

ELEKTRİK-ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ

ALANINDA ARAŞTIRMALAR
VE DEĞERLENDİRMELER

EKİM 2026

EDİTÖR

Doç. Dr. Abdurrahman GÜNDAY

gece
kitaplığı

İmtiyaz Sahibi / Yaşar Hız
Yayına Hazırlayan / Gece Kitaplığı

Birinci Basım / Ekim 2026 - Ankara
ISBN / 978-625-321-296-4

© copyright

Bu kitabın tüm yayın hakları Gece Kitaplığı'na aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Gece Kitaplığı

Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak
Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA
0312 384 80 40
www.gecekitapligi.com / gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt

Bizim Büro
Sertifika No: 42488

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK VE
HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE
DEĞERLENDİRMELER**

EKİM 2026

EDİTÖR

Doç. Dr. Abdurrahman GÜNDAY

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

MAMOGRAF GÖRÜNTÜLERİ KULLANILARAK MEME KANSERİ SINIFLANDIRILMASINDA GÖRÜNTÜ İYİLEŞTİRME TEKNİKLERİ VE TRANSFER ÖĞRENME MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Furkan ESMERAY , Arif GÜLTEN 7

BÖLÜM 2

UZAKTAN KONTROL EDİLEBİLİR AKILLI KULUÇKA MAKİNESİ

İsmail GÜÇLÜ, Beytullah BOZALI 29

BÖLÜM 3

YOL AYDINLATMASI İÇİN MODERN OPTİMİZASYON YAKLAŞIMLARI

Serhat Berat EFE 45

BÖLÜM 4

HİSTOPATOLOJİ GÖRÜNTÜLERİNDE ÖZNİTELİK HARİTALAMA VE DERİN METRİK ÖĞRENME

Volkan GÖREKE, Vekil SARI 63

BÖLÜM 5

VEKİL MODEL DESTEKLİ GENETİK ALGORİTMA YÖNTEMİ İLE İDEAL KISA DİPOL DİZİSİNİN KUAZİ-İZOTROPİK ANTEN SENTEZİ

Mustafa Cem KOÇ, Peyman MAHOUTİ 77

BÖLÜM 6

RIS DESTEKLİ KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ: BİR DURUM ÇALIŞMASI

Enis KÖRPE 99

BÖLÜM 7

METAMALZEMELER: TEMEL KAVRAMLAR, ÖZELLİKLERİ VE UYGULAMA ALANLARI

Hamdullah ÖZTÜRK 113

BÖLÜM 8

EKSENEL AKILI ELEKTRİK MOTORLARI

Vekil SARI, Volkan GÖREKE 124

BÖLÜM 9

ESP32 VE PLC TABANLI KABLOSUZ HABERLEŞME MİMARİSİ İLE ÇOKLU OTONOM ROBOT KOORDİNASYONU

Serkan PINAR 140

BÖLÜM 1

MAMMOGRAM GÖRÜNTÜLERİ KULLANILARAK MEME KANSERİ SINIFLANDIRILMASINDA GÖRÜNTÜ İYİLEŞTİRME TEKNİKLERİ VE TRANSFER ÖĞRENME MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ¹

Furkan ESMERAY² , Arif GÜLTEN³

¹ Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Prof. Dr. Arif Gülten danışmanlığında tamamlanan “ MAMMOGRAM GÖRÜNTÜLERİNDEN DERİN ÖĞRENME YÖNTEMLERİ İLE MEME KANSERİ TEŞHİSİ “ başlıklı doktora tezinden üretilmiştir.

² Dr. Öğr. Üyesi, Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye. ORCID: 0000-0002-4254-4001

³ Prof. Dr., Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye. ORCID: 0000-0002-9652-2625

1. GİRİŞ

Kanser, hücrelerin kontrolsüz bir şekilde çoğalarak yayılmasıdır ve günümüzde artmaya devam eden ölümcül bir hastalıktır (Oyelade & Ezugwu, 2020). Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) bir alt yapısı olan Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı (IARC) gibi bazı kurumlar, kanserden dolayı ölüm sayısının arttığını söylemişlerdir. Kanserın görülme sıklığının ise 2030 yılına kadar 27 milyon kişi olacağı tahmin edilmektedir. Meme kanseri cilt kanserinden sonra kadınlarda en fazla görülen ikinci kanser türüdür (Spanhol et al., 2017). Dünya Sağlık Örgütü'ne göre dünya genelinde kadınlarda 2020 yılı için 2,3 milyon kişide meme kanseri tespit edilmiştir. Bu vakaların sonucunda ise 685000 adet ölüm sonucu bildirilmiştir (Atrey et al., 2023).

Meme kanserinin tespit ve tanısı için yaygın olarak kullanılan yöntemler mamografi, ultrasonografi, manyetik rezonans görüntüleme (MRI), sintimammografi, tek foton emisyon bilgisayarlı tomografi (SPECT) ve pozitron emisyon tomografisi (PET) olarak sıralanabilir (Karellaset al., 2008). Teknolojik gelişmelere rağmen mamogram görüntülerini inceleyen uzmanlar, daha önce yapılan incelemelerde normal olarak tanı almış kişilerde meme kanseri belirtilerinin %20-60 arasında bir oranda yanlış tanı görülebildiğini belirtmişlerdir. Bu yanlış tanının sebebi mamogram görüntülerinin değerlendirilmesinin zor olmasından kaynaklanmaktadır (Lotter et al., 2021). Meme kanserini tespit edebilmek ve mamogram görüntülerini değerlendirmek için radyoloğun 30-60 saniye arasında iyi bir şekilde odaklanarak çalışması gerekmektedir. Radyologlar tarafından değerlendirilen mamogram görüntüleri %77-87 oranında duyarlılığa ve %89-97 arasında özgüllüğe sahiptir (Suh et al., 2020). Görüntü işleme ve derin öğrenme ağlarının kullanılmasıyla bu oranların yükseltilebileceği literatürde yapılan çalışmalarda görülmektedir.

Manyetik Rezonans Görüntüleme, Bilgisayarlı Tomografi, Pozitron Emisyon Tomografi, Mammografi, Ultrason ve Röntgen gibi görüntüleme teknikleri uzun yıllardır hastalıkların erken tanı ve tedavisi için kullanılmaktadır. Bu görüntüleme yöntemleri vasıtasıyla radyologlar ve hekimler hastalıkların tanı ve tedavisi için yorum yapabilmektedirler (Eker & Duru, 2021). Mammografi yöntemi meme kanseri tanısında iyi bir yöntem olmasına rağmen yüksek oranda yanlış negatif veya yanlış pozitif sonuç verme riskine sahiptir. Bu sebeple radyologlara yardımcı olması için 1990 yılında kanser tespiti yapabilen bilgisayar destekli tespit ve teşhis sistemi (CAD) geliştirilmiştir (Kavitha et al., 2022). Bilgisayar destekli tespit ve teşhis sistemleri, radyologların karar verme sürecine önemli bir şekilde etki edebilmesi için her an kullanılabilir. Bu sistem sayesinde yalancı pozitif teşhisinden dolayı yapılan biyopsinin sayısı oldukça azalmıştır. Ayrıca bir lezyonun değerlendirilmesi için boşuna enerji

harcanmasının da önüne geçilmiştir. Mammografi görüntüleri için uygulanan bilgisayar destekli tespit ve teşhis sistemi iki farklı şekilde kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi lezyonun tespiti, ikincisi ise tespit edilen lezyonun iyi huylu veya kötü huylu olmasına bağlı olarak teşhisidir (Tsochatzidis et al., 2019).

Yapay zekânın ve özellikle derin öğrenmenin gelişimiyle birlikte derin öğrenmeye dayalı görüntü sınıflandırma yöntemleri kullanılarak çok iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bilinen makine öğrenme yöntemlerine göre derin öğrenme yöntemleri ile görüntü sınıflandırmada doğruluk oranı ve hızlı bir çözüm bulmak için çeşitli avantajlar bulunmaktadır. Bu nedenle tıbbi görüntülerin sınıflandırılması için derin öğrenme yöntemlerinin kullanılması daha da önemlidir (Liu et al., 2021). Modern sağlık hizmetlerinde dijital tıbbi görüntüleme çok önemli bir konuma sahiptir. Çünkü tıbbi görüntülerin analizi ile klinik tedaviler sağlanmaktadır. Tıbbi görüntü analizinde ise görüntülerin sınıflandırılması önemli bir noktadır. Çünkü görüntü sınıflandırma ne kadar hızlı ve güvenilir ise o kadar iyi bir şekilde sınıflandırma sağlanarak doktora yardımcı olacaktır. Son zamanlarda derin öğrenme teknikleri, özellikle de evrişimsel sinir ağları tıbbi görüntü sınıflandırılmasında çok fazla önem arz etmektedir (Zhang et al., 2019). Evrişimsel sinir ağları teknolojisi girdi ile çıktı arasındaki ilişkiyi doğrusal olmayan haritalama ile yakalar. Evrişimsel sinir ağı tekniği kitlesel segmentasyon sürecinde büyük veri kümeleri için başarılı olmuştur (Malebary & Hashmi, 2021).

Meme kanserinin tespiti ve tanısı uzun zaman alabilmekte ve tanı doğruluğunu etkileyen çeşitli zorluklar içermektedir. Bu nedenle, radyologlara destek sağlayabilecek yüksek doğruluk oranına sahip bilgisayar destekli tanı sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar önem kazanmıştır. Bu tür sistemler sayesinde meme kanserinin daha hızlı ve güvenilir bir şekilde tespit edilmesi mümkün olabilecek, böylece hastaların tedavi sürecine daha erken başlanmasına katkı sağlanabilecektir.

Bu çalışmanın amacı, mamogram görüntülerini kullanarak görüntü iyileştirme teknikleri ile transfer öğrenme tabanlı derin öğrenme modellerinin meme kanseri sınıflandırma performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Bu kapsamda MIAS, DDSM ve INbreast veri setleri üzerinde VGG16, VGG19 ve ResNet50 modelleri kullanılarak deneysel analizler gerçekleştirilmiş ve görüntü iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırma başarısına etkisi incelenmiştir.

1.1.Literatürde Yapılan Çalışmalar

Literatürde yapılan çalışmalardan biri olan Al-Antari ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada meme lezyonlarının tanısallık performansını iyileştirmeyi amaçlayan derin öğrenme modeli ile bilgisayar destekli tanı sistemini önermişlerdir. Tüm mammogramlardan meme lezyonu tespiti için YOLO dedektörünü kullanmışlardır. Daha sonra da düzenli ileri beslemeli ESA, ResNet50, InceptionResNet-V2 olmak üzere üç adet modelle sınıflandırmayı gerçekleştirmişlerdir. Veri seti olarak ise DDSM ve Inbreast veri setini kullanmışlardır. DDSM veri seti için en iyi sonucu InceptionResNet-V2 ile YOLO'nun kullanılmasıyla %97,50 oranında doğrulukla bulmuşlardır. Inbreast veri seti için ise en iyi sonucu InceptionResNet-V2 ile YOLO'nun kullanılmasıyla %95,32 oranında doğrulukla elde etmişlerdir (Al-Antari et al., 2020).

Salama ve arkadaşları ise meme kanseri görüntü segmentasyonu ve sınıflandırması için çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada DDSM, CBIS-DDSM, MIAS veri setlerini kullanmışlardır. Sınıflandırmayı gerçekleştirmek için ise InceptionV3, DenseNet121, ResNet50, 3 VGG16, Mobile-NetV2 modellerini kullanmışlardır. En iyi sonucu ise DDSM veri seti için veri arttırmak için kullanılmış U-Net ve InceptionV3 sınıflandırma modeliyle %98,79 hassasiyet, %97,99 doğruluk oranını elde etmişlerdir (Salama & Aly, 2021).

Saber ve arkadaşları yaptıkları çalışmada MIAS mamogram görüntüsü veri setini kullanarak transfer öğrenme mantığını temel alan yeni bir derin öğrenme modelini oluşturarak sınıflandırma gerçekleştirmişlerdir. Bunun içinde evrimsel sinir ağlarından RESNET50, VGG16, VGG19, Inception-V2, Inception-V3 modellerini kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda VGG16 ağ modelinin daha iyi bir sonuç elde ettiğini tespit etmişlerdir. Bu model için %98.96 doğruluk oranını elde etmişlerdir (Saber et al., 2021).

Rahman ve arkadaşları yaptıkları çalışmada önceden eğitilmiş evrimsel sinir ağı modellerinin, daha önce segmentasyonu yapılmış benign ve malign mamogram görüntülerine uygulanmasıyla sınıflandırma gerçekleştirmişlerdir. Bunun için de ön işleme ve veri artırımı yaparak mevcut kaynakların sınırlılığını aşmak için transfer öğrenme veri setine uygulanmıştır. Evrimsel sinir ağı olarak ise ResNet50 ve InceptionV3 kullanılmıştır. DDSM veri kümesi için kullanılan InceptionV3 ağında 0,857 doğruluk oranı, 0,857 hassasiyet, 0,873 geri çağırma oranını elde etmişlerdir. ResNet50 için ise %5 oranında daha iyi sonuç elde etmişlerdir (Rahman et al., 2020).

Gnanasekaran ve arkadaşları yaptıkları çalışmada mamogram görüntülerinin iyi, kötü, normal olarak sınıflandırılması için derin öğrenme kavramını kullanan evrimsel sinir ağına dayalı bir

yöntem kullanmışlardır. Önerilen evrişimsel sinir ağı modeli 8 evrişim katmanı, 4 maksimum havuzlama katmanı, 2 tamamen bağlantılı katmandan oluşmaktadır. AlexNet ve VGG16 ile kıyaslandığında daha iyi sonuç elde ettiklerini savunmuşlardır. Bunun için de DDSM, MIAS ve dahili veri setlerini kullanmışlardır. En iyi sonucu üç veri setinin birleştirilerek oluşturulan veri setinin kullanılmasıyla elde etmişlerdir. %98,32 doğruluk ve 0,98 ROC eğrisi altında kalan alan olarak oranları bulmuşlardır (Gnanasekaran et al., 2020).

Li ve arkadaşları yaptıkları çalışmada DDSM veri setine ait mamogram görüntülerinin iyi ve kötü huylu olarak otomatik olarak sınıflandırılmasını gerçekleştirmişlerdir. Bunu yaparken de evrişimsel sinir ağını ve tekrarlayan sinir ağını kullanmışlardır. Evrişimsel sinir ağlarından ResNet'i mamogramların meme kitlesinin özelliklerini çıkarmak için, tekrarlayan sinir ağını meme kitlesinin özelliklerini birleştirmek için kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda %94,7 doğruluk, %94,1 geri çağırma, %96,8 eğri altında kalan alan olarak oranları bulmuşlardır (Li et al., 2021).

Podda ve arkadaşları yaptıkları çalışmada memeye ait 780 adet ultrason görüntüsünü kullanarak segmentasyon ve sınıflandırma yapabilmek için tam otomatik derin öğrenme hattını oluşturabilmek adına evrişimsel sinir ağlarının performanslarını değerlendirip karşılaştırmışlardır. Kullandıkları evrişimsel sinir ağları ise ResNet50, DenseNet121, VGG19, Inception kullanıcı tarafından oluşturulmuş ağlardır. Çalışma sonucunda segmentasyon oranı %82, doğruluk oranı %91'dir (Podda et al., 2022).

Haq ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ise bilgisayar destekli tanı sistemlerinde gürültülü ve düşük kontrastlı mamogram görüntülerinin sınıflandırılmasındaki zorluklardan dolayı yeni bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde özellik birleştirme ve topluluk öğrenme stratejilerine dayalı evrişimsel sinir ağını kullanmışlardır. Bunun içinde MIAS ve BCDR veri setlerini kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda en iyi değerleri MIAS veri setinde %99.5 hassasiyet, %99.4 özgülük ve %99.4 doğruluk oranlarını elde etmişlerdir (Haq et al., 2022).

Karthiga ve arkadaşları yaptıkları çalışmada 24576 adet mamogram görüntüsüne sahip MIAS, DDSM, INbreast veri setlerini önerdikleri derin öğrenme ağlarında kullanarak sınıflandırma ve segmentasyon yapmışlardır. Bu çalışma için VGG16, VGG19, Alexnet ağlarını kullanmışlardır. Kullanılan ağlara DDSM, MIAS, INbreast veri setleri önce ayrı ayrı olarak, daha sonra ise hepsi birleştirilerek toplam 24576 adet görüntü verilmiştir. MIAS için %95.95, DDSM için %99.39, INbreast için %96.53 oranlarını elde etmişlerdir. Bütün veri setlerinin toplamıyla da %92.27

doğruluk oranını elde etmişlerdir. Mevcut çalışmalarla kıyaslandığında ise önerilen yaklaşımın sonuçlarının verimli olduğunu savunmuşlardır (Karthiga et al., 2022).

2. MEME KANSERİ

Meme dokusu, lobüller adı verilen süt bezleri, duktuslar adı verilen süt kanalları, yağ dokusu ve meme başından oluşmaktadır (Yurttakal, 2019). Meme, kadınlarda süt üretimini sağlayan tubuloalveolar bir bezdir. Süt üretimi lubus sistem ve duktus sistemin birleşmesiyle meydana gelir. Memedeki kanser ise en fazla lobül ile terminal duktusun birleşme noktasındaki epitelde oluşan adenokanserdir. Meme kanseri oluşmadan önce duktus epiteli, atipik duktal hiperplazi, duktal karsinoma insitu gibi aşamalardan geçmektedir. Bu aşamaların sonucunda meme kanseri oluşur. Meme kanseri tedavi edilmezse biyolojik davranışına göre, uzak organ metastazları yapar ve sonuç olarak ölüme yol açar (Aydıntuğ, 2004).

2.1. Meme Görüntüleme Yöntemleri

Meme hastalıklarının ve meme kanserinin tespitinde ultrasonografi, mammografi, manyetik rezonans görüntüleme kullanılmaktadır. Tespit edilen meme kanserinin evrelendirme işlemi için ise pozitron emisyon tomografi (PET) yönteminden faydalanılmaktadır.

2.1.1.Ultrasonografi

Memenin görüntülenmesinde ultrasonografi (US) çok önemli bir araçtır. Meme US ilk defa 1950 yılında ABD donanmasında kullanılan radar tekniklerinden esinlenerek yapılmıştır. Sonraki yıllarda meme görüntülemeye US ilk olarak kistik kitleleri katı kitlelerden ayırabilmek için kullanılmıştır. Basit bir meme kisti iyi huylu bir bulgu olduğundan dolayı daha fazla araştırma gerektirmeyen bu durum klinik açıdan çok önemlidir. Diğer bir yandan US, benign ve malign katı meme kitlelerini ayırmada yeterli olmadığından dolayı katı meme kitlelerinin durumu belirsiz kalmaktadır ve biyopsi gerektirmektedir (Hooley et al., 2013).

2.1.2.Mamografi

Mamografinin tarihi 1913 yılında meme kanserinin incelenmesinde radyoloji uygulamalarını araştıran Alman doktor Salomon ile başlamıştır. Memenin ilk röntgenini ise 1931 yılında meme kanserinin erken tanısını vurgulayan Romagnoli gerçekleştirmiştir. 1951 yılında ise 10 bir röntgen makinesini mamogram yapmak için uyarlayan kişi Raul Leborgne'dir. Daha sonra ise özel bir mamografi yöntemi olan senograph geliştirilmiştir. Daha sonra ise mamografi taramasının mortaliteyi azalttığından dolayı yapılan çalışmalarla meme tümörünün

doğrulanmasının gerçekleşebileceğinden dolayı, mamografi tarama uygulamaları çeşitli ülkelerde gerçekleştirilmiştir (Heywang-Koebrunner et al., 2013).

2.1.3. Manyetik Rezonans Görüntüleme

Manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ile elde edilen ilk vücut görüntülerden bazılarında memeye ait görüntüler de bulunmaktadır. 1980'li yıllarda uzmanlar meme kanserini tespit etmede manyetik rezonans görüntülemenin klinik etkisinin oldukça düşük olduğunu belirtmişlerdir. Ancak sonradan yapılan kontrast maddelerinin meme görüntülemesinde uygulanmasıyla bu düşünce değişmiştir. Çünkü normal meme dokusuyla kıyaslandığında meme kanserlerinin standart gadolinyum kontrast maddeleriyle önemli ölçüde arttığı ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca kontrastlı manyetik rezonans görüntülemenin iyi huylu meme dokusunu kötü huylu meme dokusundan ayırabildiği de bulunmuştur (Lehman & Schnall, 2005).

3. GÖRÜNTÜ İYİLEŞTİRME TEKNİKLERİ

Bu çalışmada görüntü iyileştirme teknikleri için klasik histogram eşitleme, kontrast limitli adaptif histogram eşitleme (KLAHE) ve görüntü filtreleme yöntemleri kullanılmıştır.

3.1. Klasik Histogram Eşitleme

Histogram eşitleme kontrast zenginleştirme yöntemlerinden biri olarak bilinmektedir. Çünkü kontrast geliştirme tekniklerinin güçlü olması gri ton değerlerinin histogramda yoğunlaştığı bölgelere bağlıdır. Histogram eşitleme görüntünün tamamına uygulanabileceği gibi sadece görüntünün belirli bir kısmına da uygulanabilmektedir. Görüntünün bütününe uygulanırsa global histogram eşitleme, sadece belirli bir kısmına uygulanırsa lokal histogram eşitleme denilmektedir. Histogram eşitlemenin uygulanmasında ilk önce görüntüye ait histogram bulunur. Daha sonra ise histogramdan yararlanılarak kümülatif histogram çıkartılır. Sonraki adım ise kümülatif histogram değerleri normal hale çevrilip gri seviye değerleri elde edilir. Sonraki adım ise orijinal gri seviye değerleri ile elde edilen gri seviye değerleri birbirine karşıtlık oluşturacak şekilde yeni histogram oluşturulur (Perihanoğlu, 2015).

3.2. KLAHE

KLAHE'nin açılımı kontrast limitli adaptif histogram eşitlemedir. KLAHE gürültü sorunun çözümü için kırpma limiti olarak oluşturulmuştur. KLAHE limitleri, kümülatif dağılım fonksiyonunun hesaplanmasından önce histogramı önceden belirlenmiş değerde kırparak oluşur. Bu limitler kümülatif dağılım fonksiyonunun ve dolaylı olarak dönüşüm fonksiyonunun

eğimini belirlemektedir. Histogramın kırılma değeri veya başka bir deyişle sözde kırpma limiti, histogramın normalleşmesine ve komşu bölgenin boyutuna bağlıdır (Min et al., 2013).

KLAHE'nin iki ana noktası vardır. Bunlar blok boyutu ve kırpma limitidir. Bu parametreler görüntü kalitesini kontrol etmek için kullanılırlar. Diğer bir yandan bu parametreleri belirleyebilmek için ayrıntılı bir yöntem yoktur. Fakat kullanıcılar tarafında bilimsel olarak seçilmiştir ve kullanılmıştır (Min et al., 2013).

3.3.Görüntü Filtreleme Yöntemleri

Filtreler görüntü zenginleştirme için bazı önemli noktaları öne çıkarmak veya görüntüdeki istenmeyen zararları azaltmak için kullanılmaktadırlar. Görüntüde istenmeyen zararlar ise görüntüleri dijital olarak kaydeden cihazların görüntüyü hatalı olarak kaydedebilmeleri, çevre koşullarının yetersizliğinden dolayı birçok kayıp gibi olaylardır. Filtreler 3x3, 5x5, 7x7 gibi boyutta olan matris formda filtreleme çeşidine göre kullanılabilir. Filtreleme, bu boyuttaki matrislerin görüntü pikselleri üzerinde gezinmesiyle yapılır. Görüntü üzerindeki her bir piksel için filtre elemanları ve piksel değerleri ile yeni gri ton değerleri hesaplanarak ortalamayı ağırlıklandırmak için kullanılmaktadır (Perihanoğlu, 2015).

3.3.1.Averaj Filtre (AF)

Diğer bir adı da ortalama filtredir. Ayrıca alçak geçiren filtre çeşitlerinden biridir. Bu filtrenin özelliği ise görüntü üzerindeki gri tonların değişmediği bir noktaya uygulandığında merkezdeki gri ton değeri değişmeden kalmaktadır. Averaj filtre gri ton değerlerinde fazla değişiklik gösteren bir bölüme uygulandığında merkezdeki pikselin çevresindeki piksellerin gri ton değerlerinin ortalaması alınacağından merkezdeki pikseller ile çevresindeki piksellerin farkı azalacaktır. Bu filtreler gürültüyü azaltmada kullanılır (Perihanoğlu, 2015).

3.3.2.Katlama Filtreleme

Bu filtreleme türü bir görüntünün mekansal frekans karakteristiğinin değiştirilebilen bir filtredir. Filtreleme işlemini gerçekleştirebilmek için filtre çekirdeği kullanılmaktadır (Perihanoğlu, 2015).

3.3.3.Medyan Filtre (MF)

İşlenecek görüntülerin üzerinde gürültü oranının %20'den az olan durumlarda çok etkili olan bir filtredir. Daha çok Kontrast Limitli Adaptif Histogram Eşitleme (KLAHE) yönteminin kullanılmasıyla ortaya çıkan %1-%12 oranlarındaki gürültülerin azaltılması için tercih

edilmektedir. Diğer bir yandan da gürültü azaltma işlemini yaparken mevcut ayrıntıların kaybolmamasına olanak sağlamaktadır. Medyan filtre (MF) 3x3'lük filtre parametrelerini kullanarak görüntüyü tararken, görüntü değerleri üzerindeki medyan değerlerini de alıp, medyan değerini filtre merkezine yerleştirmektedir. Bu sayede piksel değerlerin ortak değere ulaşmasıyla görüntüdeki ince bir şekilde olan kumlanma ortadan kaldırılmaktadır (Foto, 2022)].

3.3.4. Gauss Filtresi (GF)

Gaussian filtre (GF), gaussian fonksiyonunun boyutuna ve ağırlıklarına göre ayarlanabilen doğrusal bir yumuşatma filtresidir. Uzamsal alanda veya frekans alanında gaussian yumuşatma filtresi normal bir dağılımda olan gürültüleri yok etmek için oluşturulmuş bir tür alçak geçiren filtredir. Bu sebeple de görüntü işleme uygulamalarında önemli bir noktadadır (Wang et al., 2014).

3.3.5. İkili Filtreleme (İF)

İkili filtreleme yakındaki görüntü değerlerinin doğrusal olmayan bir kombinasyonu aracılığı ile görüntü kenarını korurken aynı zamanda yumuşatmaktadır. Bu filtreleme yinelemeli olmamakla beraber oldukça basittir. Gri düzeylerini veya renkleri hem geometrik yakınlıklarına hem de fotometrik benzerliklerine göre birleştirmektedir. Ayrıca hem etki alanında hem de aralıklarda yakın değerleri uzak değerlere tercih etmektedir. Diğer bir yandan standart bir filtrelemenin aksine kenarlarda hayalet renkler üretmez ve hayalet renkleri orijinal görüntü üzerinde de azaltmaktadır (Tomasi & Manduchi, 1998).

4. TRANSFER ÖĞRENME TABANLI DERİN ÖĞRENME MODELLERİ

Bu çalışmada evrişimsel sinir ağı yöntemlerinden VGG-16, VGG-19, ResNet50 ön eğitilmiş yöntemler kullanılmıştır.

4.1. VGG16

VGG-16 mimarisine sahip evrişimsel sinir ağı, Oxford Üniversitesinden NK. Simonyan ve A. Zisserman tarafından “Büyük Ölçekli Görüntü Tanıma İçin Çok Derin Evrişimli Ağlar” isimli çalışmalarında tanıtmışlardır. VGG-16 mimarisinde toplam 41 adet katman bulunmaktadır. Bu katmanların 16 tanesi ağırlık katmanı, 13 tanesi evrişim katmanı, 3 tanesi tam bağlantılı katmandır. Tüm evrişim katmanlarında adım parametresi bir olan 3x3 boyutunda filtre kullanılmaktadır. Evrişim katmanlarından sonra da maksimum havuzlama katmanı bulunmaktadır. Giriş katmanına ise 224x224 üç kanallı görüntüler girmektedir (Mascarenhas & Agarwal, 2021). 224x224x3 boyutundaki görüntüler 2 evrişim katmanına, 1 maksimum

havuzlama katmanına, tekrar 2 evrişim katmanına, 1 maksimum havuzlama katmanına sırasıyla girmektedir. Daha sonra da görüntüler 3 evrişim katmanı, 1 maksimum havuzlama katmanı, 3 evrişim katmanı, 1 maksimum havuzlama katmanı, 3 evrişim katmanı, 1 maksimum havuzlama katmanı sırasıyla ağda gelmektedir. Bu katmanların ardından tam bağlantılı katman ve ReLu katmanı gelmektedir. Evrişim katmanı 1 adımlı 3x3 boyutunda filtre içerirken, maksimum havuzlama katmanı 2 adımlı 2x2 filtre içermektedir. Softmax sınıflandırıcı son katmanda kullanılmaktadır. ReLu fonksiyonları ise gizli katmanlara uygulanmaktadır (Mascarenhas & Agarwal, 2021).

4.2.VGG19

Derin öğrenmede, görüntünün değerlendirilebilmesi için ileri beslemeli bir tür olması sebebiyle evrişimsel sinir ağının kullanılması oldukça önemlidir. Bu evrişimsel sinir ağı yöntemlerinden biri olan VGG-19 modeli çok düşük miktarda ön işlem sayısına sahip olmasından 36 dolayı diğer sınıflandırma yöntemlerinden farklıdır. VGG-19 yöntemide en iyi sonuç veren yöntemlerden biridir (Ahmed & Nayak, 2021). VGG-19 evrişimsel sinir ağı 19 katmanlı derin sinir ağından oluşmaktadır. VGG-19 ağının tam bağlı düğümler açısından 574 MB'dir. Katman sayısı arttıkça evrişimsel sinir ağının doğruluğunu arttığı da bilinmektedir. VGG-19 modeli maksimum havuzlama katmanı, dropout katmanı ve tam bağlantılı katmandan oluşan ve eğitilebilir bir evrişimsel sinir ağı modelidir. VGG-19, 1000 adet nesne kategorisine sınıflandırma yapabilmek için, 16 evrişim katman ve 3 tam bağlantılı katman kullanmaktadır. VGG-19 da ImageNet veritabanı üzerinde eğitilmiştir. VGG-19 mimarisindeki evrişimsel katmanlar her aktivasyon haritasının önceki katmanla aynı uzamsal boyutlarda olması için bir adım parametrelili 3x3 filtre kullanmaktadır. Uzamsal boyutu azaltmak için ise maksimum havuzlama katmanını kullanmaktadır. Havuzlama katmanında 1 adım parametrelili 2x2 filtre kullanarak uzamsal boyutu yarıya indirmektedir. VGG-19, her evrişimden hemen sonra ReLu aktivasyon fonksiyonunu kullanmaktadır. 4096 ReLu etkinleştirilmiş birime sahip iki tam bağlı katman, son katmanda bulunan 1000 Softmax katmanından önce kullanılmaktadır (Ahmed & Nayak, 2021).

4.3.ResNet50

Residual Networks yani artık ağların kısaltması olan ResNet klasik bir sinir ağı olarak isimlendirilmektedir. İlk olarak 2015 yılında “Residual Deep Learning for Image Recognition” başlıklı bir bilgisayarlı görme araştırma makalesinde ortaya çıkan yenilikçi bir sinir ağıdır (Alzamily et al., 2022). ResNet50, 50 katmanlı derin bir mimaridir. Bu modelde kullanılan

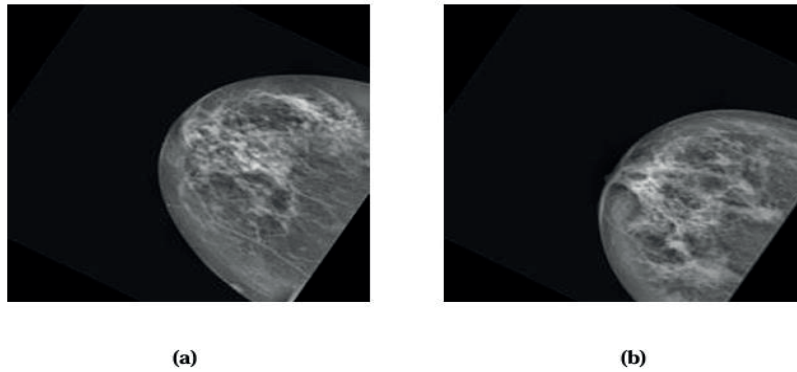
parametre sayısı 23.521 milyondur. ResNet-50 modeli 48 sarmal katman, 1 MaxPool, bir ara havuz katmanı ve ReLu aktivasyon fonksiyonundan oluşmaktadır. Toplu normalleştirme, ReLu aktivasyon fonksiyonu ve maksimum havuzlama işlemleri bu durumda conv1 bloğu aracılığıyla gerçekleştirilir. Doğrusal katman, son 2048 kanallı evrişim katmanı kullanılarak oluşturulur. Tamamen bağlı katman son katman olan softmax işlevine bağlanır. ResNet50’de giriş görüntüsü 224x224x3 boyutundadır (Alzamily et al., 2022).

5.MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmayı yapabilmek için gerekli olan veri setinin oluşturulması, görüntü işleme adımı, kullanılan transfer öğrenme ağlarının oluşturulması, kullanılan değerlendirme kriterleri, kullanılan hiper parametreler, çalışmaların sonuçları bu bölümde açıklanmıştır.

5.1.Çalışmada Kullanılan Veri Seti

Bu çalışmada halka açık veritabanı olan Mendeley Data’nın kitleleri içeren meme mamografi görüntüleri veri seti kullanılmıştır. Veri setinde iyi huylu ve kötü huylu kitleleri içeren mamografi görüntüleri bulunmaktadır. Bu veri setindeki görseller INbreast veri setinden 106 adet toplu mamogram görüntüsü, MIAS veri setinden 53 adet toplu mamogram görüntüsü ve DDSM veri setinden 2188 adet toplu mamogram görüntüsünün toplamıyla bir veri seti oluşturulmuştur. Bu oluşturulan veri seti için veri artırımı yapıldıktan sonra Inbreast veri kümesinde 7632 görüntü, MIAS veri kümesinde 3816 görüntü, DDSM veri kümesinde ise 13128 görüntü bulunmaktadır. Tüm mamogram görüntüleri 227x227x1 özelliktedir (Lin & Huang, 2020). Bu çalışma için bu veri setinden 10000 adet iyi huylu ve 10000 adet kötü huylu olan toplam 20000 adet olan mamografi görüntüsü kullanılmıştır. Şekil 5.1’de bu görüntülerin örnekleri gösterilmiştir.



Şekil5.1. (a) Benign mamografi görüntüsü, (b) Malign mamografi görüntüsü

5.2.Görüntü İşlemenin Uygulanması

Bu çalışmada veri setine ait 10000 adet malign ve 10000 adet benign toplam 20000 adet 227x227x1 boyutta mamogram görüntüsü kullanılmıştır. Öncelikli olarak kullanılacak derin öğrenme ağlarının girişine uyumlu olabilmesi için yazılımla görüntü özellikleri 224x224x3 boyutuna dönüştürülmüştür. 224x224x3 boyutundaki 20000 adet mamogram görüntüsüne, görüntü filtreleme, klasik histogram eşitleme ve KLAHE yöntemleri uygulanmıştır.

5.3.Derin Öğrenme Modellerinin Uygulanması

Bu çalışmada meme kanserinin mammogram görüntülerinden tespiti için üç adet farklı derin öğrenme modeli kullanılmıştır. Mammogram veri setinde bulunan 10000 adet benign, 10000 adet malign özellikli görüntü kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan veri setinin %80'i eğitim için, %20'si ise test için ayrılmıştır. Ayrıca benign ve malign olarak bulunan mamogram görüntülerine sınıf etiketi atanmıştır. Sınıf etiketi olarak benign görüntüler için 0, malign görüntüler için 1 sınıf etiketi değeri atanmıştır. Bu çalışmada derin öğrenme yöntemlerinden olan transfer öğrenme yöntemlerinden VGG-16, VGG-19, ResNet50 modelleri kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan bu transfer öğrenme yöntemlerine ince ayar işlemi uygulanmıştır. Her bir modelin bütün katmanları dondurulup sınıflandırıcı katman eklenmiştir. Bu sınıflandırma katmanında 1 adet maksimum havuzlama katmanı, 2 adet evrişim katmanı ve 1 adet iki tane sınıf olduğundan dolayı Softmax fonksiyonu kullanılmış sınıflandırıcı bulunmaktadır. Ayrıca ReLu aktivasyon fonksiyonu da kullanılmıştır. Bu transfer öğrenme yöntemlerinde görüntü işlemenin kullanılabilmesi için 227x227x1 boyutundaki özellikler 224x224x3 boyutlarına dönüştürülmüştür. Çünkü kullanılacak olan ağların giriş görüntüleri bu özelliklerde olmalıdır. Ayrıca görüntü işleme adımı anlatılan işlemlerle (histogram eşitleme yöntemleri, görüntü filtreleme yöntemleri ve kombinasyonları) elde edilen görüntüler ağların girişine uygulanmıştır. Bu çalışmada ağdaki tur sayısı 20, öğrenme oranı 0,00001, optimizasyon algoritması olarak Adam, doğrulama bölmesi 0.2, grup büyüklüğü ise 32 olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışma 5 kat çapraz doğrulama kullanılarak yapılmıştır.

5.4.Çalışmada Kullanılan Değerlendirme Metrikleri

Bu çalışmada mamogram görüntülerinden meme kanseri tespiti için oluşturulan modelin performansını değerlendirebilmek için Doğruluk, Geri Çağırma, F-1 Skor, Hassasiyet, Karışıklık Matrisi terimleri kullanılmıştır.

5.4.1. Karışıklık Matrisi

Makine öğrenimi alanında ve daha spesifik olarak istatistiksel sınıflandırma probleminde, bir karışıklık matrisi, bir algoritmanın (tipik olarak denetimli öğrenme algoritması) performansının görselleştirilmesini sağlayan özel bir tablo düzenidir. Her sütun gerçek bir sınıftaki örnekleri temsil ederken, matrisin her satırı tahmin edilen bir sınıftaki örnekleri temsil etmektedir. Yanlış pozitiflerin (YP), yanlış negatiflerin (YN), gerçek pozitiflerin (GP) ve gerçek negatiflerin (GN) sayısını rapor eden, iki satır ve iki sütundan oluşan bir tablodur (Cengil & Çınar, 2020). Tablo 5.1’de karışıklık matrisi ifade edilmiştir.

Tablo 5.1. Karışıklık Matrisi

	Tahmin Edilen Pozitif	Tahmin Edilen Negatif
Gerçek Pozitif	DP	YN
Gerçek Negatif	YP	DN

5.4.2. Doğruluk

Eğitim kümesi olarak oluşturulan modelin test verilerini doğru sınıflandırma oranıdır. Ayrıca doğru sınıflandırılan sınıfların tüm sınıflara oranıdır (Cengil & Çınar, 2020). Denklem 5.1’de doğruluk ifadesinin hesaplanması gösterilmiştir.

$$Doğruluk = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} \quad (5.1)$$

5.4.3. Geri Çağırma

Sınıflandırıcının tamamlama kabiliyetini ölçebilen bir kriterdir. Geri çağırma metriğinin yüksek olması daha az yanlış pozitif sayısını temsil etmektedir. Diğer bir yandan geri çağırma metriğinin düşük olması daha fazla yanlış pozitif sayısını ifade etmektedir. Hassasiyet metriğindeki iyileşme geri çağırma metriğinin azalmasıyla oluşmaktadır (Cengil & Çınar, 2020). Denklem 5.2’de geri çağırma metriğinin hesaplanması gösterilmiştir.

$$Geri \text{ Çağırma} = \frac{DP}{DP+YN} \quad (5.2)$$

5.4.4.Hassasiyet

Pozitif olarak tahmin edilen verilerin ne kadarının doğru tahmin edildiğini ifade eden kriterdir. Yüksek bir hassasiyet, daha az yanlış pozitif sayısını göstermektedir. Hassasiyet, modelin pozitif olarak sınıflandırdığı örneklerin ne kadarının gerçekten pozitif olduğunu ölçmektedir (Cengil & Çınar, 2020). Denklem 5.3’de hassasiyet kriterinin formülü ifade edilmiştir.

$$Hassasiyet = \frac{DP}{DP+YP} \quad (5.3)$$

5.4.5.F-1 Skor

Geri çağırma ve hassasiyet kriterlerinin çarpımının, geri çağırma ve hassasiyet kriterlerinin toplamına oranıyla F-1 Skoru kriteri hesaplanmaktadır. Bu kriter hem modelin tamamlama yeteneğini hem de doğruluk oranını dengeli bir şekilde hesaplamaktadır. F1-Score, yanlış negatiflerin azaltılmasıyla birlikte yanlış pozitiflerinde kontrol altında tutulup tutulmadığını ifade eden bir kriterdir (Cengil & Çınar, 2020). Denklem 5.4’te F-1 Skor metriğinin formülü ifade edilmiştir.

$$F - 1 \text{ Skor} = \frac{2*(Hassasiyet)*(Geri \text{ Çağırma})}{(Hassasiyet)+(Geri \text{ Çağırma})} \quad (5.4)$$

6.BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada VGG16, VGG19, ResNet50 yöntemleri ilk olarak hiçbir işlenmemiş görüntülere uygulanmıştır. Daha sonra ise klasik histogram eşitleme (HE), KLAHE, averaj filtre (AF), medyan filtre (MF), gauss filtre (GF), ikili filtre (İF) ayrı ayrı uygulanmıştır. Ayrıca bu filtre ve histogram eşitleme yöntemlerinin kombinasyonları da uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir. Tablo 6.1’de VGG16 derin öğrenme yönteminin Tablo 6.2’de VGG19 derin öğrenme yönteminin, Tablo 6.3’de ResNet50 derin öğrenme yönteminin, görüntü iyileştirme uygulanmış görüntülere uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 6.1. Çalışmada kullanılan ince ayarlı VGG-16 transfer öğrenme modelinin değerlendirme sonuçları

Yöntem İsmi	Doğruluk (%)	F-1 Skor (%)	Hassasiyet (%)	Geri Çağırma (%)
VGG16-Ham Veri	99.90	99.90	100.00	99.80
VGG16-MF	99.85	99.85	99.97	99.73
VGG16-AF	99.93	99.93	99.98	99.88
VGG16-GF	99.84	99.83	99.68	100.00
VGG16-İF	99.91	99.91	99.98	99.85
VGG16-MF-KLAHE	98.41	98.40	99.39	97.43
VGG16-AF-KLAHE	99.36	99.37	98.74	100.00
VGG16-GF-KLAHE	99.91	99.91	99.85	99.98
VGG16-İF-KLAHE	99.55	99.55	99.87	99.23
VGG16-KLAHE	99.80	99.80	99.73	99.88
VGG16-AF-HE	99.87	99.86	99.75	99.98
VGG16-GF-HE	99.90	99.90	99.88	99.93
VGG16-İF-HE	99.69	99.69	99.58	99.80
VGG16-MF-HE	99.93	99.93	99.88	99.98
VGG16-HE	99.51	99.52	99.04	100.00

Bu çalışmada en iyi sonucu veren yöntemlerden VGG16-AF için test verisine ait, karışıklık matrisi değerleri DP sayısı 3990, DN sayısı 4004, YP sayısı 5, YN sayısı 1'dir. VGG16-MF-HE için test verisine ait karışıklık matrisi değerleri DP sayısı 3986, DN sayısı 4008, YP sayısı 1, YN sayısı 5'dir.

Tablo 6.2. Çalışmada kullanılan ince ayarlı VGG-19 transfer öğrenme modelinin değerlendirme sonuçları

Yöntem İsmi	Doğruluk (%)	F-1 Skor (%)	Hassasiyet (%)	Geri Çağırma (%)
VGG19-Ham Veri	99.91	99.91	99.85	99.98
VGG19-MF	99.93	99.93	99.90	99.95
VGG19-AF	99.86	99.86	99.80	99.93
VGG19-GF	99.63	99.63	99.60	99.65
VGG19-İF	99.88	99.88	99.95	99.80
VGG19-MF-KLAHE	99.90	99.90	99.80	100.00
VGG19-AF-KLAHE	99.70	99.70	100.00	99.40
VGG19-GF-KLAHE	99.64	99.64	99.53	99.75
VGG19-İF-KLAHE	99.66	99.67	99.40	99.93
VGG19-KLAHE	99.90	99.90	99.98	99.83
VGG19-AF-HE	99.74	99.74	99.78	99.70
VGG19-GF-HE	99.73	99.73	99.48	99.98
VGG19-İF-HE	99.70	99.70	99.92	99.48
VGG19-MF-HE	99.86	99.86	99.80	99.93
VGG19-HE	99.73	99.73	99.68	99.78

Bu çalışmada en iyi sonucu veren yöntemlerden VGG19-MF yöntemi için test verisine ait, karışıklık matrisi değerleri DP sayısı 3987, DN sayısı 4007, YP sayısı 2, YN sayısı 4'tür. Yapılan bu çalışmanın sonucunda kullanılan bütün yöntemler çok iyi sonuçlar vermiştir.

Tablo 6.1, Tablo 6.2, Tablo 6.3 incelendiğinde, VGG19-MF yöntemi, VGG16-AF yöntemi, VGG16-MF-HE yöntemi en iyi sonuçları vermişlerdir.

Tablo 6.3. Çalışmada kullanılan ince ayarlı ResNet50 transfer öğrenme modelinin değerlendirme sonuçları

Yöntem İsmi	Doğruluk (%)	F-1 Skor (%)	Hassasiyet (%)	Geri Çağırma (%)
ResNet50-Ham Veri	99.88	99.88	99.65	99.82
ResNet50-MF	99.64	99.64	99.70	99.58
ResNet50-AF	99.85	99.85	99.88	99.83
ResNet50-GF	99.61	99.61	99.58	99.65
ResNet50-İF	98.75	98.74	99.95	97.56
ResNet50-MF-KLAHE	99.56	99.57	99.21	99.93
ResNet50-AF-KLAHE	99.42	99.42	99.18	99.56
ResNet50-GF-KLAHE	99.78	99.78	99.78	99.78
ResNet50-İF-KLAHE	98.93	98.94	98.18	99.70
ResNet50-KLAHE	99.81	99.81	99.73	99.90
ResNet50-AF-HE	99.43	99.43	99.25	99.60
ResNet50-GF-HE	99.41	99.41	99.33	99.50
ResNet50-İF-HE	99.38	99.37	99.72	99.03
ResNet50-MF-HE	99.74	99.74	99.70	99.78
ResNet50-HE	99.59	99.59	99.33	99.85

7.SONUÇLAR

Bu çalışmada, mamogram görüntülerinden meme kanseri sınıflandırılmasında görüntü iyileştirme teknikleri ile transfer öğrenme tabanlı derin öğrenme modellerinin performansı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla MIAS, DDSM ve INbreast veri setleri kullanılarak VGG16, VGG19 ve ResNet50 modelleri üzerinde deneysel analizler gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen bulgular, görüntü iyileştirme tekniklerinin derin öğrenme modellerinin sınıflandırma performansını olumlu yönde etkileyebildiğini göstermektedir. Ayrıca model performanslarının kullanılan veri seti, model mimarisi ve ön işleme yöntemlerine bağlı olarak değişiklik gösterebildiği görülmüştür. Bu durum, meme kanseri sınıflandırmasında yalnızca model seçiminin değil, görüntülerin ön işleme aşamasında hangi yöntemlerle iyileştirildiğinin de önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada sunulan karşılaştırmalı değerlendirme, transfer öğrenme tabanlı derin öğrenme modellerinin mamogram görüntülerinin analizinde etkili bir yaklaşım olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Elde edilen bulguların, bilgisayar destekli tanı sistemlerinin geliştirilmesine ve

radlyologların karar verme süreçlerine destek sağlayabilecek yöntemlerin tasarlanmasına katkı sunabileceği düşünölmektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda daha büyük ve çok merkezli veri setlerinin kullanılması, Vision Transformer ve foundation model tabanlı güncel mimarilerin değeriendirilmesi, ayrıca açıklanabilir yapay zekâ yöntemlerinin entegre edilmesiyle daha güvenilir ve genellenebilir bilgisayar destekli tanı sistemlerinin geliştirilmesi mümkün olabilir.

8.REFERANSLAR

- Ahmed, M. J., & Nayak, P. (2021, November). Detection of lymphoblastic leukemia using VGG19 model. In *2021 Fifth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)* (pp. 716–723). IEEE. <https://doi.org/10.1109/I-SMAC52330.2021.9640895>
- Al-Antari, M. A., Han, S. M., & Kim, T. S. (2020). Evaluation of deep learning detection and classification towards computer-aided diagnosis of breast lesions in digital X-ray mammograms. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 196, 105584. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105584>
- Alzamily, J. Y. I., Ariffin, S. B., & Abu-Naser, S. S. (2022). Classification of encrypted images using deep learning–ResNet50. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 100(21), 6610–6620.
- Atrey, K., Singh, B. K., Bodhey, N. K., & Pachori, R. B. (2023). Mammography and ultrasound based dual modality classification of breast cancer using a hybrid deep learning approach. *Biomedical Signal Processing and Control*, 86, 104919. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2023.104919>
- Aydınтуğ, S. (2004). Meme kanserinde erken tanı. *STED*, 13(6), 226–229.
- Cengil, E., & Çınar, A. (2020). Göğüs verileri metrikleri üzerinden kanser sınıflandırılması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(2), 513–519. <https://doi.org/10.24012/dumf.578606>
- Eker, A. G., & Duru, N. (2021). Medikal görüntü işlemede derin öğrenme uygulamaları. *Acta Infologica*, 5(2), 459–474. <https://doi.org/10.26650/acin.92756>
- Foto, Ö. (2022). *Transfer öğrenme modelleri ile akciğer X-ray görüntülerinden COVID-19 tespiti* (Yüksek lisans tezi, Aksaray Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Aksaray, Türkiye).
- Gnanasekaran, V. S., Joypaul, S., Meenakshi Sundaram, P., & Chairman, D. D. (2020). Deep learning algorithm for breast masses classification in mammograms. *IET Image Processing*, 14(12), 2860–2868. <https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2020.0070>
- Haq, I. U., Ali, H., Wang, H. Y., Lei, C., & Ali, H. (2022). Feature fusion and ensemble learning-based CNN model for mammographic image classification. *Journal of King Saud*

- University–Computer and Information Sciences*, 34(6), 3310–3318.
<https://doi.org/10.1016/j>
- Heywang-Koebrunner, S., Bock, K., Heindel, W., Hecht, G., Regitz-Jedermann, L., Hacker, A., ... Kaeab-Sanyal, V. (2013). Mammography screening—As of 2013. *Geburtshilfe und Frauenheilkunde*, 73(10), 1007–1016. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1350880>
- Hooley, R. J., Scoutt, L. M., & Philpotts, L. E. (2013). Breast ultrasonography: State of the art. *Radiology*, 268(3), 642–659. <https://doi.org/10.1148/radiol.13121606>
- Karellas, A., & Vedantham, S. (2008). Breast cancer imaging: A perspective for the next decade. *Medical Physics*, 35(11), 4878–4897. <https://doi.org/10.1118/1.2986144>
- Karthiga, R., Narasimhan, K., & Amirtharajan, R. (2022). Diagnosis of breast cancer for modern mammography using artificial intelligence. *Mathematics and Computers in Simulation*, 202, 316–330. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2022.05.038>
- Kavitha, T., Mathai, P. P., Karthikeyan, C., Ashok, M., Kohar, R., Avanija, J., ... Neelakandan, S. (2022). Deep learning based capsule neural network model for breast cancer diagnosis using mammogram images. *Interdisciplinary Sciences: Computational Life Sciences*, 14(1), 113–129. <https://doi.org/10.1007/s12539-021-00461-7>
- Lehman, C. D., & Schnall, M. D. (2005). Imaging in breast cancer: Magnetic resonance imaging. *Breast Cancer Research*, 7(5), 215–219. <https://doi.org/10.1186/bcr1309>
- Li, H., Niu, J., Li, D., & Zhang, C. (2021). Classification of breast mass in two-view mammograms via deep learning. *IET Image Processing*, 15(2), 454–467. <https://doi.org/10.1049/ipr2.12001>
- Lin, T.-Y., & Huang, M.-L. (2020). *Dataset of breast mammography images with masses* (Version 2) [Data set]. Mendeley Data. <https://doi.org/10.17632/ywsbh3ndr8.2>
- Liu, X., Song, L., Liu, S., & Zhang, Y. (2021). A review of deep-learning-based medical image segmentation methods. *Sustainability*, 13(3), 1224. <https://doi.org/10.3390/su13031224>
- Lotter, W., Diab, A. R., Haslam, B., Kim, J. G., Grisot, G., Wu, E., ... Sorensen, A. G. (2021). Robust breast cancer detection in mammography and digital breast tomosynthesis using an annotation-efficient deep learning approach. *Nature Medicine*, 27(2), 244–249. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-01174-9>

- Malebary, S. J., & Hashmi, A. (2021). Automated breast mass classification system using deep learning and ensemble learning in digital mammogram. *IEEE Access*, 9, 55312–55328.
- Mascarenhas, S., & Agarwal, M. (2021, November). A comparison between VGG16, VGG19 and ResNet50 architecture frameworks for image classification. In *2021 International Conference on Disruptive Technologies for Multi-Disciplinary Research and Applications (CENTCON)* (Vol. 1, pp. 96–99). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CENTCON52345.2021.9688094>
- Min, B. S., Lim, D. K., Kim, S. J., & Lee, J. H. (2013). A novel method of determining parameters of CLAHE based on image entropy. *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, 7(5), 113–120. <https://doi.org/10.14257/ijseia.2013.7.5.11>
- Oyelade, O. N., & Ezugwu, A. E. S. (2020). State-of-the-art survey of deep learning methods for detection of architectural distortion in digital mammography. *IEEE Access*, 8, 148644–148676. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3017748>
- Perihanoğlu, G. M. (2015). *Dijital görüntü işleme teknikleri kullanılarak görüntülerden detay çıkarımı* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul).
- Podda, A. S., Balia, R., Barra, S., Carta, S., Fenu, G., & Piano, L. (2022). Fully-automated deep learning pipeline for segmentation and classification of breast ultrasound images. *Journal of Computational Science*, 63, 101816. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2022.101816>
- Rahman, A. S. A., Belhaouari, S. B., Bouzerdoun, A., Baali, H., Alam, T., & Eldaraa, A. M. (2020, February). Breast mass tumor classification using deep learning. In *2020 IEEE International Conference on Informatics, IoT, and Enabling Technologies (ICIoT)* (pp. 271–276). IEEE.
- Saber, A., Sakr, M., Abo-Seida, O. M., Keshk, A., & Chen, H. (2021). A novel deep-learning model for automatic detection and classification of breast cancer using the transfer-learning technique. *IEEE Access*, 9, 71194–71209. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3079204>
- Salama, W. M., & Aly, M. H. (2021). Deep learning in mammography images segmentation and classification: Automated CNN approach. *Alexandria Engineering Journal*, 60(5), 4701–4709. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.048>

- Spanhol, F. A., Oliveira, L. S., Cavalin, P. R., Petitjean, C., & Heutte, L. (2017, October). Deep features for breast cancer histopathological image classification. In *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (pp. 1868–1873). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SMC.2017.8122929>
- Suh, Y. J., Jung, J., & Cho, B. J. (2020). Automated breast cancer detection in digital mammograms of various densities via deep learning. *Journal of Personalized Medicine*, *10*(4), 211. <https://doi.org/10.3390/jpm10040211>
- Tomasi, C., & Manduchi, R. (1998, January). Bilateral filtering for gray and color images. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No. 98CH36271)* (pp. 839–846). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCV.1998.710815>
- Tsochatzidis, L., Costaridou, L., & Pratikakis, I. (2019). Deep learning for breast cancer diagnosis from mammograms—A comparative study. *Journal of Imaging*, *5*(3), 37. <https://doi.org/10.3390/jimaging5030037>
- Wang, M., Zheng, S., Li, X., & Qin, X. (2014, April). A new image denoising method based on Gaussian filter. In *2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering* (Vol. 1, pp. 163–167). IEEE. <https://doi.org/10.1109/InfoSEEE.2014.6948089>
- Yurttakal, A. H. (2019). *Dinamik kontrastlı manyetik rezonans görüntülerinde bilgisayarlı meme kanseri sınıflandırması* (Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- Zhang, J., Xie, Y., Wu, Q., & Xia, Y. (2019). Medical image classification using synergic deep learning. *Medical Image Analysis*, *54*, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.media.2019.02.010>

BÖLÜM 2

UZAKTAN KONTROL EDİLEBİLİR AKILLI KULUÇKA MAKİNESİ

İsmail GÜÇLÜ¹, Beytullah BOZALI²

¹ Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı, Düzce, Türkiye. ismail245535@ogr.duzce.edu.tr, Orcid ID: 0009-0009-9126-547X

² Dr. Öğr. Üyesi, Düzce Üniversitesi, Düzce Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Düzce, Türkiye. beytullahbozali@duzce.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-3633-5780

1. GİRİŞ

Küresel ölçekte artan nüfus ve buna bağlı olarak yükselen hayvansal protein talebi, tarım ve hayvancılık sektörlerinde verimlilik odaklı yenilikler yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Kanatlı hayvancılık sektörü, küresel gıda güvenliğinin temel bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Food and Agriculture Organization tarafından yayımlanan raporlar göre, sürdürülebilir gıda üretiminin sağlanabilmesi için özellikle kanatlı sektörünün stratejik öneminin giderek arttığını ifade etmektedirler (FAO, 2022). 2024 yılında Türkiye tavuk eti üretimi 2,5 milyon tondur. Tavuk eti ihracatı yaklaşık 371 bin ton gerçekleşmiş. Ayrıca yumurta üretimi yaklaşık 1,3 milyon ton (21,2 milyar adet) ve yumurta ihracatı yaklaşık 197,7 bin ton olarak kaydedilmiştir (Gülaç, 2025). Bu bağlamda kanatlı üretim zincirinin temel bileşenlerinden biri olan kuluçka süreci, civciv kalitesi ve dolayısıyla üretim performansı üzerinde doğrudan belirleyici bir faktördür. Bu sektörün sürdürülebilirliği doğrudan kuluçka teknolojilerinin etkinliğine bağlıdır. Zira ticari çaplı kümes hayvanı üretiminde yüksek çıkış oranlarına ulaşmak, üretim ekonomisinin temel belirleyicisi konumundadır. Kanatlı yetiştiriciliğinin yanı sıra biyomedikal alanda da kuluçka sistemleri kritik bir işlev üstlenmektedir. Hücre kültürü, embriyo gelişimi araştırmaları ve aşı üretim süreçlerinde kontrollü inkübatör ortamlarının sağlanması, biyomedikal mühendisliği ile biyoteknoloji disiplinleri için vazgeçilmez bir altyapı niteliği taşımakta olduğunu ifade etmektedirler (Boga et al., 2024; Tullett, 1990). Embriyonik gelişimin sağlıklı bir şekilde ilerleyebilmesi için sıcaklık, bağıl nem, yumurta çevirme ve havalandırma gibi çevresel parametrelerin hassas kontrolünü gerekmektedir. Geleneksel kuluçka makineleri temel işlevsel prensiplerini on yıllar içinde büyük ölçüde koruyarak günümüze ulaşmıştır. Söz konusu sistemler ısıtma elemanları, nem üreteçleri, termostatik kontrol devreleri ve mekanik yumurta çevirme mekanizmalarından oluşmaktadır (Lourens et al., 2005; Kumar et al., 2025). Özellikle yumurta kabuğu sıcaklığı, embriyo gelişiminin en kritik belirleyicilerinden biri olarak kabul edilmektedir. Optimum değerlerin dışına çıkılması durumunda gelişim anomalileri ve embriyonik kayıplar gözlemlenmektedir. Sabit sıcaklık (genellikle 37,5–38,5°C) ve bağıl nem (%50–65 arası, inkübasyonun evresine göre değişken) koşullarının sürdürülmesi, embriyonik gelişim için fizyolojik olarak zorunlu parametreler olarak ifade edilmektedir (French, 1994; Lourens et al., 2005). Ek olarak, damızlık yaşı, yumurta ağırlık kaybı ve depolama koşulları gibi biyolojik ve çevresel faktörler de kuluçka başarısını önemli ölçüde etkilemektedir (Tona et al., 2001). Modern üretim sistemlerinde yumurta kalitesinin stabilizasyonu ve uzun üretim döngülerinde performansın sürdürülebilirliği, sektörün karşı karşıya olduğu başlıca zorluklar arasında yer almaktadır (Reijrink et al., 2009). Geleneksel kuluçka sistemlerinde embriyo canlılığının ve

gelişim evresinin tespiti, çoğunlukla belirli günlerde gerçekleştirilen manuel mumlama (candling) işlemine yapılmaktadır. Bu yöntem yalnızca aralıklı veri sağlamaktadır. Embriyo ölümlerinin erken tespitini geciktirmekte ve döllü olmayan yumurtaların sisteme yük oluşturmaya neden olmaktadır. Sürekli ve non-invazif izleme kapasitesinin yokluğu, özellikle yüksek katma değerli tür üretiminde ciddi kayıplara neden olabilmektedir (Bain et al., 2016). Bu nedenle kuluçka öncesi ve kuluçka süresince uygulanan tüm süreçlerin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu durum hem ekonomik hem de biyolojik verimlilik açısından kritik öneme sahiptir (Yalçın et al., 2022). Manuel yumurta çevirme, nem doldurma ve sıcaklık kalibrasyonu gibi rutin operasyonlar, yetkin operatör varlığını zorunlu kılmaktadır. Uzaktan izleme ve otonom müdahale kapasitesinin geliştirilmesi, sektörün temel ihtiyaç listesinin üst sıralarında yer almaktadır. Son yıllarda, Endüstri 4.0 prensiplerinin tarım sektörüne entegrasyonu ile birlikte kuluçka teknolojilerinde önemli dönüşümler yaşanmaktadır. Mikrodenetleyici tabanlı sistemler, sensör teknolojileri ve Nesnelerin İnterneti uygulamaları sayesinde kuluçka makinelerinde sıcaklık, nem ve gaz konsantrasyonu gibi parametreler gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte ve kontrol edilebilmektedir (Kyeremeh & Peprah, 2017; Okello, 2025). Bu tür sistemler, insan kaynaklı hataları minimize ederek daha stabil bir kuluçka ortamı sağlamaktadır. Ayrıca kuluçka randımanını artırmayı hedeflemektedir (Mohlalisi et al., 2024; Oussama et al., 2021). Sabit çıkıtlı ısıtma ve nemlendirme sistemleri, gerçek zamanlı talep değişimlerine uyum sağlayamamaktadır. Bu durum aşırı enerji tüketimine yol açmaktadır. Büyük ölçekli kuluçkahanelerde enerji maliyetleri işletme giderlerinin %30–40'ını oluşturabilmektedir. Bu oran ise kârlılık üzerinde doğrudan düşürmektedir (Reijrink et al., 2009). Adaptif kontrol algoritmalarının devreye alınmadığı sistemlerde enerji israfının %20–35 arasında olduğu tahmin edilmektedir. Enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik de akıllı kuluçka sistemlerinin gelişiminde önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle güneş enerjisi destekli kuluçka makineleri, enerji maliyetlerini düşürmenin yanı sıra çevre dostu üretim modellerinin geliştirilmesine katkı sağladığı ifade edilmektedir (Kumar et al., 2025; Peprah et al., 2022). Akıllı kuluçka teknolojilerinin bir diğer önemli bileşeni ise yapay zekâ ve görüntü işleme teknikleridir. Pekiştirmeli öğrenme (RL) algoritmalarının kuluçka parametrelerini dinamik olarak optimize etmek amacıyla uygulandığı çalışmalarda literatürde bulunmaktadır. Q-öğrenme ve derin Q-ağı (DQN) tabanlı derin sinir ağları, hem sıcaklık hem de nem kontrolünü eş zamanlı optimize ederek çok değişkenli optimizasyon problemine yenilikçi bir çözüm sunmakta olduğunu ifade edilmektedir (Okinda et al., 2020). Ayrıca açıklanabilir yapay zeka (XAI) yaklaşımları, karar destek sistemlerinin şeffaflığını artırarak yetiştiricilerin algoritmik önerilere güvenini pekiştirmekte olduğunu ifade edilmiştir. Ayrıca endüstriyel benimseme sürecini

hızlandırmaktadır olduğu belirtilmektedir (Bain et al., 2016). Özellikle dörlölük tespiti gibi kritik aşamalarda kullanılan derin öğrenme tabanlı yöntemler, evrişimli sınırları sayesinde tahribatsız ve yüksek doğrulukta analizler gerçekleştirdiklerini ifade etmektedirler (Çevik et al., 2022; Saifullah et al., 2023).

Bu çalışmada, düşük maliyetli yapısını korurken yüksek verimlilik sunabilen akıllı bir kuluçka makinesi tasarlanması ve geliştirilmesi amaçlanmıştır. Sistem, kuluçka sürecinin temel gereksinimlerini oluşturan sıcaklık, nem, havalandırma ve yumurtaların belirli aralıklarla çevrilmesi gibi çevresel koşulların hassas biçimde kontrol edilmesine odaklanmaktadır. Ayrıca kullanıcıların anlık sistem verilerine erişebilmesi ve olası arıza durumlarında uyarı alabilmesi için izleme ve bildirim mekanizmaları da yapıya dâhil edilmiştir. Bu sayede insan müdahalesine duyulan ihtiyaç azaltılırken, işletme sürecinde oluşabilecek hataların önüne geçilmesi hedeflenmektedir. Geliştirilen sistemin hem bireysel kullanıcılar hem de küçük ve orta ölçekli işletmeler tarafından kullanılabilecek pratik bir çözüm sunması, üretim verimliliğini artırması ve modern tarım uygulamalarına katkı sağlaması beklenmektedir.

2. MATERYAL VE METOD

Geliştirilen uzaktan erişilebilme özelliğine sahip akıllı kuluçka sisteminin tasarımında kullanılan elektronik, mekanik ve yazılımsal bileşenleri bütüncül bir bakışla ele alınmıştır. Akıllı kuluçka makinesi sisteminin donanım altyapısı, sensör konumlandırması, veri işleme süreci ve gerçekleştirilen test adımları ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Deneysel süreçte sıcaklık, nem, havalandırma ve yumurta çevirme parametrelerini otomatik olarak kontrol edebilen mikrodnetleyici tabanlı sistemlerden yararlanılmıştır.

2.1. Donanım Bileşenleri

Çalışmada ele alınan sistemin donanım altyapısı; ısıtma sistemi, havalandırma sistemi, sensörler, güç yönetimi bileşenleri, haberleşme modülleri ve mikrodnetleyici katmanından oluşmaktadır. Kullanılan donanımların seçiminde, açık kaynak platformlarla uyumluluk, düşük maliyet temel alınmıştır.

2.1.1. Mikrodnetleyici Arduino

Gömülü sistemler ve nesnelerin interneti (IoT) uygulamalarında düşük maliyetli ve esnek donanım platformlarına, açık kaynaklı bir mikrodnetleyici kartı olarak kullanılan Arduino Uno, eğitim, araştırma ve prototipleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Arduino Uno, ATmega328P mikrodnetleyicisi temelinde geliştirilmiştir. Dijital ve analog

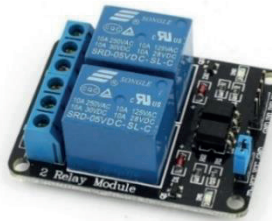
giriş/çıkış pinleri sayesinde çeşitli sensör ve aktüatörlerle kolay entegrasyon sağlamaktadır (Zlatanov, 2015). Arduino IDE aracılığıyla C/C++ tabanlı programlama yapılabilmekte ve bu sayede erişilebilir bir platform sunulmaktadır. Ayrıca açık kaynaklı yapısı sayesinde donanım ve yazılım üzerinde özelleştirme yapılabilmesi, akademik çalışmalarda deneysel esneklik sağlamaktadır. Tasarımında kullanılan Arduino Uno R3'ün görseli Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Arduino Uno R3 (Robotzade, 2026)

2.1.2. Röle modülü

Elektrik ve elektronik sistemlerde devre elemanlarının güvenli ve kontrollü bir şekilde yönetilmesi için kullanılan elektromekanik anahtarlama elemanıdır. Düşük güçlü sinyaller ile yüksek güçlü devrelerin kontrol edilmesini sağlayan temel bileşenlerden biridir. Röleler temel olarak bir bobin (coil), kontaklar (NO/NC) ve manyetik mekanizmadan oluşmaktadır. Sistem güvenliği açısından kritik bir avantaj sunmaktadır (Monk, 2016). Sistemimizde ise 5v DC gerilim ile 220v AC gerilimi kontrol etmemizi sağlamaktadır. Tasarımında kullanılan röle modülü görseli Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 2. Röle Modülü (Robotzade, 2026)

2.1.3. Saat Devresi Modülü DS1302

Zaman bilgisinin doğru ve kesintisiz bir şekilde takip edilmesi, birçok gömülü sistem uygulamasında kritik öneme sahiptir. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla geliştirilen gerçek zamanlı saat (RTC) entegreleri, sistem enerjisi kesilse dahi zamanı koruyabilen yapılarıyla öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, DS1302, düşük güç tüketimi ve harici pil desteği sayesinde yaygın

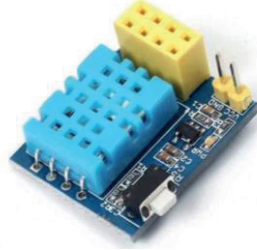
olarak kullanılan RTC modüllerinden biridir. Tasarımında kullanılan saat modülü görseli Şekil 3'te verilmektedir.



Şekil 3. Saat Modülü (Robotzade, 2026)

2.1.4. Sıcaklık ve Nem Sensörü

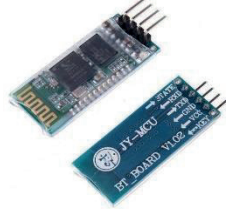
Çevresel parametrelerin izlenmesi, özellikle tarım, otomasyon ve iklimlendirme sistemlerinde kritik bir öneme sahiptir. DHT11 sensörü, düşük maliyetli ve kolay kullanılabilir yapısı sayesinde bu tür uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Sensör, içerisinde yer alan termistör ve kapasitif nem algılayıcı elemanlar sayesinde çevresel verileri algılar ve bu verileri dijital sinyallere dönüştürerek mikrodenetleyiciye iletir. Tasarımında kullanılan sıcaklık ve nem sensörü modülü görseli Şekil 4'te verilmektedir.



Şekil 4. Sıcaklık ve Nem Sensörü Modülü (Robotzade, 2026)

2.1.5. Bluetooth Modülü

Bluetooth modülleri, mikrodenetleyiciler ile harici cihazlar (akıllı telefon, bilgisayar vb.) arasında kablosuz veri iletişimi sağlamak amacıyla kullanılan donanım bileşenleridir. Bluetooth, kısa mesafeli veri iletimi için geliştirilmiş düşük güç tüketimli bir haberleşme protokolüdür. Bluetooth teknolojisi, özellikle düşük maliyetli ve kolay entegre edilebilir yapısı sayesinde mikrodenetleyici tabanlı sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Tosi et al., 2017). Arduino Uno gibi platformlarla birlikte kullanılan HC-05 ve HC-06 gibi modüller, seri haberleşme (UART) protokolü üzerinden veri alışverişi gerçekleştirmektedir. Tasarımında kullanılan bluetooth modul görseli Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5. Bluetooth Modülü (Robotzade, 2026)

2.1.6. LCD Ekran

Gömülü sistemlerde kullanıcı ile etkileşimi sağlamak amacıyla kullanılan görüntüleme birimleri arasında LCD (Liquid Crystal Display) ekranlar önemli bir yere sahiptir. En yaygın kullanılan LCD türlerinden biri olan 16x2 karakter LCD'ler, HD44780 sürücü entegresi ile çalışmaktadır. Bu tür ekranlar, paralel iletişim protokolü kullanarak veri ve komutların iletilmesini sağlar. Mikrodenetleyici, veri pinleri aracılığıyla karakter bilgilerini gönderirken, kontrol pinleri (RS, RW, E) üzerinden veri türünü ve yazma işlemini yönetmektedir (Monk, 2016). Akıllı kuluçka maikenisinde LCD ekran kullanıcıya nem, sıcaklık, saat tarih parametrelerinin datasını hızlı bir şekilde göstermek amaçlı kullanılmaktadır. Tasarımında kullanılan LCD ekran modul görseli Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 6. LCD Ekran Modülü (Robotzade, 2026)

2.1.7. Fan

Akıllı kuluçka sistemlerinde kullanılan fan, ortam içindeki hava sirkülasyonunu sağlayarak homojen bir iklim oluşturulmasında kritik bir rol oynamaktadır. Kuluçka makinelerinde fan kullanımının temel amacı, cihaz içerisindeki sıcaklık ve nem dağılımını eşitlemektir. Tasarımında kullanılan fan modul görseli Şekil 7'de verilmektedir.

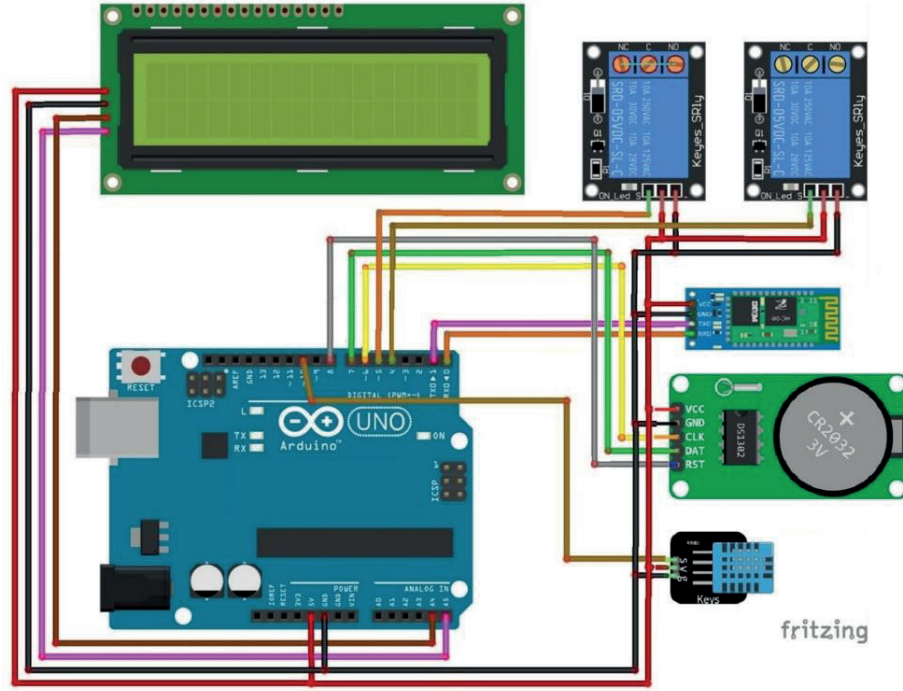


Şekil 7. Fan

3. GERÇEKLEŞTİRİLEN MODELLEME, SİMÜLASYON VE DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

3.1. Elektronik Bağlantılar ve Sistem Mimarisi

Sistemin yapısı algılama katmanı, kontrol katmanı, aktüatör katmanı ve kullanıcı haberleşme katmanı olmak üzere dört temel kontrol katmandan oluşmaktadır. İç ortam sıcaklığını ve nemini algılayan sensörler algılama oluşturur. Sensörlerden elde edilen verilerin işlenmesi Arduino Uno mikrodenetleyici tarafından yapılmaktadır. Röle kontrol kartı ısıtma ve havalandırma mekanizmasını çalıştırmaktadır. Algılama katmanından gelen bilgiler mikrodenetleyici tarafından değerlendirilir. Belirlenen sıcaklık altındaki değerler tespit edildiğinde röle kontrol katmanına aktarılan komutlarla ısıtıcı ampül devreye girerek ısıtma işlevini görmektedir. Uzaktan kontrol edilebilir akıllı kuluçka sisteminin elektronik tasarımında kullanılan genel mimari ilişkin görseli Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Genel Mimari Görünümü

HC-05 kartının RXD ve TXD pinleri sırasıyla Arduino'nun D6–D9 çıkış pinlerine ve D0–D1 giriş pinlerine bağlanmaktadır. Arduino, bu sayede haberleşme sağlamaktadır. Röle kontrol bilgisi D4-D5 ile, DHT11 sensörünün bilgisi ise D10 nolu pinden sağlanmaktadır. DS 1302'nin CLK, DAT, RST pinleri ise sırasıyla D6-D7-D8 giriş pinlerine bağlanmıştır.

3.2. Kontrol Birimi

Tasarlanan sistemin ana kontrol elemanı olarak Arduino UNO kullanılmıştır. Arduino UNO üzerinde bulunan ATmega328P mikrodenetleyicisi sensörlerden gelen analog/dijital verileri işleyerek kontrol sinyalleri üretmektedir.

Arduino tabanlı kontrol sistemleri düşük güç tüketimi, programlama kolaylığı ve geniş sensör desteği nedeniyle otomasyon çalışmalarında tercih edilmektedir (Banzi & Shiloh, 2015).

3.3. Sıcaklık ve Nem Ölçüm Sistemi

Kuluçka ortamının izlenmesi için DHT11 sıcaklık-nem sensörü kullanılmıştır. Sensör sıcaklık ölçüm aralığı: 0–50 °C, nem ölçüm aralığı: %20–90 RH olarak çalışmaktadır. Ölçülen değerler Arduino tarafından okunarak dijital ekrana aktarılır.

Nem kontrolü özellikle yumurta içerisindeki su kaybı ve embriyo gelişimi açısından kritik öneme sahip olduğunu ifade etmektedir (Tullett, 1990).

3.4. Isıtma Sistemi

Kuluçka ortamındaki sıcaklık düşüşlerini telafi etmek amacıyla ampul tabanlı ısıtıcı kullanılmıştır. Isıtıcı kontrolü röle modülü aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Kontrol algoritması Eğer $T < 37^{\circ}\text{C}$ ise Ampul = ON, Eğer $T \geq 37.5^{\circ}\text{C}$ ise Ampul = OFF konumundadır. Bu yöntem ile enerji tüketimi azaltılarak kararlı sıcaklık elde edilmesi amaçlanmaktadır.

3.5. Fan Kontrollü Soğutma Sistemi

Kuluçka kabini içerisindeki fazla ısıнын uzaklaştırılması için DC fan kullanılmıştır. Fan Sıcaklık azaltma ve kabin içi hava homojenliği sağlama amaçlanmıştır. Hava dolaşımı, kabin içerisindeki sıcaklık farklılıklarının azaltılmasında önemli rol oynamaktadır (Lourens et al., 2005). Kontrol algoritması, Eğer $T > 38^{\circ}\text{C}$ Fan = ON Aksi durumda Fan = OFF konumunda olur.

3.6. Dijital Gösterge Sistemi

Kullanıcı bilgilendirmesi için LCD ekran kullanılmıştır. Ekranda; sıcaklık, nem, saat ve sistem durumu gösterilmektedir.

3.7. Yazılım Mimarisinin Genel Yapısı

Programın yapısı temelde iki ana fonksiyona dayanmaktadır. Bunlar *setup()* ve *loop()* dır. *setup()* bölümü, giriş–çıkış pinlerinin yapılandırıldığı, seri haberleşmenin başlatıldığı ve sensörlerin ilk kalibrasyonlarının gerçekleştirildiği aşamadır. Sistem çalışmaya başladıktan

sonra döngüsel olarak işleyen *loop()* fonksiyonu devreye girmektedir. Burada sensörlerden alınan veriler sürekli olarak değerlendirilmektedir. PWM sinyalleri sıcaklık ve nem dengesine göre röle kartına gönderilmektedir.

Sensör okumaları, Arduino'nun dijital pinleri üzerinden *interrupt* (kesme) tabanlı bir yöntemle yapılmaktadır. Bu yaklaşım, *pulseIn()* komutuna göre daha hızlı tepki verdiği gibi zamanlama hatalarına karşı da daha güvenilir bir çözüm sunmaktadır. Her bir sensör, *attachInterrupt()* fonksiyonu aracılığıyla bağımsız biçimde izlenmektedir ve sensörlerin aynı anda ölçüm yapması imkân tanır. Sensör kontrol algoritmasının temel işleyişini gösteren kod Şekil 9'da bir kısmı verilmektedir.

```
void readSensorsAndControl() {
    // DHT11 sensöründen veri oku
    float humidity = dht.readHumidity();
    float temperature = dht.readTemperature();

    // Veri geçerliliği kontrolü
    if (isnan(humidity) || isnan(temperature)) {
        Serial.println("DHT sensör okuma hatası!");
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Sensor Hatası! ");
        return;
    }
    // Sıcaklık kontrolü
    temperatureControl(temperature);

    // Nem kontrolü
    humidityControl(humidity);

    // Fan kontrolü (sıcaklık farkı varsa)
    fanControl(temperature);

    // Serial monitör çıktısı
    Serial.println("Sıcaklık: " + String(temperature, 2) + "°C, Nem: " + String(humidity, 2) + "%");
    Serial.println("Isıtıcı: " + String(heaterState) + ", Fan: " + String(fanState) + ", Nemlendirici: " + String(humidifierState));
}
```

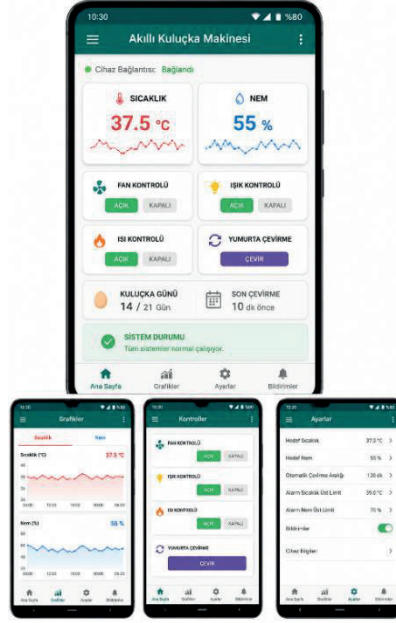
Şekil 9. Sensör Kontrol Algoritması

3.8. Android Kontrollü Mobil Uygulama Tasarımı

Sistemin kullanıcı kontrolü Android Studio ortamında Kotlin dili kullanılarak geliştirilmiştir. Mobil uygulama Bluetooth üzerinden Arduino ile haberleşmektedir. Tasarlanan akıllı kuluçka sisteminin uygulama ekran görüntüsü Şekil 10'da verilmektedir.

Uygulama ekranında ki sıcaklık, nem kuluçka günü, son çevirme zamanı ve sistem durumu görülmektedir.

Android uygulama üzerinden fan ve ısıtıcı ışık kontrolü yapılmaktadır. Bunun yanı sıra yumurta çevirme imkanı da sağlamaktadır.



Şekil 10. Android Aplikasyon Tasarımı

3.9. Simülasyon ve Modelleme

Uzaktan kontrollu kuluçka sisteminin fiziksel tasarımının ve elektronik devre yapısının simülasyon ortamında doğrulanmasını kapsamaktadır. İki farklı yazılım tasarımının doğrulaması için çalışmamızda kullanılmıştır. Bunlar:

1. SolidWorks – 3D mekanik modelleme, ağırlık merkezi hesaplaması.
2. Fritzing – elektronik bağlantıların devre simülasyonu. Uzaktan kontrollu kuluçka sisteminin mekanik tasarım yapısını Şekil 11’de verilmektedir.

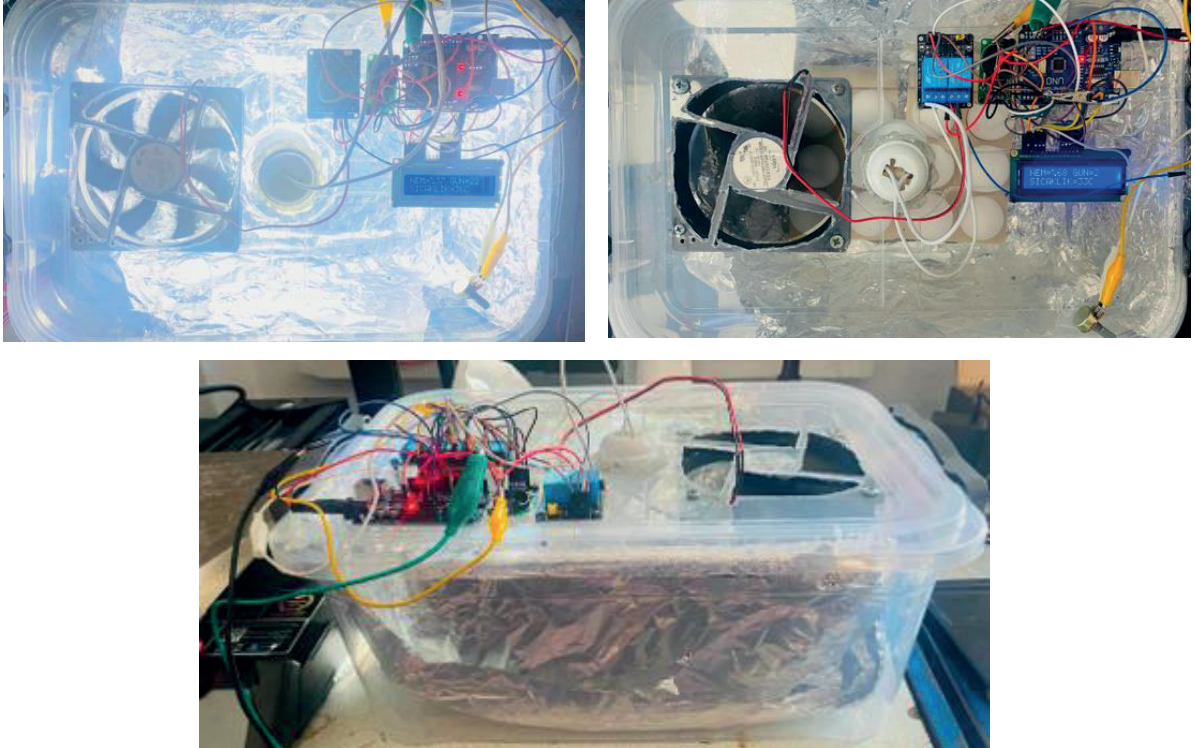


Şekil 11. Mekanik Tasarım Sistemi

3.10. Test Uygulaması ve Doğrulama

Geliştirilen akıllı kuluçka sistemi, çalışma performansının değerlendirilmesi amacıyla oda sıcaklığındaki iç mekân koşullarında test edilmiştir. Deneylerin kapalı ortamda gerçekleştirilmesi, sensörlerden daha kararlı ve güvenilir ölçümler elde edilmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca rüzgâr, doğrudan güneş ışığı ve benzeri çevresel etkilerin en aza indirilmesi sayesinde sistem davranışı daha sağlıklı bir şekilde gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen testlerde sıcaklık ölçüm performansı, sensörlerin tepki karakteristikleri ve kontrol mekanizmasının çalışma doğruluğu incelenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda sistemin ortam koşullarındaki değişimleri algılayabildiği ve gerekli kontrol işlemlerini zamanında gerçekleştirebildiği görülmüştür. Bunun yanında sıcaklık değerleri sürekli olarak izlenmiş, belirlenen eşiklere bağlı olarak ısıtma ve soğutma süreçleri otomatik şekilde yönetilmiştir. Kullanıcı erişimi Bluetooth haberleşmesi üzerinden sağlanırken, sistem bilgilerinin yerel olarak takip edilebilmesi için dijital ekran kullanılmıştır. Yapılan doğrulama çalışmaları sonucunda tasarlanan yapının düşük maliyetli olmasına rağmen kuluçka sürecinin temel gereksinimlerini karşılayabilecek işlevselliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemin güvenilir ve uygulanabilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Şekil 12’de uzaktan kontrol edilebilir akıllı kuluçka makinesi test sürec görselleri verilmektedir.



Şekil 12. Uzaktan Kontrol Edilebilir Akıllı Kuluçka Makinesi
Test Sürec Görselleri

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, uzaktan kontrol edilebilen Arduino tabanlı akıllı bir kuluçka makinesi tasarlanmış ve başarıyla uygulanmıştır. Geliştirilen sistem, kuluçka sürecinde kritik öneme sahip olan sıcaklık ve nem değerlerinin sürekli olarak izlenmesine ve belirlenen sınırlar içerisinde tutulmasına olanak sağlamaktadır. DHT11 sensörü aracılığıyla elde edilen veriler doğrultusunda ısıtma ve soğutma birimleri otomatik olarak kontrol edilmiş, böylece uygun çevresel koşulların korunması hedeflenmiştir.

Sisteme entegre edilen Bluetooth haberleşme altyapısı sayesinde kullanıcıların mobil cihazlar üzerinden anlık verilere erişebilmesi ve sistemi uzaktan takip edebilmesi sağlanmıştır. Ayrıca dijital ekran desteği ile yerel izleme imkânı sunularak kullanıcı deneyimi artırılmıştır. Gerçekleştirilen testler sonucunda sistemin sıcaklık değişimlerine uygun şekilde tepki verdiği ve temel kuluçka gereksinimlerini karşılayabilecek düzeyde performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Tasarlanan yapının düşük maliyetli bileşenlerden oluşması, kolay uygulanabilir olması ve farklı ihtiyaçlara göre geliştirilebilmesi önemli avantajlar arasında yer almaktadır. Bununla birlikte gerçek zamanlı izleme ve kablosuz erişim özellikleri, sistemin kullanım esnekliğini artırarak hem bireysel kullanıcılar hem de küçük ölçekli işletmeler için uygulanabilir bir çözüm ortaya koymaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda sisteme otomatik yumurta çevirme mekanizmasının eklenmesi, daha hassas sensörlerin kullanılması ve yapay zekâ tabanlı tahmin algoritmalarıyla çevresel koşulların önceden analiz edilmesi planlanabilir. Bu tür geliştirmeler, kuluçka performansının artırılmasına ve sistemin daha akıllı bir yapıya dönüştürülmesine katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- Bain, M. M., Nys, Y., & Dunn, I. C. (2016). Increasing persistency in lay and stabilising egg quality in longer laying cycles: What are the challenges? *British Poultry Science*, 57(3), 330–338. <https://doi.org/10.1080/00071668.2016.1161727>
- Banzi, M., & Shiloh, M. (2015). *Getting started with Arduino* (3rd ed.). Maker Media.
- Boga, E. Y., Çimen, Ö., & Kepezkaya, A. (2024). Kanatlılarda kuluçka randımanını etkileyen faktörler ve yeni uygulanan metotlar. *MAS Journal of Applied Sciences (MAS JAPS)*, 9(3), 578–589. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13294051>
- Çevik, K. K., Koçer, H. E., & Boğa, M. (2022). Deep learning based egg fertility detection. *Veterinary Sciences*, 9(10), 574. <https://doi.org/10.3390/vetsci9100574>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *World food and agriculture – Statistical yearbook 2022*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc2211en>
- French, N. A. (1994). Effect of incubation temperature on the gross pathology of turkey embryos. *British Poultry Science*, 35(3), 363–371. <https://doi.org/10.1080/00071669408417701>
- Gülaç, Z. N. (2025). *Kümes hayvancılığı: Durum ve tahmin 2025*. Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü (TEPGE), Tarım Reformu Genel Müdürlüğü.
- Kumar, P. T., Kumar, R. A., Antony, K., N. U., Durai, T. S., & Nair, S. S. (2025). Temperature and humidification control studies on solar assisted egg incubator. *Engineering Research Express*, 7(3), 035501. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ade6cc>
- Kyeremeh, F., & Peprah, F. (2017). Design and construction of an Arduino microcontroller-based egg incubator. *International Journal of Computer Applications*, 168(1), 15–23. <https://doi.org/10.5120/ijca2017914261>
- Lourens, A., van den Brand, H., Meijerhof, R., & Kemp, B. (2005). Effect of eggshell temperature during incubation on embryo development, hatchability, and posthatch development. *Poultry Science*, 84(6), 914–920. <https://doi.org/10.1093/ps/84.6.914>
- Mohlalisi, S., Koetje, T., & Thamae, T. (2024). Design and development of an artificial incubator. *Smart Agricultural Technology*, 7, 100387. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100387>
- Monk, S. (2016). *Programming Arduino: Getting started with sketches* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- Okello, H. H. (2025). *An IoT egg incubator for real time monitoring*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14348.63368>
- Okinda, C., Nyalala, I., Korohou, T., Wang, J., Achieng, T., Wamalwa, P., Mang, T., & Shen, M. (2020). A review on computer vision systems in monitoring of poultry: A welfare perspective. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4, 184–208. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.09.002>

- Oussama, H., Mohamed, B., & Mohamed Fouad, G. (2021). Design and implementation of a fully automated system dedicated to the control of an egg incubator. *European Journal of Science and Technology*, 31, 563–569. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1000315>
- Peprah, F., Gyamfi, S., Amo-Boateng, M., Buadi, E., & Obeng, M. (2022). Design and construction of smart solar powered egg incubator based on GSM/IoT. *Scientific African*, 17, e01326. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01326>
- Reijrink, I. A. M., Meijerhof, R., Kemp, B., Graat, E. A. M., & van den Brand, H. (2009). Influence of prestorage incubation on embryonic development, hatchability, and chick quality. *Poultry Science*, 88(12), 2649–2660. <https://doi.org/10.3382/ps.2008-00523>
- Robotzade. (2026). *Arduino Uno R3*. Robotzade Elektronik. <https://www.robotzade.com/urun/arduino-uno-r3>
- Robotzade. (2026). *2'li 5V röle kartı - 2 Way 5V Relay Module*. Robotzade Elektronik. <https://www.robotzade.com/urun/2li-5v-role-karti-2-way-5v-relay-module>
- Robotzade. (2026). *DHT11 ile WiFi sıcaklık ve nem sensör modülü*. Robotzade Elektronik. <https://www.robotzade.com/urun/dht11-ile-wifi-sicaklik-ve-nem-sensor-modulu>
- Robotzade. (2026). *DS1302 gerçek zamanlı saat devresi modülü (RTC modülü)*. Robotzade Elektronik. <https://www.robotzade.com/urun/ds1302-gercek-zamanli-saat-devresi-modulu-rtc-modulu>
- Robotzade. (2026). *HC06 Bluetooth-Serial modül kartı*. Robotzade Elektronik. <https://www.robotzade.com/urun/hc06-bluetooth-serial-modul-karti>
- Robotzade. (2026). *2x16 LCD ekran – I2C lehimli mavi display*. Robotzade Elektronik. <https://www.robotzade.com/urun/2x16-lcd-ekran-i2c-lehimli-mavi-display>
- Robotzade. (2026). *3D yazıcı fanı 12V 40x40 mm*. Robotzade Elektronik. <https://www.robotzade.com/urun/3d-yazici-fani-12v-40x40-mm>
- Saifullah, S., Drezewski, R., Yudhana, A., Pranolo, A., Kaswijanti, W., Suryotomo, A. P., Putra, S. A., Khaliduzzaman, A., Prabuwno, A. S., & Japkowicz, N. (2023). Nondestructive chicken egg fertility detection using CNN-transfer learning algorithms. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer Dan Informatika*, 9(3), 854–871. <https://doi.org/10.26555/jiteki.v9i3.26722>
- Tona, K., Bamelis, F., Coucke, W., Bruggeman, V., & Decuypere, E. (2001). Relationship between broiler breeder's age and egg weight loss and embryonic mortality during incubation in large-scale conditions. *Journal of Applied Poultry Research*, 10(3), 221–227. <https://doi.org/10.1093/japr/10.3.221>

- Tosi, J., Taffoni, F., Santacatterina, M., Sannino, R., & Formica, D. (2017). Performance evaluation of Bluetooth Low Energy: A systematic review. *Sensors*, 17(12), 2898. <https://doi.org/10.3390/s17122898>
- Tullett, S. G. (1990). Science and the art of incubation. *Poultry Science*, 69(1), 1–15. <https://doi.org/10.3382/ps.0690001>
- Yalçın, S., Özkan, S., & Shah, T. (2022). Incubation temperature and lighting: Effect on embryonic development, post-hatch growth, and adaptive response. *Frontiers in Physiology*, 13, Article 899977. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.899977>
- Zlatanov, N. (2015). *Arduino and open source computer hardware and software*. IEEE Computer Society. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1071.7849>

BÖLÜM 3

YOL AYDINLATMASI İÇİN MODERN OPTİMİZASYON YAKLAŞIMLARI

Serhat Berat EFE¹

¹ Doç. Dr., Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 10200, Bandırma. sefe@bandirma.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6076-4166

1. GİRİŞ

Gece koşullarında güvenli ve konforlu bir görüş ortamı oluşturmak yol aydınlatmasının temel işlevidir. Bununla birlikte, bir yolun gereğinden fazla aydınlatılması enerji tüketimini ve işletme maliyetini artırırken kamaşma, ışık kirliliği ve çevresel etkileri de büyütebilir. Buna karşılık aydınlatmanın aşırı azaltılması; yol yüzeyindeki nesnelerin algılanma süresini, görsel konforu ve kullanıcıların güvenlik algısını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle yol aydınlatması, tek bir “en iyi” değer aranan basit bir boyutlandırma problemi değil, birden fazla hedefin ve kısıtın birlikte yönetildiği bir sistem optimizasyonu problemidir (Akdeniz & Efe, 2025).

Yol aydınlatması tasarımı, yalnızca belirli bir aydınlık veya parlaklık düzeyini sağlama problemi olmaktan çıkarak güvenlik, görsel konfor, enerji tüketimi, işletme maliyeti, bakım, çevresel etki ve kullanıcı davranışını birlikte ele alan çok katmanlı bir karar problemine dönüşmüştür. LED armatürlerin yaygınlaşması, elektronik sürücülerin hassas biçimde kontrol edilebilmesi, trafik ve çevre sensörlerinin ucuzlaması, nesnelerin interneti altyapılarının gelişmesi ve makine öğrenmesi yöntemlerinin olgunlaşması bu dönüşümü hızlandırmıştır.

Geleneksel tasarım pratiğinde armatür tipi, direk yüksekliği, direkler arası mesafe, armatür eğimi ve ışık akısı gibi parametreler bir fotometrik yazılım yardımıyla denir; elde edilen sonuç, ilgili standartta verilen performans değerleriyle karşılaştırılır. Bu yaklaşım, belirli bir çözümün uygunluğunu değerlendirmede yararlı olmakla birlikte, çözüm uzayının tamamını sistematik biçimde taramayabilir. Nitekim literatürde fotometrik yazılımların tasarımın standarda uygunluğunu doğrulayabildiği, ancak standarda uygun her tasarımın enerji veya maliyet bakımından optimal olmayabileceği vurgulanmaktadır (Wojnicki, Komnata, & Kotulski, 2019).

Modern optimizasyon yaklaşımları bu noktada iki önemli katkı sunar. Birincisi, çok sayıda tasarım değişkenini birlikte değerlendirerek daha düşük enerji tüketimi, daha iyi düzgünlük veya daha düşük maliyet sağlayan alternatifleri arar. İkincisi, yolun ve kullanıcıların zamana bağlı durumunu dikkate alarak ışık akısını işletme sırasında değiştirebilir. Trafik yoğunluğu, yaya varlığı, hava koşulları, yol yüzeyi parlaklığı ve armatürün yaşlanma/kirlenme durumu gibi bilgiler çevrimiçi kontrolün girdileri hâline gelir. CIE 115:2010, trafik hacmi ve hava koşulları gibi zamana bağlı değişkenlerin aydınlatma sınıfı seçimine dâhil edilmesini ve böylece adaptif aydınlatma sistemlerinin kurulmasını destekleyen bir çerçeve sunmaktadır (International Commission on Illumination, 2010).

Bu çalışmanın amacı, yol aydınlatması için kullanılan veya kullanılabilecek modern optimizasyon yaklaşımlarını yöntem aileleri üzerinden sistematik biçimde açıklamaktır. Çalışmada ayrıntılı bir yol geometrisi, gerçek trafik veri seti veya tam ölçekli simülasyon kurulmamıştır. Bunun yerine, okuyucunun belirli bir uygulama için doğru yöntemi seçebilmesini sağlayacak kavramsal bir model kurulmuş; literatürde öne çıkan hedefler, değişkenler, doğrulama adımları, avantajlar ve sınırlılıklar karşılaştırılmıştır. Kapsam; motorlu trafik yolları, çatışma alanları ve yaya/bisiklet alanlarıyla ilişkili dış aydınlatma problemleridir. Tünel aydınlatması, bina içi aydınlatma ve trafik sinyalizasyonu bu çalışmanın doğrudan kapsamı dışındadır (Efe, Ozbay & Ozer, 2022).

2. YOL AYDINLATMASINDA OPTİMİZASYON PROBLEMİNİN YAPISI

2.1. Tasarım zamanı ve işletme zamanı kararları

Yol aydınlatması optimizasyonunu anlamanın en yararlı yollarından biri, kararları gerçekleşme zamanına göre ikiye ayırmaktır. Tasarım zamanı optimizasyonu, sistem kurulmadan önce verilen ve genellikle uzun süre değişmeyen kararları kapsar. Armatür tipi, optik dağılım, direk yüksekliği, direkler arası mesafe, yol kenarına ofset, armatür eğim ve

dönme açıları, faz sayısı ve kablo/enerji altyapısı bu gruptadır. Hyari, Khelifi ve Katkhuda'nın çok amaçlı modelinde armatür tipi, montaj yüksekliği, aralık, ofset, eğim ve dönme açısı altı temel tasarım değişkeni olarak kullanılmıştır (Hyari, Khelifi, & Katkhuda, 2016).

İşletme zamanı optimizasyonu ise kurulu sistemin anlık veya periyodik olarak nasıl çalıştırılacağını belirler. LED sürücü akımı, ışık akısı, dim seviyesi, aydınlatma sınıfı geçişi, armatür gruplarının açma-kapama durumu ve arızalı armatürlere karşı telafi bu gruptadır. İşletme kararları trafik, yaya varlığı, hava durumu, ortam ışığı ve ölçülen yol yüzeyi parlaklığı gibi değişkenlere bağlı olarak değişebilir. Pasolini ve arkadaşları, yalnızca trafik hacmini kullanan Traffic Adaptive Installation (TAI) ile trafik, yol yüzeyi parlaklığı ve hava koşullarını birlikte değerlendiren Full Adaptive Installation (FAI) yaklaşımlarını birbirinden ayırmaktadır (Pasolini et al., 2024).

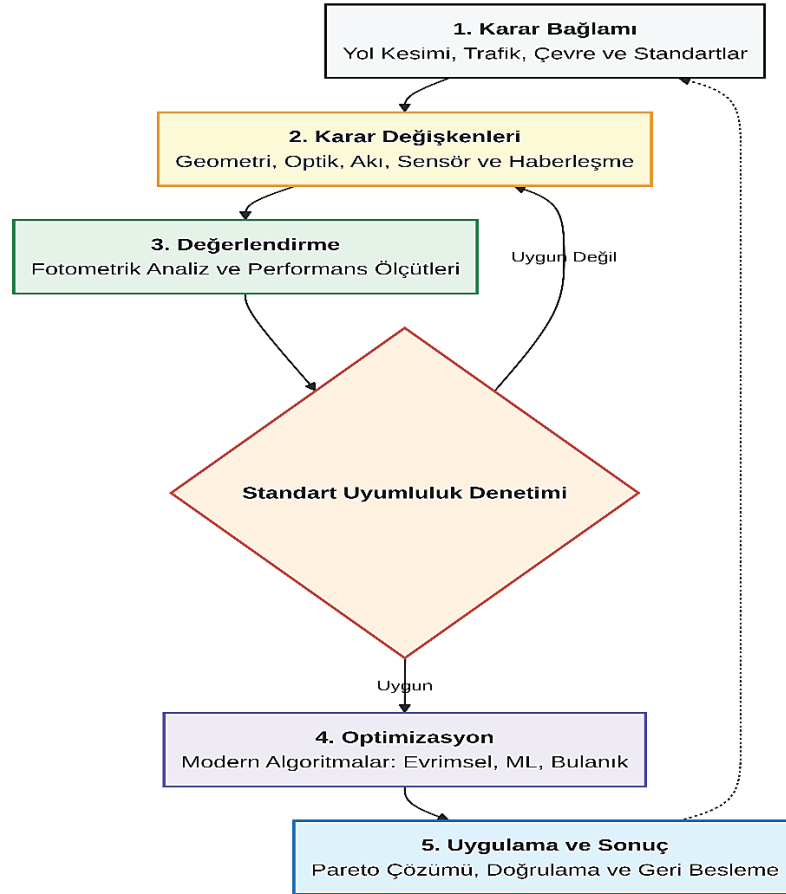
Tasarım ve işletme optimizasyonlarının birbirinden tamamen bağımsız olduğu düşünülmemelidir. Optik dağılımı ve direk aralığı iyi seçilmemiş bir sistemin işletme sırasında kısılması düzgünlük kısıtını kolayca ihlal edebilir. Tersine, çok sayıda armatür ve hassas sürücü kontrolü, işletme esnekliğini artırsa da yatırım ve bakım maliyetini yükseltebilir. Bu nedenle problem, iki aşamalı bir optimizasyon veya tasarım-işletme ortak optimizasyonu olarak kurulabilir.

2.2. Karar değişkenleri

Bir optimizasyon modelinin karar değişkenleri, çözüm üreticinin değiştirmesine izin verilen parametrelerdir. Yol aydınlatmasında bu değişkenler genellikle geometrik, fotometrik, elektriksel, işletmesel ve bilgi işlem boyutlarına ayrılır. Geometrik değişkenler direk yüksekliği, direkler arası mesafe, yol kenarına uzaklık, armatür kol uzunluğu ve yerleşim düzenidir. Fotometrik değişkenler armatürün ışık dağılımı, optik sınıfı, eğimi, dönme açısı, renk özellikleri ve nominal ışık akısıdır. Elektriksel değişkenler güç, sürücü verimi, faz yükü, kablo kesiti ve yenilenebilir enerji/depolama boyutlandırmasıyla ilgilidir (Akalp, Ozbay & Efe, 2021).

İşletme değişkenleri genellikle sürekli veya ayrık olabilir. Sürekli değişkene ışık akısı oranı örnek verilebilir; ayrık değişkene ise M2'den M3'e geçiş gibi aydınlatma sınıfı seçimi örnek verilebilir. Sensör örnekleme aralığı, hareketli ortalama penceresi, ani ışık artırma eşiği ve güvenli işletim modu da karar modeline dâhil edilebilir. Özellikle adaptif sistemlerde kontrol parametreleri, fotometrik kararlar kadar önemlidir; çok hızlı tepki veren bir kontrolcü gereksiz açma-kapama davranışı sergileyebilir, çok yavaş tepki veren bir kontrolcü ise ani trafik veya hava değişimine geç yanıt verebilir.

Şekil 1, yol aydınlatması optimizasyonunu yalnızca armatür aralığı seçimine indirgemeyen, karar bağlamından ölçüm ve yeniden optimizasyona uzanan katmanlı bir çerçeve olarak göstermektedir.



Şekil 1. Yol aydınlatması optimizasyonunun karar, değerlendirme, kontrol ve geri besleme katmanları

2.3. Amaç fonksiyonları

Yol aydınlatması optimizasyonunda amaç fonksiyonları, çoğunlukla birbiriyle çatışır. Ortalama yol yüzeyi parlaklığını artırmak belirli bir güvenlik marjı sağlayabilir; ancak daha yüksek ışık akısı enerji tüketimini, işletme maliyetini ve bazı durumlarda kamaşmayı artırır. Düzgünlüğü yükseltmek için armatürler arası mesafeyi azaltmak gerekebilir; bu da yatırım maliyetini artırır. Kamaşmayı azaltan bir optik çözüm, aynı fotometrik performansı elde etmek için daha yüksek kurulu güce ihtiyaç duyabilir.

Literatürdeki erken çok amaçlı modeller, bu çatışmayı açık biçimde göstermektedir. Hyari ve ekibi (Hyari, Khelifi, & Katkhuda, 2016) dört hedefi aynı anda optimize etmiştir: ortalama aydınlatma düzeyinin artırılması, düzgünlüğün artırılması, kullanıcı kamaşmasının azaltılması ve işletme maliyetinin azaltılması. Gómez-Lorente ve arkadaşları ise (Gómez-Lorente, Rabaza, Espín Estrella, & Peña-García, 2013) NSGA-II tabanlı çalışmalarında genel düzgünlük ile kurulum verimliliğini birlikte maksimize etmiştir. Daha güncel çerçevelerde enerji verimliliği ve düzgünlük birlikte ele alınmış; farklı evrimsel algoritmalar Pareto çözümlerinin yakınsaması ve çeşitliliği bakımından karşılaştırılmıştır (Sikdar, Kar, & Guha Thakurta, 2026). Genel birçok amaçlı model eşitlik 1’de verildiği gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned}
F(x) &= [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)] \\
g_j(x) &\leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \\
h_k(x) &= 0, \quad k = 1, 2, \dots, q \\
x_{\min} &\leq x \leq x_{\max}
\end{aligned} \tag{1}$$

Burada $\mathbf{x}$ karar değişkenleri vektörünü, f_i amaç fonksiyonlarını, g_j eşitsizlik kısıtlarını ve h_k eşitlik kısıtlarını ifade eder. Aydınlatma performansı ile ilgili standart koşulları sağlayamayan bir çözüm, enerji tüketimi çok düşük olsa bile uygulanabilir çözüm olarak kabul edilmemelidir. Bu nedenle minimum aydınlık/parlaklık, düzgünlük ve kamaşma sınırları çoğu modelde sert kısıt; enerji, maliyet, bakım ve çevresel etki ise amaç fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Bu kapsamda diğer detaylar Tablo 1’ de gösterilmiştir.

Tablo 1. Yol aydınlatması optimizasyonunda yaygın amaçlar ve performans ölçütleri.

Amaç veya ölçüt	Tipik gösterim	Yol aydınlatmasındaki anlamı	Optimizasyon rolü
Ortalama aydınlık veya parlaklık	E_{av}, L_{av}	Yol yüzeyinin veya ilgili alanın ortalama görsel düzeyi	Çoğunlukla alt sınır kısıtı veya maksimize edilen hedef
Genel düzgünlük	U_0	Minimum düzeyin ortalama düzeye oranı gibi uzaysal dağılım ölçütleri	Güvenli ve konforlu görüş için sert kısıt veya hedef
Boyuna düzgünlük	U_l	Sürüş doğrultusunda ardışık aydınlık/parlaklık değişimini sınırlar	Özellikle motorlu trafik yollarında kısıt
Kamaşma	TI veya ilgili kamaşma metriği	Kullanıcının görsel konforunu ve algılamasını etkileyen istenmeyen parlaklık	Minimize edilen amaç veya üst sınır
Enerji tüketimi	$E_{yıllık}$, kWh/yıl	Armatür gücü, çalışma süresi ve dim profiline bağlı tüketim	Minimize edilen temel hedef
İşletme ve bakım maliyeti	$C_{işletme}$	Enerji, arıza, temizlik, haberleşme ve personel giderleri	Minimize edilen ekonomik hedef
Işık kirliliği ve çevresel etki	$C_{çevre}$	Gökyüzü parlaması, taşan ışık ve ekolojik etkiler	Minimize edilen sürdürülebilirlik hedefi
Kullanıcı güvenliği/rahatlığı	$S_{kullanıcı}$	Sürücü ve yayaların algılanan veya ölçülen güvenliği	Kısıt, hedef veya çok ölçütlü karar kriteri

2.4. Kısıtlar ve uygulanabilir çözüm uzayı

Kısıtlar, optimizasyonun arama uzayını fiziksel, teknik veya mevzuata dayalı olarak sınırlar. Fotometrik kısıtlar; ortalama aydınlık/parlaklık, genel düzgünlük, boyuna düzgünlük, çevreleme ve kamaşma sınırlarını kapsar. Geometrik kısıtlar; direk yüksekliğinin, armatür aralığının ve ofsetin belirli aralıklarda tutulmasını gerektirir. Elektriksel kısıtlar; gerilim düşümü, devre kapasitesi, sürücü sınırları ve güç kalitesiyle ilgilidir. İşletmesel kısıtlar ise dim seviyesinin minimum güvenli düzeyin altına inmemesi, sınıf geçişlerinin belirli gecikme ve histerezis kurallarıyla yapılması gibi koşullardır.

Standartlar bu noktada yalnızca sonuçların sonradan kontrol edildiği belgeler değildir. Uygun biçimde modellendiğinde, standart koşulları optimizasyonun içine yerleştirilebilir. CIE 115:2010, motorlu trafik, çatışma ve yaya alanları için M, C ve P sınıfları çerçevesinde görsel gereksinimlerin belirlenmesini ve trafik hacmi/hava koşulu gibi değişkenlerin uyarlanabilir sistemlere dâhil edilmesini sağlar. EN 13201 ailesiyle ilişkilendirilen uygulamalarda yolun önemi, hız, trafik hacmi, trafik bileşimi, kavşak yoğunluğu, park etmiş araçlar, ortam parlaklığı ve görsel görev gibi değişkenler sınıf seçiminde dikkate alınır (Pasolini et al., 2024; Wojnicki, Komnata, & Kotulski, 2019).

Burada kritik nokta, “standartı sağlayan” ile “optimal” kavramlarının aynı olmadığıdır. Standartta uygun iki çözümden biri diğerine göre daha az enerji tüketebilir, daha az kamaşma yaratabilir veya daha düşük bakım maliyetine sahip olabilir. Dolayısıyla standart, kabul edilebilir çözüm uzayının sınırını; optimizasyon ise bu uzay içindeki tercihleri belirler.

3. STANDARTLAR, GÜVENLİK VE ADAPTİF AYDINLATMA

3.1. Performans sınıfları ve görsel görev

Yol aydınlatması sınıfları, her yolun aynı düzeyde aydınlatılması gerektiği varsayımını ortadan kaldırır. Yolun trafik işlevi, hız, kullanıcı bileşimi ve çevresel koşullar değiştikçe gerekli performans düzeyi de değişebilir. CIE 115:2010, uygun sınıfın seçimini görsel görev ve yol kullanıcılarıyla ilişkili parametreler üzerinden yapılandırır. EN 13201 ailesinde de farklı yol ve çatışma alanları için performans gereksinimleri sınıflar aracılığıyla ifade edilir.

Optimizasyon modelinde sınıf seçimi iki şekilde ele alınabilir. Birinci yaklaşımda sınıf önceden belirlenir ve model, bu sınıfın gerektirdiği performansı en düşük maliyetle sağlayacak armatür düzenini arar. İkinci yaklaşımda sınıfın kendisi de karar değişkenidir; trafik ve hava koşullarına göre güvenli alt sınıfa geçişin ne zaman yapılacağı optimize edilir. İkinci yaklaşım, dinamik işletme için daha esnek olmakla birlikte güvenli geçiş eşikleri, histerezis, veri gecikmesi ve ölçüm belirsizliği gibi ilave kısıtlar getirir.

3.2. TAI ve FAI yaklaşımları

Pasolini ve arkadaşlarının (Pasolini et al., 2024) aktardığı çerçevede TAI, yalnızca trafik hacmine göre aydınlatma düzeyini ayarlar. Bu yaklaşım daha az sensör ve daha basit kontrol mantığı gerektirir. FAI ise trafik hacmine ek olarak yol yüzeyi parlaklığını ve hava koşullarını dikkate alır; böylece armatür ışık akısı daha sürekli biçimde ayarlanabilir ve yaşanma, kirlenme veya ıslak yol gibi etkiler telafi edilebilir.

TAI ayrı sınıf geçişleriyle açıklanabilir. Trafik, belirli süre boyunca nominal değer altında kaldığında aydınlatma bir veya daha fazla sınıf düşürülebilir. FAI’de ise ışık akısı iki komşu sınıf arasındaki ara değerlerde sürekli veya yarı sürekli biçimde değiştirilebilir. Böyle bir yaklaşım enerji tasarrufu potansiyelini artırabilir; ancak ölçüm doğruluğu, kontrol

kararlılığı ve armatürler arası eşzamanlılık gereksinimi de artar. Bu yaklaşımların detaylı karşılaştırması Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. TAI ve FAI yaklaşımlarının kavramsal karşılaştırması

Parametre	Trafik Uyarlamalı Kurulum (TAI)	Tam Uyarlamalı Kurulum (FAI)
Temel veri	Trafik hacmi veya trafik yoğunluğu	Trafik, yol yüzeyi parlaklığı ve hava koşulları
Kontrol davranışı	Genellikle sınıf bazlı, kademeli geçiş	Sınıflar arasında sürekli veya daha sık aralıklı ayar
Sensör gereksinimi	Trafik sensörleri ve haberleşme	Trafik, parlaklık ve meteorolojik sensörler
Hesaplama/işletme karmaşıklığı	Görece düşük	Daha yüksek
Avantaj	Uygulaması ve doğrulaması daha kolay	Gerçek koşullara daha duyarlı, daha hassas telafi
Risk	Yol yüzeyi ve hava koşullarını temsil edemeyebilir	Sensör kalibrasyonu, veri bütünlüğü ve bakım yükü
Uygun kullanım	Trafik profili belirgin, altyapısı sınırlı yollar	Büyük ölçekli, yoğun sensörlü ve yüksek kontrol gerektiren ağlar

3.3. Uyarlanabilirliğin güvenlik sınırı

Uyarlanabilir aydınlatmanın enerji hedefi, güvenlik koşullarının önüne geçirilemez. FHWA’nın uyarlanabilir yol aydınlatması kılavuzu, ışık düzeyi azaltıldığında düzgünlüğün veya nesne kontrastının doğrudan bozulmayabileceğini; ancak kontrast eşiğinin artması nedeniyle algılama süresinin uzayabileceğini belirtmektedir. Bu gözlem, optimizasyon modelinde yalnızca ortalama ışık düzeyinin değil, algılama ve görsel konforla ilişkili ölçütlerin de dikkate alınması gerektiğini gösterir.

Güvenli bir adaptif kontrolcü için en az dört koruma mekanizması önerilebilir. Birincisi, minimum güvenli ışık akısı veya minimum aydınlatma sınıfı tanımlanmalıdır. İkincisi, trafik artışı veya ani hava bozulması durumunda ışığın artırılması azaltılmasından daha hızlı olmalıdır. Üçüncüsü, sensör arızası, haberleşme kesintisi veya belirsiz veri durumunda sistem önceden belirlenmiş güvenli işletim moduna geçmelidir. Dördüncüsü, kararın yalnızca geçmiş veriye değil, ölçülen gerçek yol yüzeyi parlaklığına da dayandığı uygulamalarda kalibrasyon ve ölçüm belirsizliği açıkça modellenmelidir.

4. KLASİK OPTİMİZASYONDAN ÇOK AMAÇLI EVRİMSEL YÖNTEMLERE

4.1. Matematiksel programlama

Matematiksel programlama yöntemleri, amaç fonksiyonlarını ve kısıtları açık biçimde ifade etmek isteyen uygulamalar için uygundur. Doğrusal programlama, tam sayılı programlama ve karma tam sayılı doğrusal programlama; armatür seçimi, kablo/enerji planlaması, direk yerleşimi, bakım sıralaması veya retrofit proje seçimi gibi ayrık kararları modelleyebilir. Bu yöntemlerin en güçlü yanı, çözümün hangi kısıtları neden sağladığının izlenebilir olmasıdır.

Bununla birlikte fotometrik hesaplar çoğu zaman doğrusal değildir. Armatürün ışık dağılımı, yüzey yansıtma özellikleri, direk geometrisi ve kamaşma ilişkileri doğrudan doğrusal bir modele dönüştürülemeyebilir. Bu durumda doğrusal olmayan programlama, parçaçıklaştırma, vekil model veya matematiksel optimizasyon ile fotometrik yazılımın ardışık kullanımı tercih edilebilir. Matematiksel programlama, karar değişkenleri ve kısıtlar iyi tanımlandığında güçlüdür; ancak geniş ve karmaşık arama uzaylarında özel modelleme ve çözümleyici gereksinimi artar.

4.2. Ağırlıklı toplam ve tek amaçlı indirgeme

Çok amaçlı problemi tek bir amaç fonksiyonuna dönüştürmenin en basit yolu, normalize edilmiş hedeflerin ağırlıklı toplamını kullanmaktır:

$$J(x) = w_E \tilde{f}_E(x) + w_U \tilde{f}_U(x) + w_C \tilde{f}_C(x) \quad (2)$$

Burada w_i ağırlıkları karar vericinin önceliklerini, $\tilde{f}_i$ ise farklı birimlerdeki hedeflerin normalize edilmiş biçimini gösterir. Bu yaklaşım hesaplama bakımından kolaydır; fakat ağırlıkların seçimi sonucu güçlü biçimde etkiler. Enerji maliyetine yüksek ağırlık verilmesi, güvenlik ve düzgünlük hedeflerinin sınırda kalmasına yol açabilir. Ayrıca ağırlıklı toplam, Pareto cephesinin bazı bölümlerini hiç üretemeyebilir. Bu nedenle ağırlıklı toplam, hızlı ön tasarım veya karar vericinin tercihleri önceden bilindiğinde kullanılabilir; genel literatür derlemesinde ise Pareto tabanlı yöntemlerle birlikte değerlendirilmesi daha uygundur.

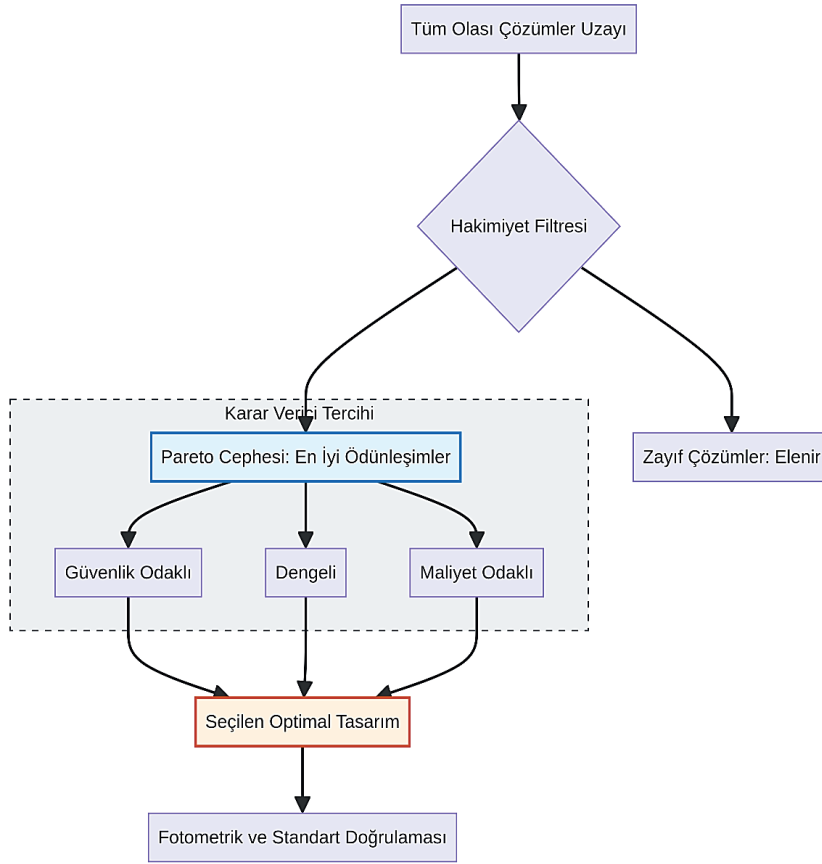
4.3. Çok amaçlı evrimsel algoritmalar

Çok amaçlı evrimsel algoritmalar, birden fazla aday çözümü aynı anda arayarak hedefler arasındaki ödünleşimi görünür kılar. Her aday çözüm, armatür düzeni veya işletme profili gibi bir tasarımı temsil eder. Çözümler fotometrik ve ekonomik ölçütlerle değerlendirilir; hâkim olmayan çözümler korunur, yeni çözümler üretmek için seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemleri uygulanır.

NSGA-II bu alanda en sık başvuru alan çerçevelerden biridir. Gómez-Lorente ve arkadaşlarının (Gómez-Lorente, Rabaza, Espín Estrella, & Peña-García, 2013) yol aydınlatması uygulamasında NSGA-II, genel düzgünlük ve kurulum verimliliğini maksimize etmek üzere kullanılmış; farklı yerleşim düzenleri incelenmiş ve sonuçlar DIALux hesaplarıyla karşılaştırılmıştır. Sikdar ve arkadaşlarının çalışması ise (Sikdar, Kar, & Guha Thakurta, 2022) NSGA-II'yi SPEA2 ve çok amaçlı diferansiyel evrimle karşılaştırarak enerji verimliliği ve düzgünlük bakımından Pareto çözümlerini değerlendirmiştir.

Çok amaçlı evrimsel algoritmaların temel çıktısı tek bir “en iyi” çözüm değil, Pareto cephesidir. Bir çözümün başka bir çözüm tarafından hâkim edilmemesi, en az bir hedefte daha iyi olup diğer hedeflerde daha kötü olabileceği anlamına gelir. Karar verici, güvenlik

ve düzgünlük önceliği ile enerji ve maliyet önceliği arasında seçim yapabilir. Şekil 2, çözüm uzayından Pareto cephesine ve seçilen tasarımın fotometrik/standart doğrulamasına uzanan bu süreci göstermektedir.



Şekil 2. Doğrulama süreci iş akışı

4.4. Meta-sezgisel yöntemler

Genetik algoritmaların yanı sıra diferansiyel evrim, parçacık sürü optimizasyonu, arı kolonisi, karınca kolonisi ve benzetimli tavlama gibi meta-sezgisel yöntemler yol aydınlatması problemlerine uygulanabilir. Bu yöntemler çoğunlukla türev gerektirmez ve fotometrik yazılımı kara kutu değerlendirme fonksiyonu olarak kullanabilir. Bu özellik, armatür konumunun veya optik yöneliminin küçük değişimlerinin analitik olarak ifade edilmesinin zor olduğu problemlerde önemlidir (Şahin, 2026).

2026 tarihli arşivli çok amaçlı benzetimli tavlama yaklaşımında enerji verimliliği ve düzgünlük hedefleri birlikte ele alınmış; ardışık armatürler arasındaki mesafe, armatür yüksekliği, yol genişliği ve ortalama aydınlık düzeyi gibi parametrelerden oluşan çözüm uzayı kullanılmıştır. Çözüm kümesinin yakınsaması ve çeşitliliği Generational Distance, Inverted Generational Distance, minimal spacing ve purity gibi ölçütlerle değerlendirilmiş; sonuçlar DIALux ile standarda uygunluk bakımından doğrulanmıştır. Bu örnek, modern meta-sezgisel yaklaşımın yalnızca algoritma adından ibaret olmadığını; arşiv mekanizması, Pareto kalite ölçütleri ve bağımsız fotometrik doğrulama ile birlikte düşünülmesi gerektiğini gösterir.

Tablo 3. Yol aydınlatması tasarımında başvurulabilecek optimizasyon yöntemi aileleri

Yöntem ailesi	Yol aydınlatmasında tipik kullanım	Güçlü yön	Dikkat edilmesi gereken nokta
Doğrusal/karma tam sayılı programlama	Armatür/direk seçimi, proje ve bakım planı	Kısıtların açık ve izlenebilir olması	Fotometrik ilişkilerin doğrusal olmaması
Ağırlıklı toplam	Hızlı tasarım veya önceliklerin bilindiği durumlar	Basit uygulama ve tek çözüm	Ağırlık seçimine duyarlılık, Pareto kaybı
Genetik algoritma	Yerleşim, optik ve güç seçimi	Karmaşık, ayırık ve sürekli değişkenlere uyum	Parametre ayarı ve tekrarlanabilirlik
NSGA-II	Enerji–düzgünlük–kamaşma–maliyet ödünleşimi	Pareto cephesini ve elit çözümleri koruma	Fotometrik değerlendirme sayısı yüksek olabilir
SPEA2	Pareto çözümlerinin arşivlenmesi	Çeşitlilik ve hâkimiyet bilgisini birlikte kullanma	Büyük arşiv ve hesaplama yükü
Çok amaçlı diferansiyel evrim	Sürekli geometrik/fotometrik değişkenler	Sürekli arama uzayında güçlü keşif	Parametre ve ölçeklendirme hassasiyeti
Benzetimli tavlama	Yerleşim veya enerji profili iyileştirme	Yerel optimumlardan kaçabilme	Soğutma planı ve yakınsama süresi
Parçacık/sürü zekâsı	Boyutlandırma ve konfigürasyon araması	Türev gerektirmeyen sezgisel arama	Yakınsama ve yerel optimum riski

5. VERİ GÜDÜMLÜ VE AKILLI OPTİMİZASYON YAKLAŞIMLARI

5.1.Bulanık mantık

Bulanık mantık, trafik yoğunluğu, yaya varlığı, yağış veya ortam parlaklığı gibi değişkenlerin kesin eşiklerle değil, “düşük”, “orta” ve “yüksek” gibi dilsel üyeliklerle temsil edilmesine izin verir. Örneğin trafik yoğunluğu düşük ve yol yüzeyi kuru ise ışık akısının azaltılması; trafik yoğunluğu yüksek veya görüş koşulları kötü ise ışık akısının artırılması kural tabanlı biçimde ifade edilebilir.

Bulanık kontrolün avantajı, sensör verisinin belirsiz ve sürekli değişken olduğu durumlarda yumuşak geçişler sağlayabilmesidir. Ayrıca karar kuralları uzman bilgisiyle açıklanabilir. Buna karşılık kural tabanının kapsamı büyüdükçe ayarlanması zorlaşır. Farklı yol tipleri, hava koşulları ve kullanıcı profilleri için aynı kuralların genellenebilirliği ayrıca doğrulanmalıdır. Bulanık mantık çoğu zaman tek başına değil, sensör füzyonu veya makine öğrenmesiyle birlikte kullanılabilecek bir kontrol katmanı olarak düşünülmelidir.

5.2. Makine öğrenmesi ve vekil modeller

Makine öğrenmesi, iki farklı rolde yol aydınlatması optimizasyonuna dâhil edilebilir. İlk rolde geçmiş trafik ve çevre verilerinden gelecekteki trafik yoğunluğu, yaya varlığı veya hava koşulu kestirilir. Böylece kontrolcü yalnızca mevcut duruma tepki vermek yerine kısa vadeli talebi öngörebilir. İkinci rolde ise fotometrik hesapların hızlı bir vekil modeli öğrenilir. Armatür tipi, yükseklik, aralık, eğim ve güç bilgileri girdiye; ortalama aydınlık, düzgünlük, kamaşma veya enerji tüketimi çıktıya dönüştürülebilir. Bu vekil model, çok sayıda aday çözümün hızlıca taranmasına yardım eder.

Vekil model kullanımında iki risk önemlidir. Birincisi, eğitim verisinin kapsamadığı geometrilerde model hatası büyüyebilir. İkincisi, güvenlik açısından kritik olan bir performans ölçütü yalnızca tahmin modeline bırakılmamalıdır. Bu nedenle makine öğrenmesi, aday çözümleri hızlı biçimde sıralayan veya tahmin yapan bir katman olarak kullanılmalı; seçilen çözümler bağımsız fotometrik hesap ve saha ölçümüyle doğrulanmalıdır. Sikdar ve arkadaşlarının çalışmaları, algoritmik çözümün DIALux ile doğrulanması gereğini açıkça göstermektedir (Sikdar, Kar, & Guha Thakurta, 2022; Sikdar, Kar, & Guha Thakurta, 2026).

5.3. Pekiştirmeli öğrenme ve model öngörülü kontrol

Pekiştirmeli öğrenmede kontrolcü, sistem durumu ve eylem arasındaki ilişkiyi bir ödül fonksiyonu aracılığıyla öğrenir. Yol aydınlatmasında sistem durumu trafik, yaya yoğunluğu, hava, saat, önceki ışık düzeyi ve enerji fiyatı gibi değişkenlerden oluşabilir. Eylem, armatürlerin ışık akısını artırmak, azaltmak veya belirli bir bölgeyi farklı seviyede çalıştırmak olabilir. Ödül, enerji tasarrufunu artırırken minimum güvenlik ve düzgünlük koşullarını koruyacak biçimde kurulmalıdır.

Pekiştirmeli öğrenmenin gerçek sistemlerde uygulanması, keşif davranışının güvenlik açısından sınırlandırılmasını gerektirir. Kontrolcünün öğrenme sırasında düşük bir ışık düzeyi denemesine izin verilmesi, yol kullanıcıları için kabul edilemez olabilir. Bu nedenle güvenli pekiştirmeli öğrenme, kısıtlı eylem uzayı, simülasyon ön eğitimi, insan/uzman denetimi ve güvenli geri dönüş modu gibi mekanizmalarla birlikte ele alınmalıdır.

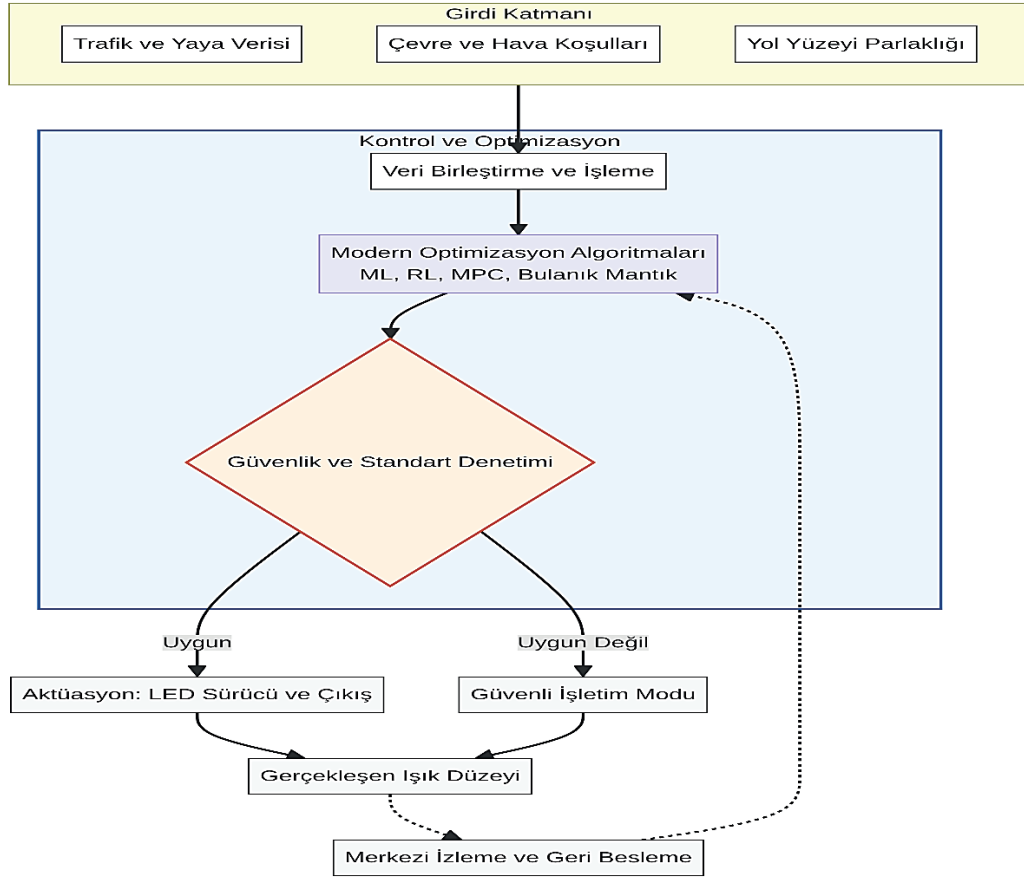
Model öngörülü kontrol (MPC), sistemin kısa vadeli geleceğini tahmin ederek belirli bir zaman ufku boyunca en iyi eylem dizisini arar. Trafik tahmini ve hava tahmini güvenilir olduğunda ışık düzeyinin ani değişimler yerine yumuşak ve enerji verimli biçimde ayarlanmasını sağlayabilir. MPC'nin temel sınırlılığı, her kontrol adımında optimizasyon problemini yeniden çözme gereğidir. Bu nedenle düşük gecikmeli edge hesaplama, sadeleştirilmiş modeller ve güvenli varsayılan kontrol kuralları önem kazanır.

5.4. IoT, edge ve dağıtık kontrol

Akıllı sokak aydınlatması, sensörler ve aktüatörlerle donatılmış, haberleşen bir altyapı olarak tanımlanabilir (Mahoor, Hosseini, Khodaei, Paaso, & Kushner, 2020). IoT tabanlı akıllı otoyol aydınlatması üzerine derlemeler; algılama, haberleşme protokolleri, veri işleme, aydınlatma kontrol stratejileri, yenilenebilir enerji ve enerji depolama gibi bileşenlerin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Achar, Rekha, & Shreyas, 2024). Bu bağlamda optimizasyon algoritması, sistemin yalnızca bir katmanıdır.

Şekil 3, çevre ve yol kullanıcılarından başlayan algılama sürecini, veri birleştirme ve kontrol kararını, güvenlik kapısını, edge/yerel kontrolü, LED çıkışını ve bakım geri beslemesini göstermektedir. Güvenlik kapısı, makine öğrenmesi veya MPC'nin ürettiği

önerinin doğrudan uygulanmasından önce minimum standart koşullarını kontrol eden bir koruma katmanıdır.



Şekil 3. Algılama süreci iş akışı

Dağıtık kontrol mimarisinde her armatür veya armatür grubu yerel karar verebilir. Bu yapı haberleşme gecikmesini azaltır ve tek bir merkezî kontrolcüye bağımlılığı düşürür. Bununla birlikte komşu armatürlerin eşzamanlı ve homojen dim edilmesi gerekir; aksi durumda yol boyunca ışık seviyesinde keskin farklılıklar oluşabilir. Pasolini ve arkadaşları, gerçek zamanlı verinin aynı adaptif alan içindeki armatürlere iletilmesinin homojen ve eşzamanlı kısma için gerekli olduğunu vurgulamaktadır.

Tablo 4. IoT tabanlı adaptif yol aydınlatmasında veri ve altyapı bileşenleri

Veri/altyapı bileşeni	Örnek girdiler	Optimizasyon veya kontrol katkısı	Başlıca risk
Trafik algılama	Araç sayısı, hız, doluluk, akış	Aydınlatma sınıfı ve kısa vadeli talep tahmini	Sensör kör noktası, örnekleme gecikmesi
Yaya/bisiklet algılama	Varlık, yön, yaklaşma mesafesi	Yerel ve yönlendirilmiş ışık artırma	Mahremiyet, yanlış pozitif/negatif
Meteoroloji	Yağış, sis, kar, sıcaklık	Görüş koşuluna göre güvenli ışık düzeyi	Sensör kalibrasyonu ve bakım
Yol yüzeyi ölçümü	Parlaklık, yansımalar, ıslaklık	Gerçekleşen fotometrik düzeyin telafisi	Ölçüm belirsizliği, kirlenme
Armatür telemetrisi	Akım, gerilim, sıcaklık, hata kodu	Arıza teşhisi ve bakım önceliği	Haberleşme kesintisi
Edge kontrolcü	Yerel durum vektörü ve kurallar	Düşük gecikmeli dimleme ve güvenli mod	Donanım kapasitesi
Bulut/merkezî platform	Tarihsel veri, harita, rapor	Uzun dönem optimizasyon ve filo yönetimi	Siber güvenlik, ağ bağımlılığı

6. YÖNTEM SEÇİMİ İÇİN DERLEME TEMELLİ KARAR ÇERÇEVESİ

Ayrıntılı simülasyon gerçekleştirmeden de bir yol aydınlatması optimizasyon yöntemi seçilebilir. Bunun için öncelikle karar probleminin tasarım zamanı mı, işletme zamanı mı, yoksa her ikisini birlikte mi kapsadığı belirlenmelidir. İkinci adımda hedeflerin tek bir ekonomik ölçüte indirgenip indirgenemeyeceği sorgulanmalıdır. Enerji, düzgünlük, kamaşma ve güvenlik aynı anda önemliyse çok amaçlı yaklaşım daha uygun olacaktır. Üçüncü adımda veri ve hesaplama altyapısı değerlendirilmelidir. Yalnızca sabit yol geometrisi ve az sayıda karar değişkeni varsa matematiksel programlama veya klasik meta-sezgisel yöntemler yeterli olabilir. Gerçek zamanlı trafik, hava ve yaya verisi mevcutsa adaptif kontrol; uzun dönemli veri mevcutsa makine öğrenmesi veya MPC gündeme gelebilir. Dördüncü adım standart ve doğrulama stratejisidir. Her aday çözüm, ilgili performans sınıfı ve fotometrik ölçütlerle kontrol edilmelidir. Beşinci adım saha işletmesidir. Algoritma bir laboratuvar veya simülasyon ortamında başarılı olsa bile sensör hataları, haberleşme gecikmeleri, LED yaşlanması, optik kirlenme ve bakım kesintileri altında güvenilir çalışmalıdır. Altıncı adım karar vericinin çözümü nasıl kullanacağıdır. Çok amaçlı algoritma bir Pareto cephesi üretiyorsa, son seçimin enerji birim maliyeti, güvenlik önceliği, yatırım bütçesi veya çevresel politika gibi kurumsal ölçütlerle yapılması gerekir.

Tablo 5. Yol aydınlatması probleminin özelliklerine göre yöntem seçimi

Problem koşulu	Öncelikli yöntem ailesi	Neden	Doğrulama gereği
Sabit yol geometrisi, az sayıda değişken	Matematiksel programlama veya ağırlıklı tek amaç	Kısıtlar açık, çözüm uzayı sınırlı	Standart ve duyarlılık analizi
Enerji–düzgünlük–kamaşma–maliyet ödünleşimi	NSGA-II, SPEA2 veya çok amaçlı diferansiyel evrim	Pareto alternatifleri üretir	Pareto kalite ölçütleri ve fotometri
Sürekli geometrik ve optik değişkenler	Diferansiyel evrim, benzetimli tavlama, parçacık sürüşü	Türev gerektirmeyen arama	Tekrarlı çalışma ve yakınsama analizi
Trafik ve hava verisiyle sınıf geçişi	Kural tabanlı, bulanık veya TAI/FAI kontrolü	Açıklanabilir ve gerçek zamanlı uygulanabilir	Eşik, histerezis ve güvenli mod testleri
Zengin tarihsel veri ve tahmin ihtiyacı	Makine öğrenmesi/vekil model	Hızlı kestirim ve öngörü	Eğitim dışı veri, kalibrasyon ve bağımsız fotometri
Ardışık kararlar ve kısa vadeli tahmin	MPC veya güvenli pekiştirmeli öğrenme	Zaman bağımlı ödünleşim	Simülasyon–saha farkı ve güvenlik sınırı
Büyük ölçekli haberleşen armatür ağı	Edge + merkezi optimizasyon	Düşük gecikme ve ölçeklenebilirlik	Ağ, siber güvenlik ve arıza senaryoları

6.1. Literatür derlemesi için önerilen uygulama adımları

Derleme yaklaşımını uygulamaya dönüştürmek için ilk olarak yol ağı veya incelenen yol kesimleri sınıflandırılmalıdır. Her kesim için yol genişliği, şerit sayısı, hız, trafik hacmi, yaya/bisiklet hareketi, kavşak ve çatışma bölgeleri, ortam aydınlığı ve mevcut direk altyapısı kaydedilir. Daha sonra ilgili aydınlatma sınıfı ve bu sınıfa ait performans koşulları belirlenir. Bu aşama, optimizasyonun hangi standarda ve hangi güvenlik seviyesine göre yapılacağını açıklar.

İkinci aşamada amaçlar ve kısıtlar yazılı hâle getirilir. “Enerji tasarrufu sağlansın” ifadesi tek başına yeterli değildir; yıllık enerji tüketimi, toplam sahip olma maliyeti, düzgünlük, kamaşma, arıza riski ve çevresel etki gibi ölçütlerin nasıl hesaplanacağı tanımlanmalıdır. Üçüncü aşamada tasarım ve işletme değişkenleri ayrılır. Böylece bir yöntem armatür yerleşimini, başka bir yöntem ise gün içi dim profilini optimize edebilir.

Dördüncü aşamada aday algoritma seçilir. Tek amaçlı yöntemler yalnızca hedefler arasında kabul edilebilir bir öncelik sıralaması varsa; çok amaçlı yöntemler ise karar vericinin alternatif ödünleşimleri görmek istediği durumlarda kullanılmalıdır. Veri güdümlü yöntemler için veri miktarı, ölçüm kalitesi, temsil gücü ve gerçek zamanlı hesaplama gereksinimi kontrol edilmelidir.

Beşinci aşama doğrulamadır. Fotometrik yazılım veya bağımsız hesap, algoritmanın ürettiği çözümün ortalama düzey, düzgünlük ve kamaşma gereksinimlerini sağlayıp sağlamadığını kontrol eder. Gerçek işletme için ayrıca enerji sayaçları, armatür telemetrisi ve yol yüzeyi ölçümleriyle saha doğrulaması gerekir. Son aşamada yöntem; enerji tasarrufu kadar güvenlik marjı, arıza durumundaki davranış, bakım kolaylığı ve kullanıcı kabulü bakımından değerlendirilir.

7. YÖNTEMLERİN ELEŞTİREL DEĞERLENDİRMESİ

7.1. “Daha az enerji” ile “daha iyi aydınlatma” arasındaki gerilim

Enerji tasarrufu ile aydınlatma kalitesi arasındaki ilişki doğrusal değildir. Işık akısının azaltılması bazı durumlarda enerji tüketimini doğrudan azaltabilir; ancak aynı azaltma düzgünlük, kontrast veya kullanıcı algısı bakımından aynı sonucu doğurmayabilir. Ayrıca yeni LED sistemlerinde başlangıçtaki ışık çıkışı, yaşlanma ve kirlenme telafisi dikkate alınmadan seçilirse ilk dönemde aşırı aydınlatma oluşabilir. FHWA, kontrol sistemlerinin her armatürü ayrı ayrı yöneterek aşırı aydınlatmayı azaltabileceğini ve yaşlanma/kirlenmeye bağlı kayıpları telafi edebileceğini belirtmektedir (Federal Highway Administration, 2014).

Bu nedenle enerji hedefi, güvenlik kısıtlarıyla birlikte verilmelidir. “Minimum enerji” hedefi yerine “standart performansını koruyarak minimum enerji” hedefi daha doğru bir modelleme biçimidir. Çok amaçlı modellerde enerji, düzgünlük ve kamaşma aynı anda izlenmeli; tek bir tasarruf yüzdesi, tasarımın tüm niteliği için vekil olarak kullanılmamalıdır.

7.2. Veri kalitesi ve model belirsizliği

Adaptif optimizasyon, sensör verisinin güvenilirliği kadar başarılıdır. Trafik sensörü yanlış sayım yaparsa sistem gereksiz biçimde ışığı azaltabilir veya artırabilir. Yol yüzeyi parlaklık sensörü kirlenirse gerçek performans olduğundan iyi veya kötü tahmin edilebilir. Meteorolojik sensörlerin yerleşimi, yol kesiminin tamamındaki koşulu temsil etmeyebilir. Bu nedenle veri kalitesi; algılama doğruluğu, örnekleme aralığı, eksik veri, aykırı değer, zaman damgası ve sensör kalibrasyonu ile birlikte ele alınmalıdır.

Makine öğrenmesi yöntemlerinde belirsizlik daha da önemlidir. Bir model, eğitim veri setinde iyi sonuç verse bile farklı bir kentte, farklı yol kaplamasında veya farklı trafik düzeninde genellenemeyebilir. Açıklanabilirlik ve güven aralığı olmayan tahminler, güvenlik açısından kritik ışık kararlarında doğrudan kullanılmamalıdır. En güvenli yaklaşım, öğrenilmiş modeli karar destek veya hızlı aday üretme katmanı olarak kullanmak; son kararı standart kısıtları uygulayan korumalı bir kontrol katmanına bırakmaktır.

7.3. Gerçek zamanlı kontrol ve hesaplama mimarisi

IoT tabanlı sistemlerde algoritmanın matematiksel olarak iyi olması, sahada uygulanacağı anlamına gelmez. Her kontrol adımı için gereken hesaplama süresi, haberleşme gecikmesi, paket kaybı ve enerji tüketimi belirlenmelidir. Achar ve arkadaşları (Achar, Rekha, & Shreyas, 2024), karmaşık algoritmaların gerçek zamanlı IoT cihazlarında uygulanmasının hesaplama ve bulut kaynakları bakımından zorluklar doğurabileceğini belirtmektedir.

Edge yaklaşımı düşük gecikmeli ve yerel kararlar için uygundur; bulut veya merkezî platform ise uzun dönemli analiz, model güncelleme, filo yönetimi ve raporlama için avantajlıdır. Pratik mimari çoğu zaman ikisinin birleşimidir. Güvenlik için gerekli minimum kararlar edge üzerinde çalışmalı, daha ağır optimizasyon ve model eğitimi merkezî sistemde

yürütülmelidir. Haberleşme kesildiğinde armatürlerin güvenli ve öngörülebilir bir yerel programa geçmesi zorunludur.

7.4.Siber güvenlik ve mahremiyet

Akıllı sokak aydınlatması, sensör, haberleşme ve uzaktan komut altyapısı nedeniyle siber güvenlik riskleri taşır. Yetkisiz bir komut, bir grup armatürü kapatabilir veya gereğinden fazla güçte çalıştırabilir. Trafik veya yaya verisi, özellikle kamera tabanlı sistemlerde mahremiyet sorunları yaratabilir. Mahoor ve arkadaşları, akıllı sokak aydınlatması derlemesinde haberleşme ve siber güvenliği sistemin temel boyutları arasında değerlendirmektedir (Mahoor, Hosseini, Khodaei, Paaso, & Kushner, 2020).

Optimizasyon modelinde siber güvenlik doğrudan bir amaç fonksiyonu olmayabilir; ancak erişim yetkisi, şifreleme, kimlik doğrulama, yazılım güncellemesi, kayıt tutma ve arıza/istismar tespiti sistem kısıtları olarak ele alınmalıdır. Kamera görüntüsünün ham hâli yerine anonimleştirilmiş sayım veya yerel özellik çıkarımı kullanılması, veri minimizasyonu açısından daha uygun olabilir.

7.5.Işık kirliliği ve ekosistem etkisi

Yol aydınlatması optimizasyonu yalnızca yol yüzeyini hedef alırsa, gökyüzüne veya yol dışındaki alanlara taşan ışığı gözden kaçırabilir. Aşırı aydınlatma, enerji tüketimini artırmanın yanı sıra ışık kirliliğine katkı verebilir. Bu nedenle armatür optiği, ışığın kesim açısı, gereksiz taşma, renk özellikleri ve zamanla kısma politikası çevresel hedeflerle birlikte değerlendirilmelidir. 2025 tarihli dinamik aydınlatma çalışmaları, enerji ve güvenlik hedeflerine ek olarak yaya güvenlik algısı ve çevresel etkilerin de karar problemine dâhil edilmesinin önemini göstermektedir (Ye et al., 2025).

8. GELECEKTEKİ ARAŞTIRMA YÖNELİMLERİ

Gelecekte yol aydınlatması optimizasyonunda ilk önemli yönelim, tasarım ve işletme kararlarının birlikte optimize edilmesidir. Bugün birçok çalışma ya armatür geometrisini ya da dim profilini ayrı ayrı ele almaktadır. Oysa armatür optiği, direk aralığı, sensör yerleşimi ve kontrol algoritması birlikte seçildiğinde toplam sahip olma maliyeti ve güvenlik marjı daha doğru değerlendirilebilir.

İkinci yönelim, standartlarla uyumlu güvenli yapay zekâdır. Makine öğrenmesi ve pekiştirmeli öğrenme, trafik ve yaya davranışını tahmin ederek enerji tasarrufuna katkı sağlayabilir; ancak modelin kararları açıklanabilir, sınırlandırılabilir ve bağımsız fotometrik doğrulamaya açık olmalıdır. Gelecekte “öğrenen ama güvenli sınırlar içinde kalan” hibrit kontrolcüler, saf veri güdümlü kontrolcülere göre daha uygulanabilir görünmektedir.

Üçüncü yönelim, dijital ikiz ve sürekli kalibrasyondur. Yol ağı, armatürler, sensörler, trafik profilleri ve hava koşulları ortak bir dijital modelde güncellenirse tasarım zamanı varsayımları işletme verileriyle düzeltilebilir. Gerçekleşen yol yüzeyi parlaklığı, enerji tüketimi ve arıza kayıtları modele geri beslenerek optimizasyon periyodik biçimde yenilenebilir.

Dördüncü yönelim, insan ve çevre boyutunun nicel modele dâhil edilmesidir. Yaya güvenlik algısı, sürücü konforu, mahalle sakinlerinin ışık tercihi, biyolojik ritimler ve ekosistem hassasiyeti yalnızca nitel yorumlar olarak bırakılmamalıdır. Bu ölçütlerin güvenilir anket, gözlem ve çevresel ölçüm protokolleriyle elde edilmesi; çok kriterli karar verme çerçevesine aktarılması gerekir.

Beşinci yönelim, tekrarlanabilirlik ve karşılaştırılabilirliktir. Literatürde yöntemler farklı yol geometrileri, farklı standartlar, farklı fotometrik yazılımlar ve farklı enerji tarifeleri kullanabildiği için sonuçların doğrudan karşılaştırılması zorlaşmaktadır. Gelecek çalışmaların karar değişkenlerini, amaç fonksiyonlarını, kısıtları, veri aralıklarını, algoritma parametrelerini ve doğrulama koşullarını açık biçimde raporlaması gerekir. Pareto yakınsaması ve çözüm çeşitliliği gibi ölçütler, yalnızca tek bir enerji tasarrufu değeri bildirmekten daha bilgilendiricidir.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yol aydınlatması için modern optimizasyon, armatürler arası mesafeyi veya güç seviyesini tek başına ayarlayan bir hesaplama işlemi değildir. Problem; tasarım değişkenlerini, işletme kararlarını, fotometrik performansı, standart kısıtlarını, trafik ve hava verisini, haberleşme altyapısını, bakım gereksinimlerini ve çevresel etkileri birlikte içeren çok katmanlı bir karar sistemidir.

Literatür, tek amaçlı ve yalnızca enerji merkezli yaklaşımlardan çok amaçlı, adaptif ve veri güdümlü yaklaşımlara doğru belirgin bir geçiş olduğunu göstermektedir. NSGA-II, SPEA2, çok amaçlı diferansiyel evrim ve benzetimli tavlama gibi yöntemler, enerji–düzgünlük–kamaşma–maliyet ödünleşimlerini Pareto çözümleriyle görünür hâle getirebilir (Hyari, Khelifi, & Katkhuda, 2016; Gómez-Lorente, Rabaza, Espín Estrella, & Peña-García, 2013; Sikdar, Kar, & Guha Thakurta, 2022; Sikdar, Kar, & Guha Thakurta, 2026). Bulanık mantık, makine öğrenmesi, MPC ve pekiştirmeli öğrenme ise trafik, yaya ve hava koşullarına göre işletme kararlarını dinamikleştirebilir. IoT, edge ve merkezî yönetim mimarileri bu kararların sahaya aktarılmasını sağlar.

Bununla birlikte, hiçbir optimizasyon yöntemi standart ve güvenlik koşullarının yerine geçmez. En düşük enerji tüketimini veren çözüm, minimum aydınlatma ve düzgünlük koşullarını sağlamıyorsa geçerli değildir. En gelişmiş makine öğrenmesi modeli, veri dağılımı değiştiğinde veya sensör arızalandığında güvenli bir işletim modu sunamıyorsa tek başına yeterli değildir. Bu nedenle önerilen genel yaklaşım; standartları sert kısıt olarak tanımlamak, enerji ve maliyet gibi hedefleri çok amaçlı biçimde değerlendirmek, adaptif kontrolü güvenlik kapısıyla korumak ve bütün sonuçları bağımsız fotometrik/saha doğrulamasıyla denetlemektir.

Sonuç olarak, yol aydınlatması optimizasyonunun geleceği tek bir algoritmanın üstünlüğünde değil, doğru problem tanımında ve katmanlar arası bütünleşmede yatmaktadır. Uygulama başarısını belirleyen temel unsurlar; gerçekçi amaç ve kısıtlar, güvenilir veri, açıklanabilir karar mantığı, düşük gecikmeli kontrol, siber güvenlik, bakım yapılabilirlik ve kullanıcı/çevre etkilerinin birlikte değerlendirilmesidir.

KAYNAKÇA

- Achar, T. E., Rekha, C., & Shreyas, J. (2024). Smart automated highway lighting system using IoT: A survey. *Energy Informatics*, 7, 76. <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00276-1>
- Akalp, O., Ozbay, H., & Efe, S. B. (2021). Design and Analysis of High-Efficient Driver Model for LED Luminaires. *Light & Engineering*, 29(2), 96–106.
- Akdeniz, M., & Efe, S. B. (2025). Forecasting of Harmonic Distortions in MV Distribution Network Caused by Illumination Devices. *Light and Engineering*, 33(2), 64–69.
- Efe, S. B., Ozbay, H., & Ozer, I. (2022). Experimental Design and Analysis of Adaptive LED Illumination System. *Light & Engineering*, 30(4), 63–70.
- Federal Highway Administration. (2014, July). *Design criteria for adaptive roadway lighting* (FHWA-HRT-14-051). U.S. Department of Transportation. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/lighting/14051>
- Gómez-Lorente, D., Rabaza, O., Espín Estrella, A., & Peña-García, A. (2013). A new methodology for calculating roadway lighting design based on a multi-objective evolutionary algorithm. *Expert Systems with Applications*, 40, 2156–2164. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.10.046>
- Hyari, K. H., Khelifi, A., & Katkhuda, H. (2016). Multiobjective optimization of roadway lighting projects. *Journal of Transportation Engineering*, 142(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000853](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000853)
- International Commission on Illumination. (2010). *Lighting of roads for motor and pedestrian traffic* (2nd ed.). CIE 115:2010.
- Mahoor, M., Hosseini, Z. S., Khodaei, A., Paaso, A., & Kushner, D. (2020). State-of-the-art in smart streetlight systems: A review. *IET Smart Cities*, 2(1), 24–33. <https://doi.org/10.1049/iet-smc.2019.0009>
- Pasolini, G., Toppan, P., Toppan, A., Bandiera, R., Mirabella, M., Zabini, F., Bonata, D., & Andrisano, O. (2024). Comprehensive assessment of context-adaptive street lighting: Technical aspects, economic insights, and measurements from large-scale, long-term implementations. *Sensors*, 24(18), 5942.
- Sikdar, P. L., Kar, S., & Guha Thakurta, P. K. (2022). Multiobjective energy efficient street lighting framework: A data analysis approach. *Applied Intelligence*, 52, 17237–17263. <https://doi.org/10.1007/s10489-022-03354-8>
- Sikdar, P. L., Kar, S., & Guha Thakurta, P. K. (2026). Energy efficient street lighting framework: An archived multi-objective simulated annealing based approach. *Energy Efficiency*, 19, 23. <https://doi.org/10.1007/s12053-025-10123-7>
- Şahin, M. (2026). ANFIS-Based Estimation of Average Luminance Values for Different Road Lighting Systems. *LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America*. <https://doi.org/10.1080/15502724.2026.2686143>
- Wojnicki, I., Komnata, K., & Kotulski, L. (2019). Comparative study of road lighting efficiency in the context of CEN/TR 13201 2004 and 2014 lighting standards and dynamic control. *Energies*, 12(8), 1524.
- Ye, Y., et al. (2025). Energy-efficient dynamic street lighting optimization: Balancing pedestrian safety and energy conservation. *Buildings*, 15(8), 1377. <https://doi.org/10.3390/buildings15081377>

BÖLÜM 4

HİSTOPATOLOJİ GÖRÜNTÜLERİNDE ÖZNİTELİK HARİTALAMA VE DERİN METRİK ÖĞRENME

Volkan GÖREKE¹, Vekil SARI²

¹ Doç.Dr.,Sivas Cumhuriyet Üniversitesi TBMYO,Bilgisayar Teknolojileri Bölümü ORCID: [orcid.org/ 0000-0002-2418-8373](https://orcid.org/0000-0002-2418-8373)

² Dr.Öğr.Üyesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi,Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği

1. Giriş

Histopatolojik örneklerin dijitalleştirilmesi, doku yapılarının bilgisayar destekli yöntemlerle incelenmesine ve geniş ölçekli görüntü analizlerinin gerçekleştirilmesine olanak sağlayan temel bir altyapı oluşturmuştur. Bu dönüşümde önemli bir yere sahip olan whole-slide imaging (WSI) teknolojisi, histolojik preparatların yüksek çözünürlükte sayısal görüntüler hâline getirilmesini sağlayarak tümör bölgelerinin saptanması, doku sınıflandırması ve farklı morfolojik yapıların otomatik olarak değerlendirilmesi gibi hesaplamalı patoloji uygulamalarının gelişimini desteklemiştir. Bununla birlikte, WSI görüntülerinin çok büyük veri hacmine sahip olması, aynı preparat içerisinde farklı hücresel ve doku bileşenlerinin bir arada bulunması ve örnekler arasında belirgin morfolojik farklılıkların gözlenebilmesi, histopatolojik görüntülerin analizini geleneksel görüntü sınıflandırma problemlerine kıyasla daha karmaşık hâle getirmektedir. Ayrıca boyama, görüntüleme ve veri elde etme süreçlerindeki farklılıklar, modellerin farklı veri kaynakları üzerindeki performansını etkileyebilecek değişkenlikler oluşturabilmektedir. Bu nedenle, histopatolojide derin öğrenme tabanlı yöntemlerin sunduğu olanakların yanı sıra veri çeşitliliği, standardizasyon, yorumlanabilirlik ve klinik doğrulama gibi konuların da yöntemin güvenilir ve genellenebilir biçimde kullanılabilmesi açısından dikkate alınması gerekmektedir (van der Laak ve ark., 2021, Morales ve ark.,2021).

Derin öğrenme modellerinin histopatolojik görüntülerdeki önemli katkılarından biri, görüntü temsiliinin önceden belirlenmiş el yapımı özelliklere bağlı kalmadan doğrudan veriden öğrenilebilmesidir. Evrimsel sinir ağlarının (Convolutional Neural Networks, CNN) farklı katmanlarında elde edilen temsiller, görüntünün düşük seviyeli görsel özelliklerinden daha karmaşık morfolojik örüntülere doğru ilerleyen bir özellik hiyerarşisi oluşturabilmektedir. Bununla birlikte, yalnızca görüntünün belirli bir sınıfa ait olup olmadığını tahmin etmek, histopatolojik örnekler arasındaki daha ayrıntılı benzerlik ilişkilerini ortaya çıkarmak için yeterli olmayabilir (Litjens ve ark.,2017). Bu noktada derin metrik öğrenme (Deep Metric Learning, DML) yaklaşımı önem kazanmaktadır. DML'nin temel amacı yalnızca doğru sınıf etiketini tahmin etmek değil, görüntülerin sayısal bir temsil uzayındaki göreceli konumlarını öğrenmektir. Böylece benzer örneklerin gömme uzayında birbirine yaklaşması, farklı örneklerin ise birbirinden ayrılması sağlanabilir. Histopatolojik görüntü erişimi amacıyla derin metrik öğrenmeyi kullanan Yang ve ark., bu yaklaşımın görüntüler arasında öğrenilebilir bir benzerlik ölçütü oluşturmak için kullanılabileceğini göstermiştir. Çalışmada Kimia Path24 veri kümesi üzerinde görüntü erişimi değerlendirilmiş ve daha az eğitim verisiyle de karşılaştırılabilir erişim performansı elde edilebildiği rapor edilmiştir (Yang ve ark. 2020).

Bu çerçevede, histopatolojik görüntü analizinde öznitelik temsili ile derin metrik öğrenmenin birlikte ele alınması, görüntülerin yalnızca belirli sınıflara atanmasının ötesinde, örnekler arasındaki benzerlik ilişkilerinin de modellenmesine olanak sağlayabilir. Öğrenilmiş gömme uzayı; görüntü sınıflandırma, içerik tabanlı görüntü erişimi ve benzer histopatolojik örneklerin aranması gibi görevlerde kullanılabilecek ortak bir temsil altyapısı sağlayabilir. Bunun yanında, gömme uzayının görselleştirilmesi ve örnekler arasındaki mesafelerin incelenmesi, model tarafından öğrenilen temsil yapısının veri dağılımı açısından değerlendirilmesine yardımcı olabilir. Bu nedenle öznitelik temsili ve derin metrik öğrenme, histopatolojik görüntülerde yalnızca sınıf tahminine odaklanan yaklaşımların ötesine geçerek, görüntüler arasındaki yapısal ve anlamsal benzerliklerin incelenmesini sağlayan tamamlayıcı bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir.

2. Öznitelik Haritalama

Histopatolojik görüntülerde öznitelik haritalama, derin öğrenme modelleri tarafından görüntüden öğrenilen görsel temsillerin ve bu temsillerin görüntü üzerindeki uzamsal dağılımının incelenmesini ifade etmektedir. Özellikle evrişimsel sinir ağlarında (Convolutional Neural Network, CNN), görüntü ardışık evrişim ve doğrusal olmayan dönüşümlerden geçirilerek farklı düzeylerde öznitelik temsilleri oluşturulmaktadır (LeCun, Bengio ve Hinton, 2015). Ağın evrişim katmanlarında elde edilen aktivasyonlar, görüntünün farklı bölgelerine ilişkin bilgileri içeren çok kanallı öznitelik haritaları şeklinde temsil edilebilmektedir (Zeiler ve Fergus, 2014).). Burada öznitelik haritalama ile kastedilen, bu temsillerin görüntüden oluşturulması ve uzamsal dağılımlarının incelenmesine yönelik süreçtir; öznitelik haritası ise bu sürecin çıktısı olan uzamsal aktivasyon temsidir. Metin boyunca bu iki kavram bu anlam ayrımıyla kullanılacaktır. Histopatolojik görüntülerin yüksek çözünürlüklü olması, derin özniteliklerin elde edilmesini diğer görüntü analiz problemlerine kıyasla daha karmaşık hâle getirmektedir (Litjens ve ark., 2017). Özellikle whole slide image (WSI) görüntüleri çok büyük görüntü boyutlarına ulaşabilmekte ve aynı görüntü içerisinde tümör dokusu, stroma, nekroz, immün hücreler ve diğer doku bileşenleri gibi farklı morfolojik bölgeler bulunabilmektedir. Hou ve ark. (2016), gigapiksel çözünürlükteki WSI görüntülerinin bir CNN ile doğrudan işlenmesinin hesaplama açısından pratik olmadığını belirtmiş ve bunun yerine görüntünün daha küçük yamalara ayrılarak işlenmesini temel alan bir yaklaşım önermiştir. Benzer biçimde Xu ve ark. (2014), doku mikrodizisi (tissue microarray, TMA) görüntülerini, görüntülerin birer “bag” ve görüntülerden elde edilen yamaların (patch) “instance” olarak ele alındığı çoklu örnek öğrenme (multiple instance learning, MIL) çerçevesinde incelemiştir. Önerilen çoklu

kümelenmiş örnek öğrenme (multiple clustered instance learning, MCIL) yaklaşımıyla, yalnızca görüntü düzeyi etiketlerden yararlanılarak görüntü düzeyinde sınıflandırma, kanser dokusunun segmentasyonu ve yama düzeyinde kümeleme birlikte gerçekleştirilebilmiştir. Bu yapı, histopatolojik görüntü analizinde temel olarak WSI → görüntü yamaları → derin özniteliklerin çıkarılması → görüntü düzeyinde özniteliklerin birleştirilmesi biçiminde ifade edilebilir (Hou ve ark., 2016). Bu yaklaşımda, ImageNet veri kümesinde önceden eğitilmiş CNN'ler transfer öğrenme yoluyla kullanılmış; ağın aktivasyon öznitelikleri yerel görüntü yamalarından çıkarılmış ve daha sonra görüntü düzeyindeki analizlerde kullanılmıştır (Spanhol ve ark., 2016; Hou ve ark., 2016). Yamalardan elde edilen CNN aktivasyon özniteliklerinin histopatolojik görüntülerin sınıflandırılması ve segmentasyonu gibi görevlerde kullanılabileceği gösterilmiştir (Xu ve ark., 2017). Böylece WSI'nın tamamının tek bir işlemde değerlendirilmesi yerine, görüntünün farklı bölgelerinden elde edilen derin temsiller kullanılarak daha yönetilebilir bir öznitelik çıkarma süreci oluşturulabilmektedir. Daha sonraki çalışmalarda WSI analizi, MIL ve dikkat tabanlı zayıf denetimli yaklaşımlarla genişletilmiş; Campanella ve ark. (2019) yalnızca görüntü düzeyi tanı etiketlerinden yararlanan bir MIL tabanlı sistem sunarken, Lu ve ark. (2021) dikkat tabanlı CLAM yaklaşımıyla tanısal açıdan önemli alt bölgelerin belirlenmesini ele almıştır.

3. CNN Aktivasyon ve Öznitelik Haritaları

CNN tabanlı öznitelik haritalamanın temel bileşenlerinden biri, ağı evrişim katmanlarında oluşturulan aktivasyon haritalarıdır. Evrişim katmanlarının çıktıları, görüntünün farklı uzamsal bölgelerine ve öğrenilen görsel örüntülere ilişkin yanıtları içeren çok kanallı temsiller biçiminde değerlendirilebilir. CNN'in farklı katmanlarında elde edilen bu temsillerin niteliği de değişebilmektedir. Erken katmanlarda daha düşük düzeyli görsel örüntülere ilişkin yanıtlar gözlenirken, daha ileri katmanlarda daha karmaşık ve daha soyut görsel yapıların temsil edildiği gösterilmiştir. Özellikle ara katmanlardaki özelliklerin görselleştirilmesi, ağı farklı katmanlarda hangi görsel örüntülere duyarlı olduğunu incelenmesine olanak sağlamaktadır (Zeiler ve Fergus, 2014).

Histopatolojik görüntüler açısından değerlendirildiğinde, bu tür derin temsiller renk, doku ve morfolojik örüntüler gibi görüntü özelliklerinin modellenmesinde kullanılabilir. Ancak bir aktivasyon haritasının doğrudan belirli bir biyolojik yapıyı temsil ettiği varsayılmamalıdır. Aktivasyonlar, ağı eğitim sürecinde öğrendiği görsel örüntülere verilen model yanıtlarını ifade eder ve bu yanıtların biyolojik anlamı kullanılan veri kümesine, göreve ve öğrenilen temsillere bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle aktivasyon haritalarının histolojik yapıların doğrudan

karşılığı olarak değil, modelin görüntüden öğrendiği temsillerin incelenmesine yardımcı olan araçlar olarak ele alınması daha uygun bir yaklaşımdır (Zeiler ve Fergus, 2014).

Histopatolojik görüntülerde CNN aktivasyon özelliklerinin görselleştirilmesine yönelik doğrudan bir örnek Xu ve ark. (2017) tarafından sunulmuştur. Araştırmacılar, derin CNN aktivasyon özelliklerini histopatolojik görüntülerin sınıflandırılması, segmentasyonu ve görselleştirilmesinde kullanmış ve özellikle son gizli katmandaki bireysel nöron bileşenlerinin yanıtlarını incelemiştir. Çalışmada görüntü yamalarının sınıflandırma açısından güven değerlerini ve bireysel CNN özelliklerine ilişkin yanıtları gösteren ısı haritaları oluşturulmuş; böylece belirli özniteliklerin görüntünün hangi bölgelerinde daha güçlü yanıt verdiği incelenmiştir. Araştırmacılar ayrıca bazı öğrenilmiş özelliklerin patologlar tarafından biyolojik açıdan anlamlı bulunan görüntülerle ilişkili olduğunu bildirmiştir (Xu ve ark., 2017).

Xu ve ark. (2017) tarafından gerçekleştirilen bu görselleştirme yaklaşımı, histopatolojik görüntülerde derin CNN özniteliklerinin yalnızca sayısal bir vektör olarak değil, görüntü üzerindeki yanıt dağılımları aracılığıyla da incelenebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, çalışmada belirli bazı özelliklerin biyolojik açıdan anlamlı görüntülerle ilişkilendirilebilmiş olması, bütün aktivasyonların tek tek hücre, doku veya patolojik yapılara birebir karşılık geldiği anlamına gelmemektedir. Bu nedenle aktivasyon görselleştirmeleri, modelin öğrendiği temsiller hakkında bilgi sağlayan bir analiz aracı olarak değerlendirilmelidir; biyolojik yorumların ise ayrıca histopatolojik bilgi ve uygun doğrulama süreçleriyle desteklenmesi gerekir (Xu ve ark., 2017).

Görselleştirme ve model açıklanabilirliği bağlamında, evrişim katmanlarındaki aktivasyonların yanı sıra gradyan tabanlı konumlandırma yaklaşımları da öznitelik haritalarının yorumlanmasında önemli bir yer tutmaktadır. Selvaraju ve ark. (2017) tarafından önerilen Grad-CAM (Gradient-weighted Class Activation Mapping) yöntemi, ağ mimarisinde herhangi bir değişiklik veya yeniden eğitim gerektirmeksizin, son evrişim katmanına akan gradyan bilgilerini kullanarak modele ait sınıf ayırt edici (class-discriminative) görsel açıklamalar ve ısı haritaları üretmektedir. Bu yaklaşım, derin öğrenme modellerinin karar verme süreçlerini saydamlaştırarak modelin görüntünün hangi uzamsal bölgelerine odaklandığının belirlenmesine olanak tanımaktadır (Selvaraju ve ark., 2017)

3.1 Öznitelik Haritalarından Gömme Uzayına Geçiş

Öznitelik haritalama ile öznitelik gömme (gömme) kavramları birbirleriyle ilişkili olmakla birlikte aynı anlamı taşımamaktadır. Öznitelik haritaları, CNN'in evrişim katmanlarında (erken,

ara ve son katmanlar dahil) oluşan ve görüntünün uzamsal yapısına ilişkin bilgi taşıyan aktivasyonları ifade etmektedir. Gömme ise görüntünün veya görüntü yamasının öğrenilmiş bir vektör uzayındaki sayısal temsidir; bu temsilin tanımlayıcı yanı, görüntünün veya görüntü yamasının öğrenilmiş bir vektör uzayındaki sayısal temsidir. Derin metrik öğrenme bağlamında bu temsil uzayı, benzer örneklerin birbirine daha yakın, farklı örneklerin ise daha uzak konumlandırılmasını sağlayacak şekilde öğrenilebilir. Bu nedenle öznitelik haritaları ile gömme arasında doğrudan bir eşanlamlılık kurulması uygun değildir.

Genel bir derin öğrenme analiz zincirinde görüntü, CNN gibi bir model tarafından işlenerek uzamsal aktivasyon veya öznitelik haritalarına dönüştürülebilir. Bu ara temsillerden havuzlama, düzleştirme veya benzeri temsil işlemleriyle daha kompakt bir öznitelik vektörü elde edilebilir. Derin metrik öğrenme gibi yaklaşımlarda ise bu vektör, örnekler arasındaki benzerlik ve uzaklık ilişkilerinin öğrenilmesini amaçlayan bir gömme uzayında temsil edilebilir. Böylece süreç, görüntüdeki yerel görsel örüntülerin öğrenilmesinden daha kompakt ve karşılaştırılabilir bir temsilin oluşturulmasına doğru ilerler.

Bu ayrım, histopatolojik görüntülerde derin metrik öğrenmenin konumlandırılması açısından önemlidir. Derin metrik öğrenmede temel amaç, görüntülerin yalnızca önceden tanımlanmış sınıflara atanması değil, örnekler arasındaki benzerlik ve uzaklık ilişkilerinin öğrenilmiş bir temsil uzayında modellenmesidir. Yang ve ark. (2020), histopatolojik görüntü erişimi probleminde derin metrik öğrenme yaklaşımını kullanarak görüntüler arasındaki benzerlik ilişkilerinin öğrenilmesini ele almıştır. Bu yaklaşımda görüntüler, öğrenilmiş bir temsil uzayında karşılaştırılarak benzer görüntülerin erişilmesi amaçlanmıştır.

Medela ve Picon (2020) ise histopatolojik görüntülerin gömme'lerinin öğrenilmesi amacıyla farklı derin metrik öğrenme kayıp fonksiyonlarını incelemiştir. Bu yaklaşım, görüntülerin temsil uzayındaki konumlarının yalnızca sınıflandırma amacıyla değil, örnekler arasındaki görsel benzerliklerin modellenmesi amacıyla da kullanılabileceğini göstermektedir. Amato ve ark. (2023) de histopatolojik görüntü sınıflandırmasında metrik öğrenme yaklaşımını ele alarak öğrenilmiş temsil uzayının örnekler arasındaki ilişkilerin incelenmesindeki rolünü değerlendirmiştir.

Bu nedenle histopatolojik görüntü analizinde kavramsal işlem zinciri şu şekilde özetlenebilir:

Görüntü/WSI → görüntü yamaları → CNN/Transformer tabanlı öznitelik çıkarımı → aktivasyon/öznitelik temsilleri → öznitelik vektörü/gömme → benzerlik tabanlı erişim veya sınıflandırma

Burada derin metrik öğrenme, gömme uzayını bu aşağı akış görevlerine hizmet edecek biçimde şekillendiren eğitim süreci; benzerlik tabanlı erişim ise bu uzayın aşağı akış kullanımı olarak konumlanmalıdır. Bu zincirin her aşaması farklı bir amaca hizmet etmektedir. Öznitelik haritalama, öğrenilen özniteliklerin ve bunların uzamsal dağılımının incelenmesine odaklanırken; gömme, görüntünün öğrenilmiş öznitelik uzayındaki sayısal temsiliyi ifade eder. Derin metrik öğrenme ise bu temsil uzayındaki örnekler arasındaki uzaklık ve benzerlik ilişkilerinin belirli bir hedef doğrultusunda öğrenilmesini sağlar.

3.2 Histopatolojik Görüntü Analizinde Öznitelik Haritalamanın Konumu

Histopatolojik görüntülerde öznitelik haritalama, derin öğrenme tabanlı analiz zincirinin görüntüden öğrenilmiş temsil elde edilmesini sağlayan önemli aşamalarından biridir. WSI görüntülerinin çok büyük boyutları nedeniyle yerel görüntü yamalarından öznitelik çıkarılması, bu özniteliklerin görüntü düzeyinde birleştirilmesi ve elde edilen temsillerin farklı analiz görevlerinde kullanılması önemli bir yaklaşım oluşturmıştır. Bu eğilim, derin öğrenme tabanlı histopatoloji analizlerinin klinik patolojiye yönelik potansiyeli üzerine yapılan genel değerlendirmelerle de uyumludur (van der Laak ve ark., 2021). Xu ve ark. (2017), CNN aktivasyon özniteliklerinin histopatolojik görüntülerin sınıflandırılması, segmentasyonu ve görselleştirilmesinde kullanılabileceğini göstererek bu yaklaşımın erken ve doğrudan örneklerinden birini sunmuştur.

Öte yandan CTransPath ve UNI gibi daha yeni temsil öğrenme yaklaşımları, histopatolojik görüntülerden daha genel ve farklı görevlere aktarılabilir özniteliklerin öğrenilmesine yönelmiştir (Wang ve ark., 2022; Chen ve ark., 2024). Bu gelişme, histopatoloji görüntülerinde öznitelik çıkarma kavramının yalnızca belirli bir göreve yönelik CNN aktivasyonlarından, farklı görevlerde yeniden kullanılabilen genel görüntü temsillerine doğru genişlediğini göstermektedir.

4. Derin Metrik Öğrenmenin Temelleri

Öznitelik haritalama ile elde edilen derin görsel temsiller, bir görüntünün yalnızca sabit bir sınıfa atanması için değil, farklı görüntülerin birbiriyle olan anlamsal benzerlik düzeylerinin tespiti amacıyla da kullanılmaktadır. Histopatolojik görüntülerde aynı hastalık tipine ait örneklerde yüksek morfolojik çeşitlilik bulunabilmekte; farklı sınıflara ait doku kesitleri ise görsel açıdan birbirine oldukça benzeyebilmektedir. Bu durum, sınırlı sınıflandırma olasılıklarının ötesine geçilerek anlamsal açıdan zengin bir benzerlik uzayının oluşturulmasını zorunlu kılmaktadır. Derin metrik öğrenme (Deep Metric Learning - DML), görselleri uygun

bir gömme uzayına dönüştüren fonksiyonu doğrudan eğiterek, benzer örneklerin bu uzayda birbirine yakın, farklı örneklerin ise uzak konumlandırılmasını hedefler (Yang ve ark., 2020).

4.1. Mesafe Metriği Öğreniminin Temelleri

Derin metrik öğrenmenin temelleri, derin ağlardan önce geliştirilen geleneksel mesafe metriği öğrenme yöntemlerine dayanır. Weinberger ve Saul (2009) tarafından geliştirilen Büyük Marjlı En Yakın Komşu (LMNN) yaklaşımı, sınıflandırma başarısını artırmak için Mahalanobis mesafesinin etiketli veriler üzerinden doğrudan öğrenilebileceğini göstermiştir. LMNN, bir örneğin aynı sınıfa ait hedef komşularını yakınlaştırırken, farklı sınıflardan gelen yanıltıcı örnekleri (impostors) belirli bir marj sınırı dışına iter (Weinberger ve Saul, 2009).

Klasik mesafe metriği öğreniminde dönüşüm giriş uzayındaki doğrusal yapılar üzerinden elde edilirken; derin metrik öğrenmede görüntü öncelikle evrişimli bir sinir ağı aracılığıyla yüksek düzeyli temsil uzayına aktarılır, ardından bu temsil üzerinde mesafe ilişkileri optimize edilir. Böylece DML, öznitelik çıkarımı ile mesafe metriği öğrenimini tek bir uçtan uca öğrenme sürecinde birleştirir.

4.2. Gömme Uzayının Öğrenilmesi ve İkiz Mimariler

DML sistemlerinin özünü, girdi görselini düşük boyutlu bir vektöre aktaran gömme fonksiyonu oluşturur. Elde edilen vektör uzayında iki görüntü arasındaki yakınlık, Öklid mesafesi veya kosinüs benzerliği ile ölçülebilir. Bu uzayın temel niteliği, sabit kategorileri ayırmak yerine örnekler arasındaki göreceli benzerlik ilişkilerini korumasıdır. Böylece model, eğitimde görülmemiş yeni doku tiplerinin veya nadir vakaların referans örneklerle karşılaştırılmasına olanak tanır.

Chopra, Hadsell ve LeCun (2005), iki özdeş evrişimli ağı ağırlıklarını paylaştığı ikiz (Siamese) ağ mimarisini sunarak örnek çiftlerinin ortak bir temsil uzayına aktarılmasını sağlamıştır. Bu çalışma, modern metrik öğrenmede yaygınlaşan çift tabanlı kayıp fonksiyonlarının temelini atmıştır (Chopra ve ark., 2005).

4.3. Kontrastif Kayıp

Kontrastif kayıp, çiftler arasındaki benzerlik ve farklılık ilişkilerini doğrudan öğrenmeyi hedefler. Aynı sınıfa ait pozitif çiftler işlendiğinde kayıp fonksiyonu vektörler arası Öklid mesafesini sıfıra indirmeye çalışır. Farklı sınıflara ait negatif çiftlerde ise, iki vektör arasındaki

mesafe belirlenen marj eşiğinden küçükse ceza uygulanarak mesafenin marj seviyesine çıkarılması zorunlanır; mesafe zaten marjdan büyükse ek ceza verilmez (Chopra ve ark., 2005).

Histopatolojide bu yapı, aynı tümör derecesine veya hücrel örüntüye sahip doku yamalarının kümelenmesini, farklı patolojik süreçlerin ise uzaklaştırılmasını sağlar. Ancak dokulardaki karmaşık benzerlik ilişkileri ikili çift sınırlarının ötesinde değerlendirmeleri gerektirmektedir.

4.4. Üçlü Kayıp ve Örnek Madenciliği

Üçlü kayıp (triplet loss), ikili kıyaslamayı çapa (anchor), pozitif ve negatif örnekten oluşan üçlü gruplara genişletir. Schroff, Kalenichenko ve Philbin (2015) tarafından FaceNet mimarisinde uygulanan bu yöntemde, çapa ile pozitif örnek arasındaki mesafenin, çapa ile negatif örnek arasındaki mesafeden en az belirlenen bir marj kadar küçük olması hedeflenir. FaceNet, görselleri 128 boyutlu Öklid uzayına eşleyerek mesafelerin doğrudan anlamsal benzerliğe karşılık gelmesini sağlamıştır.

Eğitimin başarısı, seçilen üçlülerin kalitesine bağlıdır. FaceNet çalışmasında geliştirilen çevrimiçi üçlü madenciliği (online triplet mining) tekniği, mini-batch içerisinde model için bilgi taşıma değeri yüksek olan zor pozitif ve zor negatif örnekleri dinamik olarak seçer (Schroff ve ark., 2015). Sınıf içi çeşitliliği yüksek histopatolojik verilerde zor örneklerin seçilmesi eğitimin kararlılığı açısından kritik öneme sahiptir.

4.5. Çoklu Benzerlik Kaybı

Wang ve ark. (2019), örneklerin uzaydaki tüm komşularıyla olan ilişkisini değerlendirmek amacıyla Genel Çift Ağı Dominasyon/Ağırlıklandırma (GPW) çerçevesini kurmuş ve Çoklu Benzerlik Kaybını (MS-loss) önermiştir. MS-loss; öz-benzerlik, pozitif görel benzerlik ve negatif görel benzerlik türlerini eş zamanlı olarak ağırlıklandırarak zor çiftlere öncelik verir. CUB200 veri kümesinde Recall@1 başarısını %60,6'dan %65,7'ye çıkardığı gösterilmiştir (Wang ve ark., 2019).

MS-loss'un histopatolojideki başarısı Yang ve ark. (2020) tarafından gösterilmiştir. Araştırmacılar, doku görüntülerinin anlamsal erişimi için uzamsal ve kanal dikkat mekanizmalarını (mixed attention) birleştirmiş ve ağı MS-loss ile eğitmişlerdir. Kimia Path24 veri kümesinde yapılan deneyler, MS-loss destekli DML modelinin yüksek benzerlik erişim başarısı sağladığını kanıtlamıştır (Yang ve ark., 2020).

4.6. Açısal Marj Tabanlı Kayıplar

Sınıf içi sıklığı ve sınıflar arası ayrımı artırmak için açısal ilişkileri temel alan kayıplar geliştirilmiştir. Deng ve ark. (2019) tarafından önerilen ArcFace (Additive Angular Margin Loss), derin öznitelik ve sınıf ağırlık vektörlerini birim norm seviyesine normalize ederek bir hiperküre yüzeyine izdüşürür. Doğru sınıf açısına doğrudan eklenen açısal marj parametresi ile birim hiperküre üzerindeki jeodezik mesafeyi optimize eder (Deng ve ark., 2019). İnce morfolojik farklılıklar taşıyan histopatolojik görsellerde açısal ayrıştırma güçlü bir temsil stratejisi sunmaktadır.

4.7. Öz-Gözetimli ve Gözetimli Kontrastif Öğrenme

Chen ve ark. (2020) tarafından geliştirilen SimCLR, aynı görüntüden türetilen iki farklı veri artırımını pozitif çift kabul eden öz-gözetimli bir kontrastif öğrenme çerçevesi sunmuştur. Yöntem, doğrusal olmayan bir izdüşüm başlığı (projection head) ve büyük batch boyutları ile etiket ihtiyacını ortadan kaldırmıştır. Khosla ve ark. (2020) ise bu yapıyı etiketli verilere genişleterek Gözetimli Kontrastif Öğrenmeyi tanıtmıştır.

Histopatolojide yama düzeyinde etiketleme maliyetli olduğundan, Ciga, Xu ve Martel (2022) 57 etiketsiz histopatoloji veri kümesinde SimCLR tabanlı ön eğitim gerçekleştirmiştir. Çalışma, etiketsiz Tüm Slayt Görüntülerinden (WSI) öğrenilen temsillerin F1 skorlarında ortalama %28 artış sağladığını göstermiştir (Ciga, Xu ve Martel, 2022).

4.8. Histopatolojik Uygulamalar ve Kavramsal Sentez

DML'nin histopatolojideki temel uygulamalarından biri vaka tabanlı benzer görüntü erişimidir. Hashimoto ve ark. (2023), kötü huylu lenfoma WSI görüntülerinde vaka düzeyinde benzerlik erişimi sağlayan bir DML sistemi geliştirmiştir. Araştırmacılar, dikkat tabanlı çoklu örnek öğrenimi (MIL) ile tümörlü bölgeleri tespit etmiş; immünohistokimyasal (IHC) boyama görüntülerinden elde edilen klinik benzerlik bilgisini DML denetiminde kullanmıştır. 249 lenfoma vakası ve 10 patoloğun katıldığı değerlendirmeler, yöntemin patoloğ kararlarıyla yüksek uyum sağladığını göstermiştir (Hashimoto ve ark., 2023).

Öznitelik haritalama, evrişimli ağların ara katmanlarındaki yerel uzamsal doku aktivasyonlarını yansıtırken; metrik öğrenme bu yerel öznitelikleri anlamsal küresel bir gömme vektörüne dönüştürür. WSI analizinde önce yama düzeyinde öznitelikler çıkarılır, ardından dikkat tabanlı MIL teknikleri (Ilse, Tomczak ve Welling, 2018) ile slayt düzeyinde toplulaştırılır. Bu entegrasyon, WSI düzeyinde öznitelik toplulaştırma yöntemlerine doğal bir geçiş sunmaktadır.

5. Sonuç

Histopatolojik görüntülerin yüksek çözünürlüklü ve morfolojik olarak çeşitli yapısı, yalnızca sınıf etiketi tahminine dayanan yaklaşımların ötesinde, anlamlı ve karşılaştırılabilir temsillere duyulan ihtiyacı artırmaktadır. Bu bölümde CNN tabanlı öznitelik haritalamanın, öğrenilmiş görsel örüntülerin uzamsal dağılımını incelemek için kullanılabileceği; ancak aktivasyon haritalarının doğrudan biyolojik yapıların karşılığı olarak yorumlanmaması gerektiği vurgulanmıştır. Bu haritalardan kompakt embedding vektörlerine geçiş ise derin metrik öğrenmenin temelini oluşturmaktadır. DML, benzer örnekleri temsil uzayında birbirine yaklaştırıp farklı örnekleri uzaklaştırarak sınıflandırma, benzer vaka erişimi ve WSI düzeyinde öznitelik toplulaştırma gibi görevler için ortak bir temsil altyapısı sunmaktadır.

Sonuç olarak, öznitelik haritalama ve derin metrik öğrenme birbirinin alternatifi değil, temsil oluşturma ve karşılaştırma sürecinin birbirini tamamlayan aşamalarıdır. Bununla birlikte, veri çeşitliliği, boyama ve görüntüleme farklılıkları, standardizasyon, yorumlanabilirlik ve klinik doğrulama gibi konular da dikkate alınmalıdır. Gelecekteki çalışmalar yalnızca daha yüksek sınıflandırma başarısını değil, güvenilir, karşılaştırılabilir ve farklı veri koşullarında kullanılabilir temsilleri hedeflemelidir.

KAYNAKLAR

- Amato, D., Calderaro, S., Lo Bosco, G., Rizzo, R., & Vella, F. (2023). Metric learning in histopathological image classification: Opening the black box. *Sensors*, 23(13), 6003. <https://doi.org/10.3390/s23136003>
- Campanella, G., Hanna, M. G., Geneslaw, L., Miraflor, A., Werneck Krauss Silva, V., Busam, K. J., Brogi, E., Reuter, V. E., Klimstra, D. S., & Fuchs, T. J. (2019). Clinical-grade computational pathology using weakly supervised deep learning on whole slide images. *Nature Medicine*, 25(8), 1301–1309. <https://doi.org/10.1038/s41591-019-0508-1>
- Chen, R. J., Ding, T., Lu, M. Y., Williamson, D. F. K., Jaume, G., Song, A. H., Chen, B., Zhang, A., Shao, D., Shaban, M., Williams, M., Oldenburg, L., Weishaupt, L. L., Wang, J. J., Vaidya, A., Le, L. P., Gerber, G., Sahai, S., Williams, W., & Mahmood, F. (2024). Towards a general-purpose foundation model for computational pathology. *Nature Medicine*, 30(3), 850–862. <https://doi.org/10.1038/s41591-024-02857-3>
- Chen, T., Kornblith, S., Norouzi, M., & Hinton, G. (2020). A simple framework for contrastive learning of visual representations. *Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning* (PMLR 119), 1597–1607. <https://proceedings.mlr.press/v119/chen20j.html>
- Chopra, S., Hadsell, R., & LeCun, Y. (2005). Learning a similarity metric discriminatively, with application to face verification. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 1, 539–546. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2005.202>
- Ciga, O., Xu, T., & Martel, A. L. (2022). Self supervised contrastive learning for digital histopathology. *Machine Learning with Applications*, 7, Article 100198. <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2021.100198>
- Deng, J., Guo, J., Xue, N., & Zafeiriou, S. (2019). ArcFace: Additive angular margin loss for deep face recognition. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 4690–4699. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00482>
- Hashimoto, N., Takagi, Y., Masuda, H., Miyoshi, H., Kohno, K., Nagaishi, M., Sato, K., Takeuchi, M., Furuta, T., Kawamoto, K., et al. (2023). Case-based similar image retrieval for weakly annotated large histopathological images of malignant lymphoma using deep metric learning. *Medical Image Analysis*, 85, Article 102752. <https://doi.org/10.1016/j.media.2023.102752>
- Hou, L., Samaras, D., Kurc, T. M., Gao, Y., Davis, J. E., & Saltz, J. H. (2016). Patch-based convolutional neural network for whole slide tissue image classification. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2424–2433. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.266>

- Ilse, M., Tomczak, J. M., & Welling, M. (2018). Attention-based deep multiple instance learning. *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning* (PMLR 80), 2127–2136.
- Khosla, P., Teterwak, P., Wang, C., Sarna, A., Tian, Y., Isola, P., Maschinot, A., Liu, C., & Krishnan, D. (2020). Supervised contrastive learning. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 33, 18661–18673.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Litjens, G., Kooi, T., Bejnordi, B. E., Setio, A. A. A., Ciompi, F., Ghafoorian, M., van der Laak, J. A. W. M., van Ginneken, B., & Sánchez, C. I. (2017). A survey on deep learning in medical image analysis. *Medical Image Analysis*, 42, 60–88. <https://doi.org/10.1016/j.media.2017.07.005>
- Lu, M. Y., Williamson, D. F. K., Chen, T. Y., Chen, R. J., Barbieri, M., & Mahmood, F. (2021). Data-efficient and weakly supervised computational pathology on whole-slide images. *Nature Biomedical Engineering*, 5(6), 555–570. <https://doi.org/10.1038/s41551-020-00682-w>
- Medela, A., & Picon, A. (2020). Constellation loss: Improving the efficiency of deep metric learning loss functions for the optimal gömme of histopathological images. *Journal of Pathology Informatics*, 11, Article 38. https://doi.org/10.4103/jpi.jpi_41_20
- Morales, S., Engan, K., & Naranjo, V. (2021). Artificial intelligence in computational pathology – challenges and future directions. *Digital Signal Processing*, 119, Article 103196. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103196>
- Selvaraju, R. R., Cogswell, M., Das, A., Vedantam, R., Parikh, D., & Batra, D. (2017). Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 618–626. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.74>
- Spanhol, F. A., Oliveira, L. S., Petitjean, C., & Heutte, L. (2016). Breast cancer histopathological image classification using convolutional neural networks. *2016 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2560–2567. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2016.7727519>
- van der Laak, J., Litjens, G., & Ciompi, F. (2021). Deep learning in histopathology: The path to the clinic. *Nature Medicine*, 27, 775–784. <https://doi.org/10.1038/s41591-021-01343-4>
- Wang, X., Han, X., Huang, W., Dong, D., & Scott, M. R. (2019). Multi-similarity loss with general pair weighting for deep metric learning. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 5022–5030. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00516>
- Wang, X., Yang, S., Zhang, J., Wang, M., Zhang, J., Yang, W., Huang, J., & Han, X. (2022). Transformer-based unsupervised contrastive learning for histopathological image

classification. *Medical Image Analysis*, 81, Article 102559.
<https://doi.org/10.1016/j.media.2022.102559>

- Weinberger, K. Q., & Saul, L. K. (2009). Distance metric learning for large margin nearest neighbor classification. *Journal of Machine Learning Research*, 10, 207–244.
<http://jmlr.org/papers/v10/weinberger09a.html>
- Xu, Y., Zhu, J.-Y., Chang, E. I.-C., Lai, M., & Tu, Z. (2014). Weakly supervised histopathology cancer image segmentation and classification. *Medical Image Analysis*, 18(3), 591–604. <https://doi.org/10.1016/j.media.2014.01.010>
- Xu, Y., Jia, Z., Wang, L.-B., Ai, Y., Zhang, F., Lai, M., & Chang, E. I.-C. (2017). Large scale tissue histopathology image classification, segmentation, and visualization via deep convolutional activation features. *BMC Bioinformatics*, 18(1), Article 281.
<https://doi.org/10.1186/s12859-017-1685-x>
- Yang, P., Zhai, Y., Li, L., Lv, H., Wang, J., Zhu, C., & Jiang, R. (2020). A deep metric learning approach for histopathological image retrieval. *Methods*, 179, 14–25.
<https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2020.05.015>
- Zeiler, M. D., & Fergus, R. (2014). Visualizing and understanding convolutional networks. *European Conference on Computer Vision (ECCV 2014)*, LNCS 8689, 818–833.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-10590-1_53

BÖLÜM 5

VEKİL MODEL DESTEKLİ GENETİK ALGORİTMA YÖNTEMİ İLE İDEAL KISA DİPOL DİZİSİNİN KUAZİ- İZOTROPİK ANTEN SENTEZİ

Mustafa Cem KOÇ¹, Peyman MAHOUTİ²

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, İstanbul, Türkiye. ORCID ID: 0009-0001-9352-5767

² Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, İstanbul, Türkiye. ORCID ID: 0000-0002-3351-4433

1. GİRİŞ

İzotropik radyatör, tüm uzaysal doğrultulara eşit güç yayan ideal bir kaynak olarak anten kuramında temel bir karşılaştırma ölçütüdür (Stutzman & Thiele, 2012). Pratik antenlerde dipol ve benzeri ışıyıcıların konum, yönelim ve besleme özelliklerinin birlikte düzenlenmesiyle kuazi-izotropik örüntülere yaklaşılması amaçlanır (Balanis, 2016). Üç boyutlu kapsama davranışı, özellikle kullanıcıların gelişigüzel yöneldiği ve çok yönlü yayılımın belirgin olduğu haberleşme ortamlarında önem taşır; yankılanım odası temelli çeşitlilik kazancı tanımları bu gereksinimin ölçülebilirliğini ortaya koymuştur (Kildal et al., 2002). Kullanıcı dağılımlı üç boyutlu rastgele görüş hattı koşullarında çeşitlilik kazancının tanımlanması da yön bağımsız anten yanıtının sistem düzeyindeki önemini desteklemektedir (Kildal et al., 2013).

Kuazi-izotropik antenlerin gerçekleştirilmesine yönelik ilk yaklaşımlardan biri doğrusal ve yarık antenlerin tamamlayıcı örüntülerinden yararlanmıştır (Long, 1975). Silindirik yüzey üzerine yerleştirilen anahtarlanabilir uyumlu anten yapıları, farklı yönlerde kapsama sağlamak amacıyla eleman durumlarının değiştirilmesini önermiştir (Zhang et al., 2011). Birbirine dik iki dipolün aynı kompakt yapı içinde kullanılması, tek dipolün eksen doğrultusundaki sönüm bölgelerinin diğer eleman tarafından doldurulabileceğini göstermiştir (Pan et al., 2012). Basılı yay biçimli antenler, geliş açısı uygulamalarına uygun yakın izotropik örüntüler sunmuştur (Ali et al., 2021). Üç akım hattı kaynağının birlikte sentezlenmesi ise küresel örüntüdeki dalgalanmayı azaltan bir başka yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır (Liu & Li, 2020).

Eleman sayısı arttıkça konum, yönelim ve uyarım değişkenlerinin birlikte ayarlanması yüksek boyutlu, doğrusal olmayan ve çok sayıda yerel optimum içeren bir arama problemi oluşturur. Eşit olmayan aralıklı doğrusal dizilerde doğadan esinlenen optimizasyonun örüntü sentezine uygulanması, geometrik değişkenlerin klasik tasarım kurallarıyla sınırlı kalmadan düzenlenebildiğini göstermiştir (Li et al., 2025). Elektromanyetik tasarımda genetik algoritmaların kapsamlı değerlendirmesi, popülasyon tabanlı aramanın türev bilgisi gerektirmeden karmaşık amaç fonksiyonlarında çalışabildiğini ortaya koymuştur (Weile & Michielssen, 1997). Genetik algoritmaların anten ve elektromanyetik tasarıma uygulanmasına ilişkin temel çerçeve, kromozom kodlaması, seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin fiziksel tasarım değişkenleriyle ilişkilendirilmesini açıklamaktadır (Rahmat-Samii & Michielssen, 1999). Parçacık sürü optimizasyonunun elektromanyetik problemlerde kullanılması, benzer küresel arama yeteneklerinin farklı evrimsel yöntemlerle de elde edilebildiğini göstermiştir (Robinson & Rahmat-Samii, 2004).

Doğrusal dizilerde yalnızca genlik değişkenleriyle null yönlendirme yapılması, arı algoritmasının örüntü denetimindeki potansiyelini ortaya koymuştur (Guney & Onay, 2007). Hibrit gerçek-ikili parçacık sürü optimizasyonu, sürekli ve ikili tasarım değişkenlerinin aynı arama sürecinde ele alınmasına olanak sağlamış; anten dizisi, radar soğurucu yapı ve çift bantlı anten tasarımı gibi elektromanyetik problemlere uygulanmıştır (Jin & Rahmat-Samii, 2010). Mikrodalga transistor karakterizasyonunda Pareto-optimal yaklaşımın kullanılması ise elektromanyetik/mikrodalga tasarımda çok amaçlı optimizasyonun farklı bir örneğini sunmaktadır (Güneş et al., 2020). Anten dizi örüntülerinin tasarım ve optimizasyonunda genetik algoritmaların uygulanması ise yöntemin farklı dizi geometrilerine uyarlanabilirliğini doğrulamıştır (Ares-Pena et al., 1999). Anten dizilerinde örüntü optimizasyonunun bir başka uygulamasında, Ku bandında çalışan horn dizilerinin açıklık boyutları diferansiyel evrim algoritmasıyla optimize edilerek düşük yan lob seviyeli tasarımlar elde edilmiştir (Ördek & Kizilay, 2023).

Genetik algoritmaların temel sınırlılığı, her nesildeki tüm bireylerin yüksek maliyetli elektromanyetik hesaplamalarla değerlendirilmesidir. Elektromanyetik problemlerde vekil tabanlı doldurma stratejileri, sınırlı sayıdaki yüksek doğruluklu örnekten yararlanarak yeni adayların hızlı biçimde tahmin edilebileceğini göstermiştir (Couckuyt et al., 2010). Kriging tabanlı elektromanyetik tasarım optimizasyonunda, vekil modelin tahminleri ile belirsizliğini birlikte değerlendiren seçim ölçütleri incelenmiş; bu ölçütlerin doğrudan hesaplanacak yeni tasarım noktalarının belirlenmesindeki rolü gösterilmiştir (Hawe & Sykulski, 2007). Yanıt yüzeyi yönteminin üç boyutlu motor tasarımında kullanılması, vekil yaklaşımının yalnızca antenlere değil, yüksek maliyetli çok değişkenli mühendislik problemlerine de uygulanabildiğini göstermiştir (Jo et al., 2022). Transformatör tasarımında evrimsel optimizasyon, elektromanyetik ve ısı alan hesaplarıyla birleştirilerek malzeme ve işletme maliyetlerinin azaltılmasına yönelik bir yaklaşım geliştirilmiş; önerilen yöntem sanayide kullanılan sezgisel optimizasyon yöntemiyle karşılaştırılmıştır (Amoiralis et al., 2009). Vekil modelleme, yere nüfuz eden radarla gömülü nesnelerin karakterizasyonunda da kullanılmış; farklı veri temsilleri ve derin öğrenme mimarilerinin tahmin hataları ile hesaplama maliyetleri birlikte değerlendirilmiştir (Yurt et al., 2024).

Anten optimizasyonunda boyut indirgeme ile makine öğrenmesi tabanlı vekil modellerin birlikte kullanılması, yüksek boyutlu geometrik uzaylarda örnek verimliliğinin önemini göstermiştir (Kozziel et al., 2024). Horn antenlerde geometrik değişkenler, çalışma frekansı ve gözlem doğrultusundan gerçekleşmiş kazancı tahmin eden derin öğrenme tabanlı vekil

modeller, boyut ve ışıma özelliklerini birlikte ele alan tasarım optimizasyonunda kullanılmıştır (Piltan et al., 2024). CSRR tabanlı mikroşerit anten uygulamasında genetik algoritma ile vekil modelin birlikte kullanılması (Sarmah et al., 2020), öğrenilmiş bir değerlendirme katmanının anten geometrisi optimizasyonunda kullanılabileceğini göstermektedir. FSS yüklü ultra geniş bantlı Vivaldi anten tasarımında ise destek vektör regresyonuna dayalı vekil model, bal arısı çiftleşme optimizasyonu (HBMO) birleştirilerek geometrik tasarım değişkenlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır (Mahouti et al., 2022). Antipodal Vivaldi anten boyutunun bant genişliğine etkisinin hızlandırılmış vekil model tabanlı sayısal ikiz yaklaşımıyla incelenmesi (Uluslu & Beyaz, 2026) ve interdigital çift bantlı filtre tasarımında vekil modelleme ile optimizasyonun birlikte kullanılması (Uluslu & Ural, 2026), benzer modelleme fikrinin farklı elektromanyetik yapılara taşınabildiğini göstermektedir. Anten sentezinde vekil destekli parçacık sürü optimizasyonu (Fu et al., 2022), değişken çözünürlüklü benzetim ve yanıt özellikleriyle hızlandırılan anten optimizasyonu (Koziel & Pietrenko-Dabrowska, 2024), kuadrifilar helis anten maliyet fonksiyonunun doğrusal olmayan matematiksel modellerle temsil edilmesi (Uluslu, 2023) ve modelleme destekli anten optimal karakterizasyonu (Uluslu, 2024) hesaplama maliyetinin azaltılmasına yönelik farklı yaklaşımlar sunmaktadır. Sıkı kısıtlı ve pahalı anten tasarımlarında vekil destekli evrimsel arama ise kısıt yönetimi ile tahmin katmanının birlikte ele alınmasının önemini vurgulamıştır (Hu et al., 2025).

Bu çalışma, ideal kısa dipol kaynaklarından oluşan çok elemanlı bir dizinin konum, yönelim ve karmaşık uyarımlarını eleman başına sekiz genle kodlayan ve özel olarak geliştirilen genetik algoritmayı yapay sinir ağı tabanlı vekil modelle birleştiren bir sayısal örüntü sentezi uygulaması sunmaktadır. 8 ve 16 elemanlı diziler sırasıyla 64 ve 128 gen uzunluklu kromozomlarla ele alınmış; dört popülasyon-nesil senaryosunun raporlanan süre ve maliyet ortalamaları karşılaştırılmıştır. Kromozom uzunluğu bağımsız fiziksel serbestlik derecesi sayısı değildir. Hedef, 40 gözlem doğrultusunda örneklenmiş gücün kendi ortalamasına göre normalize edilmiş değerlerini birime yaklaştırmaktır. Sonuçlar ideal kaynak modelinin sınırları içinde yorumlanmış; küresel kuazi-izotropiklik, gerçekleşmiş kazanç ve tam yöntem hızlanması için gereken doğrulamalar ayrıca tanımlanmıştır.

2. KUAZİ-İZOTROPİK ÖRÜNTÜ SENTEZ PROBLEMİ

2.1. Dizi Parametreleri ve Tasarım Uzayı

Dizi, çalışma frekansı 1 GHz olan N adet ideal kısa dipol elemandan oluşmaktadır. Bir elemanın parametreleri Eş. (1) ile tanımlanmıştır. İlk iki bileşen etkin dipol momentinin gerçek ve sanal kısımlarını, sonraki üç bileşen eleman merkezinin metre cinsinden x, y ve z konumlarını, son üç bileşen ise yönelim vektörünü temsil etmektedir. Kodda Il değişkeni akım ile uzunluğun çarpımı olarak tanımlanmıştır; normalize örüntü mutlak besleme gücü veya fiziksel akım büyüklüğünü tek başına belirlemez.

Her eleman sekiz genle kodlandığından kromozom uzunluğu toplam 8N olup N=8 için 64, N=16 için 128 gendir. Bu değerler fiziksel olarak bağımsız serbestlik derecesi sayısı değildir: üç yönelim bileşeni alan hesabından önce birim vektöre normalize edildiğinden yönelim fiziksel olarak iki serbestlik derecesine sahiptir; ayrıca normalize edilmiş örüntü açısından bütün karmaşık uyarımların ortak genlik ölçeği ve ortak fazı da değişmezlik oluşturur. Eğitim örnekleri ve ilk popülasyon [-1,+1] aralığında üretilmiştir. MATLAB alan hesabında konum vektörü r_n faz terimine $k=2\pi f/c$ ile birlikte doğrudan girdiğinden x, y ve z değerleri metre cinsinden yorumlanmıştır; 1 GHz için $\lambda \approx 0,30$ m olup her bir koordinatın -1 ile +1 m aralığı yaklaşık 2 m, yani $6,67\lambda$ toplam eksen açıklığına karşılık gelmektedir. Minimum eleman aralığı, sonlu eleman boyu/çapı, mekanik yerleşim veya besleme ağı kısıtı uygulanmamıştır. Bu nedenle model, üretilebilir fiziksel bir anten geometrisinden çok ideal kısa dipol kaynaklarının sayısal örüntü sentezini temsil etmektedir.

$$\mathbf{g}_n = [\Re\{p_n\}, \Im\{p_n\}, x_n, y_n, z_n, d_{x,n}, d_{y,n}, d_{z,n}]^T \quad (1)$$

Kodlama yapısı ve düzeni ayrıca önemlidir. `calculate_COST_Antenna2` fonksiyonu, satır biçimindeki 8N uzunluklu `ftrial` vektörünü MATLAB'ın sütun öncelikli `reshape(ftrial,N,8)` işlemiyle açmaktadır. Oluşan matrisin n'inci satırı Eş. (1)'deki eleman parametrelerine karşılık gelir. Dolayısıyla vektörde önce N elemanın gerçek uyarımları, sonra N elemanın sanal uyarımları ve sırasıyla konum/yönelim bileşenleri bulunur; her elemanın sekiz bileşeni vektörde yan yana değildir.

2.2. Uzak Alan Işıma Modeli

Gözlem doğrultusu, +z ekseninden ölçülen kutupsal açı θ ve x-y düzlemindeki azimut açısı ϕ ile tanımlanmakta; birim doğrultu vektörü Eş. (2) ile hesaplanmaktadır. Burada θ yükseliş açısı değildir: $\theta=0^\circ$ +z, $\theta=90^\circ$ x-y düzlemi, $\theta=180^\circ$ ise -z doğrultusudur. `desired.txt` dosyasındaki açılar derece cinsindedir ve kod `sind/cosd` fonksiyonlarını kullanmaktadır.

$$\mathbf{u}_o(\theta, \phi) = [\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta]^T \quad (2)$$

Her dipolün üç bileşenli yönelim vektörü, alan hesabından önce Eş. (3)'teki biçimde birim norma getirilmiştir. Konumsal faz $\psi_n = k \mathbf{r}_n \cdot \mathbf{u}_o$ ve dalga sayısı $k = 2\pi f/c$ ile tanımlanır. Bu normalizasyon yalnızca sıfırdan farklı yönelim vektörleri için geçerlidir.

$$\mathbf{u}_{d,n} = \frac{\mathbf{d}_n}{\|\mathbf{d}_n\|}, \quad \psi_n = k \mathbf{r}_n \cdot \mathbf{u}_o, \quad k = \frac{2\pi f}{c} \quad (3)$$

Kısa dipol uzak alan modelinde n'inci elemanın yönsel katkısı, çift vektörel çarpım ve konumsal faz terimiyle Eş. (4) biçiminde ifade edilmiştir. Burada p_n etkin karmaşık dipol momentini, C tüm elemanlar için ortak ölçek çarpanını gösterir. Kodlama yapısındaki E_of_one_dipole fonksiyonunda çift vektörel çarpımın birimleştirilmesi ve $\sin \theta$ çarpanı, gözlem doğrultusu ile dipol arasındaki açı için bu vektörel ifadeye karşılık gelir. Kodun ortak μ_0 çarpanı ve ihmal edilen ortak uzaklık çarpanı normalize örüntüde sadeleşir. Bu hesap mutlak elektrik alanı, yayılan güç veya kazanç kalibrasyonu olarak kullanılmamıştır.

$$\mathbf{E}_n(\theta, \phi) = C p_n [\mathbf{u}_o \times (\mathbf{u}_o \times \mathbf{u}_{d,n})] e^{j\psi_n} \quad (4)$$

Toplam dizi alanı, bütün eleman katkılarının karmaşık vektörel toplamıdır ve Eş. (5) ile verilmektedir. Bu süperpozisyon, konum ve karmaşık uyarım değişkenlerinin farklı doğrultularda yapıcı veya yıkıcı girişim oluşturmaya olanak sağlamaktadır.

$$\mathbf{E}_{\text{tot}}(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \mathbf{E}_n(\theta, \phi) \quad (5)$$

Her gözlem doğrultusundaki güç göstergesi toplam elektrik alan vektörünün karesel normundan elde edilir. Bu değer M gözlem doğrultusundaki aritmetik ortalama güce bölünerek Eş. (6)'daki Q_m normalize örneklenmiş güç değeri hesaplanır. Ortalama güç sıfırdan farklı olduğunda Q_m değerlerinin aritmetik ortalaması tanım gereği 1'dir. Kodlama yapısında bu directive_gain adıyla tutulan bu büyüklük, tüm kürenin katı açı integraliyle hesaplanan yönlülük veya kazanç değildir. Bu ayrımı korumak için örneklenmiş normalizasyon Q, küresel yönlülük ise D_Ω ile gösterilmiştir.

$$P_m = \|\mathbf{E}_{\text{tot}}(\theta_m, \phi_m)\|^2, \quad Q_m = \frac{P_m}{\frac{1}{M} \sum_{q=1}^M P_q} \quad (6)$$

2.3. Amaç Fonksiyonu

Birim hedef, desired.txt dosyasında $\theta = \{10^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 170^\circ\}$ ve $\phi = \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ\}$ birleşimindeki $M=40$ doğrultunun her biri için

verilmiştir. $\text{calculate_COST_Antenna2}$, karesel hataları toplar; fonksiyonda $1/M$ bölmesi yoktur. Dolayısıyla kodun döndürdüğü maliyet, Eş. (7)'deki hata kareleri toplamı J_{Σ} (SSE) olup ortalama karesel hata $J_{\text{ort}}=J_{\Sigma}/M$ 'dir. Örneklenmiş RMS sapma ise $\sqrt{(J_{\Sigma}/M)}=\sqrt{J_{\text{ort}}}$ olarak hesaplanır. Q_m 'nin ortalaması 1 olduğundan J_{ort} , bu sonlu örnek kümesinin M paydalı varyansına eşittir.

$$J_{\Sigma} = \sum_{m=1}^M (Q_m - 1)^2, \quad J_{\text{ort}} = \frac{J_{\Sigma}}{M}, \quad \text{RMS}_{40} = \sqrt{\frac{J_{\Sigma}}{40}} \quad (7)$$

Maliyet denkleminde $1/M$ çarpanı yer alırken paylaşılan fonksiyon SSE üretmektedir. Bu fark, sabit M için adayların aynı kesin maliyet fonksiyonuna göre sıralamasını değiştirmez; ancak mutlak maliyetleri, sonlandırma eşiğini ve vekil modelin çıktı ölçeğini değiştirir. Tablo 1'deki sayıların hangi kod sürümüyle ve hangi ölçekle üretildiği koşu kayıtlarıyla eşleştirilemediği için değerler dönüştürülmeden korunmuştur..

Kırk doğrultulu eşit ağırlıklı ızgara katı açısı bakımından düzgün değildir; kutuplara yakın doğrultuları fazla temsil eder ve ara açılardaki nulları denetlemez. Gerçek küresel yönlülük, aynı ideal alan modelinin bütün küredeki güç integraliyle Eş. (8)'de tanımlanır. Buradaki P alan normundan türetilen güç göstergesidir; ortak ölçek çarpanları oran içinde sadeleşir. D_{Ω} , modellenmeyen kayıp ve uyumsuzlukları içeren gerçekleşmiş kazanç değildir (Balanis, 2016).

$$D_{\Omega}(\theta, \phi) = \frac{4\pi P(\theta, \phi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} P(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (8)$$

Küresel integrasyonda açılar ve adım büyüklükleri radyana çevrilerek $\sin \theta \cdot \Delta \theta \cdot \Delta \phi$ ağırlığı uygulanmalı; $\phi=0^\circ$ ve 360° aynı doğrultu olarak iki kez sayılmamalıdır. İlk kontrolün ardından $0,5^\circ$ adımlı ikinci bir ızgara ile ve gözlenen minimumların çevresinde daha sık yerel örneklemeye integralin ve uç değerlerin kararlılığı denetlenmelidir. Kuazi-izotropiklik için kabul edilecek tepe-tepe dalgalanma ve/veya küresel RMS sapma ölçütü yeniden yürütmeden önce açıkça tanımlanmalıdır. Kırk yönlü eğitim hedefini değiştiren bir yeniden optimizasyonda Eş. (9)'daki katı açısı ağırlıklı hata ve en kötü sapma terimi kullanılabilir. Burada w_i integrasyon ağırlığı, $\alpha \geq 0$ önceden belirlenen denge katsayısıdır. Bu öneri Tablo 1'in üretildiği amaç fonksiyonu değildir.

$$J_{\Omega} = \frac{\sum_i w_i (D_{\Omega,i} - 1)^2}{\sum_i w_i} + \alpha \max_i |D_{\Omega,i} - 1|^2 \quad (9)$$

Her nihai aday için doğrusal ölçekte minimum/maksimum yönlülük ve küresel RMS sapma; dB ölçeğinde minimum/maksimum ve tepe-tepe dalgalanma Eş. (10) ile

raporlanmalıdır. Minimum gücün ve en büyük birim hedeften sapmanın olduğu (θ, φ) yönleri ayrıca verilmelidir. İstenirse dB-RMS, $10\log_{10}D_{\Omega}$ değerlerinin katı açılı ağırlıklı kare ortalamasının karekökü olarak tanımlanabilir. Sıfır güçte dB değeri $-\infty$ olur; böyle bir null sonlu bir dB değeriyle gizlenmemelidir. Bu ölçütler hesaplanmış yeni sonuçlar değil, eksik küresel doğrulamanın açık tanımlarıdır.

$$\Delta_{pp, dB} = 10\log_{10}\frac{D_{\Omega, \max}}{D_{\Omega, \min}}, \quad \sigma_{\Omega} = \sqrt{\frac{\sum_i w_i (D_{\Omega, i} - 1)^2}{\sum_i w_i}} \quad (10)$$

3. YAPAY SİNİR AĞI TABANLI VEKİL MODEL DESTEKLİ GENETİK ALGORİTMA

3.1. Eğitim Verisinin Üretilmesi ve Yapay Sinir Ağı

Vekil modelin eğitim kümesi, her biri 8N boyutlu kromozomla temsil edilen 1500 ideal dipol dizi konfigürasyonu olarak raporlanmıştır. Örneklerin $[-1, +1]$ hiperküpünde eş dağılımlı rastgele üretildiği ve MATLAB R2022b ortamında `rng(0)` kullanıldığı belirtilmiştir. Doğrudan alan fonksiyonu, 40 doğrultudaki normalize örneklenmiş güçten J_{Σ} maliyetini üretmektedir.

Tahmin modeli, MATLAB fitnet yapısıyla oluşturulan tam bağlı ileri beslemeli bir yapay sinir ağı olarak tanımlanmıştır. Girdi boyutu 8 eleman için 64, 16 eleman için 128; tek gizli katmandaki nöron sayısı 10 ve çıktı boyutu 1'dir. Raporlanan geliştirme akışında ayrı 500 örnekle doğrulama kümesi ve 100, 200, 250, 500 ve 1000 örnekle ara eğitimler bulunmaktadır; nihai eğitim büyüklüğü 1500'dür. Regresyon hedefi adayın skaler maliyeti olmalıdır. Normalize edilmiş 40 güç değerinin ortalaması her aday için 1 olduğundan bu ortalamanın çıktı etiketi olarak kullanılması adayları ayırt eden bir vekil model oluşturmaz.

3.2. YSA Doğrulama Protokolü ve Sınırları

Raporlanan 500 örnekle doğrulama kümesi model geliştirme içindir; bağımsız üçüncü bir test kümesi olarak kabul edilmemiştir. Ara eğitimlerde doğrulama MSE'si ve MSE'nin ortalama doğrulama çıktısına oranının izlendiği belirtilmiş, ancak sayısal değerler arşivlenmemiştir. MSE/ortalama çıktı oranı, hedefin SSE'den MSE'ye dönüştürülmesinden etkilenir ve bu iki ölçek arasında doğrudan karşılaştırılabilir bir normalize hata değildir. Yeniden değerlendirmede ağ seçimi ve GA aramasında hiç kullanılmamış bağımsız bir test kümesi ayrılmalı; 8 ve 16 elemanlı modeller için MSE, RMSE, MAE, R^2 ve tanımı açık bir NRMSE ayrı ayrı raporlanmalıdır. Örneğin NRMSE, test hedeflerinin aralığı sıfır değilse RMSE'nin bu aralığa bölünmesiyle tanımlanabilir. Düşük maliyetli adayların ve optimum

çevresindeki örneklerin tahmin hataları ayrıca incelenmelidir. Eğitim, doğrulama ve nihai test kümelerinin işlevleri birbirinden ayrılmalıdır.

Vekil model, doğrudan ideal alan hesabının yaklaşık bir değerlendirme katmanıdır. Her koşulun en iyi adayında vekil tahmini ve aynı ölçeğe getirilmiş doğrudan alan maliyeti birlikte raporlanmadan, vekil çıktısı kesin çözüm kalitesi olarak kullanılamaz. Bu koşu bazı eşleştirmeler mevcut sonuçlara eşlik etmemektedir. Yeniden yürütmede her koşulun nihai adayı saklanmalı ve her iki yöntemin adayları aynı ideal alan fonksiyonuyla, aynı 40 doğrultuda ve aynı maliyet ölçeğinde yeniden değerlendirilmelidir. Vekil koşuları için “YSA tahmini” ve “doğrudan hesaplanan nihai maliyet” ayrı tutulmalı; tekrarların ortalaması ve standart sapması doğrudan hesaplanan maliyetler üzerinden verilmelidir. Bağımsız test kümesi ağ seçimi ve GA aramasında kullanılmamalı; özellikle düşük maliyet bölgesindeki tahmin hataları ayrıca değerlendirilmelidir.

Arşivlenen model geliştirme akışında bağımsız üçüncü bir test kümesine ait sayısal MSE, R^2 , hata yüzdelikleri, tahmin-gerçek saçılımı veya en kötü hata sonuçları saklanmamıştır. Yaklaşık parametre sayısı 64 girişli ağ için 661, 128 girişli ağ için 1301 ağırlık/bias mertebesindedir; özellikle 128 boyutlu durumda 1500 eğitim örneğinin bu parametre sayısına yakın olması bağımsız test ve yerel optimum çevresindeki doğruluk kontrolünü daha da önemli hale getirmektedir. Ayrıca arşivlenen bölüm kayıtlarında fitnet çağrısı dışındaki eğitim fonksiyonu, aktivasyonlar, ön işleme, epoch/erken durdurma ayrıntıları ve ağ başlangıç tohumu sistematik olarak raporlanmamıştır. Bu nedenle vekil modelin genelleme başarısı için nicel bir üstünlük veya aşırı öğrenmenin bulunmadığı yönünde mutlak bir iddia kurulmamaktadır.

3.3. Genetik Algoritma Operatörleri

Genetik algoritma, MATLAB’ın yerleşik genetik algoritma fonksiyonu kullanılmadan özel olarak kodlanmıştır. İlk popülasyonun başlangıç aralığında rastgele üretildiği, bireylerin maliyete göre küçükten büyüğe sıralandığı ve en iyi %50’lik bölümün ebeveyn havuzuna alındığı raporlanmıştır. Ebeveynler bu havuzdan rastgele seçilmiştir; seçim olasılığı dağılımı, elit sayısı, nesil başına çocuk sayısı, yerine koyma stratejisi ve eşit maliyetlerin çözümü tam olarak belirtilmemiştir. Ana GA betiği bulunmadığından bu ayrıntılar varsayımla tamamlanmamıştır.

Çaprazlama aşamasında ebeveyn havuzundan rastgele seçilen iki kromozom için $[1,8N]$ aralığında tek bir kesim noktası belirlenmiş ve iki çocuk çözüm üretilmiştir. Mutasyon olasılığı %5 olarak ayarlanmış; mutasyon gerçekleştiğinde rastgele seçilen bir gen mevcut değerinin en fazla $\pm\%30$ ’u kadar çarpımsal olarak değiştirilmiştir. İlk popülasyonun $[-1,+1]$ içinde

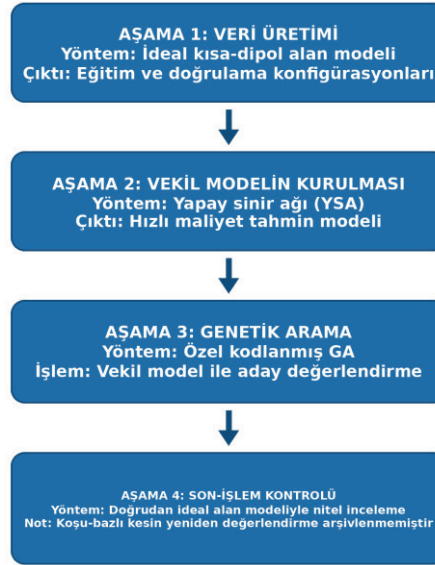
oluşturulması sonraki nesillerin de bu aralıkta kalacağını garanti etmez; örneğin sınır yakınındaki bir gen çarpımsal mutasyonla eğitim bölgesinin dışına çıkabilir ve YSA bu bölgede kontrolsüz ekstrapolasyon yapabilir. Yeniden yürütmeye her yeni adaydan sonra sınır kontrolü uygulanmalıdır. Basit bir kırpma kuralı $x_i \leftarrow \min(1, \max(-1, x_i))$ biçimindedir; yansıtma veya sınır içinde yeniden örnekleme de kullanılabilir ve seçilen işlem yöntem kısmında açıkça belirtilmelidir. Sıfır yönelim vektörü veya sıfır ortalama güç gibi alan hesabını tanımsız yapan adaylar ayrıca reddedilmeli ya da onarılmalıdır. Eski bir nihai adayı sonradan kırpmak tasarımı değiştirdiğinden eski maliyet o aday için geçerli kalmaz; sınır onarımlı yöntemle ait sonuç raporlanacaksa optimizasyon bu kuralla yeniden çalıştırılmalı ve nihai aday doğrudan alan hesabıyla yeniden doğrulanmalıdır.

Raporlanan sonlandırma koşulu, azami nesil sayısı veya maliyetin 0,001'in altına düşmesidir. Bu eşik J_Σ 'ya uygulanıyorsa 40 örnekte RMS sapma $\sqrt{(0,001/40)}=0,005$, yani %0,5; J_{ort} 'a uygulanıyorsa $\sqrt{0,001} \approx 0,0316$, yani %3,16'dır. Eşiğin hangi ölçekte uygulandığı koşu betiğinde açıkça belirtilmelidir. Vekil tahmininin eşiği geçmesi, adayın doğrudan alan maliyetiyle doğrulanmadıkça hedefe ulaşma sayılmamalıdır. Raporlanan senaryolarda popülasyon 50 veya 300, azami nesil sayısı 40, 200 veya 500'dür.

Mevcut sistemin temelinde algoritmanın genel işleyişi şu şekilde özetlenebilir: (1) P adet 8N uzunluklu aday üret; (2) adayları doğrudan maliyet fonksiyonu veya vekil tahminiyle değerlendir; (3) maliyetleri sırala ve en iyi %50'yi ebeveyn havuzuna al; (4) seçilen iki ebeveyne tek noktalı çaprazlama uygula; (5) raporlanan %5 olasılıkla seçilen geni 0,7–1,3 aralığındaki bir çarpanla değiştir; (6) yeniden yürütmeye her yeni aday için tasarım sınırı ve geçerlilik kontrolü uygula; (7) sonraki popülasyonu değerlendir ve durma ölçütünü denetle. Mevcut arşiv sonuçlarının altıncı adımıdaki sınır onarımıyla elde edildiği iddia edilmemektedir.

3.4. İş Akışı

İş akışı; doğrudan ideal kısa dipol alan hesabıyla veri üretimi, YSA modelinin eğitimi, vekil tahminleriyle genetik arama ve seçilen adayın alan modeliyle son işlem incelemesinden oluşmaktadır. Şekil 1 bu aşamaları özetler. Son aşama, mevcut kayıtlar için nitel görselleştirme düzeyindedir.



Şekil 1. Vekil model destekli genetik algoritmanın veri üretimi, öğrenme, optimizasyon ve son-işlem kontrolü aşamaları.

Yeniden yürütmede her yeni aday önce tasarım sınırları ile sıfır yönelim/ortalama güç açısından kontrol edilmelidir. Mutasyon veya çaprazlama sonrasında eğitim alanı dışına çıkan genler önceden tanımlanan onarım kuralıyla sınır içine alınmalı; seçkin adaylar ve özellikle koşu-sonu en iyi adaylar doğrudan modellerle değerlendirilmelidir. Eğitim, model seçimi/doğrulama ve nihai test verileri ayrılmalı; kullanılan rastgele tohumlar, ağ ayarları, aday vektörleri, doğrudan fonksiyon çağrı sayıları ve YSA tahmini–doğrudan maliyet çiftleri saklanmalıdır. Karşılaştırmada mümkün olduğunca aynı başlangıç popülasyonları kullanılmalı; toplam kesin hesap bütçesine veri üretimi ve ara doğrulamalar dahil edilmelidir. Mevcut sonuçların bu korumalarla elde edildiği iddia edilmemektedir.

4. SAYISAL DENEY DÜZENİ

Tüm simülasyonlar MATLAB R2022b ortamında gerçekleştirilmiştir. rng(0) ayarı deney akışına tekrarlanabilir bir başlangıç sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Arşivlenen proje kayıtlarında her karşılaştırma senaryosunun 10 kez çalıştırıldığı ve koşu-sonu en iyi maliyet, koşu-sonu en kötü maliyet ile sürelerin aritmetik ortalamalarının raporlandığı belirtilmektedir. Bununla birlikte her tekrar için ayrı rastgele tohum dizisi saklanmadığından, rng(0)'ın hangi noktalarda yeniden kurulduğu ve iki yöntemin aynı başlangıç popülasyonları/rastgele akışlarla eşleştirilip eşleştirilmediği doğrulanamamaktadır. Bu nedenle sonuçlar bağımsız tohumlara dayalı güven aralığı veya anlamlılık testi olarak değil, proje kayıtlarındaki tekrarlı çalışmaların betimsel ortalamaları olarak sunulmuştur.

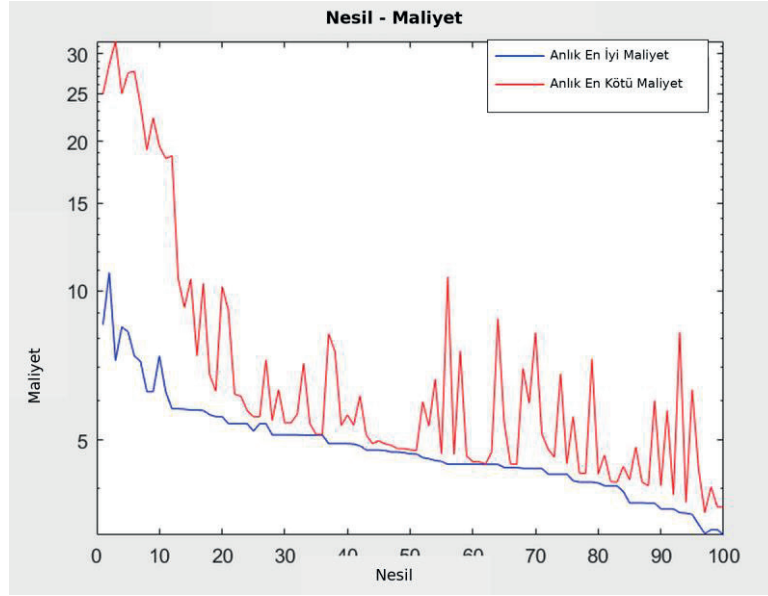
Sayısal deneylerde çalışma frekansı 1 GHz olarak alınmış; 8 ve 16 elemanlı diziler sırasıyla 64 ve 128 gen uzunluklu kromozomlarla incelenmiştir. Eğitim örnekleri ve ilk popülasyon $[-1, +1]$ aralığında oluşturulmuş, yönelim vektörleri her alan hesabında normalize edilmiştir. Maliyet 40 uzaysal doğrultudaki normalize örneklenmiş güç üzerinden hesaplanmış; vekil model 1500 eğitim konfigürasyonu ile kurulmuş ve MATLAB fitnet yapısında tek gizli katmanda 10 nöron kullanılmıştır. 500 örnekle ayrı doğrulama kümesi model geliştirme akışında kullanılmıştır.

GA için raporlanan seçim havuzu en iyi %50, çaprazlama tek noktalı ve mutasyon olasılığı %5'tir; seçilen gen en fazla $\pm\%30$ çarpımsal değişime uğrar. Tablo 1'deki vekil yöntem süreleri ağ eğitimi içerir; dolayısıyla tabloda ayrıca verilen 12 s ve 21 s eğitim süreleri toplam süreye ikinci kez eklenmemelidir. Buna karşılık 1500 eğitim ve 500 doğrulama örneğinin doğrudan alan hesabıyla üretilmesi, ön işleme ve koşu sonu kesin yeniden değerlendirme süreleri ayrı kaydedilmemiştir. Uçtan uca bir karşılaştırmada vekil yöntemin toplam süresi veri üretimi, ön işleme, ağ eğitimi, vekil destekli GA ve nihai doğrudan doğrulama aşamalarını; doğrudan GA süresi de karşılık gelen ortak aşamaları aynı ölçüm kapsamıyla içermelidir. Veri kümesi veya eğitilmiş ağ birden fazla koşuda tekrar kullanılıyorsa ilk kurulum maliyeti ile sonraki koşu maliyetleri ayrıca raporlanmalıdır. Popülasyon $\times$ nesil çarpımı nominal aday sayısını verir; gerçek doğrudan fonksiyon çağırısı sayısı başlangıç değerlendirmesi, elitizm, yeniden kullanım ve erken durmaya bağlı olduğundan ölçülmüş hesap bütçesinin yerine kullanılmamalıdır.

5. BULGULAR

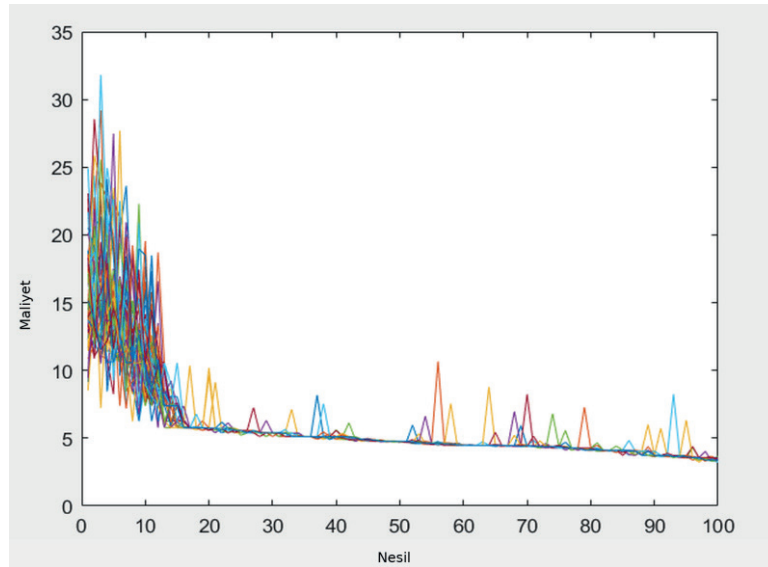
5.1. Maliyet Evrimi ve Popülasyon Yakınsaması

Şekil 2, ana dört performans senaryosundan ayrı olarak raporlanan 50 bireyli, 100 nesilli yardımcı bir kaydın anlık en iyi ve anlık en kötü maliyetlerini göstermektedir. İlk nesillerde belirgin bir azalma görülmekte, sonraki nesillerde de iyileşme sürmektedir. Bu görüntü tek başına matematiksel yakınsama veya küresel optimum kanıtı değildir. En kötü maliyetteki sıçramalar, popülasyona daha yüksek maliyetli yeni adayların girebildiğini göstermektedir. Eğrilerin maliyet ölçeği ham sayısal kayıtlarla eşleştirilemediği için grafik üzerinden RMS veya dB dalgalanma hesaplanmamıştır.



Şekil 2. Yardımcı 100 nesilli kayıta anlık en iyi ve en kötü maliyeti gösterir.

Şekil 3, 50 bireyin 100 nesil boyunca raporlanan maliyetlerini göstermektedir. Başlangıçtaki geniş dağılımın ilerleyen nesillerde daralması, örnek kayıta popülasyon maliyetlerinin birbirine yaklaştığına işaret eder. Şekil 2 ve Şekil 3'ün aynı rastgele koşuya ait olduğunu gösteren ortak koşu kimliği yoktur; görüntülerdeki son maliyet düzeyleri de birbir örtüşmemektedir. Bu nedenle şekiller ayrı yardımcı kayıtlar olarak sunulmuş, birbirinin nicel doğrulaması veya Tablo 1'deki senaryoların yerine kullanılmamıştır.



Şekil 3. Elli bireyin 100 nesillik yardımcı maliyet kaydı.

5.2. Hesaplama Süresi, Maliyet Karşılaştırılabilirliği ve Doğrulama Kapsamı

Tablo 1, doğrudan ideal alan hesabı tabanlı GA ile vekil model destekli GA için raporlanan betimsel ortalamaları göstermektedir. “En iyi” ve “en kötü” sütunları 10 tekrarın koşu sonu

aritmetik ortalamaları olarak aktarılmıştır; ham tekrar değerleri bulunmadığından standart sapma, medyan ve güven aralığı hesaplanamaz. Ayrıca tablo maliyetlerinin SSE/MSE ölçeği ile vekil satırlarında verilen değerlerin YSA tahmini mi yoksa doğrudan alan yeniden hesabı mı olduğu kayıtlar üzerinden kesinleştirilememiştir. Bu nedenle sayılar değiştirilmemiş arşiv değerleridir ve doğrudan doğrulanmış nihai çözüm kalitesi olarak yorumlanmamalıdır. Koşu-sonu aday vektörleri elde edildiğinde tablo, vekil yöntem için “YSA tahmini” ve “doğrudan hesaplanan nihai maliyet” sütunlarıyla genişletilmeli; yöntem karşılaştırması aynı ölçekli doğrudan maliyetler üzerinden yapılmalıdır. Süreler ağ eğitimi içerir, doğrudan alan hesabıyla eğitim/doğrulama verisi üretimini ve kaydedilmemiş nihai doğrulama aşamalarını içermez.

Tablo 1. Dört senaryoda raporlanan arşiv maliyet ve süre ortalamaları;

Dizi / pop. / nesil	Yöntem	Ort. raporlanan en kötü maliyet	Ort. raporlanan en iyi maliyet	Kaydedilen süre, s (dk:sn)	YSA eğitim süresi
8 / 50 / 40	GA	5,52	5,41	135 (02:15)	—
8 / 50 / 40	Vekil Model Destekli GA	5,34	4,91	40 (00:40)	12 sn
8 / 50 / 500	GA	0,68	0,63	1724 (28:44)	—
8 / 50 / 500	Vekil Model Destekli GA	0,60	0,57	748 (12:28)	12 sn
16 / 50 / 40	GA	5,32	5,18	394 (06:34)	—
16 / 50 / 40	Vekil Model Destekli GA	4,88	4,66	58 (00:58)	21 sn
16 / 300 / 200	GA	0,69	0,43	1970 (32:50)	—
16 / 300 / 200	Vekil Model Destekli GA	0,63	0,38	456 (07:36)	21 sn

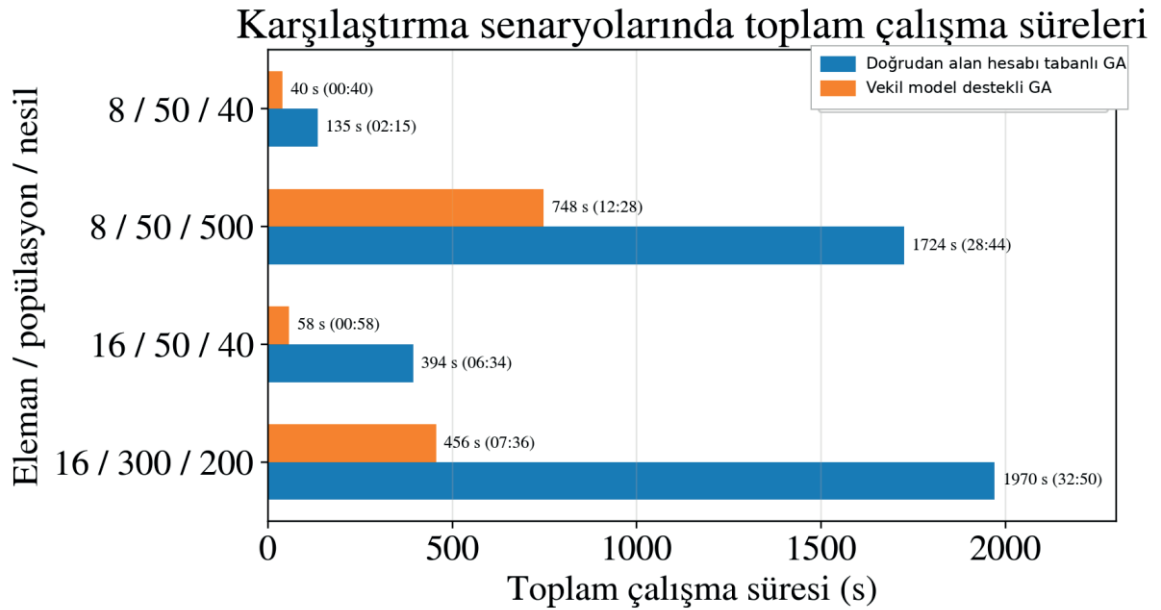
8 elemanlı, 50 popülasyonlu ve 40 nesilli kısa testte proje kayıtlarındaki ortalama süre 135 saniye (02:15) ve vekil model destekli koşuda 40 saniye (00:40) olarak verilmiştir. Bu iki kayıt arasındaki süre oranı 3,38 ve fark %70,4'tür; ancak veri üretimi ve diğer yaşam-döngüsü bileşenleri ölçülmediğinden bu değer tam yöntem hızlanması değildir. Aynı senaryoda raporlanan ortalama koşu-sonu en iyi maliyet 5,41 ve 4,91'dir.

8 elemanlı, 50 popülasyonlu ve 500 nesilli testte kaydedilen ortalama süreler 1724 saniye (28:44) ve 748 saniye (12:28) olup kayıtlı süre oranı 2,30, fark ise %56,6'dır. Raporlanan ortalama koşu-sonu en iyi maliyet değerleri sırasıyla 0,63 ve 0,57'dir.

16 elemanlı, 50 popülasyonlu ve 40 nesilli testte doğrudan yöntem için kaydedilen ortalama süre 394 saniye (06:34), vekil model destekli yöntem için 58 saniye (00:58) olmuştur. Kayıtlı süre oranı 6,79, fark %85,3'tür. Raporlanan ortalama koşu-sonu en iyi maliyetler 5,18 ve

4,66'dır. Veri üretim zamanı ve eşit hesap bütçesi dahil edilmediğinden bu oran yalnızca arşivlenmiş çalışma aşamalarının karşılaştırmasıdır.

16 elemanlı, 300 popülasyonlu ve 200 nesilli testte kaydedilen süreler 1970 saniye (32:50) ve 456 saniye (07:36); süre oranı 4,32 ve fark %76,9'dur. Raporlanan ortalama en iyi maliyetler sırasıyla 0,43 ve 0,38'dir. Tek bir kesin değerlendirme için 0,38 SSE ise örnek RMS sapması $\sqrt{(0,38/40)} \approx 0,0975$ (%9,75), MSE ise $\sqrt{0,38} \approx 0,6164$ (%61,64) olur. Ancak tablodaki sayı bir koşu ortalamasıdır; ölçeği ve vekil-kesin maliyet ayrımı doğrulanmadığından bu iki dönüşüm yalnızca tanım farkını gösterir. Ortalama maliyetin karekökü koşulların ortalama RMS'si değildir ve bu değerlerden küresel dB dalgalanma veya null bulunmadığı sonucu çıkarılamaz. Bu senaryodaki kayıtlı zaman farkı 1514 saniyedir. Kayıt dışında kalan vekil-yöntem yaşam-döngüsü maliyeti, doğrudan yöntem için kayıt dışında kalan karşılık gelen maliyetten 1514 saniyeden daha fazla olursa kayıtlı toplam süre avantajı ortadan kalkar; bu yalnızca bir başabaş eşiğidir, mevcut deneyde böyle bir ek maliyet ölçüldüğü anlamına gelmez.

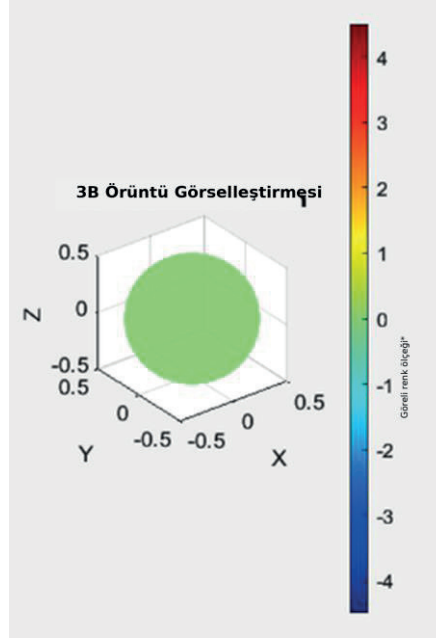


Şekil 4. Dört sayısal senaryoda proje kayıtlarındaki ortalama çalışma süreleri. Yatay eksen saniye cinsindendir; çubuk etiketlerinde dakika:saniye karşılıkları verilmiştir.

5.3. Üç Boyutlu Örüntü Görselleştirmesi

Şekil 5, proje arşivindeki bir aday çözüm için oluşturulan üç boyutlu görselleştirmedir. Son işlem ızgarası proje açıklamasında θ yönünde 181, ϕ yönünde 361 olmak üzere 65.341 açısız örneklerle tanımlanmıştır. Bu sayı, periyodik azimut sınırı ve kutup tekrarları nedeniyle 65.341 farklı uzaysal doğrultu anlamına gelmez. Görselin ait olduğu tam aday vektörü ve çizim betiği

bulunmadığından eleman sayısı ile yüzey yarıçapı ve renk değerlerinin alan genliği, güç veya logaritmik ölçekte hangi büyüklüğü temsil ettiği kesinleştirilememektedir. Bu nedenle mevcut Şekil 5 nitel arşiv görseli olarak korunmuştur.

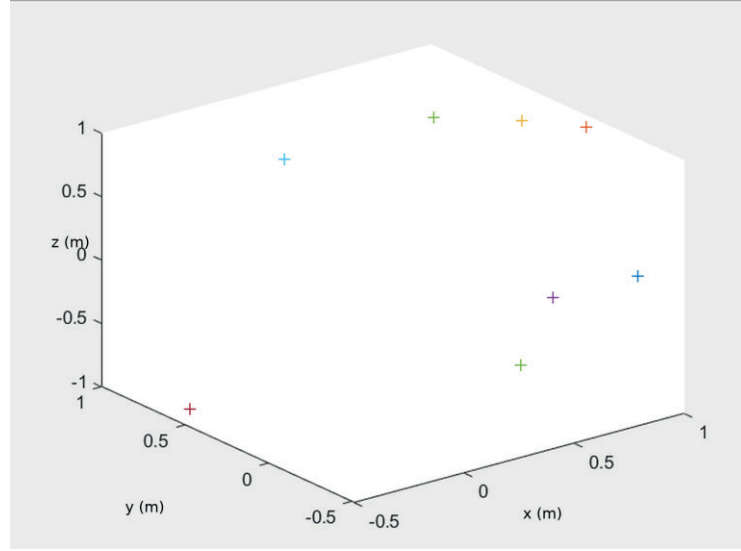


Şekil 5. Arşivdeki nitel üç boyutlu örüntü görseli; X, Y ve Z çizim koordinatlarıdır.

Şekil 5 tam dalga elektromanyetik çözüm veya fiziksel ölçüm değildir. Görselden $D\Omega_{\min}$, $D\Omega_{\max}$, tepe-tepe dalgalanma veya en kötü yön değerleri güvenilir biçimde elde edilemez. Bu ölçütler için aynı adayın konum, yönelim ve karmaşık uyarımlarıyla alan yeniden hesaplanmalı; Eş. (8)–(10)'daki küresel doğrulama önce 1° ızgarada, ardından $0,5^\circ$ ızgarada ve gözlenen minimumların çevresinde daha sık örneklemeyle uygulanmalıdır. Minimum ve maksimum yönlülük, minimumun olduğu yön, küresel RMS sapma ve tepe-tepe dB dalgalanma raporlanmalı; sıfır güçteki gerçek bir null sonlu bir dB değeriyle gizlenmemelidir. Böyle bir yeniden hesaplama olmadan görselin küreye benzemesi kuazi-izotropik başarının sayısal kanıtı olarak kabul edilmemiştir.

5.4. Optimize Edilmiş Uzaysal Yerleşimler

Şekil 6, 8 elemanlı bir adayın eleman merkezlerini göstermektedir; konumlar metre cinsindedir. Asimetrik yerleşim geometrik simetri kısıtı kullanılmadığını gösterir, fakat minimum eleman aralığı, sonlu geometri, besleme ve mekanik uygulanabilirlik modele dahil değildir. İşaretler dipol merkezlerini gösterir; yönelim veya dipol boyu değildir. En iyi genler ekranında 100×64 matris olarak sütunu görünmektedir. Kodun sütun öncelikli çözümlemesinde bunlar 8 elemanın gerçek ve sanal uyarımlarını kapsar.



Şekil 6. Sekiz elemanlı adayın metre cinsinden merkez konumları.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, ideal kısa dipol dizisinin örneklenmiş güç dağılımını birim hedefe yaklaştırmak amacıyla yapay sinir ağı tabanlı vekil model ile özel olarak geliştirilen genetik algoritmanın birlikte kullanıldığı bir sayısal optimizasyon yaklaşımı incelenmiştir. Eleman başına sekiz gen kullanılarak 8 ve 16 elemanlı diziler için sırasıyla 64 ve 128 gen uzunluğunda kromozomlar oluşturulmuş; konum, yönelim ve karmaşık uyarım değişkenleri aynı optimizasyon yapısı içinde ele alınmıştır. Bununla birlikte, yönelim normalizasyonu ile ortak uyarım ölçeği ve faz değişmezlikleri nedeniyle bu genlerin tamamı bağımsız fiziksel serbestlik derecelerini temsil etmemektedir.

Dört karşılaştırma senaryosunda vekil model destekli GA için kaydedilen çalışma sürelerinin doğrudan GA'ya göre daha düşük olduğu görülmüştür. Süre oranları 2,30–6,79 arasında değişmiş; en kapsamlı 16 elemanlı, 300 popülasyonlu ve 200 nesilli senaryoda doğrudan GA için 1970 s, vekil model destekli GA için 456 s süre kaydedilmiştir. Bu durumda kayıtlı süre oranı 4,32, fark ise %76,9'dur. Aynı senaryoda raporlanan ortalama koşu-sonu en iyi maliyetler sırasıyla 0,43 ve 0,38'dir. Bununla birlikte maliyet ölçeği ile vekil satırındaki değerlerin YSA tahmini/doğrudan yeniden hesap ayrımı arşiv kayıtlarından doğrulanamadığından bu değerler yöntemlerin kesin çözüm kalitesi açısından doğrudan üstünlüğünü kanıtlamaz. Ayrıca süreler 1500 eğitim ve 500 doğrulama örneğinin doğrudan alan hesabıyla oluşturulma süresini, ön işlemeyi ve koşu bazlı kesin yeniden değerlendirmeyi içermediğinden elde edilen oranlar uçtan uca yöntem hızlanması olarak değerlendirilmemelidir. En kapsamlı senaryodaki

1514 s kayıtlı fark yalnızca yaşam-döngüsü maliyetleri için bir başabaş referansı sağlar; eksik süreler ölçülmeden kesin amortisman noktası belirlenemez.

Vekil modellerin pahalı elektromanyetik değerlendirmelerin sayısını azaltmak amacıyla kullanılması ve yeni değerlendirme noktalarının model tahminleri ile belirsizlik bilgisine göre seçilmesi literatürde ele alınmıştır (Couckuyt et al., 2010; Hawe & Sykulski, 2007). Yüksek boyutlu anten optimizasyonunda makine öğrenmesi tabanlı ve düşük boyutlu vekil yaklaşımların örnek verimliliği açısından kullanılabileceği gösterilmiş (Kozziel et al., 2024); benzer biçimde genetik algoritma destekli vekil modelleme mikroşerit anten tasarımına (Sarmah et al., 2020), sayısal ikiz tabanlı anten optimizasyonuna (Uluslu & Beyaz, 2026) ve elektromanyetik yapıların modellenmesine (Uluslu, 2023, 2024; Uluslu & Ural, 2026) uygulanmıştır. Bu çalışma da konum, yönelim ve karmaşık uyarım değişkenlerinin tek kromozom içerisinde birlikte optimize edilmesi bakımından bu yaklaşım sınıfına bir uygulama sunmaktadır. Bununla birlikte, elde edilen sonuçlar ideal kısa dipol modeli kapsamında değerlendirilmelidir. Karşılıklı kuplaj, sonlu dipol boyutları, besleme ağı, aktif empedans, yansıma katsayısı, kayıplar, radyasyon verimi, gerçekleşmiş kazanç, polarizasyon uyumu ve mekanik yerleşim gibi fiziksel etkiler modele dahil edilmemiştir. Ayrıca vekil model için bağımsız test sonuçlarının, koşu bazlı kesin maliyetlerin ve yoğun küresel ızgara üzerinde minimum–maksimum yönlülük ile tepe-tepe dalgalanma değerlerinin arşivlenmemiş olması, sonuçların fiziksel anten performansı veya küresel kuazi-izotropiklik açısından kesin bir üstünlük olarak yorumlanmasını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle raporlanan maliyet ve süre değerleri, kullanılan ideal kaynak modeli ve mevcut deney kayıtları çerçevesinde değerlendirilmelidir.

Gelecek çalışmalarda dört doğrulama adımı birlikte uygulanmalıdır. İlk olarak SSE/MSE ölçeği ve sonlandırma ölçütü sabitlenmeli; her koşunun nihai adayı aynı doğrudan alan fonksiyonuyla yeniden değerlendirilerek YSA tahmini ve doğrudan maliyet ayrı raporlanmalıdır. İkinci olarak ağ seçimi ve GA aramasında kullanılmamış bağımsız test kümesi üzerinde MSE, RMSE, MAE, R^2 ve uygun bir NRMSE ile özellikle düşük maliyet bölgesindeki tahmin hataları verilmelidir. Üçüncü olarak nihai adaylar 1° ve $0,5^\circ$ küresel ızgaralarla, minimumların çevresinde yerel sıkılaştırma ve katı açı ağırlıkları kullanılarak doğrulanmalı; minimum/maksimum yönlülük, küresel RMS sapma ve tepe-tepe dalgalanma raporlanmalıdır. Dördüncü olarak mutasyon/çaprazlama sonrasında $[-1,+1]$ tasarım sınırları açık bir onarım kuralıyla korunmalı ve bu kuralla elde edilen sonuçlar yeniden çalıştırılmış optimizasyondan gelmelidir. Süre karşılaştırması veri üretimi, ön işleme, eğitim, optimizasyon ve nihai doğrudan

doğrulamayı aynı ölçüm kapsamıyla içermeli; veri veya ağ tekrar kullanılıyorsa ilk kurulum ve sonraki kullanım maliyetleri ayrı verilmelidir. Bu tamamlamalar, vekil model kazanımının daha güvenilir, tekrarlanabilir ve fiziksel olarak yorumlanabilir biçimde değerlendirilmesini sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Ali, H. T., Amin, S., Amin, M., Maqsood, M., Maud, A. R., & Yusuf, M. (2021). Design and development of a near isotropic printed arc antenna for direction of arrival (DoA) applications. *Electronics*, 10(7), 797.
- E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, M. A. Tsili and A. G. Kladas, "Global Transformer Optimization Method Using Evolutionary Design and Numerical Field Computation," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 3, pp. 1720-1723, March 2009, doi: 10.1109/TMAG.2009.2012795.
- Ares-Pena, F. J., Rodriguez-Gonzalez, J. A., Villanueva-Lopez, E., & Rengarajan, S. R. (1999). Genetic algorithms in the design and optimization of antenna array patterns. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 47(3), 506–510.
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: Analysis and design* (4th ed.). Wiley.
- Couckuyt, I., Declercq, F., Dhaene, T., Rogier, H., & Knockaert, L. (2010). Surrogate-based infill optimization applied to electromagnetic problems. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 20(5), 492–501. <https://doi.org/10.1002/mmce.20455>
- Fu, K., Cai, X., Yuan, B., Yang, Y., & Yao, X. (2022). An efficient surrogate assisted particle swarm optimization for antenna synthesis. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(7), 4977–4984. <https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3153080>
- Guney, K., & Onay, M. (2007). Amplitude-only pattern nulling of linear antenna arrays with the use of bees algorithm. *Progress in Electromagnetics Research*, 70, 21–36.
- Güneş, F., Uluslu, A., & Mahouti, P. (2020). Pareto optimal characterization of a microwave transistor. *IEEE Access*, 8, 47900–47913.
- Hawe, G., and J. Sykulski. "Considerations of accuracy and uncertainty with kriging surrogate models in single-objective electromagnetic design optimisation." *IET Science, Measurement & Technology* 1, no. 1 (2007): 37-47.
- Hu, C., Zeng, S., & Li, C. (2025). Expensive Highly Constrained Antenna Design Using Surrogate-Assisted Evolutionary Optimization. *Electronics*, 14(18), 3613. <https://doi.org/10.3390/electronics14183613>
- Jo, S.-T., Shin, H.-S., Lee, Y.-G., Lee, J.-H., & Choi, J.-Y. (2022). Optimal design of a BLDC motor considering three-dimensional structures using the response surface methodology. *Energies*, 15(2), Article 461. <https://doi.org/10.3390/en15020461>
- Kildal, P.-S., Carlberg, U., & Carlsson, J. (2013). Definition of antenna diversity gain in user-distributed 3D-random line-of-sight. *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 13(2), 86–92.
- Kildal, P.-S., Rosengren, K., Byun, J., & Lee, J. (2002). Definition of effective diversity gain and how to measure it in a reverberation chamber. *Microwave and Optical Technology Letters*, 34(1), 56–59. <https://doi.org/10.1002/mop.10372>
- Koziel, S., & Pietrenko-Dabrowska, A. (2024). Fast EM-driven nature-inspired optimization of antenna input characteristics using response features and variable-resolution simulation models. *Scientific Reports*, 14, Article 10081. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60749-5>
- Koziel, S., Pietrenko-Dabrowska, A., & Leifsson, L. (2024). Antenna optimization using machine learning with reduced-dimensionality surrogates. *Scientific Reports*, 14, Article 21567. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72478-w>

- Li, J., Liu, Y., Zhao, W., Zhu, T., Chen, Z., Liu, A., & Wang, Y. (2025). Pattern synthesis design of linear array antenna with unequal spacing based on improved dandelion optimization algorithm. *Sensors*, 25(3), Article 861. <https://doi.org/10.3390/s25030861>
- Liu, P., & Li, Y. (2020). Quasi-isotropic radiation pattern synthesis using triple current line sources. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68(12), 8150–8155.
- Long, S. (1975). A combination of linear and slot antennas for quasi-isotropic coverage. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 23(4), 572–576.
- Mahouti, P., Kızılay, A., Tari, O., Belen, A., Belen, M. A., & Çalışkan, A. (2022). Design optimization of ultra-wideband Vivaldi antenna using artificial intelligence. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 36(12), 1594–1601. <https://doi.org/10.13052/2021.ACES.J.361211>
- Ördek, S., & Kızılay, A. (2023). Electrically large aperture horn array antenna with low side lobe level for Ku-band frequency. *Microwave and Optical Technology Letters*, 65(2), 583–589. <https://doi.org/10.1002/mop.33494>
- Pan, G., Li, Y., Zhang, Z., & Feng, Z. (2012). Isotropic radiation from a compact planar antenna using two crossed dipoles. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11, 1338–1341.
- Piltan, O. C., Kızılay, A., Belen, M. A., & Mahouti, P. (2024). Data driven surrogate modeling of horn antennas for optimal determination of radiation pattern and size using deep learning. *Microwave and Optical Technology Letters*, 66(1), e33702. <https://doi.org/10.1002/mop.33702>
- Rahmat-Samii, Y., & Michielssen, E. (Eds.). (1999). *Electromagnetic optimization by genetic algorithms*. Wiley.
- Robinson, J., & Rahmat-Samii, Y. (2004). Particle swarm optimization in electromagnetics. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 52(2), 397–407.
- Sarmah, K., Goswami, S., & Baruah, S. (2020). Surrogate model assisted design of CSRR structure using genetic algorithm for microstrip antenna application. *Radioengineering*, 29(1), 117–124. <https://doi.org/10.13164/re.2020.0117>
- Stutzman, W. L., & Thiele, G. A. (2012). *Antenna theory and design* (3rd ed.). Wiley.
- Uluslu, A. (2023). Fitting nonlinear mathematical models to the cost function of the quadrafilar helix antenna optimization problem. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 115(3), 307–318. <https://doi.org/10.1007/s10470-023-02174-8>
- Uluslu, A. (2024). Additional acceleration of antenna optimal characterization with modeling support. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 39(5), 396–404. <https://doi.org/10.13052/2024.ACES.J.390503>
- Uluslu, A., & Beyaz, E. (2026). Determining the effect of antipodal Vivaldi antenna size on bandwidth with accelerated surrogate model based digital twin. *Mobile Networks and Applications*, 31, 210–230. <https://doi.org/10.1007/s11036-026-02511-x>
- Uluslu, A., & Ural, B. M. (2026). Interdigital dual band filter design based on surrogate modeling and optimization. *Radio Science*, 61(5), Article e2025RS008599. <https://doi.org/10.1029/2025RS008599>
- Jin, N., & Rahmat-Samii, Y. (2010). Hybrid real-binary particle swarm optimization (HPSO) in engineering electromagnetics. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 58(12), 3786–3794.

- Weile, D. S., & Michielssen, E. (1997). Genetic algorithm optimization applied to electromagnetics: A review. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 45(3), 343–353.
- Yurt, R., Torpi, H., Kizilay, A., Koziel, S., & Mahouti, P. (2024). Variable data structures and customized deep learning surrogates for computationally efficient and reliable characterization of buried objects. *Scientific Reports*, 14, Article 14898. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65996-0>
- Zhang, Z., Gao, X., Chen, W., Feng, Z., & Iskander, M. F. (2011). Study of conformal switchable antenna system on cylindrical surface for isotropic coverage. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59(3), 776–783.

BÖLÜM 6

RIS DESTEKLİ KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ: BİR DURUM ÇALIŞMASI

Enis KÖRPE¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 07425, Alanya/ANTALYA, ORCID: 0000-0001-8271-9059, E-posta: enis.korpe@alanya.edu.tr

1. GİRİŞ

Kablosuz iletişim teknolojileri; artan veri hızı, düşük gecikme süresi ve yüksek güvenilirlik gereksinimleri doğrultusunda hızla evrilmekte olup, altıncı nesil (6G) sistemler bu ihtiyaçlara yönelik çözümler sunmayı amaçlamaktadır. Milimetre dalga ve terahertz (THz) bantlarının kullanımı, geniş bant genişlikleri sayesinde çok yüksek veri hızları sağlama potansiyeli sunmaktadır (Körpe vd., 2025). Ancak bu yüksek frekans bantlarında, doğrudan görüş hattının bulunmadığı durumlarda sinyal zayıflaması, yayılım kayıpları ve saçılma etkileri önemli ölçüde artmakta; bu da iletişim performansında ciddi bozulmalara yol açmaktadır. Bu bağlamda, Yeniden Yapılandırılabilir Akıllı Yüzeyler (Reconfigurable Intelligent Surface -RIS), sinyal yayılımı ve çevredeki kablosuz ortam üzerinde akıllı kontrol sağlayan gelişmiş bir iletişim paradigmasını temsil etmektedir (Liu vd., 2021). RIS yapıları çok sayıda pasif yansıtıcı elemandan oluşur ve gelen elektromanyetik dalgaları istenen yöne yansıtmak amacıyla her bir elemanın fazı bağımsız olarak ayarlanabilir. Böylece, doğrudan iletişim yolunun engellendiği durumlarda alternatif yayılım yolları oluşturularak kapsama alanı genişletilebilir ve sistem performansı iyileştirilebilir (Feng vd., 2023; Yuan vd., 2021).

RIS'in tarihsel gelişimi, artan veri trafiği talepleri ve spektrum kıtlığı sorunlarına bir yanıt olarak, araştırmacıların bu pasif yansıtıcı yapıların kablosuz kanal koşullarını iyileştirme potansiyelini fark etmesiyle 2010'ların ortalarında başladı. Geleneksel kablosuz iletişim sistemlerinde kanal koşulları genellikle kontrol edilemeyen, rastgele bir yapı olarak değerlendirilirken; RIS teknolojisi, elektromanyetik dalgaların yansıma özelliklerini dinamik olarak kontrol edebilme yeteneği sayesinde kablosuz ortamın programlanabilmesini mümkün kılmıştır. İlk çalışmalar, bu yapıların gelen sinyalin fazını, genliğini ve yönünü kontrol edebileceğini ortaya koyan meta malzemeler ve yapay elektromanyetik yüzeyler üzerine yoğunlaşmıştır. Takip eden yıllarda, 5G standardizasyon çalışmalarının hız kazanması, RIS'i geleceğin iletişim sistemleri için öne çıkan bir teknoloji konumuna getirmiştir.

RIS sistemleri, çeşitli teknolojik yaklaşımlar aracılığıyla hayata geçirilebilir. RIS'in temel tasarımı, dinamik bir yansıtıcı dizi şeklindedir. Bu mimaride yapıyı oluşturan elemanlar, her yöne eşit güçte sinyal yayabilen çok yönlü (antenlerden meydana gelir ve bu antenlerin uç yük değerleri anlık olarak güncellenebilir. Bu sayede, gelen elektromanyetik dalga geri saçılabilir ve faz değişimine uğratılabilir (ElMossallamy vd., 2020). RIS'in daha gelişmiş bir tasarımı ise dinamik olarak programlanabilir bir meta-yüzey kullanımına dayanır. Meta-yüzeyler, meta-malzemelerin düzlemsel ve iki boyutlu yansımaları olup elektromanyetik dalgalar üzerinde güçlü bir kontrol imkânı sunar. Meta-yüzey tabanlı bir RIS birimi, yalnızca dalga fazını

değiştirip onu geri saçmakla kalmaz; bunun ötesinde, yansıma açısı ayarlanabilir olağanüstü bir ayna işlevi görebilir ve ayrıca polarizasyon dönüşümü gerçekleştirebilir (He vd., 2019).

Bu çalışma, fiziksel engeller (örneğin ağaçlar veya binalar) nedeniyle görüş hattının tamamen kesildiği bir iletişim senaryosunu ele almakta ve bu sorunu çözmek amacıyla RIS destekli bir sistem modeli geliştirmektedir. Bu modelde, doğrudan bir bağlantının bulunmaması nedeniyle, baz istasyonu ile kullanıcı ekipmanı arasındaki veri iletimi tamamen RIS destekli yayılım yoluyla gerçekleştirilmektedir. Söz konusu yaklaşım, özellikle engellerin yoğun olduğu ortamlarda gerçekçi bir iletişim senaryosu sunmaktadır. Kanal modellemesinde iki ışınlı yayılım yaklaşımı benimsenmiş olup, amaç RIS elemanlarının fazlarını uygun şekilde ayarlayarak yansıyan sinyallerden alıcı tarafında yapıcı girişim elde etmektir. Ayrıca, geliştirilen sistemin performansı sinyal-gürültü oranı (SGO) metriği kullanılarak değerlendirilmiş; farklı RIS elemanı sayıları ve iletim mesafeleri için analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, RIS kullanımının iletişim kapsama alanını genişlettiğini ve özellikle görüş hattının bulunmadığı ortamlarda sistem güvenilirliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Bu çalışmanın temel katkıları aşağıda sıralanmıştır:

- Doğrudan görüş hattının bulunmadığı senaryolar için RIS tabanlı bir iletişim modeli geliştirilmiş ve engellenmiş iletişim bağlantılarında RIS kullanımının sağladığı performans kazanımları ortaya konmuştur.
- RIS bünyesindeki yeniden yapılandırılabilir meta-yüzey sayısının sistem performansı üzerindeki etkisi matematiksel olarak gösterilmiştir. Matematiksel denklemler, uygun faz ayarlamasıyla yapıcı girişim oluşturulduğunda, alınan sinyal gücünün meta-yüzey sayısının karesiyle orantılı olarak arttığını ortaya koymaktadır. Bu analiz, RIS'in sağlayabileceği kazancı nicel olarak göstermekte ve sistem tasarımı açısından önemli çıkarımlar sunmaktadır.
- Bu çalışma, farklı iletim mesafelerinde ve çalışma frekanslarında başarılı bir iletişimi sürdürmek için gereken RIS elemanı sayısını belirlemiş ve RIS destekli sistemlerin optimum boyutlandırılmasına yönelik önemli tasarım ipuçları sağlamıştır.

Bu çalışmanın geri kalan kısmı aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2, mevcut literatürün kapsamlı bir incelemesini sunmaktadır. Bölüm 3; sistem modelini, iletişim mimarisini ve çalışmada kullanılan matematiksel formülasyonu açıklamaktadır. Bölüm 4, elde edilen sonuçları ele almakta ve çeşitli senaryolar kapsamında sistem performansını

değerlendirmektedir. Son olarak, Bölüm 5 temel bulguları özetlemekte ve gelecekteki çalışmalar için olası araştırma konuları önermektedir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

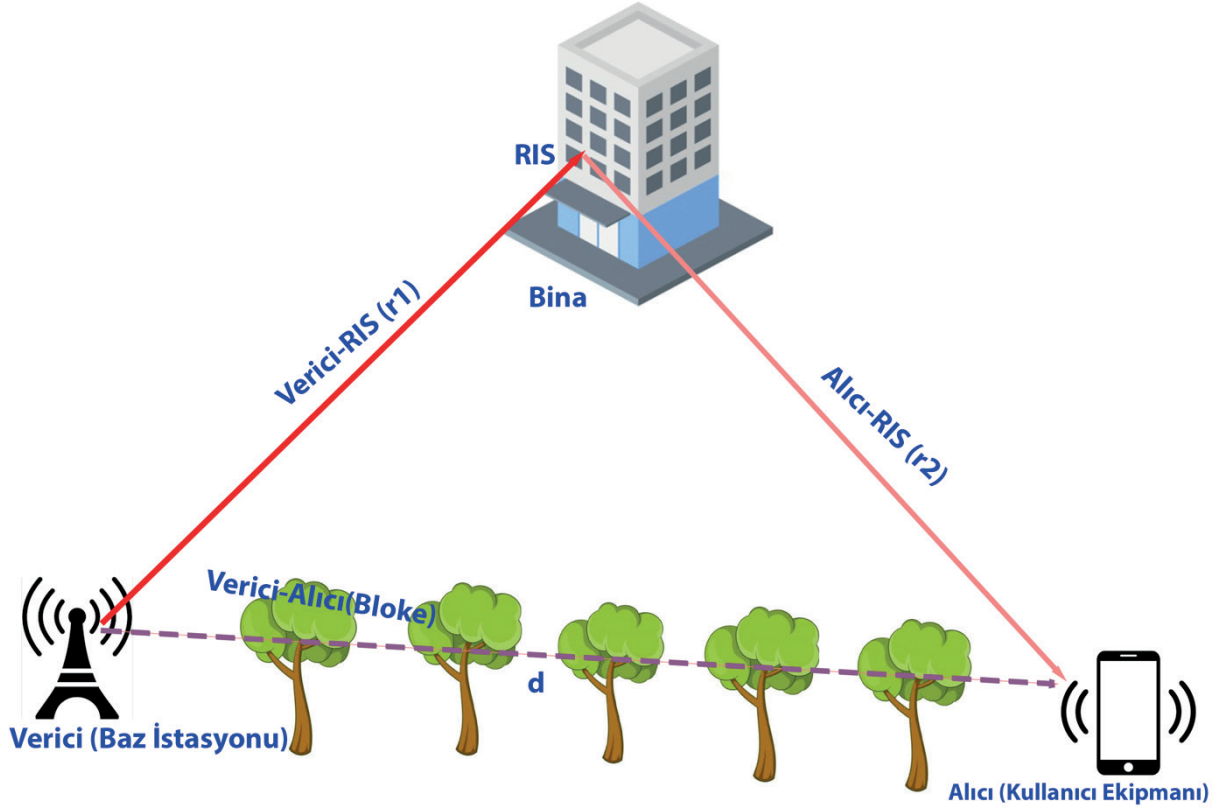
Literatürde RIS üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. (Tang vd., 2021), elektromanyetik teori ve fiziksel yayılım ilkelerini dahil ederek RIS destekli kablosuz sistemler için serbest uzay yayılım kaybı modelleri önermiş ve elde edilen sonuçları meta yüzey prototipleri kullanarak deneysel olarak doğrulamıştır. Ancak çalışma yalnızca serbest uzay yayılımına ve RIS aracılığıyla sağlanan bağlantıya odaklanmış; doğrudan verici-alıcı bağlantısı, karmaşık çok kullanıcı kanalları, gerçek şehir senaryoları, kanal kestirimi, donanım kusurlarının kapsamlı analizi ve dinamik çevresel koşullar altındaki performans değerlendirmeleri gibi konuları ele almamıştır. (Pan vd., 2021)'de, RIS teknolojisinin gelecekteki 6G ve ötesi iletişim sistemleri için potansiyeli; THz, çok hücreli ağlar, mobil uç bilişim, çoklu yayın iletimi ve fiziksel katman güvenliği gibi çeşitli uygulamalardaki çalışma ilkeleri ve performansı üzerinde özellikle durularak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bununla birlikte çalışma; kanal kestirimi, donanım kısıtlamalarının modellenmesi, dağıtık optimizasyon algoritmaları, RIS yerleşim optimizasyonu ve özellikle RIS destekli sistemlerde THz iletişimi ile entegrasyon konularında henüz yeterli çözümler sunmamış; bu hususları gelecekte araştırılması gereken açık problemler ve araştırma yönleri olarak bırakmıştır. (Basar vd., 2019)'da araştırmacılar, kablosuz iletişim sistemlerinde RIS'lerin potansiyelini kapsamlı bir şekilde incelemiş; RIS teknolojisinin teorik temelini, kanal modelleme yaklaşımlarını ve performans analizlerini ele almışlardır. Çalışmada, RIS destekli iletişim sistemlerinin kapsama alanını genişletme, spektral verimliliği artırma ve enerji verimliliği sağlama konusundaki avantajları literatür çerçevesinde değerlendirilmiştir. (Huang vd., 2022)'de, RIS destekli iletişim sistemleri için kanal ölçümleri, kanal özellikleri ve kanal modelleme yaklaşımları ayrıntılı olarak incelenmiş; büyük ölçekli yayılım kaybı ve küçük ölçekli sönmüleme olguları sistematik bir şekilde araştırılmıştır. Ancak çalışma ideal varsayımlara dayanmakta olup, donanım etkileri ve gerçekçi çok yönlü ortamlar yeterince ele alınmamıştır. (Xu vd., 2021) çalışmasında, eş zamanlı olarak iletim ve yansıtma yapabilen bir eş zamanlı iletim ve yansıtma yapan yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzey yapısı önerilmiş; ayrıca hem yakın hem de uzak alanlar için genel donanım ve kanal modelleri geliştirilmiştir. Analitik olarak kesinti olasılığı ve çeşitlilik kazancı incelenmiş; klasik RIS'e kıyasla her iki tarafta da daha yüksek çeşitlilik ve daha geniş kapsama alanı sağladığı gösterilmiş ve sonuçlar simülasyonlarla doğrulanmıştır. (Aubry vd., 2021) çalışmasında, görüş hattının bulunmadığı radar gözetim senaryolarında RIS kullanımı önerilmiş ve radar-RIS-hedef arasında çift yönlü,

iki aşamalı bir kanal yapısı modellenmiştir. RIS etkisini içeren yeni bir radar denklemi türetilmiş; SGO ve sinyal-karışıklık oranı ifadeleri elde edilmiş; yüzey ve hacimsel karışıklık koşulları analiz edilmiş; ayrıca menzil, Doppler çözünürlüğü ve veri edinme süreci ele alınmıştır. (Moustakas vd., 2023), çoklu RIS yapıları ve çok antenli alıcı-vericiler içeren iletişim sistemlerindeki karşılıklı bilgi miktarının istatistiksel analizini sunmuştur. Büyük sistem sınırı dikkate alınarak, rastgele matris teorisi ve istatistiksel fizik yöntemlerinin uygulanmasıyla ergodik kapasite ve varyansa ilişkin asimptotik formülasyonlar elde edilmiştir. (Zhang vd., 2022), kablosuz algılama ve konumlandırma mekanizmalarının hassasiyetini artırmada RIS destekli iletişimin rolünü araştırmıştır. Meta algılama ve Meta radar yaklaşımları kullanılarak farklı senaryolarda performans iyileştirmeleri analiz edilmiştir. (Lin vd., 2021) çalışmasında, RIS tabanlı bir sistemde hem pasif hüzmeye şekillendirmeye hem de RIS'in kendi bilgisinin iletilmesine olanak tanıyan, yansıma deseni modülasyonu adlı yeni bir yöntem önerilmiştir. Çalışmada, çok antenli bir erişim noktası ile tek antenli bir kullanıcı arasındaki sistem için RIS elemanlarının AÇIK/KAPALI kombinasyonları kullanılarak ek bilgi iletimi sağlanmış ve eş zamanlı olarak alınan sinyal gücü artırılmıştır. Son olarak, (Araghi vd., 2022) çalışmasında, 3.5 GHz merkez frekansında çalışan, 2430 birim hücreden oluşan ve varaktör diyotlarla yeniden yapılandırılabilen bir RIS tasarlanmış, üretilmiş ve gerçek bir ortamda test edilmiştir. Bu çalışmada; elektromanyetik tasarım ilkeleri, eşdeğer devre modeli, birim hücre faz-genlik karakterizasyonu ve özel bir kontrol devresi ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Bununla birlikte; sistem düzeyinde ağ optimizasyonu, çok kullanıcı senaryoları, dinamik kanal kestirimi, geniş bant performans analizi, dış ortam/uzun menzilli saha testleri ve üst katman (MAC/ağ) entegrasyonu gibi konular bu çalışmada ele alınmamış olup gelecekteki araştırmalara bırakılmıştır.

Literatür incelemesi, özellikle doğrudan görüş hattının tamamen engellendiği senaryolarda, iletişimin sürdürülebileceği sistem parametrelerinin ve başarılı bir iletişim için gerekli koşulların yeterince incelenmediğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle çalışma, görüş hattı bağlantısının tamamen kesildiği bir senaryoyu ele almakta ve iki ışınlı yayılım modelini bir RIS yapısıyla bütünleştiren deterministik bir sistem modeli oluşturmaktadır. Bu yaklaşım çerçevesinde; başarılı bir iletişimin hangi koşullarda sağlanabileceğini belirlemek amacıyla, farklı yeniden yapılandırılabilir meta-yüzey sayıları, iletim mesafeleri ve sistem parametreleri için SGO analizi gerçekleştirilmektedir. Bu yönüyle çalışma, RIS destekli sistemlerde kapsama sınırlarının ve performans koşullarının belirlenmesine dair önemli bilgiler sunmaktadır.

3. SİSTEM MODELİ

Bu çalışma, iki ışınlı yayılım modeline dayalı bir sistem senaryosunu ele almaktadır. Elde edilen sistem modeli Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1: Sistem modeli

Ele alınan modele göre, alınan sinyal $r(t)$, doğrudan görüş hattı bileşeni ile yansıyan bileşenin toplamından oluşmaktadır. Bu durum Denklem 1 ile ifade edilmektedir.

$$r(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \left(\frac{e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda}}}{d} + \frac{Re^{-j\frac{2\pi(r_1+r_2)}{\lambda}}}{r_1+r_2} \right) x(t) \quad (1)$$

Burada λ dalga boyunu, d doğrudan yol mesafesini, R yansıma katsayısını; r_1 ve r_2 ise sırasıyla verici–RIS ve RIS–alıcı arasındaki mesafeleri temsil etmektedir. Bu çalışmada kullanılan senaryoda, engellerin (ağaçların) varlığı nedeniyle doğrudan görüş hattı bileşeni mevcut değildir. Dolayısıyla alınan sinyal yalnızca yansıyan bileşenden oluşmakta ve matematiksel olarak Denklem 2'deki gibi ifade edilebilir.

$$r(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \left(\frac{Re^{-j\frac{2\pi(r_1+r_2)}{\lambda}}}{r_1+r_2} \right) x(t) \quad (2)$$

Yukarıdaki analiz doğrultusunda, alınan sinyal gücü P_t , Denklem 3'teki gibi ifade edilebilir.

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{Re^{-j\phi}}{r_1+r_2} \right|^2 \quad (3)$$

Burada $\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(r_1 + r_2)$ olup R, yansıma katsayısını ifade etmektedir. RIS'in N adet yeniden yapılandırılabilir meta-yüzey elemanından oluşması durumunda, ifade aşağıdaki biçimde yazılabilir:

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \sum_{i=1}^N \frac{R_i e^{-j\phi_i}}{r_{1,i}+r_{2,i}} \right|^2 \quad (4)$$

Burada $\phi_i = \frac{2\pi}{\lambda}(r_{1,i} + r_{2,i})$ ve R_i , i'inci yeniden yapılandırılabilir meta yüzey elemanının yansıma katsayısıdır. Yansıma katsayılarının optimize edilmemesi durumunda, alınan sinyal gücü önemli ölçüde dalgalanabilir. Bu nedenle her bir R_i katsayısının, N meta-yüzey elemanından yansıyan sinyalin fazı doğrudan görüş hattı bileşeninin fazıyla uyumlu olacak şekilde en uygun biçimde ayarlandığı varsayılmaktadır; başka bir ifadeyle $R_i = e^{j\phi_i}$ kabul edilmektedir. Her bir eleman için $r_{1,i} + r_{2,i} \approx d$ olduğu durumda P_r , Denklem 5'teki gibi ifade edilir (Basar vd., 2019).

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{N}{d} \right|^2 \quad (5)$$

Sistemin SGO değeri, Denklem 6'daki gibi ifade edilebilir.

$$SGO(dB) = P_r(dB) - P_g(dB) \quad (6)$$

Denklem 7'de P_g gürültü gücünü temsil etmekte olup Denklem 7'deki gibi ifade edilebilir.

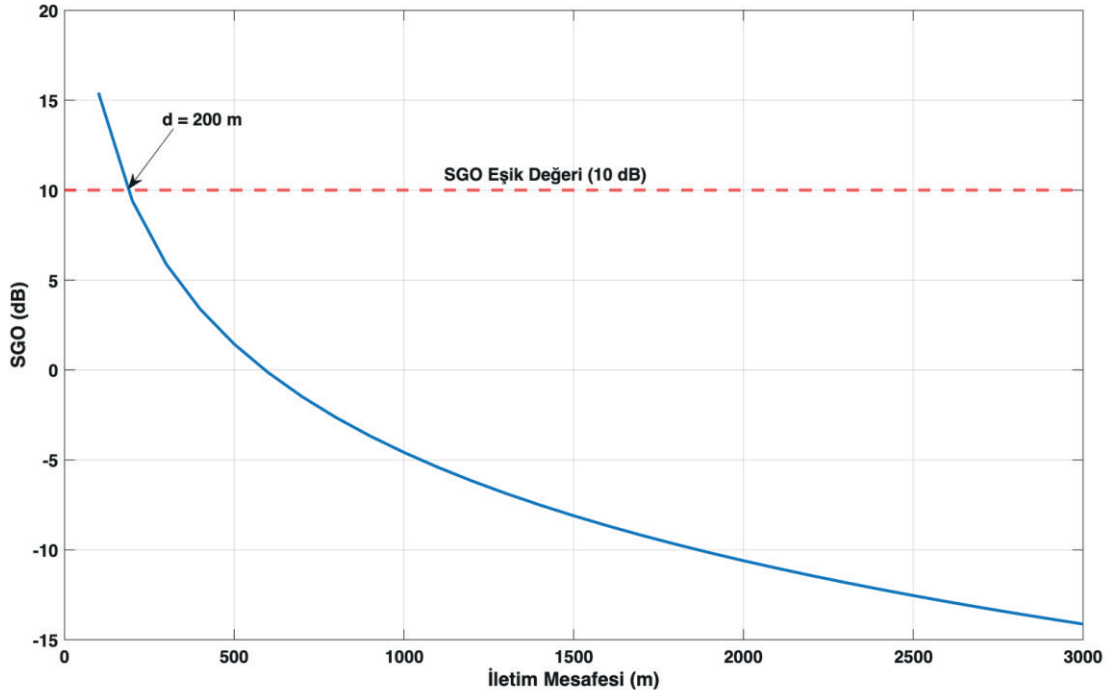
$$P_g(dBm) = 10 \times \log_{10}(1000kTB) \quad (7)$$

Denklem 7'de k Boltzmann sabitini ($1,3801 \times 10^{-23}$ J/K), T sıcaklığı (K) ve B ise bant genişliğini (Hz) göstermektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

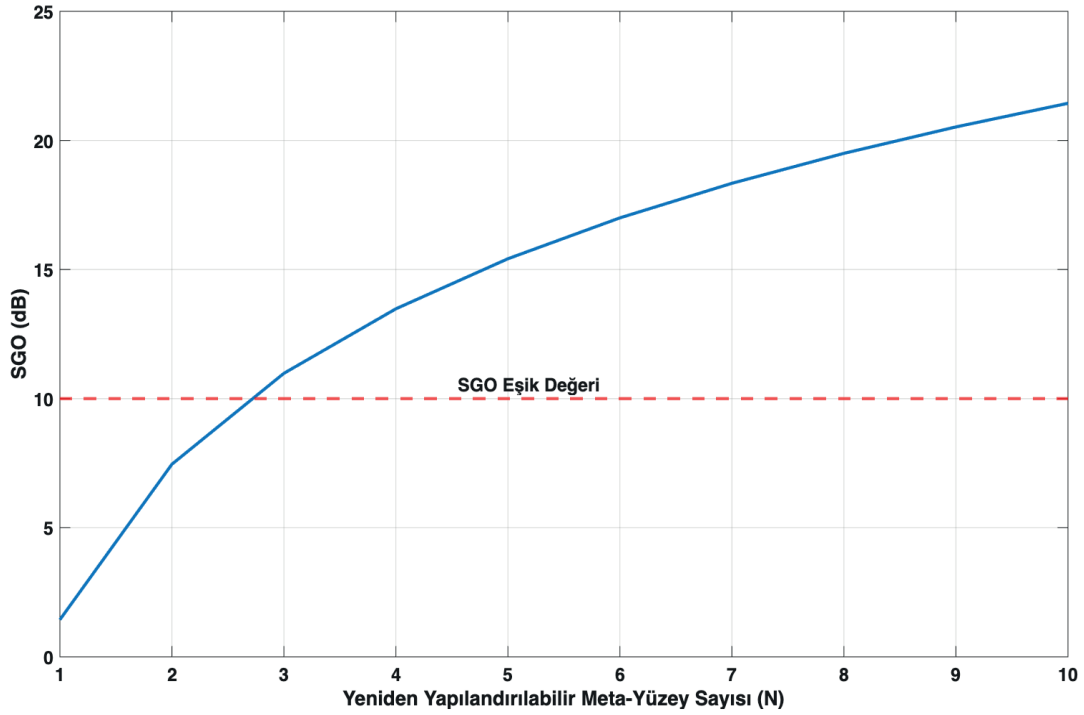
Bu bölümde, oluşturulan sistemin performansı, farklı iletim mesafeleri ve N adet yeniden yapılandırılabilir meta-yüzey koşulları altında analiz edilmektedir. Özellikle, baz istasyonu ile kullanıcı ekipmanı arasındaki SGO'nun mesafeye bağlı değişimi incelenmekte ve RIS destekli iletişimin sağladığı kazanımlar ortaya konulmaktadır. Farklı iletim mesafelerinde başarılı bir iletişimi sürdürmek için gereken minimum N sayısı belirlenmektedir. Başarılı bir iletişim için

gereken minimum SGO değeri 10 dB olarak kabul edilebilir (Saeed vd., 2020). Gereken minimum N sayısının analizi için Denklem 5, Denklem 6 ve Denklem 7 kullanılmıştır. Sistemin çalışma frekansı 10 GHz olarak seçilmiş ve iletim gücü $P_t = 0.25$ W olarak belirlenmiştir. $N=1$ durumu için sistemin SGO değerlerinin iletim mesafesine göre değişimi Şekil 2'de gösterilmektedir.



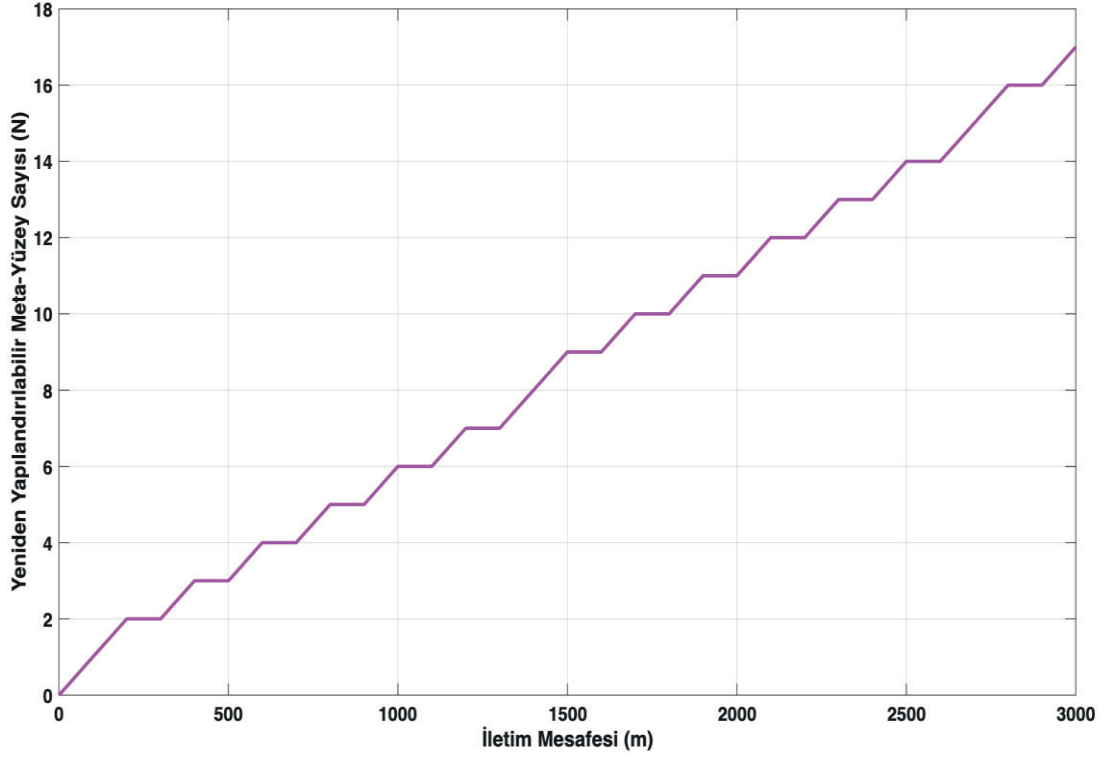
Şekil 2: Sistemin SGO değerlerinin iletim mesafesiyle değişimi ($N=1$, $f=10$ GHz)

Şekil 2, iletim mesafesi arttıkça SGO'nun nasıl değiştiğini göstermektedir. Eğri, mesafe arttıkça SGO'nun hızla düştüğünü ortaya koymakta olup, grafikte kırmızı kesikli çizgiyle belirtilen 10 dB'lik eşik değeri, başarılı bir iletişim için gereken minimum SGO seviyesini temsil etmektedir. Yaklaşık 200 metreye kadar sistem bu eşik değerinin üzerinde kalarak başarılı iletişime olanak tanımaktadır; ancak bu mesafeden sonra SGO hızla negatif değerlere düşmekte ve iletişim kalitesini ciddi ölçüde bozmaktadır. Sonuçlar, 200 metrelik bir iletim mesafesinden sonra N değerinin artırılması gerektiğini göstermektedir. Şekil 2, 500 metrelik iletim mesafesinde SGO değerinin başarılı bir iletişim için yetersiz olduğunu ortaya koymaktadır. Bu mesafe için farklı N değerlerinde sistemin SGO performansı Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3: Yeniden yapılandırılabilir meta-yüzey sayısına göre sistemin SGO değerlerinin değişimi ($d=500$ m, $f=10$ GHz)

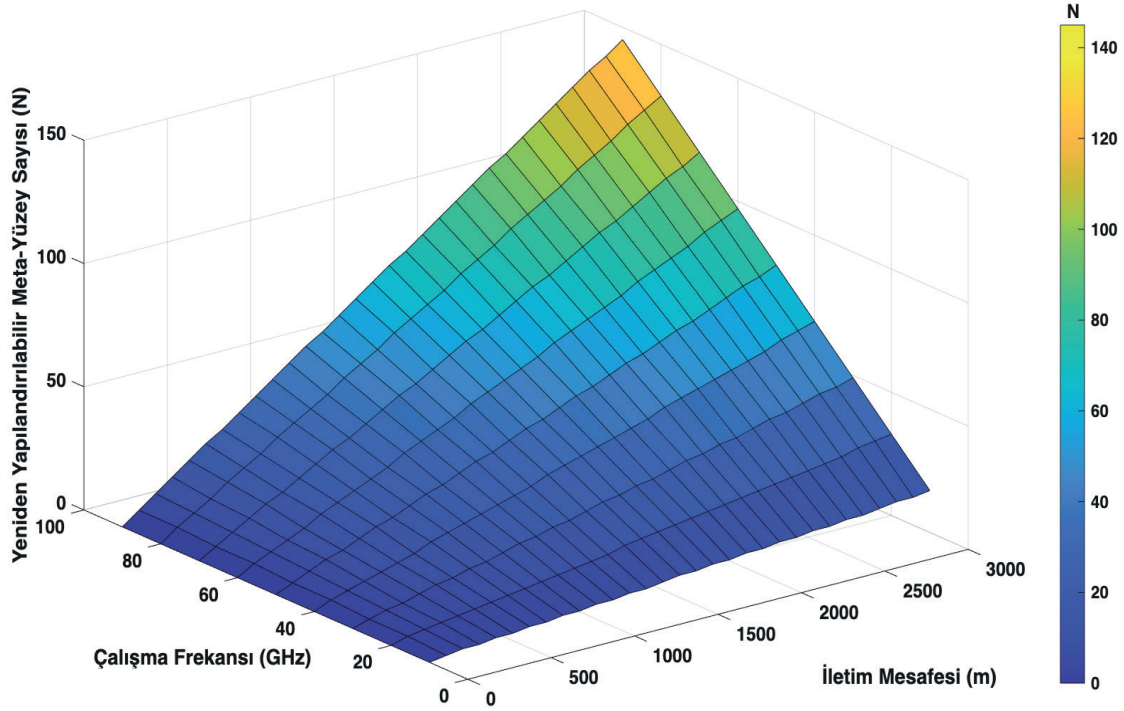
Şekil 3, yeniden yapılandırılabilir meta-yüzey sayısının sistemin SGO performansı üzerindeki etkisini göstermektedir. Sonuçlar, RIS elemanı sayısı arttıkça SGO değerinin önemli ölçüde yükseldiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca sonuçlar, başarılı bir iletişim için eşik değer olarak tanımlanan 10 dB seviyesine, $N=3$ RIS elemanı ile ulaşılabileceğini göstermektedir. Bu durum, özellikle sinyal yolunun engellendiği veya yayılım kaybının yüksek olduğu iletişim senaryolarında, RIS kullanımının sistem performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini kanıtlamaktadır. Bununla birlikte, iletişim sistemlerinde donanım karmaşıklığının ve enerji tüketiminin gereksiz yere artmasını önlemek adına, farklı iletim mesafeleri için gerekli ve yeterli RIS elemanı sayısının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu yaklaşım, gereksiz RIS elemanı kullanımının önüne geçerek daha verimli kaynak kullanımına ve optimum sistem tasarımına olanak tanır. Çeşitli iletim mesafelerinde kesintisiz ve başarılı bir iletişimi sürdürmek için gereken RIS elemanı sayısı Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4: Farklı iletim mesafelerinde ihtiyaç duyulan yeniden yapılandırılabilir meta-yüzeylerin sayısı ($f=10$ GHz)

Şekil 4'teki analiz, başarılı bir iletişim için gerekli olan minimum SGO değerini (10 dB) korumak amacıyla, iletim mesafesine bağlı olarak ihtiyaç duyulan yeniden yapılandırılabilir meta-yüzey sayısını ortaya koymaktadır. Daha uzun iletişim mesafelerinin daha fazla sayıda RIS elemanı gerektirdiği ve bunun da sistem tasarımında kapsama alanı ile karmaşıklık arasında bir denge kurulmasına olanak tanıdığı gözlemlenmiştir. Bu durum, gereksiz donanım kullanımını önlemekte ve RIS boyutlandırmasının en uygun şekilde yapılmasını sağlamaktadır.

İleri bir çalışma olarak, çalışma frekansının sonuçlar üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, farklı iletim mesafeleri ve çalışma frekanslarında başarılı bir iletişim sağlamak için gereken yeniden yapılandırılabilir meta-yüzey sayısındaki değişim Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5: Farklı çalışma frekansları ve iletim mesafelerinde ihtiyaç duyulan yeniden yapılandırılabilir meta-yüzeylerin sayısı

Şekil 5, iletim mesafesi ve çalışma frekansına bağlı olarak, başarılı bir iletişimi sürdürmek için gereken yeniden yapılandırılabilir meta-yüzey sayısındaki üç boyutlu değişimi göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, gereken RIS elemanı sayısının, iletim mesafesi ve çalışma frekansının artmasıyla birlikte önemli ölçüde arttığını ortaya koymaktadır. Özellikle uzun mesafelerde ve yüksek frekans bölgelerinde, artan serbest uzay yayılım kayıpları nedeniyle, sistem performansını korumak için daha fazla sayıda RIS elemanına ihtiyaç duyulmaktadır. Buna karşılık, kısa mesafelerde ve düşük frekanslarda, daha sınırlı sayıda meta-yüzey elemanı ile yeterli iletişim performansının sağlanabildiği gözlemlenmiştir. Bu durum, çalışma frekansı ve iletim mesafesi parametrelerinin RIS destekli iletişim sistemlerinde gereken yüzey boyutunu ve donanım karmaşıklığını doğrudan etkilediğini göstermekte; ayrıca, özellikle yeni nesil yüksek frekanslı kablosuz iletişim sistemlerinin tasarımında, uygun RIS elemanı sayısının belirlenmesinin kritik bir optimizasyon problemi olduğunu ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışma, iki ışınlı yayılım modeline dayalı RIS özellikli kablosuz iletişim sistemlerinin mesafeye bağlı SGO performansını araştırmaktadır. Görüş hattının engellendiği senaryolarda RIS kullanımının alınan sinyal gücü ve iletişim performansı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, iletim mesafesi arttıkça SGO performansının kötüleştiğini, buna karşılık RIS eleman sayısının artırılmasının tutarlı sinyal birleştirme yoluyla alınan sinyal gücünü önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Ayrıca, farklı iletim mesafeleri ve çalışma frekanslarında başarılı iletişimi sürdürmek için gereken minimum RIS eleman sayısı değerlendirilmiş ve sistem tasarımı için önemli çıkarımlar elde edilmiştir. Sonuçlar, RIS teknolojisinin özellikle yüksek frekanslı yeni nesil kablosuz iletişim sistemlerinde kapsama alanını genişletme ve yayılım kayıplarını azaltma konusunda önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Bu çalışma ayrıca, gelecekteki RIS özellikli iletişim sistemleri için daha uygun maliyetli ve enerji verimli mimarilerin tasarımına da katkıda bulunacaktır. Mobil kullanıcı senaryolarının ve çok kullanıcıli iletişim yapılarının kullanımı, ayrıca girişim yönetimi ve enerji tüketimi gibi parametrelerin dahil edilmesi gelecekteki araştırma konularıdır.

KAYNAKLAR

- Araghi, A., Khalily, M., Safaei, M., Bagheri, A., Singh, V., Wang, F., & Tafazolli, R. (2022). Reconfigurable intelligent surface (RIS) in the sub-6 GHz band: Design, implementation, and real-world demonstration. *IEEE Access*, 10, 2646–2655.
- Aubry, A., De Maio, A., & Rosamilia, M. (2021). Reconfigurable intelligent surfaces for N-LOS radar surveillance. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(10), 10735–10749.
- Basar, E., Di Renzo, M., de Rosny, J., Debbah, M., Alouini, M.-S., & Zhang, R. (2019). Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces. *IEEE Access*, 7, 116753–116773.
- ElMossallamy, M. A., Zhang, H., Song, L., Seddik, K. G., Han, Z., & Li, G. Y. (2020). Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: Principles, challenges, and opportunities. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 6(3), 990–1002.
- Feng, Y., Hu, Q., Qu, K., Yang, W., Zheng, Y., & Chen, K. (2023). Reconfigurable intelligent surfaces: Design, implementation, and practical demonstration. *Electromagnetic Science*, 1(2), 1-21.
- He, Q., Sun, S., & Zhou, L. (2019). Tunable/Reconfigurable Metasurfaces: Physics and Applications. *Research*, 2019, 1-16.
- Huang, J., Wang, C.-X., Sun, Y., Feng, R., Huang, J., Guo, B., Zhong, Z., & Cui, T. J. (2022). Reconfigurable intelligent surfaces: Channel characterization and modeling. *Proceedings of the IEEE*, 110(9), 1290–1311.
- Körpe, E., Akkaş, M. A., & Öztürk, Y. (2025). Latency and power optimization in terahertz UAV-assisted vehicular networks across diverse atmospheric profile conditions. *Telecommunication Systems*, 88, 1–25.
- Lin, S., Zheng, B., Alexandropoulos, G. C., Wen, M., Di Renzo, M., & Chen, F. (2021). Reconfigurable intelligent surfaces with reflection pattern modulation: Beamforming design and performance analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20(2), 741–755.

- Liu, Y., Liu, X., Mu, X., Hou, T., Xu, J., Di Renzo, M., & Al-Dhahir, N. (2021). Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(3), 1546–1577.
- Moustakas, A. L., Alexandropoulos, G. C., & Debbah, M. (2023). Reconfigurable intelligent surfaces and capacity optimization: A large system analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 22(12), 8736–8750.
- Pan, C., Ren, H., Wang, K., Kolb, J. F., El Kashlan, M., Chen, M., Di Renzo, M., Hao, Y., Wang, J., Swindlehurst, A. L., You, X., & Hanzo, L. (2021). Reconfigurable intelligent surfaces for 6G systems: Principles, applications, and research directions. *IEEE Communications Magazine*, 59(6), 14–20.
- Saeed, A., Gurbuz, O., & Akkas, M. A. (2020). Terahertz communications at various atmospheric altitudes. *Physical Communication*, 41, 1–15.
- Tang, W., Chen, M. Z., Chen, X., Dai, J. Y., Han, Y., Di Renzo, M., Zeng, Y., Jin, S., Cheng, Q., & Cui, T. J. (2021). Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: Path loss modeling and experimental measurement. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20(1), 421–439.
- Xu, J., Liu, Y., Mu, X., & Dobre, O. A. (2021). STAR-RISs: Simultaneous transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surfaces. *IEEE Communications Letters*, 25(9), 3134–3138.
- Yuan, X., Zhang, Y.-J. A., Shi, Y., Yan, W., & Liu, H. (2021). Reconfigurable-intelligent-surface empowered wireless communications: Challenges and opportunities. *IEEE Wireless Communications*, 28(2), 136–143.
- Zhang, H., Di, B., Bian, K., Han, Z., Poor, H. V., & Song, L. (2022). Toward ubiquitous sensing and localization with reconfigurable intelligent surfaces. *Proceedings of the IEEE*, 110(9), 1401–1422.

BÖLÜM 7

METAMALZEMELER: TEMEL KAVRAMLAR, ÖZELLİKLERİ VE UYGULAMA ALANLARI

Hamdullah ÖZTÜRK¹

¹ Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye ORCID: 0000-0001-8475-5731 E-mail: hamdullah.ozturk@gibtu.edu.tr

Giriş

Metamalzemeler, kendilerini oluşturan malzemelerin doğal özelliklerinin ötesinde özellikler sergileyen, nano ölçekten makro ölçeğe kadar uzanan ve hassas biçimde tasarlanmış yapısal düzenlemelerden oluşan (“Rising Complexity,” 2025), tasarlanmış birim hücrelerin geometrisinin ve düzenlenişinin, doğal malzemelerde bulunmayan etkin özelliklerin ortaya çıkmasını sağladığı, yapay olarak geliştirilmiş sistemlerdir (Shen et al., 2025).

Metamalzeme kavramının temelleri, Sovyet bilim insanı Victor Veselago’nun negatif kırılma indisine sahip malzemelerin var olabileceği ile ilgili ileri sürdüğü düşünce deneyine dayanmaktadır. Kırılma indisi, malzemelerin temel optik özelliklerden biridir. Kırılma indisinin geleneksel malzemelerde pozitif değerleri aldığı ifade edilirken, doğada bulunan malzemelerde negatif kırılma indisinin olmadığı belirtilmektedir. Bu yüzden negatif kırılma indisi özelliklerini içeren bir malzemenin varlığının ve bu malzemeyle ilgili yeni fiziksel olayların deneysel olarak gözlenmesi ve doğrulanmasının mümkün olmadığı ifade edilmiştir (Sun et al., 2025). 20. yüzyılın sonlarında İngiliz bilim insanı John B. Pendry tarafından, sırasıyla negatif etkin elektriksel geçirgenlik (ϵ) ve negatif etkin manyetik geçirgenlik (μ) elde edilmesini sağlayabilecek metal tel dizileri (Pendry et al., 1998) ve yarıklı halka rezonatörlerinden (Pendry et al., 1999) oluşan yapay yapıların teorik tasarımları yapılmıştır. Daha sonraki süreçte Amerikalı bilim insanı David R. Smith tarafından bu iki yapının birim hücre içerisinde bir araya getirilmesi sonucunda negatif kırılma indisi özelliğini kapsayan malzemeler geliştirilmiştir ve negatif kırılma olgusu ilk kez deneysel olarak başarıyla tespit edilmiştir (Smith et al., 2000; Shelby et al., 2001; Sun et al., 2025).

Genel olarak elmas ve cam gibi doğal malzemelerin, pozitif kırılma indisi, manyetik geçirgenlik ve elektriksel geçirgenlik gibi değerleri bulunmaktadır. Öte yandan metamalzemeler, negatif kırılma indisi (Smith et al., 2004; Suzuki et al., 2018), negatif elektriksel geçirgenlik (Lorduy et al., 2020; Stuart 2007) ve negatif manyetik geçirgenlik (Chen et al., 2022; Eason et al., 2011) gibi özellikler göstermektedir. Metamalzemeler, negatif kırılma indisi ve beraberinde negatif elektriksel ve manyetik geçirgenlik değerlerine sahip malzemelere ek olarak, yüksek düzeyde negatif ısı genleşme, düzlem içi sıfıra yakın ısı genleşme, yüksek Poisson oranı ya da tersine dönmüş makroskobik mıknatıslanma gibi özellikler içeren farklı mühendislik ürünü malzemeleri bünyesinde barındırmaktadır (Lu et al., 2022). Literatürde bu malzemeler farklı terimlerle ifade edilmekte olup, sol elli (left-handed, LH) malzemeler, geri yönlü dalga (backward-wave, BW) ortamları, negatif indisli malzemeler (negative-index

materials, NIMs) ve çift negatif (double-negative, DNG) ortamlar şeklinde sıralanabilir (Suresh et al., 2021; Matei et al., 2025).

Metamalzemeler, kontrol edilmesi hedeflenen fiziksel özellik ve işlevlerine göre farklı alt gruplarda incelenmektedir. Bu alt gruplar şu şekilde sıralanabilir; elektromanyetik, mekanik, akustik ve termal metamalzemeler (Yeswanth et al., 2026). Elektromanyetik metamalzemeler, yapay olarak tasarlanmış olup genellikle periyodik veya yarı periyodik biçimde düzenlenmiş birim hücrelerden oluşmaktadırlar. Bu birim hücrelerin geometrik şekli, boyutu ve uzamsal düzeni değiştirilerek elektromanyetik metamalzemelerin, elektromanyetik yanıtı ayarlanabilmektedir. Bu sayede elektromanyetik dalgaların ışıınımı, saçılması ve yayılımı ihtiyaca göre kontrol edilebilmektedir (You et al., 2023). Mekanik metamalzelerin negatif Poisson oranı, ayarlanabilir rijitlik ve yüksek dayanım/ağırlık oranı gibi özgün mekanik davranışlar sergileme gibi özellikleri bulunmaktadır (Aghamiri et al., 2025). Akustik metamalzemeler, dalga boyundan daha küçük ölçekli birimlerden oluşmaktadır. Bu malzemeler yapay olarak yapılandırılmış malzemelerdir ve dalgaların yayılımını kontrol etmektedir (Lee et al., 2025). Termal metamalzemeler, anizotropi, uzamsal heterojenlik veya yapısal tasarım gibi mekanizmalar sayesinde ısı akışını konvansiyonel malzemelere kıyasla daha etkin biçimde kontrol edilmesini sağlamaktadır. Bu yapay malzemelerin tasarımı özel ısıl yönetim özelliklerine dayanmaktadır. Bu dört farklı alt grup malzemeler, farklı fiziksel özellikleri ve işlevleri temelinde barındırmakla birlikte, metamalzeme kavramının ortak tasarım ilkeleri çerçevesinde değerlendirilen alt kategorilerindendir (Yeswanth et al., 2026).

Metamalzemelerin Yapısal Özellikleri ve Tasarım İlkeleri

Metamalzeme, doğal malzemelerde bulunmayan özgün ve istenen özellikleri elde etmek amacıyla, çoğunlukla periyodik bir düzende bir araya getirilen çok sayıda mikro yapıdan oluşan yapısal bir bütün olarak tanımlanmaktadır. Mikro yapı, belirli bir düzen içerisinde bir araya getirilen çok sayıda birim hücreden oluşan ve bu düzenlenişten kaynaklanan daha karmaşık özelliklerin ortaya çıkmasını sağlayan yapısal bir bütün olup bu yapıların organizasyonu ise makroskobik ölçekte özgün fiziksel özellikler sergileyen metamalzeme sistemlerini oluşturmaktadır (Lee et al., 2024). Bu özellikler, metamalzemeyi oluşturan malzemelerin içsel özelliklerinden çoğunlukla farklı olmakla birlikte, mikro yapının tasarımı ve optimizasyonu aracılığıyla istenen biçimde kontrol edilebilmektedir (Lee et al., 2024). Metamalzemeler, iç mikro mimarilerinin uygun biçimde tasarlanması yoluyla çeşitli alışılmadık fiziksel özellikler sergileyecek şekilde geliştirilebilmektedir (Ma et al., 2025).

Metamalzemelerin yapısal mimarileri, periodik, periyodik olmayan ve daha stokastik geometrik organizasyonları da kapsamakta olup farklı fiziksel davranışların elde edilmesine imkân tanımaktadır (Lee et al., 2024). Metamalzemelerin tasarımında temel maksat, hedeflenen makroskobik özelliklerin ortaya çıkmasını mümkün kılacak küçük ölçekli yapısal mimarilerin iyileştirilmesine olanak sağlamaktır. Bu tasarım yaklaşımları, tasarımı gerçekleştirilen mikro mimariler ile makroskobik özellikler arasındaki ilişkinin ortaya konması için ileri yönlü hesaplamalı modellerin kullanıldığı parametrik çalışmalar yapılarak desteklenmektedir. Bu sebeple, tasarım sürecinin başlangıcında olası mikro-mimarilerin belirli parametreler ile tanımlanması ve böylece tasarım seçeneklerinin sınırlandırılması önem arz etmektedir (Zadpoor et al., 2023).

Metamalzemeler, doğal malzemelerde veya geleneksel kompozit malzemelerde bulunmayan sıra dışı fiziksel özellikleri elde etmek üzere tasarlanırlar. Yapay malzemeler olarak tanımlanan bu yapıların işlevselliği, yapısal birimlerinin kolektif davranışına dayanır. Sahip olduğu bu özellikler dikkate alındığında, bu malzemeler yayılan dalgaları ve madde taşınımını kontrol etmek ve bu benzersiz yeteneklere ve potansiyel uygulamalara sahip yeni cihazların geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yapay yapıların, elektromanyetik dalgalar ve elastik dalgaların yanı sıra moleküller ve parçacıkların daha önce benzeri görülmemiş biçimde kontrol edilmesine olanak sağlayan alışılmadık malzeme özellikleri sergilediği son yıllarda ortaya konmuştur (Holliman et al., 2022).

Metamalzemelerin ve çok ölçekli yapıların tasarımı sırasında bazı parametrelere dikkat edilmelidir. Örneğin; yapısal parametreler ile hedeflenen fiziksel özellikler arasındaki karmaşık ilişki incelenmelidir. Bu süreçte geniş bir tasarım uzayının araştırılması beraberinde bazı güçlüklerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu güçlükler şu şekilde sıralanabilir; mikro yapıların farklı ölçeklerdeki etkin özelliklerle ilişkilendirilmesi, optimizasyon sırasında çok sayıda yerel optimumla karşılaşılması ve analitik gradyan bilgilerinin elde edilememesi. Bununla birlikte, malzeme özelliklerinin veya sistem performansının değerlendirilmesi yüksek maliyete sebep olmaktadır (Lee et al., 2024).

Metamalzemelerin Üretim Metodları

İşlevsel özelliklerinin korunabilmesi için birim hücre geometrilerinin farklı ölçeklerde yüksek geometrik doğrulukla yeniden üretilebilmesi, metamalzemelerin üretimindeki temel gerekliliklerden biridir. Metamalzemelerin üretimi sırasında önemli zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu zorluklardan başlıcaları bu malzemelerin karmaşık iç yapıları, yüksek hassasiyet gereksinimleri ve kendilerine özgü yapısal özellikleridir (Subeshan et al., 2025).

Eklemeli imalat teknolojisinin, karmaşık yapıların üretiminde sağladığı önemli avantajlar bulunmaktadır. Bu avantajlar sayesinde eklemeli imalat teknolojisi, metamalzeme örneklerinin oluşturulmasında ve deneysel olarak doğrulanmasında daha doğrudan ve verimli bir metot sunmaktadır (Fan et al., 2021). Diallo ve ark. iki farklı yöntemle atıf yapmış olup bunlarda ilki, yukarıdan aşağıya (top-down) olan yöntem; daha büyük hacimli malzemelerin küçük bileşenlere dönüştürülmesi yoluyla istenen mikro veya nano ölçekli yapıların oluşturulmasını sağlayan üretim yaklaşımını tanımlamaktadır. İkinci yöntem ise aşağıdan yukarıya (bottom-up) olan yöntemdir. Bu yöntemde ise atomik ve moleküllerin yapı taşlarının çeşitli fiziksel ve kimyasal süreçlerle bir araya getirilerek istenen yapıların oluşturulmasına dayanmaktadır (Diallo et al., 2026). Geleneksel litografi, malzeme ekstrüzyonu, haznede fotopolimerizasyon, toz yatağında ergitme, çok fotonlu polimerizasyon, mürekkep püskürtmeli üç boyutlu baskı, aerosol püskürtmeli baskı, elektron demetiyle ergitme, bağlayıcı püskürtme, yönlendirilmiş enerji biriktirme, metamalzemelerin üretiminde kullanılan çeşitli diğer yöntemlerdir (Subeshan et al., 2025).

Metamalzeme üretiminde eklemeli imalat teknolojilerinin yaygın kullanımını engelleyen güçlükler, önemli ilerlemeler kat edilmiş olmasına rağmen devam etmektedir. Bunlar arasında, özellikle optik frekanslarda metamalzemelerin performansı açısından kritik öneme sahip olan üretim çözünürlüğü ve hassasiyetindeki sınırlılıklar yer almaktadır. Bununla birlikte elektromanyetik, mekanik veya termal özelliklere sahip uyumlu malzeme seçeneklerinin kısıtlı olması da önemli bir engel olmaya devam etmekte ve laboratuvar ölçeğindeki prototiplerden endüstriyel uygulamalara geçişin gerçekleştirilebilmesi için seri üretimde ölçeklenebilirliğe ilişkin sorunların ve çoğu zaman karmaşık ve zaman alıcı son işlem aşamalarına duyulan gereksinimin giderilmesi önem arz etmektedir (Subeshan et al., 2025).

Metamalzemelerin Uygulama Alanları

Metamalzemeler, haberleşme ve görüntüleme teknolojilerinden gürültü ve titreşim kontrolüne, darbe koruma sistemlerinden ısı yönetimine birçok farklı uygulama alanında tercih edilmektedir (Diallo et al., 2026; Boafu et al., 2025). Elektromanyetik metamalzemeler, anten performansının iyileştirilmesi, elektromanyetik görünmezlik teknolojilerinin geliştirilmesi ve kırımın sınırının ötesinde yüksek çözünürlüklü görüntüleme uygulamalarında ön plana çıkmaktadır (Diallo et al., 2026). Akustik metamalzemeler, enerji verimliliği, gürültünün azaltılması, malzeme dayanımı ve kullanım ömrüne ilişkin ortaya çıkan gereksinimlerin karşılanmasında gelecek vadetmektedir (Boafu et al., 2025). Mekanik metamalzemelerin, farklı

frekanslardaki elastik dalgaların yayılımını kontrol etme ve bu dalgaları sönümleme karakteristikleri bulunmaktadır. Bu sayede bu metamalzemeler sismik yalıtım (Brûlé et al., 2014; Miniaci et al., 2016), gürültünün azaltılması (Martínez et al., 1995), dalga boyunun altındaki ölçeklerde görüntüleme (Molerón et al., 2015) ve ısı yönetim (Gorishnyy et al., 2005) gibi birçok farklı uygulama alanlarında tercih edilmektedir (Krushynska et al., 2017). Mekanik metamalzemeler, darbe enerjisinin soğurulması, koruyucu yapıların geliştirilmesi ve hafif mühendislik bileşenlerinin tasarlanmasında kullanılmak üzere araştırılmaktadır (Ma et al., 2025; Boafu et al., 2025). Termal metamalzemeler, elektronik sistemlerde ısı yönetimi, ısı akışının yönlendirilmesi ve termal kamuflaj gibi birçok farklı uygulama alanında değerlendirilmektedir (Diallo et al., 2026). Metamalzemelerin gelişmekte olan uygulama alanları arasında ise, biyomedikal alanda mekanik özellikleri ayarlanabilen implantlar, doku mühendisliği iskeleleri ve uyarlanabilir tıbbi cihazlar yer almaktadır (Boafu et al., 2025; Guo et al., 2026).

Metamalzemelerin Mevcut Sınırlılıkları ve Gelecek Perspektifleri

Metamalzemeler üzerine yürütülen araştırma verileri ile, bunların teknik uygulamalara aktarılması arasındaki boşluğun giderilmesi için büyük bir çaba gerekmektedir. Yapılan birçok birim hücre tasarımı, iç yapılarından kaynaklanan karmaşık özelliklere sahip olmakla birlikte, bu tür malzemelerin metreküp ölçeğinde üretimi kapsamlı bir şekilde ele alınmamıştır (Fischer et al., 2020). Bununla beraber, bu uygulamaların sağladığı olanaklardan henüz yeterince faydalanılmamış olup metamalzemelere yönelik pazar kayda değer bir şekilde büyümemiştir. Bu durumun olası sebebi, metamalzemelerin kusursuz şekilde üretilmesine olanak sağlayan kolay uygulanabilir ve ekonomik bir üretim metodunun henüz geliştirilememiş olmasıdır (Paul et al., 2025).

Mekanik metamalzemelerin tasarım ve üretiminde hızlı ilerlemeler kaydedilmiştir. Fakat bu alandaki gelişmelerin önünde engel oluşturabilecek çeşitli zorluklar hâlen bulunmaktadır. Metamalzemelerin yapısal değişikliklere karşı hassasiyeti sebebiyle, yapılarında meydana gelen küçük bir değişiklikte bile performanslarının önemli ölçüde etkilendiği ifade edilmektedir (Khosravani et al., 2025). Özellikle elektromanyetik ve optik metamalzemelerde üretim süreçlerinin karmaşık olması, yapısal kusurlar ile saçılma ve malzeme kaynaklı kayıplar, bu yapıların pratik uygulama alanlarında kullanımını kısıtlayan önemli faktörler arasındadır (Paul et al., 2025; Islam et al., 2025).

Eklemeli imalat ve gelişmiş nano fabrikasyon teknikleri ile birlikte, yapay zekâ destekli ters tasarım ve topoloji optimizasyonu tekniklerindeki gelişmeler, hedeflenen özelliklere sahip

karmaşık metamalzeme yapılarının geliştirilmesine ve üretim süreçlerinin optimize edilmesi gibi ilerlemelere önemli katkılar sağlamaktadır (Guo et al., 2026). Bunun yanı sıra dış uyaranlara yanıt verebilen, mekanik özellikleri dinamik olarak ayarlanabilen ve birden fazla fonksiyonu aynı yapıda birleştiren akıllı metamalzemelerin geliştirilmesi gelecekteki araştırmaların önemli eğilimlerindenidir (Guo et al., 2026). Bu doğrultuda, metamalzemelerin mühendislik uygulamalarında daha yaygın tercih edilebilmesi için ölçeklenebilir üretim, uzun dönem güvenilirlik, standardizasyon ve sürdürülebilirlik alanlarındaki çalışmaların geliştirilmesi önemlidir (Han et al., 2026).

Sonuç

Metamalzemeler, malzeme bilimi ve mühendisliğinde, fiziksel ve mekanik özelliklerin malzeme bileşimine ilaveten yapısal geometri ve mimari tasarım yoluyla kontrol edilebilmesine olanak sağlayarak yeni tasarım imkanları sunmaktadır (Han et al., 2026). Özellikle mekanik metamalzemeleri dikkate aldığımızda yapısal tasarım yoluyla birden fazla fonksiyonun aynı sistemde bütünleştirilmesi özelliği sayesinde enerji soğurma, titreşim sönümleme ve ayarlanabilir mühendislik sistemleri açısından önemli olanaklar sunmaktadır (Guo et al., 2026; Han et al., 2026). Bunun yanı sıra, mekanik metamalzemelerin laboratuvar ortamından endüstriyel uygulamalara geçişi sırasında üretim metodlarının ölçeklenebilirliğinin oluşabilmesi, uzun dönem yapısal dayanıklılık ve güvenilirliğin artırılması ile performans değerlendirmelerinin standartlaştırılması önem arz etmektedir (Han et al., 2026). Eklemeli imalat, gelişmiş nanofabrikasyon ve yapay zekâ destekli tasarım metotlarındaki gelişmeler, karmaşık metamalzeme yapılarının üretilmesini kolaylaştırırken, ayarlanabilir ve çok fonksiyonelli sistemlerin ilerletilmesine de katkı sunmaktadır (Guo et al., 2026). Bununla birlikte, üretim maliyetleri, yapısal kusurlar, ölçeklenebilirlik ve uzun dönem güvenilirlik gibi engellerin giderilmesi, metamalzemelerin endüstriyel uygulamalarda yaygınlaşması bakımından önemlidir (Paul et al., 2025; Han et al., 2026). Sonuç olarak, tasarım ve üretim teknolojilerindeki gelişmelerin mevcut teknik engellerin aşılmasına yönelik araştırmalarla desteklenmesi, metamalzemelerin farklı mühendislik alanlarındaki uygulama sahalarında kapasitelerinin ilerletilmesine ve endüstriyel kullanımının yaygınlaşmasına katkı verebilir (Boafo et al., 2025; Paul et al., 2025).

Kaynaklar

- Rising complexity in metamaterials. *Nat. Mater.* 24, 473 (2025).
<https://doi.org/10.1038/s41563-025-02217-7>
- Shen, Z., Zhu, D., & Zhang, M. (2025). Synergy of smart materials and structures toward intelligent metamaterials. *SmartSys*, 1(3), e70007.
- Sun, J., & Zhou, J. (2025). Metamaterials: The art in materials science. *Engineering*, 44, 145-161.
- Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. J. (1998). Low frequency plasmons in thin-wire structures. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 10(22), 4785-4809.
- Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. J. (1999). Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 47(11), 2075-2084.
- Smith, D. R., & Kroll, N. (2000). Negative refractive index in left-handed materials. *Physical review letters*, 85(14), 2933.
- Shelby, R. A., Smith, D. R., & Schultz, S. (2001). Experimental verification of a negative index of refraction. *science*, 292(5514), 77-79.
- Smith, D. R., Pendry, J. B., & Wiltshire, M. C. (2004). Metamaterials and negative refractive index. *science*, 305(5685), 788-792
- Suzuki, T., Sekiya, M., Sato, T., & Takebayashi, Y. (2018). Negative refractive index metamaterial with high transmission, low reflection, and low loss in the terahertz waveband. *Optics express*, 26(7), 8314-8324.
- Lorduy G, H., & Castellanos, L. M. (2020). Negative electrical permittivity in metamaterials for a wire of rectangular cross-sectional: an application to antennas design. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 34(14), 1842-1848.
- Stuart, H. R. (2007, June). The application of negative permittivity materials and metamaterials in electrically small antennas. In *2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* (pp. 1148-1151). IEEE.

- Chen, J., Qin, G., Shi, Y., Pan, K., Du, J., & Qiu, J. (2022). Negative permittivity and negative magnetic susceptibility of polypyrrole nanorings/carbon nanotubes multi-dimensional metacomposites in the radiowave frequency range. *Organic Electronics*, 104, 106470.
- Eason, K., Luk'Yanchuk, B., Zhou, Y., Miroshnichenko, A. E., & Kivshar, Y. S. (2011, December). Magnetic microscopy/metrology potential of metamaterials using nanosized spherical particle arrays. In *Smart Nano-Micro Materials and Devices* (Vol. 8204, pp. 427-432). SPIE.
- Lu, C., Hsieh, M., Huang, Z., Zhang, C., Lin, Y., Shen, Q., ... & Zhang, L. (2022). Architectural design and additive manufacturing of mechanical metamaterials: a review. *Engineering*, 17, 44-63.
- Suresh Kumar, N., Naidu, K. C. B., Banerjee, P., Anil Babu, T. V. S. R. P., & Venkata Shiva Reddy, B. (2021). A review on metamaterials for device applications. *Crystals*, 11(5), 518.
- Matei, A. T., Vişan, A. I., & Popescu-Pelin, G. F. (2025). Design and processing of metamaterials. *Crystals*, 15(4), 374.
- Yeswanth, A., Kishore, T. L., & Sai Pavan, D. S. S. (2026). A comprehensive review on development of thermal metamaterials. *Discover Materials*, 6(1), 53.
- You, J., Ma, Q., Zhang, L., Liu, C., Zhang, J., Liu, S., & Cui, T. (2023). Electromagnetic metamaterials: From classical to quantum. *Electromagnetic Science*, 1(1), 1-33.
- Aghamiri, S., & Sedaghati, R. (2025). Magnetoactive Metamaterials: A State-of-the-Art Review. *Advanced Engineering Materials*, 27(23), e202501312.
- Lee, J. H., Kwak, H., Kim, E., & Han, M. W. (2025). Recent advances in soft acoustic metamaterials: a comprehensive review of geometry, mechanisms, and system responsiveness. *Applied Sciences*, 15(14), 7910.
- Lee, D., Chen, W., Wang, L., Chan, Y. C., & Chen, W. (2024). Data-driven design for metamaterials and multiscale systems: a review. *Advanced Materials*, 36(8), 2305254.
- Ma, W. W. S., Yang, H., Zhao, Y., Li, X., Ding, J., Qu, S., ... & Song, X. (2025). Multi-physical lattice metamaterials enabled by additive manufacturing: design principles, interaction mechanisms, and multifunctional applications. *Advanced Science*, 12(8), 2405835.

- Zadpoor, A. A., Mirzaali, M. J., Valdevit, L., & Hopkins, J. B. (2023). Design, material, function, and fabrication of metamaterials. *APL materials*, 11(2).
- Holliman Jr, J. E., Schaef, H. T., McGrail, B. P., & Miller, Q. R. (2022). Review of foundational concepts and emerging directions in metamaterial research: design, phenomena, and applications. *Materials Advances*, 3(23), 8390-8406.
- Subeshan, B., Hamzat, A. K., & Asmatulu, E. (2025). Fabricating Three-Dimensional metamaterials using additive manufacturing: an overview. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(10), 343.
- Fan, J., Zhang, L., Wei, S., Zhang, Z., Choi, S. K., Song, B., & Shi, Y. (2021). A review of additive manufacturing of metamaterials and developing trends. *Materials Today*, 50, 303-328.
- Diallo, M. L. O., Sarankó, Á., Pataki, T. I., & Zsidai, L. (2026). Metamaterials and their applications in engineering metamaterials: classification, applications-a comprehensive review. *Applied Physics A*, 132(3), 160.
- Boafo, G., & Biswal, D. K. (2025). Advances in functional metamaterials: Bridging mechanical, acoustic innovations with multifunctionality and adaptive responses. *Results in Engineering*, 107367.
- Brûlé, S., Javelaud, E. H., Enoch, S., & Guenneau, S. (2014). Experiments on seismic metamaterials: molding surface waves. *Physical review letters*, 112(13), 133901.
- Miniaci, M., Krushynska, A., Bosia, F., & Pugno, N. M. (2016). Large scale mechanical metamaterials as seismic shields. *New Journal of Physics*, 18(8), 083041.
- Martínez-Sala, R., Sancho, J., Sánchez, J. V., Gómez, V., Llinares, J., & Meseguer, F. (1995). Sound attenuation by sculpture. *nature*, 378(6554), 241-241.
- Molerón, M., & Daraio, C. (2015). Acoustic metamaterial for subwavelength edge detection. *Nature communications*, 6(1), 8037.
- Gorishnyy, T., Maldovan, M., Ullal, C., & Thomas, E. (2005). Sound ideas. *Physics world*, 18(12), 24-29.

- Krushynska, A. O., Miniaci, M., Bosia, F., & Pugno, N. M. (2017). Coupling local resonance with Bragg band gaps in single-phase mechanical metamaterials. *Extreme Mechanics Letters*, 12, 30-36.
- Guo, K., Li, Y., Zhu, S., Li, C., & Lu, Y. (2026). Functional nano-architected mechanical metamaterials and devices. *npj Metamaterials*, 2(1), 1.
- Fischer, S. C., Hillen, L., & Eberl, C. (2020). Mechanical metamaterials on the way from laboratory scale to industrial applications: Challenges for characterization and scalability. *Materials*, 13(16), 3605.
- Paul, A., & Timp, G. (2025). How to manufacture photonic metamaterials. *Advanced Materials Technologies*, 10(18), e00313.
- Khosravani, M. R., Anders, D., Ayatollahi, M. R., & Reinicke, T. (2025). Fabrication of mechanical metamaterials by 3D printing: recent advancements and current challenges. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 25(5), 244.
- Islam, M. A., Hasan, M. J., Chowdhury, M. S., Ghosh, J., & Mobarak, M. H. (2025). Metamaterials for electromagnetic wave manipulation: Advancements and future prospects. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 41, 101424.
- Han, S., Li, C., Han, Q., & Yao, X. (2026). Mechano-X coupling in multifunctional mechanical metamaterials. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 44, 101272.

BÖLÜM 8

EKSENEL AKILI ELEKTRİK MOTORLARI

Vekil SARI¹, Volkan GÖREKE²

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye; e-mail: vsari@cumhuriyet.edu.tr; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5963-0179>

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler MYO, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye; e-mail: vgoreke@cumhuriyet.edu.tr; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2418-8373>

1. GİRİŞ

Elektrik motorları, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren temel elektromekanik sistemler olup endüstriyel üretim, ulaştırma ve elektrikli tahrik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Saidur, 2010). Elektrikli araçların yaygınlaşması ve elektrikli tahrik sistemlerinden beklenen performansın artması, yüksek verimlilik, yüksek güç ve tork yoğunluğu, düşük kütle ve kompakt boyut özelliklerini bir arada sunabilen elektrik motorlarının geliştirilmesini önemli bir araştırma alanı haline getirmiştir (Zhu ve Howe, 2007). Bu gereksinimler, geleneksel radyal akılı motorların yanında farklı manyetik akı geometrilerine sahip elektrik makinelerinin de araştırılmasını hızlandırmıştır.

Geleneksel radyal akılı elektrik motorlarında manyetik akı, rotorun dönme eksenine esas olarak dik bir düzlemde ve radyal yönde ilerlemektedir. Buna karşılık eksenel akılı motorlarda manyetik akı, rotor eksenine boyunca veya eksene paralel yönde hareket eder. Bu nedenle eksenel akılı motorların elektromanyetik yapısı çoğunlukla disk biçimli rotor ve stator geometrisine sahiptir. Söz konusu geometri, aktif elektromanyetik yüzeyin rotor çapının geniş bir bölümüne yayılmasına olanak sağlayarak özellikle düşük ve orta hızlı uygulamalarda yüksek tork yoğunluğu elde edilmesini mümkün kılmaktadır (Tangalychev et al., 2026).

Eksenel akılı motor kavramı yeni olmamakla birlikte, son yıllarda kalıcı mıknatıs teknolojilerindeki gelişmeler, yüksek performanslı güç elektroniği, sayısal elektromanyetik modelleme, optimizasyon algoritmaları ve yeni üretim teknikleri sayesinde yeniden önem kazanmıştır. Özellikle elektrikli araçlarda motorun toplam kütlesinin ve hacminin azaltılması, batarya kapasitesinin daha etkin kullanılabilmesi ve aktarma sistemlerinin sadeleştirilmesi açısından eksenel akılı sabit mıknatıslı motorlar önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Güncel çalışmalar, eksenel akılı makinelerin elektrikli araçların yanı sıra havacılık, denizcilik, robotik ve yenilenebilir enerji sistemlerinde de giderek daha fazla değerlendirildiğini göstermektedir (Gadiyar et al., 2023).

Bununla birlikte, yüksek güç yoğunluğu tek başına bir motor teknolojisinin üstünlüğünü garanti etmemektedir. Eksenel akılı motorların geometrik yapısı, elektromanyetik alanın modellenmesi ve tasarım optimizasyonu açısından ek güçlükler doğururken, eksenel kuvvetlerin dengelenmesi ve üretim toleranslarının kontrolü de tasarım sürecinde dikkate alınması gereken hususlardır. Ayrıca, yüksek güç yoğunluğunda ortaya çıkan ısı yüklerinin etkin biçimde uzaklaştırılması, motorun sürekli güç kapasitesi ve güvenilirliği açısından kritik önem

taşımaktadır. Bu nedenle eksenel akılı motorların tasarımında elektromanyetik, termal, mekanik ve üretim parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Fawzal et al., 2017).

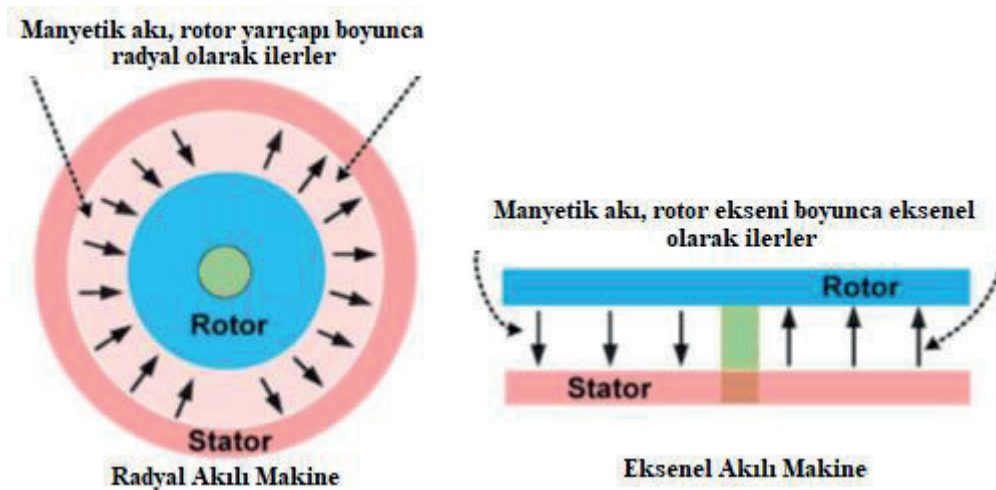
Hem eksenel hem de radyal manyetik akıları kullanan hibrit topolojilerin birleştirilmesi elektromanyetik tasarımda daha fazla esneklik sunar; yüksek tork yoğunluğuna ulaşmak ve makine boyutunu küçültmek için yeni olanaklar yaratır. Hibrit topolojiler asansör tahrik sistemleri, hafif elektrikli araçlar ve yüksek performanslı endüstriyel sürücüler gibi çeşitli uygulamalar için araştırılmıştır (Komorowski ve Wardach, 2026).

Eksenel akılı motorların başlıca avantajları, yüksek tork yoğunluğu, yüksek güç yoğunluğu, kompakt tasarım, yüksek verim, doğrudan tahrik ve modüler tasarım olarak özetlenebilir. Avantajlarına rağmen eksenel akılı motorların dezavantajları da bulunmaktadır. Dezavantajları arasında; üretim karmaşıklığı, mekanik hizalama, termal problemler, kaçak akı, mıknatıs maliyeti, demanyetizasyon ve kontrol karmaşıklığı bulunmaktadır.

2. EKSENEL AKILI MOTORLARIN TEMEL YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

2.1. Eksenel Akı Kavramı

Elektrik makinelerinde elektromanyetik tork, stator ve rotor alanlarının etkileşimi sonucunda oluşmaktadır. Geleneksel radyal akılı makinelerde manyetik akı radyal doğrultuda, eksenel akılı makinelerde ise rotor ve stator arasındaki hava aralığını eksenel doğrultuda geçecek şekilde yönlendirilmektedir (Ouldhamrane et al., 2022). Şekil 1’de radyal ve eksenel akılı makinelerde manyetik akının yönü gösterilmektedir (Habib et al., 2021).

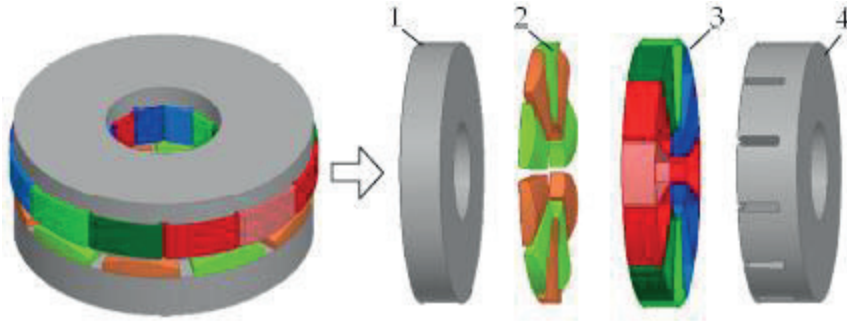


Şekil 1. Radyal ve eksenel akılı makinelerdeki manyetik akı yönü (Habib et al., 2021).

Eksenel akılı motorların önemli bir bölümü sabit mıknatıslı senkron motor (PMSM) prensibine dayanmaktadır. Sabit mıknatısların rotor üzerinde bulunması, rotor tarafında elektriksel uyarma sargılarına duyulan gereksinimi ortadan kaldırır. Bu durum, rotor bakır kayıplarının azaltılmasını, yüksek verimin elde edilmesini, yüksek tork yoğunluğunu ve kompakt rotor tasarımını mümkün hale getirir. Özellikle NdFeB gibi yüksek enerji yoğunluğuna sahip kalıcı mıknatısların kullanılması, küçük hacimde güçlü manyetik alan oluşturulmasını sağlamaktadır.

Bununla birlikte nadir toprak elementlerine dayalı mıknatısların maliyeti ve tedarik güvenliği önemli sorunlardır. Bu nedenle son dönem araştırmalarda daha az nadir toprak içeren mıknatısların, ferrit mıknatısların ve mıknatıs kullanımının azaltıldığı alternatif topolojilerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar da artmaktadır.

Eksenel akılı sabit mıknatıslı motorlarda elektriksel sargılar stator üzerinde, kalıcı mıknatıslar ise rotor üzerinde konumlandırılmaktadır. Stator sargılarından geçirilen akımın oluşturduğu manyetik alan ile rotor mıknatıslarının alanı arasındaki elektromanyetik etkileşim, motorun dönmesini ve elektromanyetik tork üretimini sağlar (Alamdar Yazdi et al., 2020). Şekil 2’de tek stator ve tek rotorlu bir eksenel akılı motor yapısı gösterilmektedir (Wu et al., 2022).



Şekil 2. Eksenel akılı motorun yapısı (1-rotor, 2-kalıcı mıknatıs, 3-sargılar, 4-stator) (Wu et al., 2022).

Eksenel akılı motorların ticarileşmesinde üretim teknolojileri kritik öneme sahiptir. Geleneksel elektrik çeliği laminasyonlarının eksenel akılı yapılara uyarlanması, radyal akılı makinelerdeki üretim süreçlerine göre daha karmaşık olabilir. Bu nedenle soft magnetic composite (SMC), segmentli stator, PCB tabanlı stator, alüminyum sargılar, eklemeli imalat ve gelişmiş kompozit rotor yapıları gibi teknolojiler araştırılmaktadır. Özellikle SMC ve yeni üretim teknikleri, üç boyutlu manyetik akı yollarının daha esnek biçimde oluşturulmasına imkan sağlayabilir.

Bununla birlikte yeni malzemelerin elektriksel, mekanik ve termal özellikleri birlikte değerlendirilmelidir. Örneğin düşük kayıplı bir malzemenin mekanik dayanımı yetersiz olabilir veya yüksek termal iletkenlik sağlayan bir malzemenin üretim maliyeti yüksek olabilir. Dolayısıyla malzeme seçimi de çok amaçlı optimizasyon problemi olarak ele alınmalıdır.

Bir elektrik makinesinin performansı açısından en önemli husus, hacimsel güç yoğunluğu ve verimliliğidir. Eksenel akılı makineler, radyal akılı makinelere kıyasla daha iyi hacimsel güç yoğunluğuna ve verimliliğe sahiptir (Kelch et al., 2017).

Maxwell tensörü yöntemine göre, motorun eksenel elektromanyetik kuvveti, eksenel hava aralığı manyetik akı yoğunluğu B_z ve teğetsel hava aralığı manyetik akı yoğunluğu B_t temel alınarak Eşitlik 1’ de ki gibi hesaplanabilir (Zhao et al., 2023).

$$f = \frac{B_z^2 - B_t^2}{2\mu_0} \approx \frac{B_z^2}{2\mu_0} = \frac{(B_{z1} - B_{z2})^2}{2\mu_0} \quad (1)$$

2.2. Radyal Akılı Motorlarla Eksenel Akılı Motorların Temel Farkları

Eksenel ve radyal akılı motorlar aynı elektromanyetik enerji dönüşüm prensibine dayanmasına rağmen geometrik ve manyetik yapıları önemli ölçüde farklıdır. Tablo 1’de bu farklar görülmektedir.

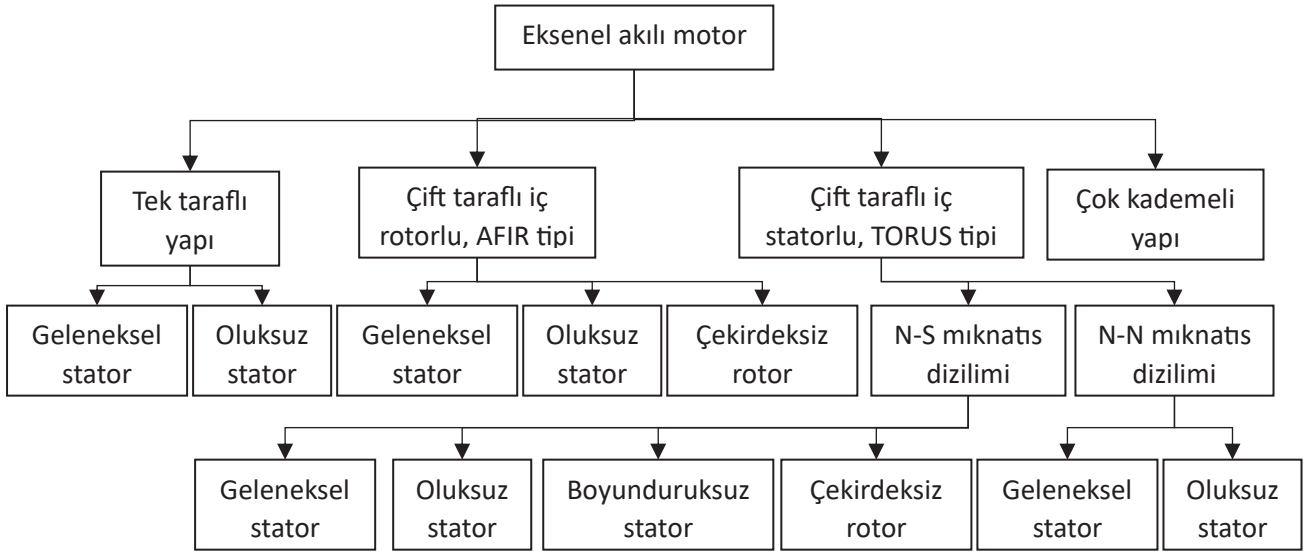
Tablo 1. Radyal akılı motorlarla eksenel akılı motorların karşılaştırılması.

Özellik	Radyal akılı motor	Eksenel akılı motor
Manyetik akının yönü	Hava aralığında temel olarak radyal yönde	Hava aralığında temel olarak eksenel yönde
Genel geometri	Genellikle silindirik	Genellikle disk biçimli
Aktif hava aralığı yüzeyi	Silindirik yüzey	Dairesel veya halka biçimli yüzey
Tork yoğunluğu	Tasarıma bağlı olarak yüksek olabilir	Uygun tasarım koşullarında yüksek tork yoğunluğu sağlayabilir
Eksenel boyut	Makine tasarımına bağlıdır; bazı uygulamalarda daha uzun olabilir	Kısa eksenel boyut gerektiren uygulamalara elverişlidir
Üretim ve montaj	Yaygın üretim altyapısı ve olgun üretim yöntemleri bulunur	Rotor-stator yapısına ve topolojiye bağlı olarak üretim ve montaj daha karmaşık olabilir
Rotor-stator hizalaması	Geleneksel silindirik yapı nedeniyle görece kolay yönetilebilir	Hava aralığının düzgünlüğü ve eksenel hizalama kritik olabilir
Soğutma ve termal yönetim	Olgun yöntemler mevcuttur; performans tasarımıyla ilişkilidir	Yüksek güç yoğunluğunda ısı uzaklaştırılması önemli bir tasarım sorunu olabilir
Eksenel elektromanyetik kuvvet	Topolojiye bağlı olarak genellikle temel tasarım sorunu değildir	Özellikle tek taraflı topolojilerde önemli olabilir; çift taraflı tasarımlarda dengelenebilir
Düşük hızda yüksek tork	Uygun tasarımla mümkündür	Büyük etkin yarıçapın tork üretimine katkısı nedeniyle bu uygulamalar için elverişli olabilir
Elektrikli araçlarda kullanım	Yaygın olarak kullanılmaktadır	Özellikle yüksek tork yoğunluğu ve kompakt boyut gerektiren uygulamalarda gelişen bir seçenektir

Eksenel akılı makineler, demir kayıplarını ortadan kaldırarak yüksek verimlilik, güç ve tork yoğunluğu sunar. Ancak çekirdeksiz tasarım; karmaşık mekanik yapılar, geleneksel malzemelerin kullanımı nedeniyle yüksek üretim maliyetleri, mekanik kararsızlığa yol açan dengesiz eksenel kuvvetler, olası soğutma zorlukları ve daha yüksek enerji yayılım oranları gibi çeşitli zorlukları da beraberinde getirir. Sargı tasarımları, gelişmiş mıknatıs dizileri ve malzeme teknolojilerindeki yenilikler, özgün optimizasyon teknikleriyle birleşerek bu makinelerin elektromanyetik performansını önemli ölçüde artırmıştır (Shuaibu et al., 2024).

3. EKSENEL AKILI MOTOR TOPOLOJİLERİ

Eksenel akıllı motorların en önemli özelliklerinden biri çok sayıda farklı topolojik yapının geliştirilebilmesidir. Topoloji seçimi; tork yoğunluğu, verimlilik, soğutma, üretim maliyeti, mekanik dayanım ve kontrol gereksinimlerini doğrudan etkiler. Şekil 3’de eksenel akıllı makine topolojilerinin genel bir sınıflandırması gösterilmektedir (Hong et al., 2024). Şekil 4’te ise bu topolojilerin görünümü görülmektedir (Hao et al., 2022).



Şekil 3. Eksenel akıllı makine topolojilerinin genel bir sınıflandırması (Hong et al., 2024).

3.1. Tek stator–Tek rotor yapısı (Single-Stator/Single-Rotor SSSR)

En temel yapı, bir rotor ve bir statordan oluşmaktadır. Rotor üzerinde sabit mıknatıslar, statorda ise sargılar bulunmaktadır. Bu yapı, basit, kompakt ve üretilebilirliği görece yüksek olmasına rağmen çift taraflı manyetik yapıların sağlayabileceği yüksek elektromanyetik kuvvetten tam olarak yararlanamaz.

3.2. Çift stator–Tek rotor yapısı (Double-Stator/Single-Rotor DSSR)

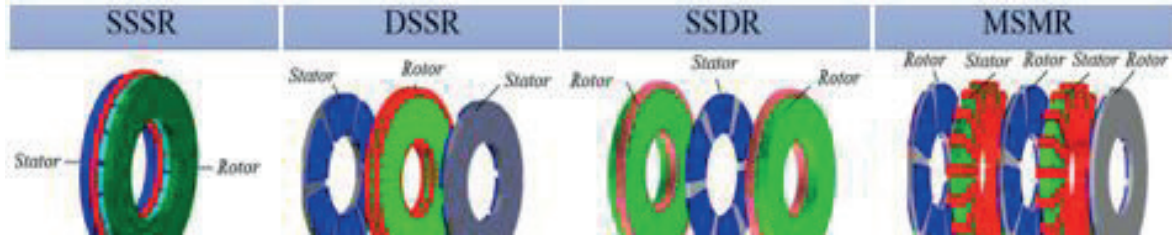
Bu topolojide rotor iki stator arasında yer almaktadır. Çift stator yapısı, aynı rotor üzerinde iki ayrı elektromanyetik tork üretim bölgesi oluşturabilir. Bununla birlikte statorların elektriksel ve termal olarak birlikte yönetilmesi gerekir.

3.3. Tek stator –Çift rotor yapısı (Single-Stator/Double-Rotor (SSDR))

Çift rotor–tek stator yapısında stator iki rotor arasında konumlandırılır. Bu konfigürasyonun önemli avantajı, statorun iki yüzeyinin de elektromanyetik tork üretiminde kullanılabilmesidir. Böylece aktif malzeme kullanımının iyileştirilmesi ve daha yüksek tork yoğunluğunun elde edilmesi mümkün olabilir. Ancak iki rotor arasındaki manyetik kuvvetlerin dengelenmesi ve rotorların hassas şekilde hizalanması mekanik tasarım açısından kritik hale gelir.

3.4. Çok stator– Çok rotor yapısı (Multi-Stator/Multi-Rotor MSMR)

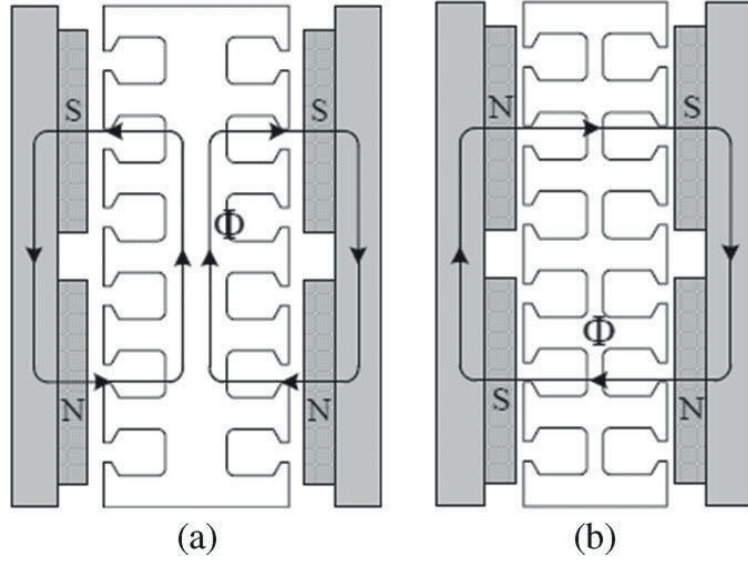
N adet stator ve (N+1) adet rotora sahip MSMR tipi AFPM motorlar, motor çapını artırmadan tork yoğunluğunu ve güç yoğunluğunu iyileştirebilir ve gemi tahriki gibi yüksek tork gerektiren uygulamalar için oldukça uygundur (Hao et al., 2022).



Şekil 4. Eksenel akılı sabit mıknatıslı motorların temel topolojik yapıları: (a) SSSR, (b) DSSR, (c) SSDR ve (d) MSMR (Hao et al., 2022).

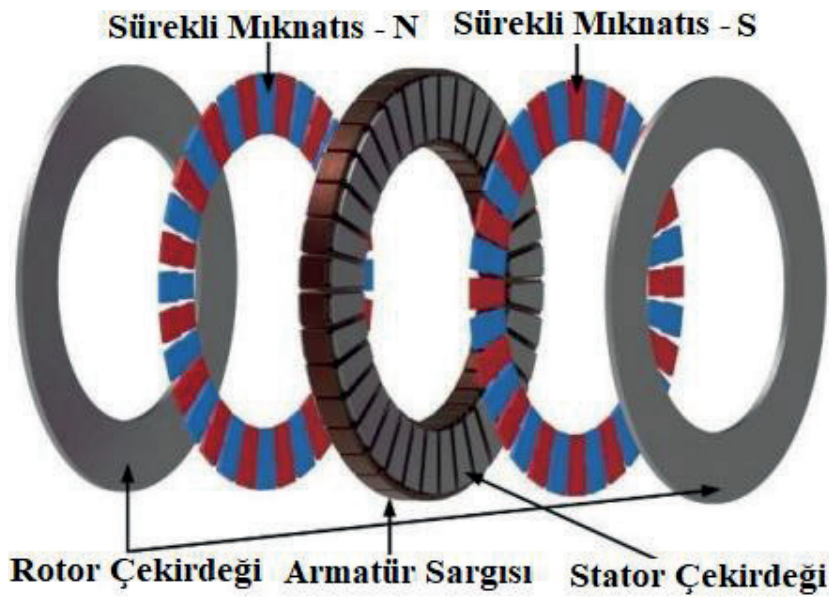
3.5. YASA tipi eksenel akılı motorlar

Eksenel akılı motor topolojileri arasında, eksenel akılı iç rotorlu (Axial-Flux Internal Rotor-AFIR) ve çift taraflı iç statorlu (TORUS) tipler, tek taraflı yapıya kıyasla daha yüksek bir tork yoğunluğu sergiler. Çok kademeli yapı, diğer yapı türlerine göre daha yüksek tork yoğunluğuna ulaşabilse de, çift taraflı yapılara kıyasla çok daha karmaşık bir yapıya sahiptir (Hong et al., 2024). TORUS NN tipleriyle karşılaştırıldığında, TORUS NS tipinin akı döngüsü stator arka boyunduruğundan geçmez. Dolayısıyla, TORUS NS tipinde stator boyunduruğu çekirdeği ortadan kaldırılabilir; bu da motorun eksenel uzunluğunun azaltılmasını sağlar ve sonuç olarak yüksek bir güç/ağırlık oranı (kW/kg) elde edilir. Şekil 5’de Torus NN ve Torus NS yapısı görülmektedir (Capponi et al., 2012). Sonuç olarak, stator arka boyunduruğu tamamen çıkarılabilir. Bu yapıya Yokeless And Segmented Armature (YASA) tipi denir (Woolmer ve McCulloch, 2007).



Şekil 5. Eksenel akıllı motor topolojileri: (a) Torus NN, (b) Torus NS (Capponi et al., 2012).

Son yıllarda YASA olarak adlandırılan yapılar özellikle dikkat çekmektedir. Çünkü YASA tipi eksenel akıllı motorlar, eksenel akıllı motorlar içerisinde en iyi performans gösteren yapıya sahiptir (Ojaghlu ve Vahedi, 2018). YASA topolojisinde geleneksel stator nüvesindeki sürekli boyunduruk yapısının ortadan kaldırılması ve segmentli stator yapısının kullanılması amaçlanır. Bu yapı, aktif bakır kullanımını artırabilir, motorun eksenel boyutunu azaltabilir, yüksek tork yoğunluğu sağlayabilir ve stator segmentlerinin ayrı ayrı soğutulmasına imkan verebilir. YASA tipi motorlar özellikle elektrikli araç ve yüksek güç yoğunluğu gerektiren tahrik sistemleri açısından önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Şekil 6'da YASA tipi eksenel akıllı motorun topolojisi görülmektedir (Su et al., 2024).



Şekil 6. YASA tipi eksenel akıllı motorun topolojisi (Su et al., 2024).

4. MEKANİK TASARIM VE EKSENEL KUVVETLER

Eksenel akıllı motorların mekanik tasarımı, radyal akıllı motorlara göre daha kritik olabilir. Bunun temel nedeni, rotor ve stator arasında oluşan elektromanyetik kuvvetlerin eksenel doğrultuda etkili olmasıdır. Özellikle çift rotor–tek stator yapısında iki hava aralığındaki manyetik kuvvetlerin dengelenmesi gerekir. Küçük bir geometrik hizasızlık bile, hava aralığının değişmesine, dengesiz manyetik kuvvetlere, titreşime, gürültüye ve yatak yükünün artmasına neden olabilir. Bu nedenle yüksek hassasiyetli üretim ve montaj teknikleri önem taşımaktadır. Güncel çalışmalarda otomatik montaj ve hassas hizalama yöntemlerinin eksenel akıllı motorların güvenilirliği açısından kritik olduğu belirtilmektedir.

5. TORK DALGALANMASI VE COGGİNG TORK

Eksenel akıllı motorlarda önemli problemlerden biri cogging torque olarak adlandırılan dişli momenti ve buna bağlı tork dalgalanmasıdır. Tork dalgalanması, mekanik titreşim, akustik gürültü, hız dalgalanması ve kontrol performansında bozulma oluşturabilir. Bu sorunu azaltmak amacıyla mıknatıs şekillendirme, mıknatıs kaydırma, oluk/kutup kombinasyonunun değiştirilmesi, fractional-slot winding, stator segmentlerinin optimizasyonu ve uygun kutup yayı seçimi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerin her biri farklı bir tasarım ödünleşimi meydana getirir. Örneğin tork dalgalanmasını azaltan bir mıknatıs geometrisi, aynı zamanda ortalama torku veya üretim kolaylığını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle modern tasarım çalışmalarında tek amaçlı optimizasyon yerine çok amaçlı optimizasyon giderek daha fazla kullanılmaktadır.

6. EKSENEL AKILI MOTORLARIN UYGULAMA ALANLARI

6.1. Elektrikli araçlar

Elektrikli araçlar eksenel akıllı motorların en önemli potansiyel uygulama alanlarından biridir. Bunun temel nedenleri, yüksek tork yoğunluğu, düşük ağırlık, kompakt hacim, yüksek verim ve doğrudan tahrik potansiyeli olarak sıralanabilir. Özellikle tekerlek içi veya tekerleğe yakın motor sistemlerinde disk biçimli yapı önemli avantaj sağlayabilir.

6.2. Havacılık ve elektrikli hava araçları

Elektrikli ve hibrit-elektrikli havacılık sistemlerinde motor ağırlığı kritik bir tasarım parametresidir. Bu nedenle yüksek güç/ağırlık oranı sağlayabilen eksenel akıllı motorlar, elektrikli hava araçları, eVTOL sistemleri, insansız hava araçları ve hibrit-elektrikli uçaklar için

araştırılmaktadır. Güncel literatürde havacılık uygulamaları, yüksek güç yoğunluğu gereksinimi nedeniyle AFPM motorların önemli hedef alanlarından biri olarak değerlendirilmektedir.

6.3. Robotik

Robotik sistemlerde düşük hacimde yüksek tork üretimi önemlidir. Eksenel akıllı motorlar özellikle, robot eklemleri, insansı robotlar ve hassas servo sistemleri için uygun olabilir. Motorun disk biçimli yapısı, bazı robot eklemlerine doğrudan entegre edilebilmesine olanak sağlamaktadır.

6.4. Rüzgar enerjisi

Eksenel akıllı jeneratörler düşük hızlı doğrudan tahrik uygulamalarında değerlendirilmektedir. Geleneksel sistemlerde mekanik dişli kutusunun kullanılması mekanik kayıplara, bakım gereksinimine ve ağırlık artışına neden olabilir. Eksenel akıllı doğrudan tahrik jeneratörlerinde ise düşük hızda yüksek tork üretme kabiliyeti önemli bir avantajdır.

6.5. Denizcilik

Elektrikli ve hibrit-elektrikli deniz araçlarında yüksek tork ve kompakt tasarım gereksinimleri nedeniyle eksenel akıllı motorlar alternatif bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Güncel araştırmalar deniz tahrik sistemlerini de eksenel akıllı motorların gelişmekte olan uygulama alanları arasında göstermektedir.

7. EKSENEL AKILI MOTORLARDA ARAŞTIRMA VE GELİŞTİRME EĞİLİMLERİ

Güncel araştırmalar incelendiğinde eksenel akıllı motorların yalnızca elektromanyetik performansının artırılmasına değil, sistem düzeyinde optimizasyonuna yönelim olduğu görülmektedir. Özellikle aşağıdaki araştırma alanları öne çıkmaktadır:

7.1. Yapay zeka destekli tasarım

Makine öğrenmesi modelleri, motor geometrisi ile performans arasındaki ilişkileri öğrenerek hızlı tasarım optimizasyonu sağlayabilir.

7.2. Çok amaçlı optimizasyon

Aynı anda tork yoğunluğu, verim, maliyet, sıcaklık, ağırlık ve tork dalgalanması optimize edilebilir.

7.3. Dijital ikiz

Motorun elektromanyetik, termal ve mekanik davranışının gerçek zamanlı olarak modellenmesi, kestirimci bakım ve durum izleme açısından önemlidir.

7.4. Arıza teşhisi

Makine öğrenmesi tabanlı rulman arızası, sargı arızası, mıknatıs demanyetizasyonu, rotor eksantrikliği ve faz arızası tespit yöntemleri giderek önem kazanmaktadır.

7.5. Nadir toprak elementlerinin azaltılması

Mıknatıs maliyetinin ve tedarik riskinin azaltılması amacıyla yeni mıknatıs malzemeleri ve alternatif elektromanyetik topolojiler araştırılmaktadır.

8. GELECEKTEKİ ARAŞTIRMA ALANLARI

Eksenel akıllı motorların gelecekteki gelişimi açısından aşağıdaki konular özellikle önem taşımaktadır.

8.1. Elektromanyetik, termal ve mekanik tasarımın birbirinden bağımsız değil, birlikte optimize edilmesi gerekmektedir. Günümüzde yüksek tork yoğunluğu sağlayan bir tasarımın termal sınırları veya üretilebilirliği yeterince dikkate alınmayabilmektedir.

8.2. 3B FEM analizlerinin hesaplama maliyetinin azaltılması gerekmektedir. Bu kapsamda makine öğrenmesi tabanlı vekil modeller önemli bir potansiyele sahiptir.

8.3. Yüksek güç yoğunluğuna uygun yeni soğutma teknikleri geliştirilmelidir. Özellikle doğrudan sargı ve mıknatıs soğutması, yüksek performanslı uygulamalarda kritik hale gelecektir.

8.4. Eksenel akıllı motorların üretim maliyetinin azaltılması gerekmektedir. Tasarım ne kadar yüksek performanslı olursa olsun, seri üretimde ekonomik olarak uygulanabilir değilse geniş çaplı ticarileşme sınırlı kalacaktır.

8.5. Mıknatıs malzemelerine yönelik bağımlılığın azaltılması önem taşımaktadır. Daha az nadir toprak içeren mıknatıslar ve alternatif manyetik devre tasarımları bu açıdan önemli araştırma alanlarıdır.

8.6. Motorların yalnızca nominal çalışma koşullarındaki değil, arıza ve geçici rejimlerdeki davranışlarının da araştırılması gerekmektedir. Özellikle elektrikli araçlar ve havacılık gibi

güvenilirliğin kritik olduğu sistemlerde hata toleranslı eksenel akılı motor tasarımları önem kazanacaktır.

8.7. Eksenel akılı motorların elektrikli araçlarda radyal akılı motorlarla rekabet edebilmesi için yalnızca daha yüksek performans değil, toplam yaşam döngüsü maliyeti, üretilebilirlik, bakım kolaylığı ve güvenilirlik açısından da avantaj sağlaması gerekmektedir.

9. SONUÇ

Eksenel akılı elektrik motorları, manyetik akının eksenel doğrultuda ilerlemesine dayanan özgün geometrileri sayesinde yüksek tork ve güç yoğunluğu sağlayabilen yeni nesil elektrik makinesi teknolojileri arasında önemli bir konuma ulaşmıştır. Özellikle sabit mıknatıslı eksenel akılı senkron motorlar; kompakt yapıları, yüksek verimleri, yüksek tork/ağırlık oranları ve doğrudan tahrik sistemlerine uygunlukları nedeniyle elektrikli araçlar, havacılık, robotik, denizcilik ve yenilenebilir enerji gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda önemli bir potansiyel taşımaktadır.

Bununla birlikte, eksenel akılı motorların avantajlarının beraberinde önemli mühendislik sorunları getirdiği görülmektedir. Özellikle rotor-stator hizalaması, eksenel elektromanyetik kuvvetler, termal yönetim, kaçak akı, tork dalgalanması, demanyetizasyon, üretim toleransları ve yüksek üretim maliyeti teknolojinin yaygınlaşmasının önündeki başlıca engellerdir. Bu nedenle gelecekteki tasarım çalışmalarının yalnızca elektromanyetik performansı artırmaya odaklanması yeterli olmayacaktır. Elektromanyetik, termal, mekanik ve ekonomik parametrelerin aynı optimizasyon çerçevesinde değerlendirilmesi gerekmektedir.

Özellikle YASA, çift rotor–tek stator, coreless ve hibrit eksenel akılı topolojiler, yüksek güç yoğunluğu gerektiren uygulamalar açısından önemli araştırma alanları oluşturmaktadır. Bunun yanında yapay zeka destekli tasarım, çok amaçlı optimizasyon, dijital ikiz, gelişmiş termal yönetim, yeni manyetik malzemeler ve katkılı imalat teknolojilerinin gelişmesi, eksenel akılı motorların teknik ve ekonomik sınırlamalarının azaltılmasına katkı sağlayacaktır. Güncel literatür de araştırmaların artık yalnızca yeni topolojilerin geliştirilmesinden ziyade topoloji, malzeme, üretim, soğutma, kontrol ve optimizasyon bütünlüğüne doğru ilerlediğini göstermektedir.

Sonuç olarak eksenel akılı motorlar, geleneksel radyal akılı motorların doğrudan alternatifi olmaktan ziyade, yüksek tork yoğunluğu, düşük ağırlık, kompakt hacim ve yüksek verim gerektiren özel uygulamalarda güçlü bir alternatif teknoloji olarak değerlendirilmelidir.

Önümüzdeki dönemde elektrikli ulaşım ve havacılık sistemlerindeki elektrifikasyon eğiliminin devam etmesiyle birlikte bu motorların araştırma, prototipleme ve ticarileştirme faaliyetlerinin daha da hızlanması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Alamdar Yazdi, M., Saied, S. A., & Mirimani, S. M. (2020). Design and construction of new axial-flux permanent magnet motor. *IET Electric Power Applications*, 14(12), 2389-2394.
- Capponi, F. G., De Donato, G., & Caricchi, F. (2012). Recent Advances in Axial-Flux Permanent-Magnet Machine Technology. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(6), 2190–2205.
- Fawzal, A. S., Cirstea, R. M., Gyftakis, K. N., Woolmer, T. J., Dickison, M., & Blundell, M. (2017). Fan Performance Analysis for Rotor Cooling of Axial Flux Permanent Magnet Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(4), 3295–3304.
- Gadiyar, N., Van Verdegheem, J., & Severson, E. L. (2023). A review of axial flux permanent magnet machine technology. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(4), 3920-3933.
- Habib, A., Mohd Zainuri, M. A. A., Che, H. S., Ibrahim, A. A., Rahim, N. A., Alaas, Z. M., & Ahmed, M. M. R. (2022). A systematic review on current research and developments on coreless axial-flux permanent-magnet machines. *IET Electric Power Applications*, 16(10), 1095-1116.
- Hao, Z., Ma, Y., Wang, P., Luo, G., & Chen, Y. A Review of Axial-Flux Permanent-Magnet Motors: Topological Structures, Design, Optimization and Control Techniques. *Machines*. 2022; 10 (12), 1178.
- Hong, D. K., Park, J. H., & Jeong, Y. H. (2023). Comprehensive analysis of dual-rotor yokeless axial-flux motor with surface-mounted and Halbach permanent magnet array for urban air mobility. *Energies*, 17(1), 30.
- Kelch, F., Yang, Y., Bilgin, B., & Emadi, A. (2018). Investigation and design of an axial flux permanent magnet machine for a commercial midsize aircraft electric taxiing system. *IET Electrical Systems in Transportation*, 8(1), 52-60.
- Komorowski, K., & Wardach, M. (2026). Axial—Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Machines: A Comprehensive Review. *Energies*, 19(12), 2893.
- Ojaghlu, P., & Vahedi, A. (2017). A new axial flux permanent magnet machine. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(1), 1-6.

- Ouldhamrane, H., Charpentier, J.-F., Khoucha, F., Zaoui, A., Achour, Y., & Benbouzid, M. (2022). Development and experimental validation of a fast and accurate field calculation tool for axial flux permanent magnet machines. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 552, 169105.
- Saidur, R. (2010). A review on electrical motors energy use and energy savings. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(3), 877-898.
- Shuaibu, I., Wei, E. H. T., Kannan, R., & Samaila, Y. A. (2024). Advancements in axial flux permanent magnet machines utilizing coreless technology: A systematic review. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(12), 103091.
- Su, L., Wang, G., Gao, Y., Zanchetta, P., & Zhang, H. (2024). Multi-Objective Optimization of Yokeless and Segmented Armature Machine for In-Wheel Traction Applications Based on the Taguchi Method. *Machines*, 12(4), 221.
- Tangalychev, R., Guadagno, M., Skrickij, V., Delogu, M., & Ivanov, V. (2026). System-Level Review and Advances in Axial-Flux Permanent-Magnet Machines: Topology Classification, Design Optimisation, Materials, Modelling, and Control Strategies. *Applied Sciences*, 16(14), 6854.
- Woolmer, T. J., & McCulloch, M. D. (2007). Analysis of the yokeless and segmented armature machine. In *2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, pp. 704-708.
- Wu, S., Wang, B., Zhang, T., & Gu, Q. (2022). Design optimization and electromagnetic performance analysis of an axial-flux permanent magnet brushless DC motor with unequal-thickness magnets. *Applied Sciences*, 12(15), 7863.
- Zhao, F., Shao, Z., & Fan, H. (2023). Analytical calculation and low-order component optimization of axial electromagnetic force for an axial flux motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 59(11), 1-5.
- Zhu, Z. Q., & Howe, D. (2007). Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 746-765.

BÖLÜM 9

ESP32 VE PLC TABANLI KABLOSUZ HABERLEŞME MİMARİSİ İLE ÇOKLU OTONOM ROBOT KOORDİNASYONU

Serkan PINAR¹

¹ Öğr. Gör. Ege Üniversitesi, Ege Meslek Yüksekokulu 0000-0001-8601-3248 serkan.pinar@ege.edu.tr

GİRİŞ

Endüstri 4.0 ve akıllı üretimin yaygınlaşması, geleneksel sabit otomasyon sistemlerini dinamik, esnek ve modüler üretim mimarilerine dönüştürmüştür. Modern akıllı fabrika ortamlarında imalat süreçlerinin kesintisiz sürdürülmesi, hammadde ve ara mamul transferlerinin insan müdahalesi olmaksızın optimize edilmesine dayanmaktadır (Belda ve Jirsa, 2021). Bu kapsamda, Otonom Mobil Robotlar lojistik yönetimi, depolama, montaj hatları arası malzeme taşıma ve dinamik görev dağılımı süreçlerinde kritik birer bileşen olarak öne çıkmaktadır (Surmann vd., 2020; Mukhlisin vd., 2016). Bunun yanı sıra, akıllı fabrika ortamlarında yüksek hassasiyet ve hız gerektiren tut-yerleştir görevlerinde ters kinematik optimizasyonları ile konumlandırılan delta robotlar da üretim esnekliğine büyük katkı sağlamaktadır (Duymazlar ve Gönenli, 2024). Sadece kendi dahili yönetim mantığı ile çalışan tekil robot uygulamaları yerine; saha sensörleri, konveyör hatları, depolama üniteleri ve merkezi denetleyiciler ile sürekli iletişim halinde bulunan çoklu otonom robot sistemleri yaygınlaşmaktadır. Bu entegrasyon, verimliliği ve üretim hızını doğrudan artırmaktadır. (Wang ve de Silva, 2008; Prorok vd., 2017).

Çoklu mobil robot sistemlerinin dinamik fabrika ortamlarında senkronize çalışabilmesi; yüksek hızlı, düşük gecikmeli ve güvenilir bir kablosuz haberleşme altyapısının kurulmasını zorunlu kılmaktadır (Bayram, 2013). Endüstriyel otomasyon uygulamalarında; konveyörler, aktüatörler, varlığı algılayan sensörler vb. saha ekipmanlarının gerçek zamanlı kontrolü geleneksel olarak Programlanabilir Mantıksal Denetleyiciler (PLC) tarafından gerçekleştirilmektedir. PLC tabanlı kontrol mimarileri, veri toplama ve motor sürme işlemlerinin eşzamanlı yürütüldüğü endüstriyel otomasyon uygulamalarında da yüksek kararlılık sunmaktadır (Dumazlar ve Engin, 2023; Gönenli vd., 2025). PROFINET veya Ethernet/IP gibi standart kablolu endüstriyel haberleşme protokolleri yüksek veri iletim kapasitesi sunmaktadır. Fakat saha içerisinde serbestçe hareket eden otonom mobil robotların fiziki kablo bağlantılarıyla kontrol edilmesi zordur. Bu durum, endüstriyel işletim teknolojileri ile mobil robotlar arasında hibrit, esnek ve kablosuz köprülerin kurulması ihtiyacını doğurmuştur (Belda ve Jirsa, 2021).

Geleneksel Wi-Fi veya Bluetooth tabanlı kablosuz iletişim çözümleri; erişim noktası (Access Point - AP) bağlantı kurma süreçleri, ağ trafiğindeki paket sıkışmaları, yüksek güç tüketimi ve Açık Sistemler Ara Bağlantısı (OSI - Open Systems Interconnection) modelindeki çok katmanlı yapı nedeniyle milisaniyeler mertebesinde yüksek yanıt gecikmelerine yol açmaktadır. Özellikle bant üzerindeki ani yük birikimleri veya acil durum senkronizasyonu gerektiren senaryolarda bu gecikmeler paket kayıplarına ve karar verme süreçlerinde aksamalara sebep olmaktadır (Budak, 2015). Bu kısıtlamaların üstesinden gelmek için doğrudan eşten eşe (Peer-to-Peer - P2P) iletişim imkânı sunan ESP-NOW kablosuz haberleşme protokolü ortaya çıkmaktadır. ESP32 mikrodenetleyici mimarisi üzerinde çalışan ESP-NOW, OSI modelinin beş katmanını tek bir katmana indirgeyerek paket başlığı karmaşıklığını ortadan kaldırmakta, düşük güç tüketimi ve yüksek yanıt hızıyla akıllı fabrika sistemlerinde kesintisiz veri aktarımı sağlamaktadır.

Bu kitap bölümünün amacı; endüstriyel konveyör sistemlerini yöneten PLC'ler ile sahadaki Festo Robotino otonom mobil robotlar arasında ESP32 Wi-Fi/ESP-NOW modülleri ile kurulan kablosuz haberleşme mimarisini detaylı bir şekilde incelemek ve bu haberleşme altyapısı üzerinde çalışan koordineli iş paylaşımı ve hassas lokalizasyon algoritmalarını sunmaktır

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, akıllı fabrika içerisinde Programlanabilir Mantık Denetleyiciler (PLC) ile çoklu otonom mobil robotlar arasında koordineli görev paylaşımını sağlayan deneysel bir otomasyon platformu tasarlanmıştır. Sistem mimarisi; PLC ile otonom mobil robotların kablosuz haberleşme köprüsü ESP32 Wi-Fi/ESP-NOW modülleri ve donanımsal sinyal seviyesi uyarlama birimlerinden oluşmaktadır.

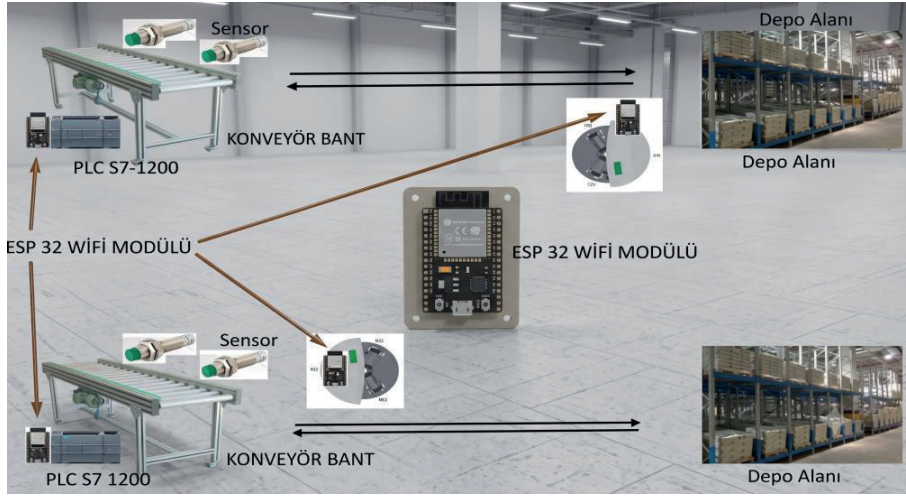
2.1 ESP-NOW Kablosuz Haberleşme Protokolü ve Katman Mimarisi , Donanım Altyapısı ve Teknik Parametreler

Espresif Systems tarafından üretilen ESP32, bünyesinde Wi-Fi özelliği barındıran gelişmiş bir mikro denetleyici platformudur. Sağladığı esneklik ve ağ erişim imkânları sayesinde, başta Nesnelerin İnterneti (IoT) sistemleri ve akıllı sensör düğümleri olmak üzere pek çok elektronik projede yaygın olarak tercih edilmektedir.

ESP32; çift çekirdekli işlemci mimarisi, 520 KB SRAM ve 448 KB ROM dâhili belleğinin yanı sıra Wi-Fi, Bluetooth ve Ethernet gibi geniş bağlantı ara yüzleriyle öne çıkmaktadır. Çeşitli sensörler, kamera modülleri ve çevresel birimlerle sağladığı yüksek uyumluluk, platformu çok yönlü bir çözüm haline getirmektedir. Standart kullanımda 100 metreye kadar güvenilir haberleşme imkânı sunan kart, cihazlar arası uzun menzil modunda bu mesafeyi 480 metreye kadar çıkarabilmektedir. Donanıma ait teknik parametreler Tablo 1'de detaylandırılmıştır. Süreçte ihtiyaç duyulan uzaktan veri toplama ve kablosuz aktarım gereksinimlerini optimize şekilde karşılaması sebebiyle bu çalışmada ESP32 modülü tercih edilmiştir.

Tablo 1. ESP32 Teknik Özellikleri

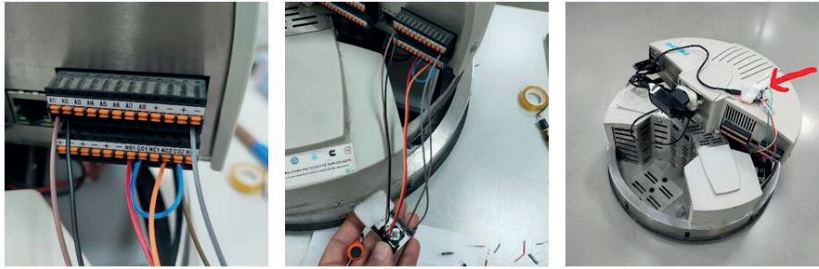
Parametre	Değer
İşlemci	Çift çekirdekli 32-bit RISC işlemcisi, 240 MHz
Bellek	520 KB SRAM
Kablosuz Bağlantı	802.11 b/g/n/e/i ve Bluetooth 4.2
Analog çıkış	2 adet ADC çıkışı
Giriş/Çıkış (GPIO) Pinleri	34
Seri UART, I2C ve SPI protokolleri	FreeRTOS, ESP-IDF ve Lua
Desteklenen İşletim Sistemleri	
Güç Kaynağı	2.5 V - 3.6 V DC
Düşük Güç Tüketimi	150µA modu, RX veya TX modlarında 2.8mA
Çalışma Sıcaklığı	-40°C ile +85°C



Şekil 2. ESP32 Mikrodenetleyicilerin PLC'ler ile Robotino mobil robotlar arasındaki haberleşmesi (Pınar, 2024).

2.3.ESP 32'ler Arası Haberleşme Kontrolü

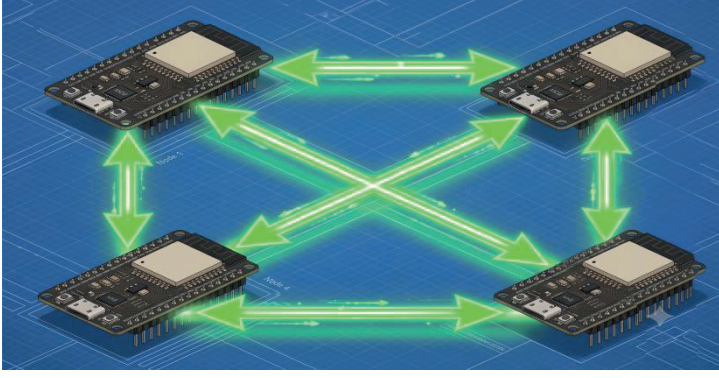
Robotino mobil robotlar üzerinde birer adet ESP32 mikrodenetleyici Wi-Fi kartı ve PLC üzerinde de birer adet ESP32 mikrodenetleyici Wi-Fi kartı kullanılmak üzere 4 adet haberleşme kartı kullanıldı. ESP32 Wi-Fi kartlarından sadece bir tanesi veri gönderici olurken diğer üç tanesi istemci konumundadır. Şekil 3'te Robotino robot üzerindeki ESP32 kartı ve bağlantıları görülmektedir.



Şekil 3. ESP32 mikrodenetleyici kartının Wi-Fi haberleşme için Robotino mobil robot üzerindeki bağlantısı (Pınar, 2024).

ESP32'ler arasında Wi-Fi iletişimi sağlamak için işlem adımları şöyledir:

- Her ESP32 mikrodenetleyicisi için bir Mac adresini alır.
- Bir ESP32 mikrodenetleyicisi, diğer üç ESP32 mikrodenetleyicisine ESP-NOW protokolünü kullanarak bağlanacak ve veri gönderecek bir sunucu olarak hareket eder.
- Diğer üç ESP32 mikrodenetleyicisi, sunucu ESP32'ye ESP-NOW protokolünü kullanarak bağlanır ve veri alışverişi yaparlar.
- Aktif olan ESP32 mikrodenetleyicisi gönderici olup, diğer ESP32 mikrodenetleyiciler istemci konumuna geçer. Şekil 4'te ESP32 mikrodenetleyicilerin kendi aralarındaki haberleşmesini göstermektedir.



Şekil 4. 4 ESP32 mikrodnetleyicilerin kendi aralarındaki haberleşmesi

ESP32 kartlarının atamaları aşağıdaki şekilde sağlandı.

ESP32 Wi-Fi modülü 1 _____ PLC1

ESP32 Wi-Fi modülü 2 _____ PLC2

ESP32 Wi-Fi modülü 3 _____ Robotino1

ESP32 Wi-Fi modülü 4 _____ Robotino2

PLC1'in bağlı olduğu yürüyen bant1'deki sensör tarafından PLC 1 tarafına bir bilgi geldiğinde Robotino robotun AI1'ine 3.3V gelir. PLC2'in bağlı olduğu yürüyen bant2 'deki sensörden PLC 2 tarafına bilgi geldiğinde ise Robotino robotun AI2'ine 3.3V gelir. Buradaki analog girişlere gelen bilgiler Robotino robotların hat değişimine katkıda bulunur. Robotino robot, yürüyen bant1'in önüne gittiğinde role1 aktif olur. Robotino robot, yürüyen bant2'in önüne gittiğinde role2 aktif olur. Bu her bir Robotino için geçerlidir. (Pınar, 2024).

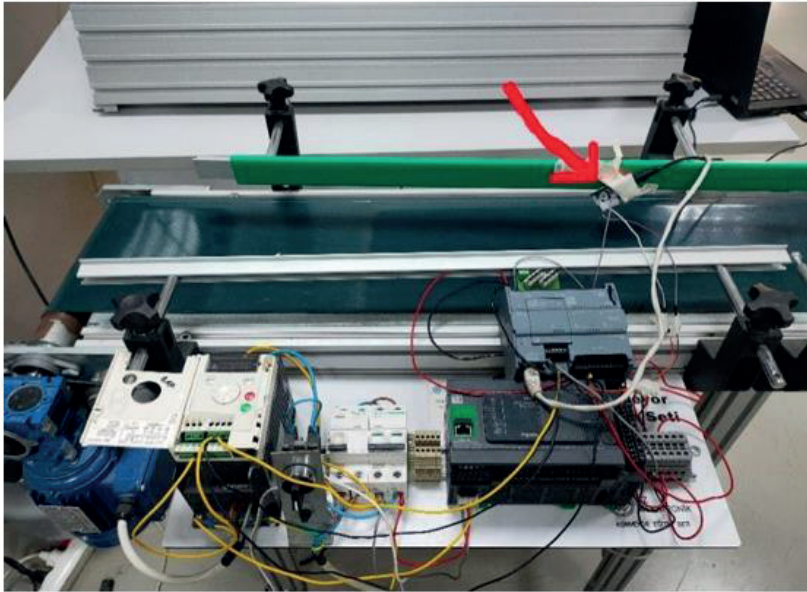
Robotino tarafından değerlendirme yapacak olursak;

Role1 aktif olduğunda “yürüyen bant1 önündeyim” bilgisini, role 2 aktif olduğunda “yürüyen bant2 önündeyim” bilgisini bize vermektedir. Yürüyen bant1'in önünde ürün birikmişse Robotino'nun AI1 analog girişine 3.3V gelir, yürüyen bant2'nin önünde ürün birikmişse Robotino'nun AI2 analog girişine 3.3V gelir. Analog girişler ESP32 kartının 26. pinine bağlıdır. Ürün belirlenen sınırı aştığında program içindeki sayıcı çıkışının aktif ettiği PLC çıkışı, ESP32 kartının 36. pinine bağlıdır. (Pınar, 2024).

ESP32 Wi-Fi modülü ile ilgili bağlantı bilgileri aşağıdaki gibidir.

ESP32 Wi-Fi modülü 1: ESP32 modülünün 26.pini (çıkış3) PLC1'in analog girişine bağlanır. 36.pin (giriş1) PLC1'in sayıcı çıkışının aktif ettiği çıkışa bağlanır. PLC1 programındaki sayıcı belirlenen ürün sayısına ulaşıldığında “işlem tamam” bitini kurar ve ESP-NOW ile tüm ağa “1” sinyal verisi gönderilir.

ESP32 Wi-Fi modülü 2: PLC1 sayıcı çıkışının aktif ettiği çıkıştan veri geldiğinde ESP-NOW ağı ile sadece giriş1'e veri girişi olur. ESP32 modülünün 27.pini (çıkış 4) PLC2'in analog girişine bağlanır. 39.pin (giriş 2) PLC2'in sayıcı çıkışının aktif ettiği çıkışa bağlanır. ESP32 Wi-Fi modülü 3 ve 4: Modül3'ün çıkış1'i Robotino robotun AI1 analog girişine bağlıdır. ESP-NOW ağından PLC1'in Q0.1 çıkış sinyali geldiğinde AI1 aktif olur. Modül3'ün out2 çıkışı Robotino robotun AI2 analog girişine bağlıdır. ESP-NOW ağından PLC2'nin Q0.2 çıkış sinyali geldiğinde AI2 aktif olur. Modül3'ün input1'ine sinyal geldiğinde bütün ağa istasyon 2'ye gittiği sinyalini gönderir. ESP32 modülünün 34.pini (giriş 3) Robotino robotun role1'ine bağlanır. Bu ise "yürüyen bant1 önündeyim" bilgisini verir. ESP32 modülünün 35.pini (giriş 4) Robotino robotun role2'ine bağlanır. Bu ise "yürüyen bant2 önündeyim" bilgisini verir. ESP32 modülünün 33.pini (çıkış1) Robotino robotun AI1 girişine bağlanır ve bu girişe sinyalin gelmesi demek yürüyen bant1'de ürün birikmesi anlamına gelmektedir. ESP32 modülünün 25.pini (çıkış2) Robotino robotun AI2 girişine bağlanır ve bu girişe sinyalin gelmesi yürüyen bant2'de ürünün biriktiği anlamına gelmektedir. Şekil 5'te ESP32 mikrodnetleyici kartının Wi-Fi haberleşme için yürüyen bant üzerindeki PLC ile bağlantısı gösterilmiştir. (Pınar, 2024).



Şekil 5. 4 ESP32 mikrodnetleyici kartının Wi-Fi haberleşme için bant üzerindeki PLC ile bağlantısı (Pınar, 2024).

3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, PLC'ler ile Festo Robotino mobil robotlar arasında harici bir kablosuz erişim noktasına (Access Point) ihtiyaç duymayan, düşük gecikmeli ve güvenilir bir kablosuz haberleşme mimarisi geliştirilmiştir. Sistemde kullanılan dört adet ESP32 mikrodenetleyici üzerinden katman-2 (MAC adresi tabanlı) ESP-NOW protokolü yapılandırılarak eşten eşe (Peer-to-Peer) bir ağ altyapısı kurulmuştur. Gerçekleştirilen deneysel testler; PLC kontrol sinyalleri ile robot verilerinin kararlı bir şekilde aktarıldığını ve altyapı maliyetlerini düşüren esnek bir endüstriyel iletişim ortamı sağlandığını göstermiştir. ESP32 ve ESP-NOW entegrasyonunun akıllı fabrikalar ve esnek üretim sistemleri için yüksek başarımlı ve düşük maliyetli bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalar; maliyet odaklı ve yüksek performanslı bir mikrodenetleyici olan ESP32'nin, endüstriyel PLC ve mobil robotik sistemler arasında esnek, güvenilir ve kablosuz bir köprü işlevi görebileceğini kanıtlamıştır. Geliştirilen bu mimari; kablo karmaşasını engellemiş, altyapı maliyetlerini düşürmüş ve esnek üretim sistemlerine (Endüstri 4.0 / Akıllı Fabrikalar) uyumlu bir altyapı sunmuştur.

İlerleyen çalışmalarda, ESP-NOW protokolünün dâhili AES-128 şifreleme özellikleri derinleştirilerek endüstriyel siber güvenlik katmanları güçlendirilebilir. Sistemdeki robot ve PLC sayısı artırılarak, ESP-NOW tabanlı bir Wi-Fi Mesh ağı mimarisinin dinamik yönlendirme performansı incelenebilir. ESP32 ile PLC arasındaki haberleşmede Modbus RTU/TCP veya PROFINET kütüphanelerinin doğrudan entegrasyonu optimize edilebilir.

KAYNAKÇA

- Bayram, H. (2013). Multi robot communication and task coordination (Yüksek lisans tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Belda, K., & Jirsa, J. (2021). Control principles of autonomous mobile robots used in cyber-physical factories. *Proceedings of the 2021 23rd International Conference on Process Control (PC)*, 314-319. <https://doi.org/10.1109/PC52310.2021.9447468>
- Budak, E. (2015). *Yük taşımayı otonom olarak gerçekleştirebilen çoklu mobil robot uygulaması* (Yüksek lisans tezi). Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Duymazlar, O., & Engin, D. (2023). Design, application and analysis of an OPC-based SCADA system. *Politeknik Dergisi*, 26(2), 991-999.
- Duymazlar, O. ve Gönenli, C. (2024). *A Comparative Analysis of Genetic and Particle Swarm Optimization Algorithms for Delta Robot Inverse Kinematics*. Article and Reviews in Engineering Sciences içinde (s. 377-387). Platanus Publishing.
- Festo Didactic SE. (2022a). *Robotino 3 manual and technical specifications*. Festo Didactic GmbH & Co. KG.
- Festo Didactic SE. (2022b). *Robotino View software documentation*. Festo Didactic GmbH & Co. KG.
- Gönenli, C., Duymazlar, O., Ercan, E. ve Aka, Ç. (2025). *Design and Application of a PLC-Based Vibratory Stress Relief System*. Türkiye ve Dünyada Makine Mühendisliği içinde (s. 423-437). YAZ Yayınları.
- Prorok, A., Hsieh, M. A., & Kumar, V. (2017). The impact of diversity on optimal control policies for heterogeneous robot swarms. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(2), 346-358. <https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2631593>
- Surmann, H., Jestel, C., Marchel, R., Musberg, F., Elhadj, H., & Ardani, M. (2020). Deep reinforcement learning for real autonomous mobile robot navigation in indoor environments. *arXiv preprint arXiv:2005.13857*.
- Wang, Y., & de Silva, C. W. (2008). A machine-learning approach to multi-robot coordination. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(3), 470-484. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2007.05.006>
- Mukhlisin, S. W., Rachmat, H., & Mulyana, T. (2016). Perancangan sistem storage and retrieval machine pada simulasi automated storage and retrieval system dengan memanfaatkan Robotino®. *JRSI (Jurnal Rekayasa Sistem Dan Industri)*, 3(1), 27-32
- Pınar, S. (2024). Dinamik ortamlarda çalışan çoklu otonom robotlar için makine öğrenmesi algoritması geliştirilmesi. *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1(1), 1-12.