli Çalışma Bölgesi

Her bir çalışma aralığı için tanımlanmış detaylı devre denklemleri incelendiğinde, R_{EQ} , L_{EQ} ve C_{RES} değerlerinin, SSQR inverterin güvenli çalışma bölgesinin belirlenmesi açısından büyük öneme sahip oldukları açıktır. Güç elektroniği devrelerinde güvenli çalışmayı tehdit eden temel sorunlar, yarı iletken anahtarların maksimum çalışma değerlerini aşan yüksek gerilim ve yüksek akımlardır. Elektronik devrelerin tüm bileşenleri aşırı akım ve aşırı gerilim stresinden etkilenebilirken, yarı iletken anahtarlar, inverter uygulamalarında en savunmasız elemanlar olarak ön plana çıkar. Aşırı akımlar tarafından oluşturulan fazla ısı, zorlamalı soğutma yöntemleri yardımıyla azaltılabilir, ancak yarı iletkenlerin bozulma limitlerini aşan gerilimlere maruz kalmaları, onları hızla çalışmaz hale getirebilir.

Aralık IV' te ayrıntılı olarak verildiği gibi L_{EQ} ve C_{RES} arasındaki rezonansın tamamlanması sonucu, anahtar uç geriliminin sıfır değerine ulaşması ile birlikte yarı iletken anahtara paralel bağlı D diyotunun iletme girmesi öngörülmektedir. Ancak bu durum her koşulda mümkün olamamakta, yarı iletken anahtar devreye girerken, anlık yüksek C_{RES} kondansatörü deşarj akımlarına maruz kalmaktadır (I_{T-LL}). SSQR inverter devrelerinde sıkça gözlemlenen C_{RES} kondansatörünün anlık deşarj akımları, hem yarı iletkenlerin hem de güç elektroniği devrelerinin güvenilir çalışması için bir tehdit oluşturur. Bu anlık akımlar, hafif yük akımları olarak da adlandırılır ve yarı iletkenin nominal maksimum akımını üç ile dört kat aşabilir, aşırı ısınma, elektriksel gürültü ve benzeri sorunlara neden olabilir.

Diğer taraftan, yalnızca R_{EQ} , L_{EQ} ve C_{RES} değerleri değil aynı zamanda kapalı çevrim güç kontrol teknikleri de SSQR inverter açısından güvenilir çalışma bölgesinde kalabilmek adına önemli bir rol oynar. SSQR inverter incelendiğinde,

çalışma modlarının RL ve RLC devreleri arasında salınım yaptığı görülmektedir. Bu nedenle, yarı iletken anahtarların iletim ve kesim sürelerini belirlemek için kapalı çevrim kontrol yöntemlerinin uygulanması kaçınılmaz hale gelir. Isıtılacak malzemenin özelliklerine, V_{DC} kaynak gerilim değerine ve inverter devre elemanlarının parametrelerine bağlı olarak, yarı iletken anahtarın açma veya kapatma sürelerindeki 1 μs 'yi aşan hatalı hesaplamalar (yaklaşık %5 lik bir sapma anlamına gelir), anahtarlama kayıpları arttıracak, bunun sonucu olarak da, aşırı ısınma veya aşırı gerilimler nedeniyle yarı iletken anahtar kısa devre olarak çalışamaz hale gelecektir.

4. SSQR Inverter İçin Güvenli Çalışma Limitlerinin Hesaplanması

SSQR inverter tasarımında sınır koşullarını tanımlamak son derece önemlidir. Çalışma aralığı II ve III (seri RLC devre modu) sırasında bobin akımı I_{LEQ} ve anahtar uç gerilimi V_{CE} maksimum değerlerine ulaşırlar. Bu iki parametre hakkındaki bilgi, tasarımcı açısından sadece güvenilir çalışma koşulları için değil, aynı zamanda güç gibi kontrol sistem parametrelerini belirleme açısından da çok önemli ve değerlidir.

4.1. Akım Sınır Koşullarının Hesaplanması

Şekil 3'ten de görülebileceği gibi, bobin akımı I_{LEQ} 'nun maksimum değeri I_{LEQMAX} 'a ulaştığında, I_{LEQ} akımının türevi sıfırdır ($t = t_1$). Bu nedenle, maksimum bobin akımı I_{LEQMAX} , (16)-(18) denklemleri yardımıyla türetilir.

$$di_{LEQ}(t_1)/dt = 0 \Rightarrow i_{LEQ}(t_1) = I_{LEQMAX} \quad (16)$$

$$t_1 = \tan^{-1}[-(B_1\alpha - B_2\omega_d)/(B_1\omega_d + B_2\alpha)]/\omega_d \quad (17)$$

$$I_{LEQMAX} = i_{LEQ}(t_1) = e^{-\alpha t_1} (B_1 \cos(\omega_d t_1) + B_2 \sin(\omega_d t_1)) \quad (18)$$

Ancak burada gözden kaçırılmaması gereken en önemli ayrıntı, ilgili denklemler yardımıyla bobin ve yarı iletken geçen maksimum nominal akım değerinin tespit edilebileceğidir. Anahtarlama kaybı açısından kritik öneme sahip anlık en yüksek yarı iletken anahtar akım değerinin tespiti ise daha karmaşık bir çalışma gerektirir. Öncelikle rezonansın tamamlandığı t_5 anındaki V_{CE} gerilim değeri hesaplanmalı, sonrasında ise C_{RES} değeri ve deşarj süresi kullanılarak I_{T-LL} hesaplanmalıdır. Bunun için (19) ve (20) denklemleri kullanılabilir.

$$V_{CEMIN} = v(t_5) = V_{DC} + e^{-\alpha t_5} (A_1 \cos(\omega_d t_5) + A_2 \sin(\omega_d t_5)) \quad (19)$$

$$I_{T-LL} = C_{RES} \cdot \Delta V / \Delta t = C_{RES} \cdot V_{CEMIN} / \Delta t \quad (20)$$

Δt süresini tespit edebilmek, rezonans kondansatörü, yarı iletken anahtar ve akım çevriminde yer alan tüm iletken yolların iç direncine bağlı olduğu için çok kolay değildir. Ancak pratik ölçümlerde 100-300ns mertebesinde olduğu gözlemlenmiştir.

4.2. Gerilim Sınır Koşullarının Hesaplanması

SSQR inverterli endüksiyon ocağın maksimum güç seviyesi, yarı iletken anahtarının maksimum gerilim dayanım değeri ile sınırlıdır. Anahtar uç gerilimi maksimum V_{CEMAX} değerine ulaştığında, rezonans akımı yön değiştirecektir ve dolayısıyla I_{LEQ} akımı sıfırdır ($t = t_3$). Bunun sonucunda (21)-(23)

denklemleri yardımıyla maksimum anahtar uç gerilimi V_{CEMAX} elde edilmektedir.

$$i_{LEQ}(t_3) = 0 \Rightarrow v(t_3) = V_{CEMAX} \quad (21)$$

$$t_3 = \tan^{-1}(-B_1/B_2)/\omega_d \quad (22)$$

$$V_{CEMAX} = v(t_3) \quad (23)$$

$$= V_{DC} + e^{-\alpha t_3}(A_1 \cos(\omega_d t_3) + A_2 \sin(\omega_d t_3))$$

4.3. Devre Parametrelerine Bağlı Sınır Koşullarının Hesaplanması

SSQR inverter için güvenli çalışma limitlerinin hesaplanması bölümünde detaylı bir şekilde anlatılan devre denklemleri kullanılarak sınır koşulları hesaplanmıştır. Bu hesaplama yapılırken V_{DC} gerilimi 230 V_{AC} şebeke geriliminin doğrultulması ile elde edilmiştir. Yarı iletken anahtarın iletim süresi $T_{ON} = 16\mu s$ ve kesim süresi $T_{OFF} = 25\mu s$ değerlerinde sabit tutulmuştur.

C_{RES} rezonans kondansatörünün değeri tasarımcı tarafından belirlenmekle birlikte, R_{EQ} eşdeğer direnci ve L_{EQ} eşdeğer endüktansı değerleri, tencere ve bobin arasındaki ilişkiye bağlı olarak belirlenmekte, tencerenin ferromanyetik karakteristiğine, boyutuna ve tencere-bobin arasındaki mesafeye bağlı olarak değişmekte ve değerler net olarak tanımlanamamaktadır. Ancak tasarımın başında tanımlanacak tenceresiz durum eşdeğer endüktans değeri, her iki değer belirlenir aralıkta tanımlanabilmesine olanak sağlar. Bununla birlikte, kapalı çevrim güç kontrol yöntemleri, yarı iletken anahtarın maruz kalacağı akım ve gerilim değerleri üzerinde etkili olmaktadır. Diğer taraftan kontrol tekniklerinden bağımsız olarak devre parametrelerinin değişimi çıkış sınır değerleri üzerinde etkili olmaktadır. Bu etkileşimin karşılaştırmalı gösterimi Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Devre Parametrelerine Bağlı Sınır Koşulları.

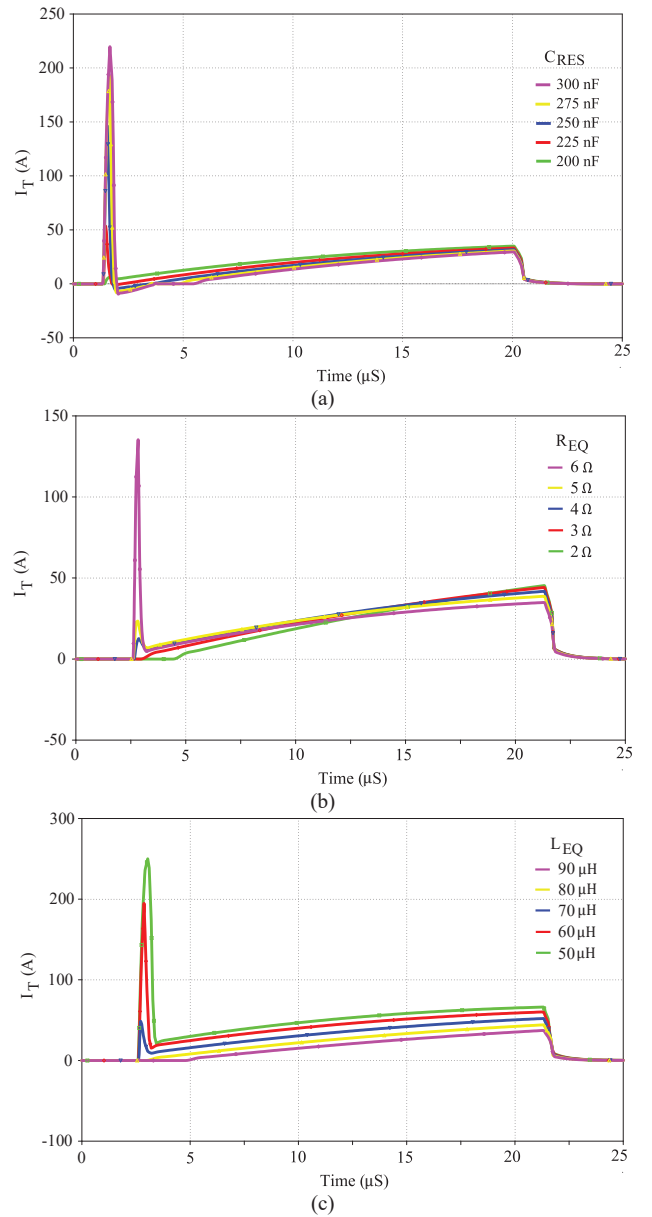
Devre Parametreleri			Çıkış Sınır Değerleri			
R_{EQ} (Ω)	L_{EQ} (μH)	C_{RES} (nF)	I_{LEQMAX} (A)	I_{T-LL} (A)	V_{CEMAX} (V)	P_{IN} (W)
5	80	200	33,24	0	926,09	1449,75
5	80	225	33,24	10,30	867,40	1449,75
5	80	250	33,24	46,10	820,44	1449,75
5	80	275	33,24	75,40	782,02	1449,75
5	80	300	33,24	99,82	750,00	1449,75
2	80	270	35,79	0	915,35	1665,57
3	80	270	34,81	0	869,57	1590,33
4	80	270	33,96	17,83	827,62	1518,43
5	80	270	33,24	69,98	789,13	1449,75
6	80	270	32,65	113,83	753,80	1384,30
5	50	270	35,28	181,67	664,18	2009,31
5	60	270	34,34	139,11	717,90	1782,80
5	70	270	33,70	102,06	758,38	1599,87
5	80	270	33,24	69,98	789,13	1449,75
5	90	270	32,91	42,12	812,83	1324,70

Tablo 1 detaylı incelendiğinde, C_{RES} rezonans devresi kondansatör değeri ile R_{EQ} eşdeğer devre direnci değişimlerinin, yarı iletken uç geriliminin en yüksek değeri

olan V_{CEMAX} ve anlık en yüksek yarı iletken anahtar akım değeri I_{T-LL} üzerinde çok etkili olduğu görülmüştür. Aynı şekilde L_{EQ} eşdeğer devre endüktans değeri değişiminin, kaynaktan çekilen güç P_{IN} ve I_{T-LL} üzerinde etkili olduğu hesaplanmıştır. Kullanılan yarıiletken anahtarın karakteristik özelliklerine bağlı olarak I_{T-LL} akımı küçük değişimler gösterebilir ancak genel davranış modeli ölçüm sonuçları ile tutarlı olacaktır.

4.4. Simulasyon Devresi Sonuçları

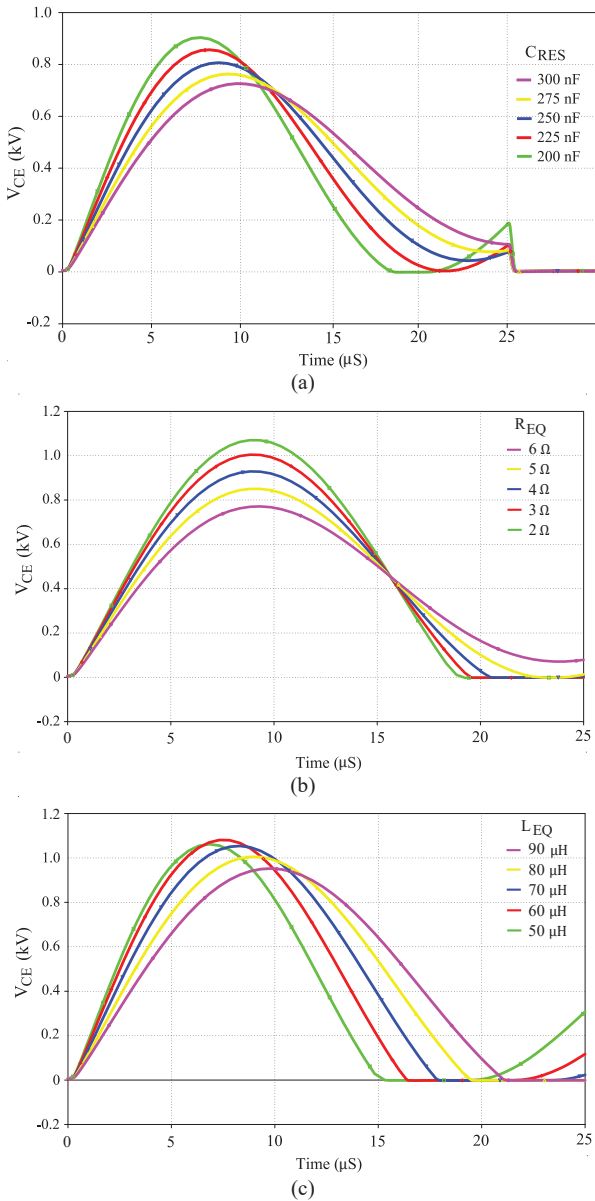
R_{EQ} eşdeğer devre direnci, L_{EQ} eşdeğer endüktansı ve C_{RES} rezonans devresi kondansatörü parametrelerine bağlı olarak sınır koşullarının değişimini inceleyebilmek amacıyla Pspice (OrCAD Capture – Lite version 17.2-2016) benzetim programından



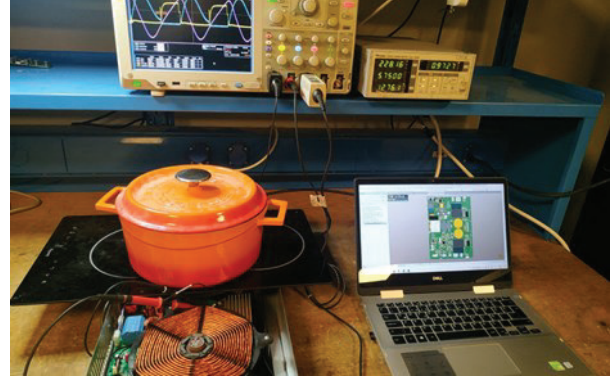
Şekil 5: PSpice programı yardımıyla elde edilen I_T anahtar akımı değişimleri (a) $R_{EQ} = 3 \Omega$, $L_{EQ} = 80 \mu H$ ve C_{RES} değeri değişken (b) $C_{RES} = 270 nF$, $L_{EQ} = 80 \mu H$ ve R_{EQ} değeri değişken (c) $R_{EQ} = 3 \Omega$, $C_{RES} = 270 nF$ ve L_{EQ} değeri değişken.

yararlanılmıştır. PSpice simülasyon programı kullanılarak, çeşitli rezonans devre parametre değerlerine bağlı yarı iletken anahtarın I_{T-LL} akım değerindeki değişimler, Şekil 5'te, yarı iletken anahtarın V_{CE} uç gerilimindeki değişimler, Şekil 6'da verilmektedir.

Hesaplama adımı ile tutarlı olacak bir şekilde, C_{RES} rezonans devresi kondansatör değeri ile R_{EQ} eşdeğer devre direnci değişimlerinin, yarı iletken uç geriliminin en yüksek değeri olan V_{CEMAX} ve anlık en yüksek yarı iletken anahtar akım değeri I_{T-LL} üzerinde çok etkili olduğu görülmüştür. Aynı şekilde L_{EQ} eşdeğer devre endüktans değeri değişiminin, I_{T-LL} yarı iletken akımı üzerinde etkili olduğu görülmüştür.



Şekil 6: PSpice programı yardımıyla elde edilen V_{CE} anahtar gerilimi değişimleri (a) $R_{EQ} = 3 \Omega$, $L_{EQ} = 80 \mu H$ ve C_{RES} değeri değişken (b) $C_{RES} = 270 nF$, $L_{EQ} = 80 \mu H$ ve R_{EQ} değeri değişken (c) $R_{EQ} = 3 \Omega$, $C_{RES} = 270 nF$ ve L_{EQ} değeri değişken.

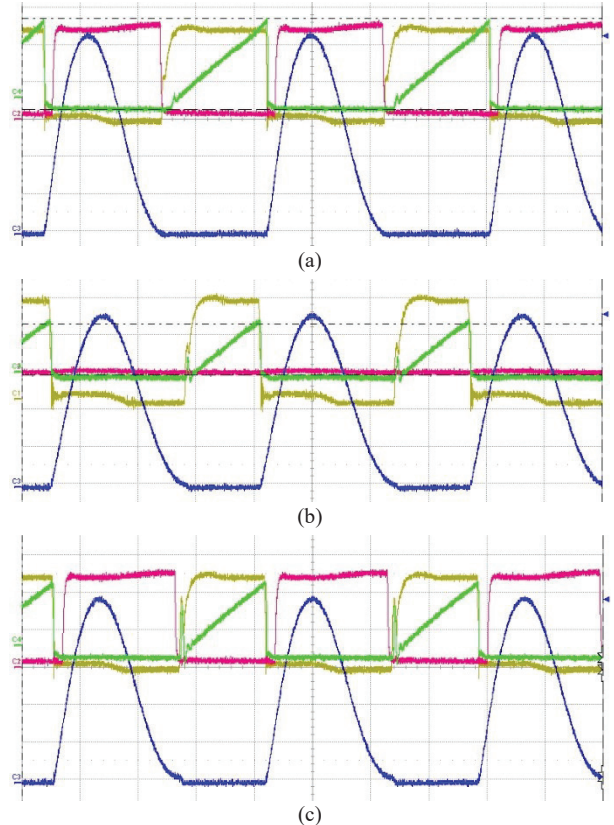


Şekil 7: Genel çalışma ve test düzeneği

4.5. Uygulama Devresi Sonuçları

Önerilen hesaplama yönteminin pratikte nasıl çalıştığını inceleyebilmek amacıyla bir uygulama devresi geliştirilmiştir. Altium Designer (Version 17.1.5) yardımıyla sch ve pcb çalışmaları yapılmış, sonrasında STM32F100R8 ARM tabanlı işlemci yardımıyla devrenin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Köprü doğrultucu olarak GSIB2560, yarı iletken anahtar olarak IHW20N135R5, IGBT sürücüsü olarak 1EDI05I12AF entegresi kullanılmıştır.

İlgili devreye ait genel çalışma ve test düzeneği Şekil 7'de verilmektedir. Kullanılan farklı karakteristik ve çaptaki tencereler kullanıldığında simülasyon sonuçlarına benzer akım ve gerilim şekilleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 8'de verilmektedir.



Şekil 8: Prototip devre kullanılarak elde edilen detaylı dalga şekilleri. Mavi sinyal: IGBT collector-emitter gerilimi, V_{CE} (200 V/div). Yeşil sinyal: IGBT akımı, I_T (10 A/div). Sarı sinyal: IGBT gate kontrol sinyali (5 V/div).

5. Sonuç

Güç elektroniği devrelerindeki güvenli çalışma koşullarını zorlayan en önemli unsurlar, yarı iletken anahtarların maruz kalacağı yüksek gerilim ve yüksek akımlardır. Aşırı akımın ürettiği aşırı ısı, zorlamalı soğutma yöntemleriyle azaltılabilirse bile, yüksek gerilimlere maruz kalan yarı iletken anahtarlar, muhtemelen kısa devre olacak ve devre çalışamaz hale gelecektir. Önerilen çalışmada EI'da kullanılan SSQR inverter için yarı iletken anahtarların maruz kalacağı aşırı akım ve aşırı gerilimler, çeşitli devre parametreleri kullanılarak önerilen hesaplama yöntemi ile hesaplanmıştır. Bu devre parametreleri arasında AC şebeke geriliminin doğrultulması ile elde edilen V_{DC} gerilimi, tencere ve bobinden oluşan sistemin eşdeğer direnci R_{EQ} ve eşdeğer endüktans değeri L_{EQ} , rezonans devresi kondansatörü C_{RES} bulunmaktadır. Bu sayede devre elemanlarının akım ve gerilim zorlanması üzerinde ne kadar etkili olduğu tespit edilmiştir. Sonrasında ise simülasyon sonuçları ve uygulama sonuçları yardımıyla elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır.

- [1] O. Lucia, P. Maussion, E. Dede, ve J. M. Burdio, "Induction heating technology and its applications: Past Developments, current Technology, and future challenges", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, c. 61, sayı 05, ss. 2509–2520, 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2281162.
- [2] M. Öztürk, F. Züngör, ve D. Ersoy, "Ev Tipi Endüksiyon Isıtmalı Ocakların Analizi", *EMO Bilim. Dergi*, c. 14, sayı 2, ss. 117–129, 2024, [Çevrimiçi]. Available at: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/emobd/issue/86413/1510028>.
- [3] M. K. Kazimierczuk ve S. Wang, "Frequency-domain analysis of series resonant converter for continuous conduction mode", *IEEE Trans. Power Electron.*, c. 7, sayı 2, ss. 270–279, Nis. 1992, doi: 10.1109/63.136243.
- [4] S. Aslan, U. Oktay, ve N. Altintas, "A Novel Non-Resonant Full-Bridge Multi-Output Topology for Domestic Induction Heating Applications", *Electronics*, c. 14, sayı 3, s. 596, Şub. 2025, doi: 10.3390/electronics14030596.
- [5] M. Ozturk ve N. Altintas, "Multi-output AC–AC converter for domestic induction heating", *Electr. Eng.*, c. 105, sayı 1, ss. 297–316, Şub. 2023, doi: 10.1007/s00202-022-01664-8.
- [6] T. Tanaka, "A new induction cooking range for heating any kind of metal vessels", *IEEE Trans. Consum. Electron.*, c. 35, sayı 3, ss. 635–641, 1989, doi: 10.1109/30.44329.
- [7] H. Sarnago, O. Lucia, A. Mediano, ve J. M. Burdio, "A Class-E Direct AC–AC Converter With Multicycle Modulation for Induction Heating Systems", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, c. 61, sayı 5, ss. 2521–2530, May. 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2281164.
- [8] H. P. Park, M. Kim, J. H. Jung, ve H. S. Kim, "Load adaptive modulation method for all-metal induction heating application", *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, c. 2018-March, ss. 3486–3490, 2018, doi: 10.1109/APEC.2018.8341606.
- [9] H. Sarnago, O. Lucia, ve J. M. Burdio, "Multiple-output ZCS resonant inverter for multi-coil induction heating appliances", *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, ss. 2234–2238, 2017, doi: 10.1109/APEC.2017.7931010.
- [10] M. S. Huang, C. C. Liao, Z. F. Li, Z. R. Shih, ve H. W. Hsueh, "Quantitative Design and Implementation of an Induction Cooker for a Copper Pan", *IEEE Access*, c. 9, ss. 5105–5118, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3046713.
- [11] S. H. Jeong, J. Il Jin, H. P. Park, ve J. H. Jung, "Enhanced load adaptive modulation of induction heating series resonant inverters to heat various-material vessels", *J. Power Electron.*, c. 22, sayı 6, ss. 1020–1032, 2022, doi: 10.1007/s43236-022-00409-x.
- [12] E. Jang, S. M. Park, D. Joo, H. M. Ahn, ve B. K. Lee, "Analysis and Comparison of Topological Configurations for All-Metal Induction Cookers", *J. Electr. Eng. Technol.*, c. 14, sayı 6, ss. 2399–2408, 2019, doi: 10.1007/s42835-019-00292-w.
- [13] W. Han, K. T. Chau, W. Liu, X. Tian, ve H. Wang, "A Dual-Resonant Topology-Reconfigurable Inverter for All-Metal Induction Heating", *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, c. 10, sayı 4, ss. 3818–3829, 2022, doi: 10.1109/JESTPE.2021.3071700.
- [14] H. Sarnago, Ó. Lucia, A. Mediano, ve J. M. Burdio, "Analytical Model of the Half-Bridge Series Resonant Inverter for Improved Power Conversion Efficiency and Performance", *IEEE Trans. Power Electron.*, c. 30, sayı 8, ss. 4128–4143, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2359576.
- [15] H. I. Hsieh, C. C. Kuo, ve W. Te Chang, "Study of half-bridge series-resonant induction cooker powered by line rectified DC with less filtering", *IET Power Electron.*, 2023, doi: 10.1049/pel2.12503.
- [16] H. W. Koertzen, J. D. van Wyk, ve J. A. Ferreira, "Design of the half-bridge, series resonant converter for induction cooking", içinde *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, 1995, c. 2, ss. 729–735, doi: 10.1109/pesc.1995.474899.
- [17] F. Zungor, H. Bodur, M. Ozturk, ve H. Obdan, "Design Methodology of Series Resonant Half Bridge Inverter for Induction Cooker", *IEEE Access*, c. 11, sayı November, ss. 135476–135492, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3338542.
- [18] M. Ozturk, "A Simplified Design Method for Quasi-Resonant Inverter Used in Induction Hob", *Electronics*, c. 12, sayı 19, s. 4145, Eki. 2023, doi: 10.3390/electronics12194145.
- [19] I. Sheikhan, N. Kaminski, S. Voß, W. Scholz, ve E. Herweg, "Optimisation of Quasi-resonant Induction Cookers", *2013 15th Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE 2013*, 2013, doi: 10.1109/EPE.2013.6631837.
- [20] M. Ozturk, F. Zungor, B. Emre, ve B. Oz, "Quasi Resonant Inverter Load Recognition Method", *IEEE Access*, c. 10, sayı August, ss. 89376–89386, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3201355.
- [21] J. Villa, D. Navarro, A. Dominguez, J. I. Artigas, ve L. A. Barragan, "Vessel Recognition in Induction Heating Appliances - A Deep-Learning Approach", *IEEE Access*, c. 9, ss. 16053–16061, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3052864.
- [22] Z.-F. Li, J.-C. Hu, M.-S. Huang, Y.-L. Lin, C.-W. Lin, ve Y.-

- M. Meng, "Load Estimation for Induction Heating Cookers Based on Series RLC Natural Resonant Current", *Energies*, c. 15, sayı 4, s. 1294, Şub. 2022, doi: 10.3390/en15041294.
- [23] E. Spateri, F. Ruiz, ve G. Gruosso, "Modelling and Simulation of Quasi-Resonant Inverter for Induction Heating under Variable Load", *Electron.*, c. 12, sayı 3, 2023, doi: 10.3390/electronics12030753.
- [24] J. Acero, J. M. Burdío, L. A. Barragán, ve R. Alonso, "A model of the equivalent impedance of the coupled winding-load system for a domestic induction heating application", *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, sayı 1, ss. 491–496, 2007, doi: 10.1109/ISIE.2007.4374646.
- [25] H. Okuno, H. Yonemori, ve M. Kobayashi, "Relation of gap length and resonant frequency about a double-coil drive type IH cooker", içinde *2008 15th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, Ağu. 2008, ss. 65–68, doi: 10.1109/ICECS.2008.4674792.
- [26] H. Omori, H. Yamashita, M. Nakaoka, ve T. Maruhashi, "A novel type induction-heating single-ended resonant inverter using new bipolar Darlington-Transistor", içinde *1985 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Haz. 1985, ss. 590–599, doi: 10.1109/PESC.1985.7070998.
- [27] W. P. W. KOMATSU, "A simple and reliable class E inverter for induction heating applications", *Int. J. Electron.*, c. 84, sayı 2, ss. 157–165, Şub. 1998, doi: 10.1080/002072198134922.
- [28] H. Terai vd., "Comparative performance evaluations of IGBTs and MCT in single-ended quasi-resonant zero voltage soft switching inverter", içinde *2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.01CH37230)*, c. 4, sayı 1, ss. 2178–2182, doi: 10.1109/PESC.2001.954443.
- [29] M. N. O. S. Charles K. Alexander, *Fundamentals of Electric Circuits*, 7th Editio. McGraw-Hill Education,.

Özgeçmiş



Metin Öztürk, 1981 yılında Kastamonu’da doğmuştur. 2004 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nden Lisans Derecesi ile mezun olmuştur. 2007 yılında “Üç Fazlı Asenkron Motorun Farklı Modülasyon Teknikleriyle Kontrol Edilmesi” üzerine yaptığı Tez çalışmasıyla Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Anabilim Dalından Yüksek Lisans Derecesi ile mezun olmuştur. 2018 yılında “Ev Türü Endüksiyonlu Ocaklar İçin Yeni Bir AC-AC Dönüştürücünün Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi” üzerine yaptığı Tez çalışmasıyla Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Anabilim Dalından Doktora Derecesi ile mezun olmuştur. 2006-2016 yılları arasında Arçelik A.Ş. Ar-Ge Merkezi’nde sırasıyla Mühendis, Uzman Mühendis ve Kıdemli Uzman Mühendis olarak görev yapmıştır. 2016 yılından günümüze kadar geçen süreçte Mamur Teknoloji Sistemleri A.Ş. Ar-Ge Merkezi’nde Elektrik ve Elektronik süreçlerin kurulması sürecini yönetmiş ve halen Elektronik projelerden Sorumlu Ar-Ge Yöneticisi olarak görev yapmaktadır. Ayrıca 2019 yılından günümüze kadar geçen süreçte İstanbul Esenyurt Üniversitesi’nde (IESU) Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmakta, 2023-2024 ders yılı itibarıyla IESU Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde Bölüm Başkanı olarak görev yapmaktadır. Araştırma ilgi alanları arasında ev tipi endüksiyonlu pişirme ve endüksiyonlu ısıtma amacıyla kullanılan yarım köprü seri rezonans evirici ve tek anahtarlı kısmi rezonanslı eviricinin geliştirilmesi konuları yer almaktadır.