

MÜHENDİSLİKTE MODERN VE ÇAĞDAŞ ARAŞTIRMALAR



All Sciences Academy

MÜHENDİSLİKTE MODERN VE ÇAĞDAŞ ÇALIŞMALAR

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA





Mühendislikte Modern ve Çağdaş Çalışmalar

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA

Dizayn: All Sciences Academy Design

Basım Tarihi: Ağustos 2026

Yayıncı Sertifika Numarası: 72273

ISBN: 978-625-8839-66-1

© All Sciences Academy

www.allsciencesacademy.com

allsciencesacademy@gmail.com

İÇERİK

1. Bölüm	5
Medikal Görüntü Analizinde Açıklanabilir Yapay Zeka (XAI): Yöntemler, Değerlendirme Metrikleri ve Klinik Perspektifler	
<i>Emine Gül ÖZKAN, Ahmet SAYGILI</i>	
2. Bölüm	30
İş Sağlığı ve Güvenliğinde Risk Değerlendirme Metotları	
<i>Fatma BOSTAN ÖZTÜRK, Türkey Ercan ŞENGÖZ, İlyas KARTAL</i>	
3. Bölüm	49
Atık Polipropilen Agregalı LC ³ Esaslı Harçların Özellikleri	
<i>Nazım Çağatay DEMİRAL, Aylin ÖZODABAŞ</i>	
4. Bölüm	60
Türk Enerji Birliği Perspektifinde Türk Devletleri Arasında HVDC Elektrik Enterkonneksiyonu: Teknik ve Stratejik Bir Değerlendirme	
<i>Turan ÇAKIL</i>	

Medikal Görüntü Analizinde Açıklanabilir Yapay Zeka (XAI): Yöntemler, Değerlendirme Metrikleri ve Klinik Perspektifler

Emine Gül ÖZKAN¹

Ahmet SAYGILI^{2,*}

¹Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ, Türkiye. ORCID: 0009-0009-3381-5410

²Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye. ORCID: 0000-0001-8625-4842

* Correspondence: asaygili@nku.edu.tr

ÖZET

Derin öğrenme modelleri medikal görüntü analizinde yüksek başarımlar gösterebilmekle birlikte, karar süreçlerinin izlenemediği kara kutu (black-box) yapıları nedeniyle klinik güven açısından önemli bir engelle karşılaşmaktadır. Bu bölümün amacı, tıbbi görüntüleme için kullanılan Açıklanabilir Yapay Zeka (XAI) yöntemlerini bütüncül bir taksonomi altında incelemek, bu açıklamaların nasıl doğrulanacağını tartışmak ve yöntemlerin klinik uygulanabilirliğini değerlendirmektir. Yöntemler; model eğitildikten sonra uygulanan post-hoc yaklaşımlar (Grad-CAM ve türevleri, LIME, SHAP, kavram tabanlı testler, karşıtölçüsel açıklamalar) ile yorumlanabilir bileşenlerin karar mimarisine gömüldüğü model-içi yaklaşımlar (prototip tabanlı öğrenme, kavram darboğazı modelleri, dikkat tabanlı mimariler) olarak ele alınmıştır. Dikkat ağırlıkları tek başına sadık bir açıklama olarak kabul edilmemiştir. Literatürün sentezi, Grad-CAM gibi görselleştirme tekniklerinin radyolojide en yaygın kullanılan araçlar olduğunu; ancak bu yöntemlerin çoğunlukla nedensellikten ziyade korelasyona dayalı sonuçlar ürettiğini ortaya koymaktadır. Medikal görüntüleme için yürütülen sistematik değerlendirmeler, yaygın belirginlik yöntemlerinin güvenilirlik ölçütlerini karşılamakta zorlandığını ve lokalizasyon başarımlarının radyolog referans ölçütünün gerisinde kaldığını göstermektedir. Nicel metriklerin (sadakat, dayanıklılık, konumlandırma) ve güvenilirlik testlerinin yaygın biçimde kullanılmaması, klinik adaptasyonun önündeki temel darboğaz olarak belirlenmiştir. Bölümde ayrıca kestirme öğrenme, alt-grup adaleti, belirsizlik kestirimi, insan-yapay zeka etkileşimindeki yanlışlıklar ile AB Yapay Zeka Yasası, CLAIM ve DECIDE-AI gibi düzenleyici ve raporlama çerçeveleri tartışılmakta; araştırmacılar için uygulanabilir bir iyi uygulama listesi sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Açıklanabilir Yapay Zeka (XAI), Derin Öğrenme, Medikal Görüntü Analizi, Kara Kutu, Grad-CAM, Kavram Darboğazı Modelleri, Sadakat, Klinik Güven.

1. GİRİŞ

Derin öğrenme, son on yılda görüntü analizinde köklü bir dönüşüme yol açmıştır. Bu gelişmeden önce görüntü analizi, uzmanlar tarafından elle tasarlanan öznitelikler kullanan istatistiksel sınıflandırıcılarla yürütülüyordu;

derin mimarilerde ise öznitelikler, belirli bir girdi için en uygun temsili (representation) üretmek üzere doğrudan ağ tarafından öğrenilmektedir (Van der Velden vd., 2022). Ağ, doğrusal olmayan ve iç içe geçmiş çok sayıda katmandan oluştuğundan, tüm katmanlar tanımlanabilse dahi belirli bir karara nasıl ulaşıldığını kavramak neredeyse imkansızdır. Bu nedenle derin öğrenme modelleri sıklıkla *kara kutu* (black-box) olarak adlandırılır ve modelin fark edilmeden yanlı davranabileceği yönünde ciddi endişeler oluşmuştur. Hata toleransının son derece düşük olduğu tıbbi uygulamalarda bu durum telafisi güç sonuçlar doğurabilmektedir (Nazir vd., 2023; Tjoa & Guan, 2021).

Açıklanabilir Yapay Zeka (Explainable Artificial Intelligence, XAI), bir modelin *ne* tahmin ettiğini değil, *neden* o tahmini yaptığını anlamayı hedefleyen yöntemler bütünüdür. Açıklanabilirlik ihtiyacı, uygulama alanına ve kararın taşıdığı riske göre değişir: bir görüntüdeki hayvan türünü kestiren modelde bu ihtiyaç düşükken, kanser öngören bir modelde kritik düzeye çıkar. Tıbbi görüntülemede yüksek doğruluk tek başına yeterli değildir; radyolog ve klinisyenlerin kararı doğrulayabilmesi, hatalı kararları fark edebilmesi ve sisteme kalibre bir güven duyabilmesi gerekir (Singh vd., 2020; Ghnemat vd., 2023).

1.1. Açıklanabilirliğin Klinik, Etik ve Hukuki Gerekçeleri

Açıklanabilirlik talebi dört gerekçenin kesişiminde doğar. Klinik gerekçe, hekimin yapay zeka çıktısını kendi muhakemesiyle karşılaştırabilmesidir; açıklamanın asıl işlevi güveni artırmak değil, güveni kalibre etmektir. Bilimsel gerekçe, modelin patolojiden mi yoksa veri kümesine özgü bir yapaylıktan mı öğrendiğinin denetlenebilmesi ve hata analizinin mümkün kılınmasıdır. Etik gerekçe, kararın hastaya ve hekime gerekçelendirilebilmesi ile alt gruplar arasındaki başarımların farklarının görünür kılınmasıdır. Hukuki gerekçe ise tıbbi görüntüleme yazılımlarının, üçüncü taraf uygunluk değerlendirmesi gerektiren tıbbi cihazların güvenlik bileşeni oldukları ölçüde yüksek riskli yapay zeka sistemleri kapsamında değerlendirilerek şeffaflık, kayıt tutma ve insan gözetimi yükümlülüklerine tabi olmasıdır (Avrupa Parlamentosu ve Konseyi, 2024). Bu gerekçeler farklı paydaşlara hitap ettiğinden, tek bir açıklama biçiminin hepsini birden karşılaması beklenemez.

1.2. Alandaki Temel Tartışma ve Bölümün Amacı

Literatürde birbirini dengeleyen iki konum bulunmaktadır. Rudin (2019), yüksek riskli kararlarda kara kutu modellerin sonradan açıklanmasının yanıltıcı olduğunu, bunun yerine doğası gereği yorumlanabilir modellerin tasarlanması gerektiğini savunur; zira post-hoc açıklama, tanımı gereği modelin kendisi değil bir yaklaşımdır ve bu yaklaşım hatalıysa hata görünmez kalır. Ghassemi vd. (2021), mevcut açıklanabilirlik yöntemlerinin hasta düzeyinde karar desteği için beklenen güveni sağlayamadığını; bu yöntemlerin asıl değerinin model denetimi ve hata ayıklama gibi küresel süreçlerde olduğunu, dolayısıyla yerel açıklamaların titiz iç ve dış validasyonun yerine geçemeyeceğini ileri sürer. Buna karşılık, halihazırda eğitilmiş yüksek başarılı mimarilerin klinik ortamda denetlenmesi ihtiyacı post-hoc yöntemleri vazgeçilmez kılmaktadır. Bu bölüm iki konumu karşıt değil tamamlayıcı olarak ele alır ve şu çerçeveyi benimser: post-hoc açıklamalar bir doğrulama aracı değil, bir hipotez üretme aracıdır; klinik iddia ancak nicel validasyon, dış merkez testleri ve prospektif çalışmalarla kurulabilir.

Bu doğrultuda bölümün katkıları; post-hoc ve model-içi (ante-hoc) yöntemleri kapsam, model bağımlılığı ve açıklama biçimi eksenleriyle birlikte ele alan çok boyutlu bir taksonomi sunmak, açıklamaların nasıl doğrulanacağını medikal görüntülemeye özgü kanıtlarla tartışmak, kestirme öğrenme ile adalet ve belirsizlik sorunlarını tek çatı altında birleştirmek, regülasyon ve raporlama standartlarının XAI pratiğine yansımalarını açıklamak ve uygulayıcılar için bir iyi uygulama kontrol listesi önermektir. Bölümün kalanında sırasıyla kavramsal çerçeve, ilgili derlemeler, yöntem taksonomisi, klinik uygulamalar, değerlendirme metrikleri, açık problemler, regülasyon ve öneriler ele alınmaktadır.

2. AÇIKLANABİLİR YAPAY ZEKANIN KAVRAMSAL ÇERÇEVESİ

Literatürde açıklanabilirlik (explainability) ve yorumlanabilirlik (interpretability) kavramları çoğu zaman eşanlamli kullanılsa da aralarında anlamlı bir ayrım vardır. Yorumlanabilirlik, modelin karar mekanizmasının insan tarafından doğrudan izlenebilmesini ifade eder ve mimarinin bir özelliğidir; açıklanabilirlik ise karmaşık bir modelin davranışının sonradan anlaşılır kılınmasıdır ve model üzerine eklenen bir katmandır (Rudin, 2019).

Bu ayrım, bölümde kullanılan post-hoc / model-içi (ante-hoc) ayrımının da temelini oluşturur.

XAI yöntemleri birbirini tamamlayan birkaç boyut üzerinden sınıflandırılır:

- **Uygulama zamanı:** Yöntem eğitim sonrasında mı uygulanıyor (post-hoc), yoksa yorumlanabilir bileşenler karar mimarisine mi gömülü (model-içi / ante-hoc)?

- **Kapsam:** Açıklama tek bir tahmini mi (yerel), modelin genel davranışını mı (küresel) hedefliyor?

- **Model bağımlılığı:** Yöntem her mimariye uygulanabilir mi (modelden bağımsız), yoksa belirli bir mimariye mi özgü (modele özgü)?

- **Açıklama biçimi ve modalite:** Çıktı görsel, metinsel, kavramsal, örnek tabanlı veya karşılığusal olabilir; açıklama yalnızca görüntüye ya da görüntüyle birlikte klinik ve metinsel veriye dayanabilir.

Yerel açıklamalar (ör. LIME, SHAP, Integrated Gradients) “bu görüntü neden bu sınıfa atandı?” sorusuna yanıt verirken; küresel açıklamalar (ör. TCAV kavram skorları) modelin genel eğilimlerini ortaya koyar. Klinik denetim açısından bu birliktelik kritiktir: tekil bir vakadaki isabetli ısı haritası, modelin veri kümesi genelinde doğru gerekçelerle çalıştığını kanıtlamaz.

Bir açıklamanın iki temel ve çoğu zaman çelişen niteliği vardır. Sadakat (faithfulness), açıklamanın modelin gerçek karar mekanizmasını ne ölçüde yansıttığını; anlaşılabilirlik ise hekim tarafından ne kadar kolay yorumlanabildiğini ifade eder. Yüksek sadakatli bir gradyan haritası klinik olarak okunaksız kalabilirken, sade ve ikna edici bir görselleştirme modelin gerçek gerekçesini yansıtmayabilir; ikna edicilik ile doğruluk karıştırıldığında yanlış kalibre edilmiş bir güven ortaya çıkar. Açıklamanın uygun biçimi muhatabına göre de değişir; kullanıcının uzmanlığı, sahip olduğu bilişsel yığınların biçimini ve beklediği ayrıntı düzeyini belirler (Doshi-Velez & Kim, 2017).

3. İLGİLİ DERLEME ÇALIŞMALARI

Medikal görüntülemelerde XAI, hızla genişleyen ve çok sayıda kapsamlı derlemeye konu olan bir alandır. Tjoa ve Guan (2021) yöntemleri algısal yorumlanabilirlik ile matematiksel yapı üzerinden yorumlanabilirlik olmak üzere iki ana kutupta sınıflandırmış; açıklamaların kasıtlı manipülasyona ve gürültüye karşı kırılganlığına dikkat çekerek tıbbi alanda hesap verebilirliğin

ayrı bir sorun oluşturduğunu vurgulamıştır. Van der Velden vd. (2022), 223 çalışmayı model-tabanlı/post-hoc, modele özgü/modelden bağımsız ve küresel/yerel olmak üzere üç ölçütlü bir çerçevede sınıflandırmış; yöntemleri görsel, metinsel ve örnek tabanlı olarak ayırarak literatürün ağırlıklı olarak post-hoc, yerel ve görsel açıklamalara dayandığını, çalışmaların anatomik konum ve modalite açısından ise göğüs/beyin ile X-ışını/MRI çevresinde yoğunlaştığını göstermiştir. Nazir vd. (2023), MRI, BT ve X-ışını çalışmalarında Grad-CAM'in en yaygın kullanılan XAI tekniği olduğunu (bunu LRP, LIME ve SHAP'ın izlediğini), buna karşın açıklanabilirlik performansının ölçülmesinde üzerinde uzlaşılmış nicel bir metrik setinin henüz oluşmadığını raporlamıştır. Patrício vd. (2023) açıklama modalitesine göre görsel (öznitelik atfı), metinsel, örnek tabanlı ve kavram tabanlı yöntemleri ayrı kategorilerde incelemiş; alanda hâlen Grad-CAM, Integrated Gradients ve LRP gibi post-hoc saliency yöntemlerinin baskın olduğunu, buna karşılık içsel olarak yorumlanabilir ve kavram tabanlı modellerin giderek öne çıkan bir araştırma yönü haline geldiğini vurgulamıştır. D. Muhammad ve Bendeche (2024) 18 farklı XAI yaklaşımını matematiksel temelleri, çalışma prensipleri ve sınırlılıklarıyla karşılaştırmalı olarak incelemiş; incelenen çalışmalarda açıklanabilirliğe özgü hiçbir değerlendirme metriğinin kullanılmadığını, mevcut metriklerin derin öğrenme alanından ödünç alındığını ve dayanıklılık ile tutarlılığı da kapsayan, XAI'ye özgü nicel metriklerin geliştirilmesinin öncelikli araştırma yönü olduğunu vurgulamıştır.

Metodolojik eleştiri getiren çalışmalar özellikle önemlidir. Miró-Nicolau vd. (2022), beş farklı dijital veri tabanından derledikleri 141 çalışmaları sistematik literatür incelemesinde, X-ışını analizinde kullanılan açıklanabilirlik yöntemlerinin %81,56'sında herhangi bir değerlendirme metriği kullanılmadığını yapılan değerlendirmelerin ise ağırlıklı olarak objektif metriklerden yoksun, öznel (subjektif) biçimde ve yazarların kendi sezgilerine dayalı olarak gerçekleştirildiğini belirtmiştir. Nauta vd. (2023), 2014–2020 dönemini kapsayan sistematik incelemelerinde 361 çalışmayı ele almış; bunlardan yeni bir XAI yöntemi öneren 312 makalenin üçte birinin (%33) değerlendirmeyi yalnızca anekdotsal kanıtlarla yaptığını ortaya koymuştur. Araştırmacılar, açıklama kalitesinin çok boyutlu ve nesnel biçimde değerlendirilebilmesi amacıyla 12 kavramsal özellikten oluşan Co-12 çerçevesini önermiştir. Alanın en güncel derlemelerinden Q. Sun vd. (2025) görsel, işitsel ve çok modlu tıbbi uygulamalardaki XAI pratiklerini tek bir

çerçevede sentezlerken; Haile Dagnaw vd. (2025) modalite merkezli bir taksonomi önererek çok modlu öğrenmenin ve Görüntü–Dil Modellerinin (VLM) açıklanabilirliğini yeni bir araştırma eksenini olarak öne çıkarmaktadır. Saw vd. (2025) ise yapay zeka açıklamalarının hekimlerin klinik karar verme süreçleriyle hizalanması gerektiğini savunmaktadır. Yazarlar, radyologların tıbbi görüntü yorumlama esnasındaki sezgisel (Tip 1) ve analitik (Tip 2) bilişsel mekanizmalarını analiz ederek, XAI yöntemlerinin klinik iş akışlarına pratik entegrasyonunu ve hekimlerin alan bilgisiyle uyumunu tartışmış; böylelikle konuyu doğrudan klinik pratik boyutuna taşımıştır. Bu derlemelerin ortak paydası dikkat çekicidir: yöntem çeşitliliği hızla artarken, *değerlendirme* pratiği aynı hızda olgunlaşmamıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Medikal görüntülemelerde XAI üzerine seçilmiş derleme çalışmalarının sentezi.

Çalışma (yıl)	Kapsam ve yaklaşım	Öne çıkan bulgu / işaret ettiği boşluk
Tjoa & Guan (2021)	Yöntemlerin matematiksel yapılarına göre sınıflandırılması	Açıklamalar manipülasyona ve gürültüye açıktır; klinik hesap verebilirlik zayıftır
Van der Velden vd. (2022)	Medikal görüntülemelerde anatomi ve modalite eksenli taksonomi	Literatür ağırlıklı olarak post-hoc ve görsel yöntemlere dayanmaktadır
Miró-Nicolau vd. (2022)	X-ışını analizinde 141 çalışmanın sistematik incelenmesi	Açıklamaların büyük bölümünde nicel doğrulama yapılmamıştır
Nazir vd. (2023)	MRI, BT, X-ışını ve optik modalitelerde XAI uygulamaları	Grad-CAM en yaygın tekniktir; standartlaştırılmış nicel metrik kullanımı yoktur
Patrício vd. (2023)	Görsel, metinsel, örnek ve kavram tabanlı açıklamaların dört kategoride incelenmesi	Alan çok modlu ve kavram odaklı modellere evrilmektedir; sınıflandırma dışı görevler eksik kalmaktadır
Nauta vd. (2023)	361 çalışmada değerlendirme pratiğinin taranması	Değerlendirme büyük ölçüde anekdotsaldır; Co-12 çerçevesi önerilmektedir
D. Muhammad & Bendeche (2024)	Pertürbasyon, geri yayılım ve CAM tabanlı yöntemler	Sadakat, dayanıklılık ve karmaşıklık metrikleri birlikte raporlanmalıdır
Q. Sun vd. (2025)	Görsel, işitsel ve çok modlu tıbbi uygulamalarda XAI pratikleri	Modalite ötesi bütüncül bir sentez sunulmakta; değerlendirme pratiği dağınık kalmaktadır
Haile Dagnaw vd. (2025)	Biyomedikal görüntülemelerde modalite merkezli taksonomi	Çok modlu öğrenme ve Görüntü–Dil Modellerinin açıklanabilirliği yeni araştırma eksenini olarak öne çıkarılmaktadır

4. XAI YÖNTEMLERİNİN TAKSONOMİSİ VE TEKNİK DETAYLARI

Bu bölümde açıklanabilirlik yöntemleri, modelin karar sürecine nasıl bağlandıklarına göre post-hoc ve doğası gereği yorumlanabilir tasarımlar olmak üzere iki ana kategoride incelenmiştir. Şekil 1, bu kategorilerin alt dallarını ve kesişen sınıflandırma boyutlarını bir arada göstermektedir.



Şekil 1. Medikal görüntülemelerde kullanılan XAI yöntemlerinin taksonomisi.

4.1. Post-hoc (Model Eğitildikten Sonra) Yöntemler

Bu yaklaşımda model kara kutu olarak kalır; eğitim tamamlandıktan sonra harici bir teknikle kararlar yorumlanmaya çalışılır. Hazır modellerin yeniden eğitilmesine gerek kalmadığından medikal alanda en yaygın kullanılan gruptur. Ancak bu esnekliğin bedeli, açıklamanın modelin kendisi değil bir *yaklaşımı* olmasıdır; dolayısıyla post-hoc çıktıların sadakati ayrıca sınanmalıdır (Rudin, 2019).

4.1.1. Görsel Açıklamalar (Saliency / Isı Haritaları)

Bu yöntemler, giriş görüntüsündeki piksellerin modelin tahminine katkısını bir ısı haritasıyla görselleştirir. Gradyan ve geri yayılım tabanlı yöntemler, çıkış sınıfının girdiye göre türevini alarak önem haritası oluşturur; Simonyan vd. (2014) belirginlik haritalarını literatüre kazandırmış, Zeiler ve Fergus (2014) ile Springenberg vd. (2015) geri yayılım tabanlı görselleştirmeleri geliştirmiş, Sundararajan vd. (2017) aksiyomatik temelli

Integrated Gradients yöntemini, Smilkov vd. (2017) ise gürültüyü azaltan SmoothGrad'ı önermiştir. Bach vd. (2015) tarafından geliştirilen Katmanlı İlgili Yayılımı (LRP), tahmini geriye doğru dağıtarak piksel düzeyinde ilgi skorları üretir ve Alzheimer sınıflandırmasında MR verisinde başarıyla kullanılmıştır (Böhle vd., 2019).

Sınıf Aktivasyon Haritaları (CAM) ailesi, medikal görüntüleme en yaygın kullanılan açıklama yaklaşımlarından biridir. Zhou vd. (2016) tarafından önerilen CAM mimari değişikliği gerektirirken, Selvaraju vd. (2017) tarafından geliştirilen Grad-CAM gradyan bilgisini kullanarak bu kısıtı ortadan kaldırmıştır. Sonraki türevler farklı sınırlamaları hedeflemiştir: Grad-CAM++ çoklu lezyon durumunda kapsayıcılığı artırır (Chattopadhyay vd., 2018), Score-CAM gradyandan bağımsız çalışarak gürültüyü azaltır (H. Wang vd., 2020), XGrad-CAM aksiyomatik bir temel sunar (Fu vd., 2020), LayerCAM ara katmanlardan daha ince ayrıntılı haritalar üretir (Jiang vd., 2021) ve Eigen-CAM temel bileşen analizine dayanır (M. B. Muhammad & Yeasin, 2020). Raghavan vd. (2024), dikkat güdümlü bir Grad-CAM varyantı ile kızılötesi meme görüntülerinde gürültülü ısı haritalarının azaltılabildiğini göstermiştir. Bu yöntemlerin önemli kısıtları, kullanılan katmana bağlı olarak kaba çözünürlüklü haritalar üretebilmeleri, küçük lezyonlarda sınır belirsizliği yaratabilmeleri ve tek başlarına nedensel açıklama sunmamalarıdır (Şekil 2).



Şekil 2. Grad-CAM açıklamasının medikal görüntüleme iş akışındaki şematik gösterimi.

4.1.2. Öznitelik Önemi ve Kavram Tabanlı Açıklamalar

Öznitelik önemi yöntemleri, her bir giriş özneliğinin karara ne yönde ve ne ölçüde katkı sağladığını hesaplar. LIME, kara kutu modeli belirli bir

örneğin çevresinde basit bir vekil modelle taklit ederek yerel açıklama sunar; medikal görüntülerde süperpiksel bölütleme parametrelerine duyarlıdır (Ribeiro vd., 2016). SHAP, koalisyonel oyun teorisine dayanarak katkıları Shapley değerleri üzerinden dağıtır ve hem yerel hem küresel açıklama üretebilir; kuramsal olarak güçlü olmakla birlikte yüksek boyutlu görüntülerde hesaplama maliyeti yüksektir (Lundberg & Lee, 2017). Tıkanma hassasiyeti ise görüntünün belirli kısımlarını kapatarak tahmindeki düşüşü izler; sezgisel ve modelden bağımsızdır, ancak pencere boyutuna duyarlıdır (Zeiler & Fergus, 2014).

Piksel düzeyindeki açıklamaların en önemli kısıtı, klinik dilde karşılığı olan kavramlara bağlanamamalarıdır. Kavram tabanlı yöntemler bu boşluğu doldurur: TCAV, bir kavramı temsil eden örnek kümesinden türetilen kavram aktivasyon vektörleri aracılığıyla modelin bir sınıf kararında o kavramdan ne ölçüde etkilendiğini ölçer (B. Kim vd., 2018); ACE ise kavramları veriden otomatik olarak çıkararak insan etiketleme yükünü azaltır (Ghorbani vd., 2019b). Dermatolojide bu yaklaşımlar, “düzensiz sınır” gibi klinik terimlerle konuşan açıklamalar üretebilmektedir (Patrício vd., 2023).

4.1.3. Karşılgusal, Örnek Tabanlı ve Transformer Odaklı Açıklamalar

Karşılgusal (counterfactual) açıklamalar, “girdide asgari düzeyde ne değişseydi model kararını değiştirirdi?” sorusunu yanıtlar ve modelin karar sınırını değişim üzerinden inceleyen güçlü bir açıklama biçimidir; ancak tek başına nedensellik kanıtı oluşturmaz (Wachter vd., 2017). Üretici modellerle oluşturulan karşılgusal görüntüler, modelin hangi görsel niteliğe duyarlı olduğunu görünür kılar; Singla vd. (2023) bu yaklaşımla göğüs radyografisi modellerinin karar sınırlarını incelemiştir. Örnek tabanlı açıklamalar ise kararı, eğitim kümesindeki benzer vakalara dayandırarak hekimin alışkın olduğu vaka temelli akıl yürütmeyi taklit eder (Fontes vd., 2024). Görsel transformer modellerinin yaygınlaşmasıyla birlikte dikkat akışının katmanlar boyunca izlenmesi (Abnar & Zuidema, 2020) ve ilgi yayılımının transformer mimarilerine uyarlanması (Chefer vd., 2021) gibi mimariye özgü yöntemler de geliştirilmiştir.

4.2. Model-İçi ve Doğası Gereği Yorumlanabilir Yaklaşımlar

Bu yaklaşımlarda yorumlanabilir bileşenler karar mekanizmasının parçasıdır; açıklama sonradan üretilen bir yaklaşım değil, modelin kendi karar zinciridir. Dikkat mekanizmaları girdinin belirli kısımlarına farklı ağırlıklar

atayarak modelin nereye odaklandığını görünür kılar ve segmentasyonda şekil bilgisiyle birleştirilerek klinik açıdan anlamlı çıktılar üretebilir (J. Sun vd., 2020). Ancak dikkat ağırlıklarının tek başına açıklama sayılıp sayılamayacağı tartışmalıdır: Jain ve Wallace (2019) dikkat dağılımlarının model çıktısıyla zayıf ilişkili olabildiğini gösterirken, Wiegreffe ve Pinter (2019) uygun deneysel kurgu altında dikkatin yine de bilgi taşıdığını savunmuştur. Dolayısıyla dikkat haritaları, sadakat testleriyle desteklenmedikçe klinik gerekçe olarak sunulmamalıdır.

Prototip tabanlı öğrenme, kararı eğitim sırasında öğrenilen temsilci prototiplerle benzerlik üzerinden kurar ve “bu görüntü şuna benziyor” biçiminde bir gerekçe üretir. Chen vd. (2019) tarafından önerilen ProtoPNet bu yaklaşımın öncüsüdür; Donnelly vd. (2022) deformasyona duyarlı bir varyant, Nauta vd. (2021) karar ağacı yapısıyla birleştiren ProtoTree’yi geliştirmiştir. Medikal alanda XProtoNet göğüs radyografisinde hastalık belirtilerini prototiplerle ilişkilendirmiş (E. Kim vd., 2021), IAIA-BL ise mamografide klinik olarak anlamlı prototiplerle vaka tabanlı akıl yürütme sunmuştur (Barnett vd., 2021). Kavram darboğazı modelleri (CBM), nihai karardan önce insan tarafından tanımlanmış kavramları kestirir ve kararı bu kavramlar üzerinden kurar; böylece hekim, hatalı bir kavram kestirimini düzelterek kararı doğrudan etkileyebilir (Koh vd., 2020). Kavram etiketleme maliyeti ve etiket eksikliğinde başarımların kaybı temel kısıtlardır; post-hoc CBM varyantları bu yükü azaltmayı hedefler (Yuksekgonul vd., 2023).

4.3. Post-hoc ve Ante-hoc Yöntemlerin Karşılaştırılması

İki yaklaşımın klinik açıdan güçlü ve zayıf yönleri Tablo 2’de karşılaştırılmıştır. Post-hoc yöntemler mevcut modeller üzerinde hızlı denetim imkanı sunarken, model-içi (ante-hoc) tasarımlar yorumlanabilir bileşenleri karar mimarisine yerleştirir; ancak bu yapıların varlığı tek başına sadakat garantisi sağlamaz. Yüksek riskli uygulamalarda yorumlanabilirliğin tasarım aşamasında ele alınması özellikle önemlidir (Rudin vd., 2022).

Tablo 2. Post-hoc ve model-içi (ante-hoc) yöntemlerin karşılaştırması.

Ölçüt	Post-hoc (Grad-CAM, LIME, SHAP)	Ante-hoc (CBM, ProtoPNet, dikkat)
Model başarımı	Genelde korunur; mevcut mimari değişmez	Yorumlanabilirlik kısıtı nedeniyle sınırlı kayıp olabilir
Uygulama kolaylığı	Yüksek; hazır kütüphanelerle uygulanabilir	Düşük; özel mimari ve etiketli kavram gerekir
Açıklama sadakati	Değişken; açıklama modelin bir yaklaşımıdır	Karar mekanizması açıklanabilir bileşenler üzerine kurulabilir; ancak yapısal yorumlanabilirlik tek başına ampirik sadakat garantisi sağlamaz
Klinik uyumluluk	Çoğunlukla piksel düzeyinde ve kaba	Kavramsal ve vaka temelli; klinik dile yakın
İnsan müdahalesi	Çoğu yöntemde mümkün değil; açıklama yalnızca gözlenir (post-hoc CBM istisnadır)	Mümkün; kavram düzeyinde düzeltme yapılabilir
Maliyet	Ek etiket gerektirmez; bazı yöntemlerde hesap yükü yüksektir	Kavram/prototip etiketleme ve eğitim maliyeti yüksektir
Tipik kullanım	Mevcut modelin denetimi ve hata analizi	Klinik karar desteği ve regüle ürün geliştirme

Yeniden üretilebilirlik açısından, kullanılan kütüphane ve hiperparametrelerin raporlanması belirleyicidir. Captum ve Quantus gibi açık kaynak araç setleri yöntem uygulamalarını ve değerlendirme metriklerini standartlaştırmayı kolaylaştırmaktadır (Kokhlikyan vd., 2020; Hedström vd., 2023). Grad-CAM sonuçları hedef katman seçimine, eşikleme ve yeniden ölçekleme stratejisine duyarlı olduğundan bu ayrıntılar açıkça bildirilmelidir.

5. MEDİKAL GÖRÜNTÜLEMEDE XAI UYGULAMALARI

Toraks ve akciğer görüntülemesi, XAI uygulamalarının yoğun olduğu alanlardan biridir; pnömoni ve nodül tespitinde sınıf aktivasyon haritaları modelin odaklandığı bölgeleri göstermek için erken dönemden itibaren kullanılmış (Rajpurkar vd., 2018), COVID-19 döneminde ise Grad-CAM türevleri hızla yaygınlaşmıştır (DeGrave vd., 2021). Ancak bu alan aynı zamanda kestirme öğrenmenin en sık belgelendiği alandır: modellerin patoloji yerine cihaz işaretleri veya merkez kaynaklı yapaylıklardan öğrendiği gösterilmiştir (Zech vd., 2018; DeGrave vd., 2021). Nöro-görüntülemede tümör derecelendirmesi ve Alzheimer sınıflandırmasında LRP ve dikkat tabanlı yöntemler öne çıkar; üç boyutlu veride açıklamanın görselleştirilmesi ve raporlanması ek bir zorluk oluşturur (Böhle vd., 2019). Meme görüntülemede kitle sınıflandırması ve kalsifikasyon tespitinde CAM türevleri ile prototip tabanlı modeller kullanılmakta, IAIA-BL gibi çalışmalar klinik

olarak anlamlı gerekçeler sunmaktadır (Barnett vd., 2021). Kızılötesi meme termografisinde ise Raghavan vd. (2024) dikkat güdümlü Grad-CAM yaklaşımını incelemiştir.

Dermatoloji ve histopatoloji gibi alanlarda kavram ve dikkat tabanlı yaklaşımlar, lezyon niteliklerinin klinik kavramlarla ilişkilendirilmesine olanak sağlayan alternatifler olarak öne çıkmaktadır (Patrício vd., 2023). Oftalmoloji ve kardiyolojide diyabetik retinopati derecelendirmesinde Integrated Gradients ve dikkat tabanlı görselleştirmeler kullanılmış; hekim–yapay zeka etkileşimini inceleyen çalışmalar ısı haritası desteğinin hastalığın bulunduğu olgularda doğruluğu artırdığını, buna karşılık hastalığın bulunmadığı olgularda doğruluğu düşürdüğünü ve okuma süresini uzattığını göstermiştir (Sayres vd., 2019). Kardiyak segmentasyonda ise şekil bilgisini dikkatle birleştiren SAUNet gibi mimariler yorumlanabilirliği tasarım aşamasında ele almaktadır (J. Sun vd., 2020).

6. AÇIKLAMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Lokalizasyon odaklı medikal görüntüleme çalışmalarında referans gerçek çoğunlukla lezyonun konumu veya uzman tarafından belirlenen bölgedir; bu nedenle bu tür açıklamaların değerlendirilmesi bazı diğer alanlara kıyasla daha nesnel yapılabilir. Buna karşın literatürde nicel değerlendirme hala istisnadır (Miró-Nicolau vd., 2022; Nauta vd., 2023).

6.1. Nicel Metrikler ve Güvenilirlik Testleri

Sadakat analizi, açıklamanın modele ne kadar sadık olduğunu pertürbasyon yoluyla ölçer: en önemli işaretlenen pikseller kademeli olarak silindiğinde (deletion) tahmin olasılığının hızla düşmesi, eklendiğinde (insertion) hızla yükselmesi beklenir. ROAR yaklaşımı, silinmiş veriyle modelin yeniden eğitilmesini önererek dağılım kayması sorununu kısmen giderir (Hooker vd., 2019). Konumlandırma metrikleri, XAI haritasının uzman tarafından çizilen lezyon sınırıyla örtüşmesini ölçer; en yaygın kesişim/birleşim oranıdır (IoU), isabet oranı (pointing game) ise en yüksek aktivasyon noktasının lezyon içine düşme sıklığını verir; tutulan enerji oranı, haritadaki toplam önem kütesinin ne kadarının lezyon maskesi içinde kaldığını gösterir. Dayanıklılık, görüntüye eklenen küçük ve tahmini değiştirmeyen bir gürültünün açıklamayı ne ölçüde değiştirdiğini ölçer;

Ghorbani vd. (2019a) ile Alvarez-Melis ve Jaakkola (2018), açıklamaların bu tür pertürbasyonlara karşı kırılğan olabildiğini göstermiştir.

Adebayo vd. (2018) tarafından ortaya konulan güvenilirlik testleri (sanity checks), bir yöntemin asgari geçerlilik koşulunu tanımlar: model parametreleri kademeli olarak rastgeleleştirildiğinde ya da etiketler karıştırılarak model yeniden eğitildiğinde açıklamanın da anlamlı biçimde değişmesi beklenir. Bazı yaygın yöntemlerin bu testlerde girdiye duyarlı ancak modele duyarsız kaldığı, yani kenar dedektörü gibi davrandığı gösterilmiştir. Kindermans vd. (2019) ise girdiye sabit bir kayma eklenmesinin bazı atıf yöntemlerini tamamen değiştirebildiğini ortaya koymuştur. Bu testleri geçmek yeterlilik değil, yalnızca gerekliliktir.

6.2. Medikal Görüntülemeye Özgü Kanıtlar ve İnsan Odaklı Değerlendirme

Genel bilgisayarlı görüde elde edilen uyarıların medikal veride de geçerli olduğu iki kapsamlı çalışmayla belgelenmiştir. Arun vd. (2021), iki büyük göğüs radyografisi veri kümesinde (SIIM-ACR pnömotoraks segmentasyonu ve RSNA pnömoni tespiti) sekiz yaygın belirginlik yönteminin lokalizasyon faydası, model ağırlığı rastgeleleştirmesine duyarlılık, tekrarlanabilirlik ve yeniden üretilebilirlik ölçütlerini büyük ölçüde karşılayamadığını; Saporta vd. (2022) ise on patoloji üzerinde yürüttükleri karşılaştırmada saliency tabanlı yöntemlerin lokalizasyon başarımının radyolog referans ölçütünün gerisinde kaldığını göstermiştir. Bu bulgular, ısı haritalarının klinik gerekçe olarak sunulmasından önce nicel doğrulama zorunluluğunu ortaya koymaktadır.

Nihai kullanıcı hekimler olduğundan, matematiksel doğruluk tek başına yeterli değildir. Ampirik bulgular karışıktır: Sayres vd. (2019), diyabetik retinopatide model desteğinin duyarlılığı artırdığını, ancak özellikle hastalık bulunmayan olgularda ısı haritası desteğinin doğruluğu azaltabildiğini göstermiştir. Tschandl vd. (2020) dermatolojide iş birliğinin tekil performansları aştığını; Gaube vd. (2021), hatalı önerilerin özellikle görev alanında daha az deneyimli kullanıcıların kararlarını olumsuz etkileyebildiğini göstermiştir. Buna karşılık Gaube vd. (2023), doğru ve açıklamalı AI tavsiyesinin özellikle görev dışı uzmanlığa sahip hekimlerin X-ışını değerlendirme performansını artırabildiğini göstermiştir. Dolayısıyla her XAI iddiasının hedef kullanıcı grubuyla ayrıca sınanması gerekir (Şekil 3).

Değerlendirme pratiğinin standartlaşması için Co-12 çerçevesi (Nauta vd., 2023) ile Quantus gibi araç setleri (Hedström vd., 2023) umut vericidir; Tablo 3 metrikleri değerlendirme hedeflerine göre özetlemektedir.



Şekil 3. Medikal XAI için teknik, ampirik ve insan-merkezli kanıtları birleştiren doğrulama döngüsü.

Tablo 3. Değerlendirme hedeflerine göre XAI metriklerinin özeti.

Hedef	Kullanılabilecek metrikler	Dikkat edilmesi gereken kısıt
Modelin mantığını doğrulamak	Deletion/Insertion eğrileri, ROAR	Pertürbasyon dağılım kaymasına yol açar; ROAR yeniden eğitim maliyeti getirir
Yer tespitini ölçmek	IoU / mIoU, isabet oranı, tutulan enerji oranı	Lezyon boyutuna güçlü bağımlılık; uzman çizimleri arasında değişkenlik
Kararlılığı ölçmek	Maksimum duyarlılık, yerel Lipschitz kestirimi	Tahmin kararlılığı ile açıklama kararlılığı birbirine karıştırılmamalıdır
Güvenilirliği sınamak	Model parametre ve veri randomizasyon testleri	Testi geçmek yeterlilik değil, asgari gerekliliktir
Kullanıcı etkisini ölçmek	Tanısal doğruluk, okuma süresi, güven kalibrasyonu	Etki kullanıcı uzmanlığına ve arayüz tasarımına göre değişir

7. MEDİKAL ALANDAKİ ZORLUKLAR VE AÇIK PROBLEMLER

7.1. Kestirme Öğrenme ve XAI'ın Tespit Gücü

Derin öğrenme modelleri, patolojiyi öğrenmek yerine veri kümesindeki kestirme yollarını öğrenebilmektedir (Geirhos vd., 2020). Zech vd. (2018) pnömoni modellerinin cihaz ve merkez işaretlerinden yararlandığını, DeGrave vd. (2021) ise COVID-19 modellerinin ağırlıklı olarak hastalıkla ilgisiz

görüntü yapaylıklarına dayandığını göstermiştir. Sorunun en rahatsız edici boyutu, bazı kestirmelerin insan gözüyle görülememesidir: Gichoya vd. (2022), modellerin göğüs radyografisinden hastanın ırkını yüksek doğrulukla kestirebildiğini, buna karşılık bu bilgiyi hangi görsel özellikten çıkardığının açıklanamadığını raporlamıştır. Adebayo vd. (2022) ise post-hoc açıklamaların, görünür yapaylıklar dışındaki sahte korelasyonları tespit etmekte büyük ölçüde etkisiz kaldığını göstermiştir. Bu nedenle XAI, dış merkez validasyonunun ve dikkatli veri denetiminin yerine geçemez.

7.2. Nedensellik, Adalet ve Belirsizlik

Mevcut yöntemlerin çoğu korelasyon tabanlıdır; modelin nereye baktığını gösterir, ancak o bölgenin karara nedensel katkısını kanıtlamaz. Karşıolgusal üretim ve nedensel çıkarım temelli yaklaşımlar bu boşluğu kapatmayı hedefler (Wachter vd., 2017; Singla vd., 2023). Adalet boyutunda ise toplam doğruluk değeri, klinik açıdan anlamlı başarısızlıkları gizleyebilir: Oakden-Rayner vd. (2020) gizli tabakalaşma olgusunu tanımlamış, Seyyed-Kalantari vd. (2021) göğüs radyografisi modellerinin dezavantajlı hasta gruplarında daha yüksek yanlış negatif oranları ürettiğini göstermiştir. Bu nedenle başarımlar ve açıklama metrikleri alt gruplara ayrıştırılarak raporlanmalıdır. Üçüncü bir eksik, belirsizliğin bildirilmemesidir; modelin kararına ilişkin güven aralığı sunulmadan verilen bir açıklama, düşük güvenli tahminlerde yanıltıcı olabilir (Abdar vd., 2021).

7.3. Multimodalite, Hesaplama Maliyeti ve Raporlama

Tıp yalnızca görüntüden ibaret değildir; hekim teşhis koyarken klinik öyküyü, laboratuvar bulgularını ve önceki tetkikleri birlikte değerlendirir. Görüntü ve metni birlikte işleyen modeller ile genel amaçlı tıbbi temel modeller, açıklamayı metinsel gerekçelendirmeye taşıma potansiyeli sunar (X. Wang vd., 2018; Moor vd., 2023). Ancak akıcı bir metinsel gerekçe, doğru bir gerekçe olduğu anlamına gelmez; bu tür açıklamalar sadakat ve halüsinasyon ölçütleriyle ayrıca sınanmalıdır. Uygulama tarafında SHAP, Score-CAM ve karşıolgusal üretim gibi yöntemler tekil bir açıklama için çok sayıda ileri geçiş gerektirir; bu maliyet, gerçek zamanlı klinik iş akışlarında yöntem seçimini doğrudan etkiler. Son olarak, kütüphane sürümü, hedef katman, eşikleme ve ölçekleme gibi ayrıntıların bildirilmemesi sonuçların tekrarlanabilirliğini ortadan kaldırmaktadır.

8. REGÜLASYON, RAPORLAMA STANDARTLARI VE KLİNİK VALİDASYON

Açıklanabilirlik, son yıllarda akademik bir tercih olmaktan çıkıp düzenleyici bir yükümlülüğe dönüşmüştür. Avrupa Birliği'nde kabul edilen Yapay Zeka Yasası, tıbbi cihaz mevzuatı kapsamındaki yazılımları (üçüncü taraf uygunluk değerlendirmesine tabi oldukları ölçüde) yüksek riskli sistemler arasında değerlendirmekte; şeffaflık bilgisi, teknik dokümantasyon, kayıt tutma, risk yönetimi ve etkin insan gözetimi yükümlülükleri getirmektedir (Avrupa Parlamentosu ve Konseyi, 2024). FDA, Health Canada ve MHRA tarafından yayımlanan İyi Makine Öğrenmesi Uygulamaları ilkeleri ise bağlayıcı olmayan ancak yaygın biçimde benimsenen bir çerçeve sunarak klinik olarak anlamlı performans raporlaması ve kullanıcıya şeffaf bilgi sağlanmasını önermektedir (U.S. Food and Drug Administration vd., 2021).

Metodolojik şeffaflık için geliştirilen kontrol listeleri, çalışmaların kalitesini doğrudan artırmaktadır. CLAIM, medikal görüntülemeye yapay zeka çalışmalarının model, veri ve değerlendirme boyutlarını raporlamaya yönelik maddeler içerir ve güncellenmiş sürümüyle yaygın biçimde kullanılmaktadır (Mongan vd., 2020; Tejani vd., 2024). CONSORT-AI, randomize klinik araştırmalarda yapay zeka müdahalesinin girdi/çıktı tanımını ve insan-yapay zeka etkileşiminin raporlanmasını öngörür (Liu vd., 2020). DECIDE-AI ise erken aşama klinik değerlendirmede insan faktörleri, kullanıcı eğitimi ve güvenlik olaylarının bildirimini kapsar (Vasey vd., 2022). XAI bileşeni içeren çalışmalarda bu listelerin makale yazımından önce, çalışma tasarımı aşamasında dikkate alınması önerilir.

9. UYGULAYICILAR İÇİN İYİ UYGULAMA ÖNERİLERİ

Bölüm boyunca tartışılan bulgular, medikal görüntülemeye XAI kullanan araştırmacılar için uygulanabilir bir kontrol listesine dönüştürülebilir.

1. Açıklamanın amacını ve muhatabını baştan tanımlayın. Hata analizi için üretilen bir harita ile klinik karar desteği için tasarlanan bir arayüz aynı şey değildir.
2. Tek bir yöntemle yetinmeyin. En az iki bağımsız aileden yöntem uygulayın ve sonuçların uyuşup uyuşmadığını raporlayın.

3. Güvenilirlik testlerini uygulayın. Model ve veri randomizasyon testlerinden geçemeyen bir yöntemi klinik yorum için kullanmayın (Adebayo vd., 2018).
4. Nicel metrik raporlayın. Sadakat, konumlandırma ve kararlılık metriklerini görsel örneklerle birlikte bildirin.
5. Referans ölçütlerle karşılaştırın. Rastgele harita, merkez yanlılığı ve mümkünse radyolog çizimi referans olarak kullanılmalıdır (Saporta vd., 2022).
6. Alt gruplara ayırıştırın. Başarım ve açıklama metriklerini cinsiyet, yaş, cihaz/merkez ve veri kaynağına göre ayrı ayrı raporlayın (Seyyed-Kalantari vd., 2021; Oakden-Rayner vd., 2020).
7. Dış merkez validasyonu yapın. Tek merkezde elde edilen açıklama tutarlılığı genelleme kanıtı değildir (Zech vd., 2018; DeGrave vd., 2021).
8. Belirsizliği birlikte sunun. Düşük güvenli tahminlerde açıklamanın da güvenilirliğinin düştüğünü kullanıcıya açıkça bildirin (Abdar vd., 2021).
9. Hatalı model senaryosunu test edin. Kullanıcı çalışmalarında yalnızca doğru değil, kasıtlı olarak hatalı öneriler de sunularak güven kalibrasyonu ölçülmelidir (Gaube vd., 2021).
10. Yeniden üretilebilirliği ve raporlama uyumunu sağlayın. Kütüphane sürümü, hedef katman ve eşikleme stratejisi paylaşılmalı; CLAIM ve uygunsa DECIDE-AI listeleri çalışma tasarımında dikkate alınmalıdır (Mongan vd., 2020; Vasey vd., 2022).

10. SONUÇ VE GELECEK VİZYONU

Medikal görüntü analizinde derin öğrenme modellerinin gösterdiği yüksek başarımlar, karar mekanizmalarının kapalılığı nedeniyle klinik pratikte doğrudan karşılık bulmamaktadır. Bu bölümde XAI yöntemleri post-hoc ve model-içi (ante-hoc) eksenlerinde sınıflandırılmış; post-hoc açıklamaların model denetimi için pratik, ancak sadakat güvencesi bakımından kırılgan; model-içi (ante-hoc) tasarımların ise maliyetli olabilmekle birlikte, klinik gerektirmeyi tasarım aşamasında ele almaya daha uygun olduğu ortaya konulmuştur.

Bölümün vurguladığı ikinci kritik nokta, değerlendirmedeki standart eksikliğidir. Literatürün önemli bir kısmı açıklamaları yalnızca görsel örneklerle sunmakta; sadakat, konumlandırma ve dayanıklılık metrikleri ile

güvenilirlik testleri sistematik biçimde uygulanmamaktadır. Medikal görüntülemeye özgü kanıtlar, yaygın belirginlik yöntemlerinin bu ölçütleri karşılamakta zorlandığını göstermektedir. Üçüncü olarak XAI, kestirme öğrenme ve yanlılık tespitinde tek başına yeterli bir denetim aracı değildir; alt-grup analizleri, dış merkez validasyonu ve belirsizlik kestirimi ile birlikte kullanılmalıdır.

Gelecek perspektifinde alanın; statik ısı haritaları üreten modellerden, doğası gereği yorumlanabilir, insan-döngüde çalışan, belirsizliğini bildiren ve görüntüyle birlikte klinik ve metinsel veriyi işleyebilen sistemlere doğru evrildiği değerlendirilmektedir. Öncelikli araştırma gündemi; ortak metrik setleri ve açıklama referans veri kümeleriyle değerlendirmenin standartlaştırılması, sadakati tasarım gereği güvence altına alan mimariler, otomatik kestirme tespiti ve adalet denetimi, çok modlu açıklama üretimi ile Görüntü–Dil Modellerinin ürettiği metinsel gerekçelerin sadakat ve halüsinasyon ölçütleriyle sınanması başlıklarında toplanmaktadır. Nihai ölçüt laboratuvar başarımları değil, prospektif ve çok merkezli çalışmalarla gösterilen klinik etkidir; bu süreçte açıklamaların hekimin karar verme biçimiyle uyumlu tasarlanması ayrıca gereklidir.

KAYNAKÇA

- Abdar, M., Pourpanah, F., Hussain, S., Rezazadegan, D., Liu, L., Ghavamzadeh, M., ... & Nahavandi, S. (2021). A review of uncertainty quantification in deep learning: Techniques, applications and challenges. *Information Fusion*, 76, 243–297.
- Abnar, S., & Zuidema, W. (2020). Quantifying attention flow in transformers. In *Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics* (pp. 4190–4197).
- Adebayo, J., Gilmer, J., Muelly, M., Goodfellow, I., Hardt, M., & Kim, B. (2018). Sanity checks for saliency maps. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 31.
- Adebayo, J., Muelly, M., Abelson, H., & Kim, B. (2022). Post hoc explanations may be ineffective for detecting unknown spurious correlation. In *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
- Alvarez-Melis, D., & Jaakkola, T. S. (2018). On the robustness of interpretability methods. *arXiv preprint arXiv:1806.08049*.
- Arun, N., Gaw, N., Singh, P., Chang, K., Aggarwal, M., Chen, B., ... & Kalpathy-Cramer, J. (2021). Assessing the trustworthiness of saliency maps for localizing abnormalities in medical imaging. *Radiology: Artificial Intelligence*, 3(6), e200267.
- Avrupa Parlamentosu ve Konseyi. (2024). Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down

- harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act). Official Journal of the European Union, OJ L, 2024/1689, 12.7.2024.
- Bach, S., Binder, A., Montavon, G., Klauschen, F., Müller, K.-R., & Samek, W. (2015). On pixel-wise explanations for non-linear classifier decisions by layer-wise relevance propagation. *PLoS ONE*, 10(7), e0130140.
- Barnett, A. J., Schwartz, F. R., Tao, C., Chen, C., Ren, Y., Lo, J. Y., & Rudin, C. (2021). A case-based interpretable deep learning model for classification of mass lesions in digital mammography. *Nature Machine Intelligence*, 3(12), 1061–1070.
- Böhle, M., Eitel, F., Weygandt, M., & Ritter, K. (2019). Layer-wise relevance propagation for explaining deep neural network decisions in MRI-based Alzheimer's disease classification. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 11, 194.
- Chattopadhyay, A., Sarkar, A., Howlader, P., & Balasubramanian, V. N. (2018). Grad-CAM++: Generalized gradient-based visual explanations for deep convolutional networks. In *2018 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)* (pp. 839–847). IEEE.
- Chefer, H., Gur, S., & Wolf, L. (2021). Transformer interpretability beyond attention visualization. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 782–791).
- Chen, C., Li, O., Tao, D., Barnett, A., Rudin, C., & Su, J. K. (2019). This looks like that: Deep learning for interpretable image recognition. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 32.
- DeGrave, A. J., Janizek, J. D., & Lee, S.-I. (2021). AI for radiographic COVID-19 detection selects shortcuts over signal. *Nature Machine Intelligence*, 3(7), 610–619.
- Donnelly, J., Barnett, A. J., & Chen, C. (2022). Deformable ProtoPNet: An interpretable image classifier using deformable prototypes. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 10265–10275).
- Doshi-Velez, F., & Kim, B. (2017). Towards a rigorous science of interpretable machine learning. *arXiv preprint arXiv:1702.08608*.
- Fontes, M., De Almeida, J. D. S., & Cunha, A. (2024). Application of example-based explainable artificial intelligence (XAI) for analysis and interpretation of medical imaging: A systematic review. *IEEE Access*, 12, 26419–26427.
- Fu, R., Hu, Q., Dong, X., Guo, Y., Gao, Y., & Li, B. (2020). Axiom-based Grad-CAM: Towards accurate visualization and explanation of CNNs. In *British Machine Vision Conference (BMVC)*.
- Gaube, S., Suresh, H., Raue, M., Merritt, A., Berkowitz, S. J., Lermer, E., ... & Ghassemi, M. (2021). Do as AI say: Susceptibility in deployment of clinical decision-aids. *npj Digital Medicine*, 4, 31.
- Gaube, S., Suresh, H., Raue, M., Lermer, E., Koch, T. K., Hudecek, M. F. C., ... & Ghassemi, M. (2023). Non-task expert physicians benefit from correct explainable AI advice when reviewing X-rays. *Scientific Reports*, 13(1), 1383.
- Geirhos, R., Jacobsen, J.-H., Michaelis, C., Zemel, R., Brendel, W., Bethge, M., & Wichmann, F. A. (2020). Shortcut learning in deep neural networks. *Nature Machine Intelligence*, 2(11), 665–673.
- Ghassemi, M., Oakden-Rayner, L., & Beam, A. L. (2021). The false hope of current approaches to explainable artificial intelligence in health care. *The Lancet Digital Health*, 3(11), e745–e750.

- Ghnemat, R., Alodibat, S., & Abu Al-Haija, Q. (2023). Explainable artificial intelligence (XAI) for deep learning based medical imaging classification. *Journal of Imaging*, 9(9), 177.
- Ghorbani, A., Abid, A., & Zou, J. (2019a). Interpretation of neural networks is fragile. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 33(1), 3681–3688.
- Ghorbani, A., Wexler, J., Zou, J., & Kim, B. (2019b). Towards automatic concept-based explanations. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 32.
- Gichoya, J. W., Banerjee, I., Bhimireddy, A. R., Burns, J. L., Celi, L. A., Chen, L.-C., ... & Zhang, H. (2022). AI recognition of patient race in medical imaging: A modelling study. *The Lancet Digital Health*, 4(6), e406–e414.
- Haile Dagnaw, G., Zhu, Y., Maqsood, M. H., Yang, W., Dong, X., Yin, X., & Wee-Chung Liew, A. (2025). Explainable artificial intelligence in biomedical image analysis: A comprehensive survey. *arXiv preprint arXiv:2507.07148*. DOI: 10.48550/arXiv.2507.07148.
- Hedström, A., Weber, L., Krakowczyk, D., Bareeva, D., Motzkus, F., Samek, W., Lapuschkin, S., & Höhne, M. M.-C. (2023). Quantus: An explainable AI toolkit for responsible evaluation of neural network explanations and beyond. *Journal of Machine Learning Research*, 24(34), 1–11.
- Hooker, S., Erhan, D., Kindermans, P.-J., & Kim, B. (2019). A benchmark for interpretability methods in deep neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 32.
- Jain, S., & Wallace, B. C. (2019). Attention is not explanation. In *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics (NAACL-HLT)* (pp. 3543–3556).
- Jiang, P.-T., Zhang, C.-B., Hou, Q., Cheng, M.-M., & Wei, Y. (2021). LayerCAM: Exploring hierarchical class activation maps for localization. *IEEE Transactions on Image Processing*, 30, 5875–5888.
- Kim, B., Wattenberg, M., Gilmer, J., Cai, C., Wexler, J., Viégas, F., & Sayres, R. (2018). Interpretability beyond feature attribution: Quantitative testing with concept activation vectors (TCAV). In *International Conference on Machine Learning* (pp. 2668–2677). PMLR.
- Kim, E., Kim, S., Seo, M., & Yoon, S. (2021). XProtoNet: Diagnosis in chest radiography with global and local explanations. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 15719–15728).
- Kindermans, P.-J., Hooker, S., Adebayo, J., Alber, M., Schütt, K. T., Dähne, S., Erhan, D., & Kim, B. (2019). The (un)reliability of saliency methods. In *Explainable AI: Interpreting, explaining and visualizing deep learning* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 11700, pp. 267–280). Springer.
- Koh, P. W., Nguyen, T., Tang, Y. S., Mussmann, S., Pierson, E., Kim, B., & Liang, P. (2020). Concept bottleneck models. In *International Conference on Machine Learning* (pp. 5338–5348). PMLR.
- Kokhlikyan, N., Miglani, V., Martin, M., Wang, E., Alsallakh, B., Reynolds, J., ... & Reblitz-Richardson, O. (2020). Captum: A unified and generic model interpretability library for PyTorch. *arXiv preprint arXiv:2009.16009*.
- Liu, X., Cruz Rivera, S., Moher, D., Calvert, M. J., & Denniston, A. K. (2020). Reporting guidelines for clinical trial reports for interventions involving

- artificial intelligence: The CONSORT-AI extension. *Nature Medicine*, 26(9), 1364–1374.
- Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30.
- Miró-Nicolau, M., Moyà-Alcover, G., & Jaume-i-Capó, A. (2022). Evaluating explainable artificial intelligence for X-ray image analysis. *Applied Sciences*, 12(9), 4459.
- Mongan, J., Moy, L., & Kahn, C. E. (2020). Checklist for Artificial Intelligence in Medical Imaging (CLAIM): A guide for authors and reviewers. *Radiology: Artificial Intelligence*, 2(2), e200029.
- Moor, M., Banerjee, O., Abad, Z. S. H., Krumholz, H. M., Leskovec, J., Topol, E. J., & Rajpurkar, P. (2023). Foundation models for generalist medical artificial intelligence. *Nature*, 616(7956), 259–265.
- Muhammad, D., & Bendeache, M. (2024). Unveiling the black box: A systematic review of explainable artificial intelligence in medical image analysis. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 24, 542–560.
- Muhammad, M. B., & Yeasin, M. (2020). Eigen-CAM: Class activation map using principal components. In *2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)* (pp. 1–7). IEEE.
- Nauta, M., van Bree, R., & Seifert, C. (2021). Neural prototype trees for interpretable fine-grained image recognition. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 14933–14943).
- Nauta, M., Trienes, J., Pathak, S., Nguyen, E., Peters, M., Schmitt, Y., Schlötterer, J., van Keulen, M., & Seifert, C. (2023). From anecdotal evidence to quantitative evaluation methods: A systematic review on evaluating explainable AI. *ACM Computing Surveys*, 55(13s), Article 295, 1–42. <https://doi.org/10.1145/3583558>
- Nazir, S., Dickson, D. M., & Akram, M. U. (2023). Survey of explainable artificial intelligence techniques for biomedical imaging with deep neural networks. *Computers in Biology and Medicine*, 156, 106668.
- Oakden-Rayner, L., Dunnmon, J., Carneiro, G., & Ré, C. (2020). Hidden stratification causes clinically meaningful failures in machine learning for medical imaging. In *Proceedings of the ACM Conference on Health, Inference, and Learning* (pp. 151–159).
- Patrício, C., Neves, J. C., & Teixeira, L. F. (2023). Explainable deep learning methods in medical image classification: A survey. *ACM Computing Surveys*, 56(4), 1–41.
- Raghavan, K., Sivaselvan, B., & Veezhinathan, K. (2024). Attention guided grad-CAM: An improved explainable artificial intelligence model for infrared breast cancer detection. *Multimedia Tools and Applications*, 83, 57551–57578. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-17776-7>
- Rajpurkar, P., Irvin, J., Ball, R. L., Zhu, K., Yang, B., Mehta, H., ... & Lungren, M. P. (2018). Deep learning for chest radiograph diagnosis: A retrospective comparison of the CheXNeXt algorithm to practicing radiologists. *PLoS Medicine*, 15(11), e1002686.
- Ribeiro, M. T., Singh, S., & Guestrin, C. (2016). "Why should I trust you?": Explaining the predictions of any classifier. In *Proceedings of the 22nd ACM*

- SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (pp. 1135–1144).
- Rudin, C. (2019). Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. *Nature Machine Intelligence*, 1(5), 206–215.
- Rudin, C., Chen, C., Chen, Z., Huang, H., Semenova, L., & Zhong, C. (2022). Interpretable machine learning: Fundamental principles and 10 grand challenges. *Statistics Surveys*, 16, 1–85.
- Saporta, A., Gui, X., Agrawal, A., Pareek, A., Truong, S. Q. H., Nguyen, C. D. T., ... & Rajpurkar, P. (2022). Benchmarking saliency methods for chest X-ray interpretation. *Nature Machine Intelligence*, 4(10), 867–878.
- Saw, S. N., Yan, Y. Y., & Ng, K. H. (2025). Current status and future directions of explainable artificial intelligence in medical imaging. *European Journal of Radiology*, 183, 111884. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2024.111884>
- Sayres, R., Taly, A., Rahimy, E., Blumer, K., Coz, D., Hammel, N., ... & Webster, D. R. (2019). Using a deep learning algorithm and integrated gradients explanation to assist grading for diabetic retinopathy. *Ophthalmology*, 126(4), 552–564.
- 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. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision* (pp. 618–626).
- Seyyed-Kalantari, L., Zhang, H., McDermott, M. B. A., Chen, I. Y., & Ghassemi, M. (2021). Underdiagnosis bias of artificial intelligence algorithms applied to chest radiographs in under-served patient populations. *Nature Medicine*, 27(12), 2176–2182.
- Simonyan, K., Vedaldi, A., & Zisserman, A. (2014). Deep inside convolutional networks: Visualising image classification models and saliency maps. *Workshop at International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
- Singh, A., Sengupta, S., & Lakshminarayanan, V. (2020). Explainable deep learning models in medical image analysis. *Journal of Imaging*, 6(6), 52.
- Singla, S., Eslami, M., Pollack, B., Wallace, S., & Batmanghelich, K. (2023). Explaining the black-box smoothly—A counterfactual approach. *Medical Image Analysis*, 84, 102721.
- Smilkov, D., Thorat, N., Kim, B., Viégas, F., & Wattenberg, M. (2017). SmoothGrad: Removing noise by adding noise. *arXiv preprint arXiv:1706.03825*.
- Springenberg, J. T., Dosovitskiy, A., Brox, T., & Riedmiller, M. (2015). Striving for simplicity: The all convolutional net. *Workshop at International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
- Sun, J., Darbehani, F., Zaidi, M., & Wang, B. (2020). SAUNet: Shape attentive U-Net for interpretable medical image segmentation. In *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention – MICCAI 2020 (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 12264, pp. 797–806)*. Springer.
- Sun, Q., Akman, A., & Schuller, B. W. (2025). Explainable artificial intelligence for medical applications: A review. *ACM Transactions on Computing for Healthcare*, 6(2), Article 17, 1–31. <https://doi.org/10.1145/3709367>

- Sundararajan, M., Taly, A., & Yan, Q. (2017). Axiomatic attribution for deep networks. In *International Conference on Machine Learning* (pp. 3319–3328). PMLR.
- Tejani, A. S., Klontzas, M. E., Gatti, A. A., Mongan, J. T., Moy, L., Park, S. H., & Kahn, C. E. (2024). Checklist for Artificial Intelligence in Medical Imaging (CLAIM): 2024 update. *Radiology: Artificial Intelligence*, 6(4), e240300.
- Tjoa, E., & Guan, C. (2021). A survey on explainable artificial intelligence (XAI): Toward medical XAI. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 32(11), 4793–4813.
- Tschandl, P., Rinner, C., Apalla, Z., Argenziano, G., Codella, N., Halpern, A., ... & Kittler, H. (2020). Human–computer collaboration for skin cancer recognition. *Nature Medicine*, 26(8), 1229–1234.
- U.S. Food and Drug Administration, Health Canada, & Medicines and Healthcare products Regulatory Agency. (2021). Good machine learning practice for medical device development: Guiding principles.
- Van der Velden, B. H. M., Kuijf, H. J., Gilhuijs, K. G. A., & Viergever, M. A. (2022). Explainable artificial intelligence (XAI) in deep learning-based medical image analysis. *Medical Image Analysis*, 79, 102470.
- Vasey, B., Nagendran, M., Campbell, B., Clifton, D. A., Collins, G. S., Denaxas, S., ... & McCulloch, P. (2022). Reporting guideline for the early-stage clinical evaluation of decision support systems driven by artificial intelligence: DECIDE-AI. *Nature Medicine*, 28(5), 924–933.
- Wachter, S., Mittelstadt, B., & Russell, C. (2017). Counterfactual explanations without opening the black box: Automated decisions and the GDPR. *Harvard Journal of Law & Technology*, 31(2), 841–887.
- Wang, H., Wang, Z., Du, M., Yang, F., Zhang, Z., Ding, S., Mardziel, P., & Hu, X. (2020). Score-CAM: Score-weighted visual explanations for convolutional neural networks. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops* (pp. 24–25).
- Wang, X., Peng, Y., Lu, L., Lu, Z., & Summers, R. M. (2018). TieNet: Text-image embedding network for common thorax disease classification and reporting in chest X-rays. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 9049–9058).
- Wiegreffe, S., & Pinter, Y. (2019). Attention is not not explanation. In *Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP-IJCNLP)* (pp. 11–20).
- Yuksekgonul, M., Wang, M., & Zou, J. (2023). Post-hoc concept bottleneck models. In *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
- Zech, J. R., Badgeley, M. A., Liu, M., Costa, A. B., Titano, J. J., & Oermann, E. K. (2018). Variable generalization performance of a deep learning model to detect pneumonia in chest radiographs: A cross-sectional study. *PLoS Medicine*, 15(11), e1002683.
- Zeiler, M. D., & Fergus, R. (2014). Visualizing and understanding convolutional networks. In *European Conference on Computer Vision (ECCV)* (pp. 818–833). Springer.
- Zhou, B., Khosla, A., Lapedriza, A., Oliva, A., & Torralba, A. (2016). Learning deep features for discriminative localization. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 2921–2929).

İş Sağlığı ve Güvenliğinde Risk Değerlendirme Metotları

Fatma BOSTAN ÖZTÜRK¹
Türkay Ercan ŞENGÖZ²
İlyas KARTAL³

- 1- Öğr. Gör. Fatma BOSTAN ÖZTÜRK; Nişantaşı Üniversitesi Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü İş Sağlığı ve Güvenliği Programı fatma.bostan@nisantasi.edu.tr ORCID No: 0009-0004-7839-452
- 2- Doktora Öğrencisi; Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İş Güvenliği Programı. turkay.ercan@marun.edu.tr, tes.net@gmail.com ORCID No: 0000-0002-5577-8990
- 3- Doç. Dr.; Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü. ilyaskartal@marmara.edu.tr ORCID No: 0000-0001-9677-477X

ÖZET

İş sağlığı ve güvenliği uygulamalarında risk değerlendirmesi; çalışma ortamında mevcut olan veya ortaya çıkma potansiyeli bulunan tehlikelerin sistematik biçimde belirlenmesi, analiz edilmesi ve uygun kontrol stratejileri ile yönetilmesini sağlayan temel süreçlerden biridir. Üretim teknolojilerindeki gelişmeler, çalışma sistemlerinin çeşitlenmesi ve iş süreçlerinin daha karmaşık hale gelmesi, risklerin etkin biçimde değerlendirilmesini ve yönetilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu doğrultuda farklı sektörlerin ihtiyaçlarına göre geliştirilmiş çeşitli risk değerlendirme yaklaşımları kullanılmaktadır. Bu bölümde risk değerlendirmesi kavramsal çerçevede ele alınmış ve iş sağlığı ve güvenliği alanında yaygın biçimde kullanılan yöntemler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmada öncelikle nitel, nicel ve yarı kantitatif değerlendirme yaklaşımlarına değinilmiş; ardından L Tipi Matris, Fine-Kinney, Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA), Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi (HAZOP), Hata Ağacı Analizi (FTA), Olay Ağacı Analizi (ETA), What-if Analizi ve İş Güvenliği Analizi (JSA) yöntemlerinin temel yapıları, uygulama aşamaları, kullanım alanları ile güçlü ve sınırlı yönleri değerlendirilmiştir. Risk değerlendirme yaklaşımının seçiminde sektör özellikleri, çalışma koşulları, süreç karmaşıklığı ve karar verme ihtiyacının belirleyici olduğu görülmektedir. Uygun yöntemin doğru şekilde uygulanması; iş kazalarının azaltılması, meslek hastalıklarının önlenmesi, çalışanların korunması ve sürdürülebilir iş sağlığı ve güvenliği performansının desteklenmesi açısından önemli katkı sağlamaktadır. Bu bölümün, risk değerlendirme uygulamalarına ilişkin kuramsal altyapı ile uygulama süreçleri arasında bütüncül bir değerlendirme sunması amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Risk Değerlendirmesi, İş Sağlığı ve Güvenliği, Risk Analizi, Risk Değerlendirme Metotları, Tehlike Yönetimi, İş Kazaları

GİRİŞ

İş sağlığı ve güvenliği, çalışanların maruz kalabileceği tehlike ve risklerin kontrol altına alınmasını hedefleyen ve güvenli çalışma ortamlarının oluşturulmasını esas alan disiplinler arası bir yönetim alanıdır. Çalışma yaşamında meydana gelen iş kazaları ve meslek hastalıkları yalnızca bireysel sağlık üzerinde değil; üretim sürekliliği, ekonomik performans ve sosyal refah üzerinde de önemli etkiler oluşturmaktadır. Bu nedenle çalışma ortamlarında risklerin önceden belirlenmesi ve uygun kontrol mekanizmalarının geliştirilmesi günümüzde daha fazla önem kazanmıştır. Sanayileşme, teknolojik dönüşüm ve üretim sistemlerindeki değişimlerle birlikte çalışma ortamlarının yapısı da önemli ölçüde değişmiştir. Fiziksel, kimyasal, biyolojik, ergonomik ve psikososyal

etmenlerin çeşitlenmesi; işyerlerinde yalnızca mevzuata uyum odaklı değil, aynı zamanda önleyici ve sürdürülebilir bir risk yönetimi yaklaşımının benimsenmesini gerekli hale getirmiştir. Bu yaklaşımın temel araçlarından biri risk değerlendirmesidir (Aven, 2016).

Risk değerlendirmesi; mevcut veya potansiyel tehlikelerin tanımlanması, bu tehlikelerden kaynaklanabilecek risklerin analiz edilmesi ve uygun kontrol önlemlerinin belirlenmesini kapsayan planlı bir süreç olarak değerlendirilmektedir. Bu süreç sayesinde tehlikeler gerçekleşmeden önce öngörülebilmekte, önceliklendirilebilmekte ve gerekli iyileştirme faaliyetleri uygulanabilmektedir. Böylece yalnızca olay sonrasında müdahaleye dayanan yaklaşımlar yerine önleyici uygulamaların güçlendirilmesi mümkün olmaktadır.

Risk değerlendirme sürecinde kullanılan yöntemler; çalışma alanının özellikleri, faaliyetlerin niteliği, tehlike düzeyi ve analiz amacına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Literatürde bu amaçla geliştirilmiş çok sayıda nitel, nicel ve yarı kantitatif yöntem bulunmaktadır. L Tipi Matris, Fine-Kinney, FMEA, HAZOP, FTA, ETA, What-if ve JSA yöntemleri uygulamada en yaygın kullanılan yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Her yöntemin sunduğu analiz derinliği, veri ihtiyacı ve uygulanabilirlik düzeyi farklılık göstermektedir (Aslantaş ve Erpek, 2024). Bu bölümde iş sağlığı ve güvenliği alanında yaygın kullanılan risk değerlendirme yöntemleri kuramsal özellikleri ve uygulama perspektifiyle ele alınmış; yöntemlerin kullanım alanları, temel özellikleri, avantajları ve sınırlılıkları karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir.

1. İş Sağlığı ve Güvenliği

İş sağlığı ve güvenliği (İSG), çalışanların çalışma ortamından kaynaklanabilecek tehlike ve risklerden korunmasını amaçlayan disiplinler arası bir çalışma alanıdır. İSG uygulamalarının temel amacı; çalışanların fiziksel, ruhsal ve sosyal yönden tam iyilik halinin korunması, iş kazaları ve meslek hastalıklarının önlenmesi, güvenli çalışma ortamlarının oluşturulması ve üretim süreçlerinin sürdürülebilirliğinin sağlanmasıdır. Çalışma ortamlarında karşılaşılan fiziksel, kimyasal, biyolojik, ergonomik ve psikososyal risk etmenleri çalışan sağlığını olumsuz etkileyebilmekte ve ciddi iş kazaları ile meslek hastalıklarına neden olabilmektedir. Bu nedenle İSG uygulamaları yalnızca yasal bir zorunluluk değil, aynı zamanda çalışanların yaşam kalitesinin korunması açısından da büyük önem taşımaktadır (Chatzoglou, 2025).

Sanayileşme, teknolojik gelişmeler ve üretim süreçlerinin karmaşıklaşması ile çalışma ortamlarında ortaya çıkan risklerin çeşitliliği artmıştır. Özellikle yüksek riskli sektörlerde meydana gelen iş kazaları ve meslek hastalıkları; çalışanların sağlıklarını, işletmelerin ekonomik sürdürülebilirliğini ve toplumsal refahı olumsuz yönde etkilemektedir (Alshreef, (2025). Yapılan çalışmalar, etkili İSG yönetim sistemlerinin iş kazalarının azaltılmasında önemli rol oynadığını göstermektedir. İSG

yönetim sistemlerinin uygulanmasıyla birlikte iş kazası oranlarının ve ölümcül iş kazalarının anlamlı düzeyde azaldığı belirtilmektedir (Vitran, ve Micheli, 2024).

İş kazaları, çalışanların işyerinde veya işin yürütümü sırasında karşılaştıkları ve ölüm, yaralanma ya da maddi kayıpla sonuçlanabilen olaylar olarak tanımlanmaktadır. Meslek hastalıkları ise çalışanların işin niteliğine bağlı olarak çeşitli risk etmenlerine uzun süre maruz kalmaları sonucunda ortaya çıkan hastalıkları ifade etmektedir. Uluslararası Çalışma Örgütü verilerine göre her yıl milyonlarca çalışan iş kazaları ve meslek hastalıkları nedeniyle yaşamını yitirmekte veya iş göremez hale gelmektedir. Bu durum, İSG uygulamalarının önemini daha da artırmaktadır.

Günümüzde iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarında, meydana gelen olaylara sonradan müdahale etmeye dayalı reaktif yaklaşımlar yerine önleyici nitelik taşıyan proaktif uygulamalar daha fazla önem kazanmaktadır. Bu doğrultuda risk değerlendirmesi; çalışma ortamındaki tehlikelerin önceden tanımlanması, bu tehlikelerden kaynaklanan risklerin sistematik biçimde değerlendirilmesi ve gerekli kontrol tedbirlerinin planlanması açısından İSG yönetim süreçlerinin temel unsurlarından biri olarak değerlendirilmektedir. Güvenlik kültürünün geliştirilmesi, çalışanların güvenli davranışlarının artırılması ve sistematik risk yönetimi uygulamalarının yaygınlaştırılması sayesinde iş kazalarının önemli ölçüde azaltılabileceği belirtilmektedir.

2. İş Sağlığı ve Güvenliğine Risk Değerlendirme Yöntemleri

Risk değerlendirme sürecinde kullanılan yöntemler; çalışma ortamının özelliklerine, gerçekleştirilen faaliyetlerin niteliğine, sektörün tehlike sınıfına ve değerlendirme amacına göre farklılık göstermektedir. Bu kapsamda literatürde kalitatif, kantitatif ve yarı kantitatif olmak üzere çok sayıda risk değerlendirme yöntemi geliştirilmiştir. Kullanılan yöntemler sayesinde işyerlerinde mevcut ve potansiyel tehlikeler sistematik şekilde analiz edilmekte, risk düzeyleri belirlenmekte ve uygun kontrol önlemleri planlanabilmektedir (Marhavila vd., 2021) . Özellikle İSG uygulamalarında L tipi matris yöntemi, Fine-Kinney yöntemi, Hata Türleri ve Etki Analizi (FMEA), Hata Ağacı Analizi (FTA), Olay Ağacı Analizi (ETA), HAZOP ve What-if analizi yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır. Her yöntemin uygulama alanı, değerlendirme yaklaşımı, avantajları ve sınırlılıkları birbirinden farklılık göstermektedir. Bu bölümde iş sağlığı ve güvenliği alanında yaygın olarak kullanılan risk değerlendirme yöntemleri kavramsal ve uygulama boyutlarıyla ele alınmıştır (Tixier vd.,2002).

2.1. L Tipi Matris Yöntemi

L tipi matris yöntemi, İSG uygulamalarında sıklıkla tercih edilen yarı kantitatif risk değerlendirme yaklaşımlarından biridir. Yöntemin temelini, belirlenen bir tehlikenin meydana gelme olasılığı ile oluşması durumunda ortaya çıkaracağı etkinin ya da sonuç şiddetinin birlikte değerlendirilmesi oluşturmaktadır. Bu değerlendirme sonucunda risk düzeyi

belirlenerek uygun kontrol önlemlerinin planlanması amaçlanmaktadır. L tipi matris yöntemi özellikle uygulama kolaylığı, hızlı sonuç vermesi ve farklı sektörlerde rahatlıkla kullanılabilmesi nedeniyle İSG uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Soykan, 2018).

Matris tabanlı risk değerlendirme yaklaşımları ilk olarak askeri ve endüstriyel güvenlik alanlarında geliştirilmiş, daha sonra İSG uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. L tipi matris yöntemi ise özellikle 5×5 risk matrisi yaklaşımıyla birlikte yaygınlaşmış ve birçok ulusal ve uluslararası risk değerlendirme uygulamasında temel yöntemlerden biri haline gelmiştir. Yöntemin temel mantığı; bir tehlikenin gerçekleşme ihtimali (Tablo 2) ile gerçekleşmesi durumunda ortaya çıkacak sonucun şiddetinin (Tablo 3) sayısal olarak derecelendirilmesine dayanmaktadır. Olasılık ve şiddet değerlerinin çarpılması sonucunda risk skoru (Tablo 1) elde edilmekte ve bu skor doğrultusunda riskin kabul edilebilirlik düzeyi belirlenmektedir.

L tipi matris yöntemi özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerde, üretim alanlarında, eğitim kurumlarında, hastanelerde, laboratuvarlarda, inşaat sektöründe ve bakım-onarım faaliyetlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntemin uygulanabilmesi için ileri düzey teknik hesaplamalara ihtiyaç duyulmaması önemli avantajlarından biridir. Ayrıca risklerin önceliklendirilmesini kolaylaştırması sayesinde kontrol önlemlerinin planlanmasında da etkin şekilde kullanılmaktadır.

Risk düzeyleri, uygulanacak kontrol tedbirlerinin önceliğinin belirlenmesinde önemli bir ölçüt olarak değerlendirilmektedir. Düşük risk düzeyinde yer alan tehlikeler için acil müdahale gerekmemekle birlikte düzenli izleme faaliyetlerinin sürdürülmesi yeterli görülmektedir. Orta risk düzeyindeki tehlikeler için mümkün olan en kısa sürede iyileştirici faaliyetlerin planlanması ve uygulanması önerilmektedir. Yüksek risk düzeyindeki tehlikelerde ise riskin kontrol altına alınmasına yönelik çalışmaların gecikmeksizin başlatılması ve gerekli önlemlerin derhal uygulanması gerekmektedir.

Bununla birlikte L tipi matris yönteminin bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Özellikle değerlendirmelerin uzman görüşüne bağlı olması, öznel değerlendirme farklılıklarının ortaya çıkabilmesi ve karmaşık proseslerde yetersiz kalabilmesi yöntemin dezavantajları arasında gösterilmektedir. Buna rağmen uygulama kolaylığı ve pratikliği nedeniyle iş sağlığı ve güvenliği alanında en yaygın kullanılan risk değerlendirme yöntemlerinden biri olmayı sürdürmektedir (Bostan, 2025).

Tablo 1. Risk Değerlendirme Matrisi (5×5 L Tipi) (Bedir, vd., 2024)

Olasılık \ Şiddet	5 (Çok Ciddi)	4 (Ciddi)	3 (Orta)	2 (Hafif)	1 (Çok Hafif)
5 – Çok Yüksek	25	20	15	10	5
4 – Yüksek	20	16	12	8	4
3 – Orta	15	12	9	6	3
2 – Küçük	10	8	6	4	2
1 – Çok Küçük	5	4	3	2	1

Tablo 2. Olasılık Değerlendirme Ölçeği (Bedir, vd., 2024)

Risk Puanı	Olasılık Düzeyi	Gerçekleşme Eğiliminin Açıklaması
1	Çok Düşük	Tehlikenin gerçekleşme ihtimali ihmal edilebilir düzeyde olup olağan çalışma koşullarında beklenmemektedir.
2	Düşük	Olayın ortaya çıkması düşük olasılıklıdır ve çoğunlukla olağan dışı koşullarda değerlendirilmektedir.
3	Orta	Belirli zaman aralıklarında meydana gelebilecek düzeyde gerçekleşme olasılığı bulunmaktadır.
4	Yüksek	Tehlikenin çalışma süreci içerisinde düzenli aralıklarla ortaya çıkması beklenebilir.
5	Çok Yüksek	Tehlikenin normal çalışma koşullarında sık tekrar etme eğilimi gösterdiği durumları ifade etmektedir.

Tablo 3. Şiddet Değerlendirme Ölçeği (Bedir, vd., 2024)

Şiddet Puanı	Etki Düzeyi	Değerlendirme Açıklaması
1	Çok Hafif	İş kaybına neden olmayan ve yalnızca temel ilk yardım uygulamaları ile yönetilebilen etkileri ifade etmektedir.
2	Hafif	Çalışanın iş günü kaybı yaşamadığı, kalıcı sağlık sonucu oluşturmayan ve ayakta müdahale ile giderilebilen durumları kapsamaktadır.
3	Orta	Tıbbi değerlendirme veya kısa süreli tedavi gerektirebilen yaralanmaların ortaya çıktığı etki düzeyidir.
4	Ciddi	Uzun süreli tedavi ihtiyacı oluşturan, önemli yaralanmalar veya meslek hastalığı ile sonuçlanabilecek durumları ifade etmektedir.
5	Çok Ciddi	Ölüm, kalıcı iş göremezlik veya geri dönüşü olmayan sağlık sonuçları oluşturabilecek olayları kapsamaktadır.

2.2. Fine-Kinney Yöntemi

Fine-Kinney yöntemi, İSG çalışmalarında yaygın şekilde kullanılan nicel risk değerlendirme yöntemlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. İlk olarak William T. Fine tarafından geliştirilen yöntem, daha sonraki süreçte Kinney ve Wiruth tarafından yeniden düzenlenerek literatürde daha sistematik bir yapı kazanmıştır. Yöntem; çalışma ortamında yer alan tehlikelerin meydana gelme olasılığı, çalışanların bu tehlikelere maruz kalma sıklığı ve oluşabilecek sonuçların şiddetini birlikte ele alarak risk düzeyinin

sayısal bir değ er üzerinden belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Birgören, 2017).

Yöntemin temel amacı, i  yerinde mevcut risklerin öncelik sırasına konulmasını sağlayarak hangi tehlikelere daha hızlı müdahale edilmesi gerektiğini belirlemektir. Bu yönüyle yöntem, özellikle endüstriyel tesisler, tersaneler, inşaat sektörü, kimyasal üretim tesisleri ve yüksek riskli çalışma alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Fine-Kinney yöntemi sayesinde riskler sistematik şekilde analiz edilmekte ve kontrol tedbirleri daha planlı biçimde uygulanabilmektedir (Bostan, 2025).

Fine-Kinney yönteminde risk düzeyi; olasılık, maruziyet sıklığı ve şiddet parametrelerinin çarpılmasıyla hesaplanmaktadır. Yöntemde kullanılan temel formül aşağıdaki gibidir:

$$R = O \times F \times S$$

Burada;

- R: Risk skoru
- O: Olasılık (Probability) (Tablo 4)
- F: Maruziyet sıklığı (Frequency) (Tablo 5)
- S: Şiddet/Sonuc (Severity) (Tablo 6)

olarak ifade edilmektedir (Oturakçı vd., 2015).

Olasılık parametresi, tehlikenin meydana gelme ihtimalini göstermektedir. Maruziyet sıklığı, çalışanların söz konusu tehlikeye hangi sıklıkta maruz kaldığını ifade etmektedir. Şiddet parametresi ise gerçekleşebilecek olayın insan sağlığı, ekipman veya çalışma ortamı üzerindeki etkisinin büyüklüğünü değerlendirmektedir. Bu parametreler için belirlenen katsayıların çarpılmasıyla toplam risk puanı elde edilmektedir.

Elde edilen risk skorları belirli aralıklara göre yorumlanmaktadır. Fine-Kinney yönteminde hesaplanan risk puanları, alınacak önlemlerin öncelik sırasını belirlemek amacıyla değerlendirilmektedir. Risk puanının 20'nin altında olduğu durumlar kabul edilebilir risk düzeyi olarak değerlendirilmekte ve acil bir müdahale gerektirmemektedir. 20–70 aralığındaki riskler gözetim altında tutulması gereken olası riskler olarak kabul edilmekte, 70–200 aralığındaki riskler için belirli bir süre içerisinde iyileştirme faaliyetlerinin planlanması önerilmektedir. 200–400 arasındaki riskler yüksek risk grubunda değerlendirilmekte ve kısa sürede gerekli düzeltici önlemlerin uygulanması beklenmektedir. Risk puanının 400' n üzerinde olduğu durumlar ise çok yüksek risk olarak kabul edilmekte olup çalışmanın durdurulması da d hil olmak üzere acil kontrol tedbirlerinin uygulanması gerekmektedir. Bu durum, i  kazalarının ve meslek hastalıklarının önlenmesinde proaktif yaklaşımın geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Gul, vd., 2018).

Fine-Kinney yönteminin en önemli avantajlarından biri, riskleri sayısal olarak değerlendirmesi nedeniyle farklı tehlikeler arasında karşılaştırma yapılmasına olanak sağlamasıdır. Ayrıca yöntemin uygulanmasının görece kolay olması ve farklı sektörlere uyarlanabilmesi de önemli avantajlar arasında yer almaktadır. Bununla birlikte yöntemde kullanılan parametrelerin uzman görüşüne dayanması nedeniyle değerlendirme sonuçları uygulayıcının deneyiminden etkilenebilmektedir. Bu nedenle risk analizlerinin alanında uzman kişiler tarafından gerçekleştirilmesi önerilmektedir (Bostan, 2025).

Tablo 4. Olasılık Değeri ve Kategorileri (Gul, vd., 2018)

Olasılık Puanı	Olasılık Düzeyi	Değerlendirme Açıklaması
0,2	Çok Düşük	Tehlikenin gerçekleşmesi pratik koşullarda beklenmeyen düzeydedir.
0,5	Düşük	Olayın ortaya çıkma ihtimali oldukça sınırlı olmakla birlikte tamamen göz ardı edilemez.
1	Sınırlı Olasılık	Tehlikenin oluşması mümkün olmakla birlikte gerçekleşme ihtimali düşük kabul edilmektedir.
3	Olası	Belirli koşullar altında zaman zaman meydana gelebilecek risk durumlarını ifade eder.
6	Yüksek	Olayın gerçekleşme ihtimali belirgin düzeyde olup oluşma beklentisi kuvvetlidir.
10	Çok Yüksek	Tehlikenin ortaya çıkması beklenen ve gerçekleşme olasılığı en yüksek düzeyde olan durumları ifade eder.

Tablo 5. Frekans Değeri Sınıflandırması (Gul, vd., 2018)

Frekans Puanı	Maruziyet Düzeyi	Maruziyetin Yaklaşık Tekrar Aralığı
0,5	Çok Seyrek	Tehlikeye maruziyetin yılda bir kez veya daha düşük sıklıkta gerçekleştiği durumları ifade eder.
1	Seyrek	Maruziyetin yıl içerisinde sınırlı sayıda tekrarlandığı durumları kapsamaktadır.
2	Düşük Sıklık	Tehlikeyle karşılaşmanın ayda bir veya birkaç kez meydana geldiği durumları ifade eder.
3	Orta Sıklık	Maruziyetin haftalık düzeyde tekrar ettiği çalışma koşullarını temsil eder.
6	Yüksek Sıklık	Tehlikeye maruziyetin günlük olarak veya gün içerisinde birden fazla kez gerçekleştiği durumları kapsamaktadır.
10	Sürekli Maruziyet	Çalışma sürecinde maruziyetin kesintisiz şekilde devam ettiği veya saat içerisinde birden fazla tekrar ettiği durumları ifade eder.

Tablo 6. Şiddet Değeri Sınıflandırması (Gul, vd., 2018)

Şiddet Puanı	Etki Düzeyi	Değerlendirme Kriteri
1	Düşük Öncelikli	Çalışma sürecini önemli ölçüde etkilemeyen, hafif sonuçlu veya kayıpsız olayları ifade eder.
3	Sınırlı Etki	Küçük çaplı yaralanma, düşük düzeyde iş kaybı veya sınırlı ekipman hasarı ile sonuçlanabilecek durumları kapsamaktadır.
7	Ciddi	Yaralanma, belirgin iş gücü kaybı veya profesyonel tıbbi müdahale gerektiren olayları ifade eder.
15	Çok Ciddi	Kalıcı sağlık etkileri, uzun süreli iş gücü kaybı veya çevresel sonuç oluşturabilecek olayları kapsamaktadır.
40	Kritik	Ölümcül sonuçlar, tam iş göremezlik veya geniş kapsamlı çevresel etkilerin ortaya çıkabileceği durumları ifade eder.
100	Felaket Düzeyi	Birden fazla ölüm, yaygın çevresel zarar veya büyük ölçekli operasyonel kayıplarla sonuçlanabilecek olayları temsil eder.

2.3. FMEA Yöntemi

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis – Hata Türleri ve Etkileri Analizi), sistemlerde, süreçlerde veya ekipmanlarda meydana gelebilecek olası hata türlerinin önceden belirlenmesi, bu hataların neden olabileceği etkilerin analiz edilmesi ve gerekli önlemlerin planlanması amacıyla kullanılan sistematik bir risk değerlendirme yöntemidir. Yöntem ilk olarak 1940’lı yıllarda Amerikan ordusu tarafından geliştirilmiş, daha sonra havacılık, otomotiv, sağlık, enerji ve üretim sektörleri başta olmak üzere birçok alanda yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır.

FMEA yönteminin temel amacı, olası hata türlerini henüz gerçekleşmeden önce belirlemek ve bu hataların sistem üzerindeki etkilerini değerlendirerek riskleri azaltmaktır. Bu nedenle yöntem, proaktif risk yönetimi yaklaşımının önemli araçlarından biri olarak kabul edilmektedir. Özellikle karmaşık üretim süreçlerinde, makine sistemlerinde ve iş güvenliği uygulamalarında risklerin önceden analiz edilmesine katkı sağlamaktadır.

FMEA yönteminde her hata türü üç temel parametre açısından değerlendirilmektedir:

- Olasılık (Occurrence)
- Şiddet (Severity)
- Tespit Edilebilirlik (Detection)

Bu parametrelerin çarpılmasıyla Risk Öncelik Sayısı (RÖS/RPN) elde edilmektedir. Kullanılan temel formül aşağıdaki gibidir:

$$RPN = O \times S \times D$$

Burada;

- RPN: Risk Öncelik Sayısı
- O: Hatanın oluşma olasılığı (Tablo 7)
- S: Hatanın etkisinin şiddeti (Tablo 8)
- D: Hatanın tespit edilebilirlik düzeyi (Tablo 9)

olarak ifade edilmektedir (Birgören ve Yalçınkaya, 2019).

Olasılık parametresi, hata türünün meydana gelme ihtimalini göstermektedir. Şiddet parametresi, hata gerçekleştiğinde oluşabilecek zararın büyüklüğünü değerlendirmektedir. Tespit edilebilirlik parametresi ise oluşabilecek hatanın sistem tarafından önceden fark edilme olasılığını ifade etmektedir. Elde edilen Risk Öncelik Sayısı ne kadar yüksekse, ilgili riskin o kadar kritik olduğu kabul edilmekte ve öncelikli kontrol tedbirlerinin uygulanması gerekmektedir.

FMEA yöntemi genel olarak aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

1. Sistem veya sürecin tanımlanması
2. Olası hata türlerinin belirlenmesi
3. Hata nedenlerinin ve etkilerinin analiz edilmesi
4. Olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik puanlarının verilmesi
5. Risk Öncelik Sayısının hesaplanması
6. Düzeltici ve önleyici faaliyetlerin planlanması

Bu yöntem sayesinde süreçlerde oluşabilecek problemler önceden belirlenebilmekte ve iş kazaları, ekipman arızaları veya üretim kayıpları azaltılabilmektedir. Özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde kalite yönetim sistemlerinin temel araçlarından biri olarak kullanılmaktadır (Birgören ve Yalçınkaya, 2019).

FMEA yönteminin en önemli avantajlarından biri, potansiyel hata kaynaklarının sistematik biçimde değerlendirilmesini sağlamasıdır. Ayrıca süreçlerin güvenilirliğinin artırılması, bakım maliyetlerinin azaltılması ve iş güvenliği performansının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte yöntemde puanlamaların uzman görüşüne dayanması nedeniyle değerlendirme sonuçları kişisel yorumlardan etkilenebilmektedir. Bu nedenle analizlerin multidisipliner ekipler tarafından gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

Tablo 7. Hatanın oluşma olasılığı (Nuchpho vd., 2014)

Değer	Oluşma Olasılığı Düzeyi	Yaklaşık Gerçekleşme Sıklığı
10	Çok yüksek / kaçınılmaz	Hatanın ortaya çıkma olasılığı oldukça yüksektir (yaklaşık $\geq 1/2$).
9	Çok yüksek	Hata oluşumunun sık gözlenmesi beklenmektedir (yaklaşık $1/3$).
8	Tekrarlayan	Süreç içerisinde düzenli olarak tekrar eden hata durumu (yaklaşık $1/8$).
7	Yüksek	Hatanın belirli aralıklarla ortaya çıkma ihtimali yüksektir (yaklaşık $1/20$).
6	Orta–yüksek	Hata oluşumu düşük sıklıkta olsa da göz ardı edilemeyecek düzeydedir (yaklaşık $1/80$).
5	Orta	Hata oluşumu belirli koşullar altında meydana gelebilir (yaklaşık $1/400$).
4	Düşük–orta	Hata oluşumu seyrek olarak değerlendirilmektedir (yaklaşık $1/2.000$).
3	Düşük	Hata meydana gelme olasılığı oldukça sınırlıdır (yaklaşık $1/15.000$).
2	Çok düşük	Hatanın gerçekleşmesi nadir kabul edilmektedir (yaklaşık $1/150.000$).
1	İhmal edilebilir	Hatanın gerçekleşmesi pratikte beklenmeyen düzeydedir (yaklaşık $\leq 1/1.500.000$).

Tablo 8. Hatanın etkisinin şiddeti (Nuchpho vd., 2014)

Değer	Şiddet Düzeyi	Etkinin Tanımı
10	Kritik / Tehlikeli	Hata herhangi bir uyarı mekanizması olmaksızın ortaya çıkar ve sistemin işleyişini ciddi düzeyde kesintiye uğratar.
9	Çok Ciddi	Sistem çalışmasını olumsuz etkileyen ve uyarı ile fark edilebilen hata durumlarını ifade eder.
8	Aşırı	Güvenlik açısından doğrudan kritik sonuç oluşturmamakla birlikte sistemin çalışamaz hale gelmesine neden olan ağır etkileri kapsar.
7	Büyük	Ekipman üzerinde önemli düzeyde hasar oluşturarak sistem performansını sürdürülemez hale getirir.
6	Önemli	Sınırlı düzeyde hasar oluşmasına rağmen sistemin normal çalışma koşullarını sürdüremediği durumları ifade eder.
5	Orta	Sistemin beklenen fonksiyonlarını yerine getirmesini

		engelleyen ancak kritik olmayan hata etkilerini kapsamaktadır.
4	Düşük	Sistemin çalışmaya devam ettiği ancak performansında belirgin düşüşlerin gözlemlendiği durumları ifade eder.
3	Az	Kısmi performans kayıplarıyla birlikte sistem faaliyetlerinin sürdürülebildiği etki düzeyidir.
2	Çok Az	Basit düzeltici uygulamalar ile sistemin normal çalışma koşullarına döndürülebildiği durumları ifade eder.
1	Etkisiz	Sistem performansı üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmayan hata düzeyidir.

Tablo 9. Hatanın tespit edilebilirlik düzeyi (Nuchpho vd., 2014)

Değer	Tespit Düzeyi	Kontrol Mekanizmasının Hata Kaynağını Belirleme Yeteneği
10	Belirlenemez	Mevcut tasarım kontrollerinin olası hata nedenini ortaya çıkarma kapasitesi bulunmamaktadır.
9	Çok düşük tespit olasılığı	Kontrol mekanizmalarının hata kaynağını ortaya koyabilme olasılığı oldukça sınırlıdır.
8	Düşük tespit olasılığı	Potansiyel hata nedeninin belirlenmesi düşük düzeyde mümkün olmaktadır.
7	Sınırlı tespit	Kontroller hata kaynağını yalnızca düşük güvenilirlikle ortaya çıkarabilmektedir.
6	Kısmen tespit edilebilir	Tasarım kontrolleri hata nedenlerini belirlemede belirli düzeyde yeterlilik göstermektedir.
5	Orta düzey tespit	Hata nedeninin kontrol mekanizmaları ile ortaya çıkarılabilme olasılığı orta seviyededir.
4	İyi düzeyde tespit	Tasarım kontrolleri potansiyel hata kaynaklarını yüksek doğrulukla belirleyebilmektedir.
3	Yüksek tespit olasılığı	Hata nedenlerinin kontrol sürecinde tespit edilme ihtimali oldukça yüksektir.
2	Çok yüksek tespit olasılığı	Kontrol sistemi hata kaynağını büyük ölçüde ortaya çıkarabilmektedir.
1	Neredeyse kesin tespit	Tasarım kontrol süreçlerinin hata nedenini belirleme başarısı oldukça yüksektir.

2.4. HAZOP Yöntemi

HAZOP (Hazard and Operability Study – Tehlike ve İşletilebilirlik Çalışması), özellikle kimya, petrokimya, enerji ve proses endüstrilerinde kullanılan sistematik bir risk değerlendirme yöntemidir. Yöntem ilk olarak

1960'lı yıllarda Imperial Chemical Industries (ICI) tarafından geliştirilmiş ve proses güvenliği çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. HAZOP yöntemi; proseslerde meydana gelebilecek sapmaların belirlenmesi, bu sapmaların nedenlerinin analiz edilmesi ve olası sonuçlarının değerlendirilmesi amacıyla uygulanmaktadır.

HAZOP yönteminin temel amacı, sistemin tasarım amacından sapmasına neden olabilecek durumları önceden belirlemek ve bu durumların güvenlik, çevre, sağlık ve üretim süreçleri üzerindeki etkilerini değerlendirmektir. Bu nedenle yöntem, özellikle yüksek tehlike içeren proseslerde iş kazalarının, patlamaların, yangınların ve toksik yayılımların önlenmesinde önemli bir risk analiz aracı olarak kabul edilmektedir.

HAZOP çalışmaları genellikle multidisipliner ekipler tarafından yürütülmektedir. Analiz sırasında sistem; boru hatları, tanklar, reaktörler, vanalar ve proses ekipmanları gibi bölümlere ayrılmakta ve her bölüme belirli rehber kelimeler yardımıyla incelenmektedir. Kullanılan rehber kelimeler; proses parametrelerinde meydana gelebilecek sapmaları tanımlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu parametreler genellikle debi, sıcaklık, basınç, seviye ve konsantrasyon gibi değişkenlerden oluşmaktadır (Kabakulak, 2019).

HAZOP yönteminde yaygın olarak kullanılan bazı rehber kelimeler aşağıdaki gibidir:

- Yok (No)
- Daha fazla (More)
- Daha az (Less)
- Ters (Reverse)
- Kısmen (Part of)
- Fazla erken/Fazla geç (Early/Late)

Bu rehber kelimeler proses parametreleri ile birlikte değerlendirilerek olası sapmalar belirlenmektedir. Örneğin “Daha fazla basınç” veya “Debi yok” gibi sapmalar analiz edilerek bu durumların nedenleri ve sonuçları incelenmektedir. Daha sonra mevcut kontrol önlemleri değerlendirilmekte ve gerekli görülmesi durumunda ek önlemler önerilmektedir.

HAZOP yöntemi genel olarak aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

1. Sistemin ve proses akışının tanımlanması
2. İncelenecek düğüm noktalarının belirlenmesi
3. Proses parametrelerinin seçilmesi
4. Rehber kelimeler kullanılarak sapmaların belirlenmesi

5. Sapmaların neden ve sonuçlarının analiz edilmesi
6. Mevcut kontrol önlemlerinin değerlendirilmesi
7. Düzeltici ve önleyici faaliyetlerin belirlenmesi (Choi ve Byeon, 2020)

Yöntemin en önemli avantajlarından biri, proseslerde ortaya çıkabilecek tehlikelerin sistematik ve ayrıntılı biçimde analiz edilmesine olanak sağlamasıdır. Ayrıca HAZOP çalışmaları sayesinde proses güvenliği artırılmakta, ekipman arızaları azaltılmakta ve büyük endüstriyel kazaların önlenmesine katkı sağlanmaktadır. Özellikle kimyasal proseslerde meydana gelebilecek zincirleme etkilerin belirlenmesi açısından etkili bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Galante, 2014).

Bununla birlikte HAZOP yöntemi zaman alıcı bir analiz süreci gerektirmektedir. Ayrıca yöntemin etkinliği, analiz ekibinin deneyimi ve proses bilgisine bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle çalışmaların alanında uzman kişilerden oluşan ekipler tarafından yürütülmesi önerilmektedir.

2.5. FTA Yöntemi

FTA (Fault Tree Analysis – Hata Ağacı Analizi), sistemlerde meydana gelebilecek istenmeyen olayların nedenlerini mantıksal ilişkiler yardımıyla analiz etmek amacıyla kullanılan sistematik bir risk değerlendirme yöntemidir. Yöntem, özellikle karmaşık sistemlerde hata kaynaklarının belirlenmesi, kritik risklerin ortaya çıkarılması ve güvenlik performansının artırılması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. İlk olarak havacılık ve savunma sanayinde geliştirilen yöntem, günümüzde enerji, kimya, üretim, ulaşım ve iş sağlığı ve güvenliği alanlarında yaygın biçimde uygulanmaktadır.

FTA yönteminin temel amacı, meydana gelmesi istenmeyen bir olayın hangi temel nedenlerden kaynaklandığını sistematik biçimde ortaya koymaktır. Analiz süreci “tepe olay” olarak adlandırılan kritik olayın belirlenmesiyle başlamaktadır. Daha sonra bu olaya neden olabilecek alt olaylar mantıksal ilişkiler kullanılarak analiz edilmektedir. Böylece olayların birbirleriyle olan neden-sonuç ilişkileri görsel ve sistematik biçimde değerlendirilebilmektedir (Büyük ve Yorulmaz, 2022).

FTA yönteminde olaylar arasındaki ilişkiler genellikle VE (AND) ve VEYA (OR) mantık kapıları kullanılarak gösterilmektedir. VE kapısında üst olayın gerçekleşebilmesi için tüm alt olayların meydana gelmesi gerekirken VEYA kapısında alt olaylardan yalnızca birinin gerçekleşmesi yeterli olmaktadır. Bu yapı sayesinde sistemdeki hata zincirleri ve kritik bileşenler ayrıntılı şekilde analiz edilebilmektedir (Yağmur ve Arslan, 2024).

FTA yöntemi genel olarak aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

1. Tepe olayın belirlenmesi

2. Sistem ve süreç bilgilerinin incelenmesi
3. Alt hata nedenlerinin belirlenmesi
4. Mantık kapıları yardımıyla hata ağacının oluşturulması
5. Kritik hata nedenlerinin analiz edilmesi
6. Risk kontrol önlemlerinin planlanması

FTA yöntemi özellikle büyük endüstriyel kazaların analiz edilmesi, ekipman arızalarının değerlendirilmesi ve proses güvenliğinin geliştirilmesi açısından önemli avantaj sağlamaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda yöntemin; yangın, patlama, proses kazaları, elektriksel arızalar ve makine kaynaklı iş kazalarının analizinde etkili sonuçlar verdiği belirtilmektedir. Yöntemin en önemli avantajlarından biri, karmaşık sistemlerdeki hata ilişkilerini görsel biçimde ortaya koyabilmesidir. Ayrıca kritik hata kaynaklarının belirlenmesine katkı sağlayarak önleyici faaliyetlerin daha etkin planlanmasına yardımcı olmaktadır. Bununla birlikte sistemin ayrıntılı analiz gerektirmesi ve büyük ölçekli sistemlerde hata ağacının karmaşık hale gelmesi yöntemin sınırlılıkları arasında yer almaktadır

Hata ağacı analizi, nitel ve nicel değerlendirme yaklaşımlarını birlikte içeren sistematik bir risk analiz yöntemidir. Nicel analiz aşamasında, hata olaylarına ait olasılık değerleri kullanılarak mantık kapıları aracılığıyla olayların sistem üzerindeki yayılımı ve tepe olayın gerçekleşme olasılığı hesaplanmaktadır. Nitel analiz aşamasında ise sistemde kritik rol oynayan hata kombinasyonlarını belirlemek amacıyla minimum kesme kümeleri analiz edilmektedir. Analiz sürecinde olaylar arasındaki mantıksal ilişkilerin modellenmesi ve değerlendirilmesi için Boolean cebiri esas alınmaktadır (Kilian vd., 2023).

SONUÇ

Risk değerlendirmesi, İSG faaliyetleri kapsamında iş kazaları ile meslek hastalıklarının ortaya çıkmasını önlemeye yönelik temel önleyici uygulamalardan biri olarak kabul edilmektedir. Çalışma ortamında bulunan ya da ortaya çıkma potansiyeli taşıyan tehlikelerin sistematik biçimde tespit edilmesi, bu tehlikelerden kaynaklanan risklerin değerlendirilmesi ve gerekli kontrol önlemlerinin planlanması; çalışanların sağlık ve güvenliğinin sağlanması, güvenli çalışma koşullarının oluşturulması ve kurumsal iş güvenliği kültürünün sürdürülebilirliğinin desteklenmesi açısından önemli bir rol üstlenmektedir. Bu bölüm kapsamında risk değerlendirme kavramı ele alınmış; nitel, nicel ve yarı kantitatif yaklaşımlar çerçevesinde yaygın olarak kullanılan L Tipi Matris, Fine-Kinney, FMEA, HAZOP, FTA, ETA ve What-if analiz yöntemleri incelenmiştir. Değerlendirme sonucunda her yöntemin farklı amaçlara, sektörlere ve çalışma koşullarına uygun avantajlar

sunduğu görülmüştür. L Tipi Matris yöntemi uygulama kolaylığı ve hızlı değerlendirme imkânı sağlarken; Fine-Kinney yöntemi risklerin önceliklendirilmesine katkı sunmaktadır. FMEA yöntemi potansiyel hata türlerinin sistematik analizine olanak tanırken, HAZOP özellikle proses güvenliğinde ayrıntılı değerlendirme sağlamaktadır. FTA ve ETA yöntemleri karmaşık sistemlerde neden-sonuç ilişkilerinin ortaya konulmasına yardımcı olmakta, What-if analizi ise ön değerlendirme çalışmalarında pratik bir yaklaşım sunmaktadır.

Risk değerlendirme yöntemlerinin etkinliği yalnızca kullanılan yönteme değil; verilerin doğruluğuna, değerlendirme ekibinin bilgi ve deneyimine, çalışan katılımına ve kontrol önlemlerinin uygulanabilirliğine de bağlıdır. Bu nedenle tüm sektörler için tek bir yöntemin yeterli olmadığı, çalışma ortamının özelliklerine göre uygun yöntem seçiminin yapılması gerektiği değerlendirilmektedir. Özellikle yüksek tehlike içeren sektörlerde birden fazla yöntemin birlikte kullanılması daha kapsamlı sonuçlar elde edilmesine katkı sağlayabilmektedir.

Gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda; dijital risk değerlendirme sistemleri, yapay zekâ destekli karar mekanizmaları, gerçek zamanlı veri izleme teknolojileri ve dinamik risk analiz yaklaşımlarının İSG süreçlerine entegrasyonunun değerlendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca sektöre özgü hibrit risk değerlendirme modellerinin geliştirilmesi ve farklı yöntemlerin performanslarının uygulama örnekleri üzerinden karşılaştırılması, risk yönetimi süreçlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak risk değerlendirmesi; yalnızca yasal bir zorunluluk değil, çalışanların korunması, işletme sürekliliğinin sağlanması ve güvenlik kültürünün yaygınlaştırılması açısından stratejik bir yönetim aracıdır. Uygun yöntemin doğru koşullarda uygulanması, İSG performansının artırılmasında önemli rol oynamaktadır.

REFERANSLAR

- Alshreef, B. . (2025). The ISO 45001: A systematic review of global adoption trends, outcomes, and barriers (2018–2023). *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 8(5), 1127–1136. <https://doi.org/10.53894/ijirss.v8i5.8970>
- Aslantaş, S., ve Erpek, Y. İ. (2024). Farklı Risk Analiz Metotlarının Karşılaştırılması: Kaynak Atölyesi Uygulama Örneği. *Uluslararası Hukuk ve Sosyal Bilim Araştırmaları Dergisi*, 5(2), 39-71.
- Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European journal of operational research*, 253(1), 1-13.
- Bedir, F., Kul, S., Özdemir, M., ve İrdemez, Ş. (2024). L tipi matris ve Fine-Kinney metodları kullanılarak Erzurum Havalimanı'nın çevresel risk

- değerlendirmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 14(3), 1063-1074.
- Birgören, B. (2017). Fine Kinney risk analizi yönteminde risk analizi yönteminde risk faktörlerinin hesaplama zorlukları ve çözüm önerileri. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 9(1), 19-25.
- Birgören, B., ve Yalçinkaya, M. (2019). İş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirmesinde hata türleri ve etkileri analizinin (FMEA) kullanımı. *International Journal Of Engineering Research And Development*, 11(1), 41-50.
- BOSTAN, F. (2025). *Tersanelerdeki kaynaklı imalat işlerinde meydana gelen fiziksel ve kimyasal risk etmenlerinin belirlenerek iki farklı risk değerlendirme metodu ile değerlendirilmesi: Ordu ili örneği* (Tez No. 932595) [Yüksek lisans tezi, GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ]. Ulusal Tez Merkezi.
- Büyük, N., ve Yorulmaz, M. (2022). Kimyasal Tankerlerde Tank Operasyonlarındaki Yangın Risklerinin FTA Metodu ile İncelenmesi. *ICAENS 2022*.
- Chatzoglou, P. D., Kotzakolios, A. E., ve Marhavilas, P. K. (2025). Health and Safety Management System (HSMS) and Its Impact on Employee Satisfaction and Performance—A New HSMS Model. *Safety*, 11(2), 52.
- Choi, J. Y., ve Byeon, S. H. (2020). HAZOP methodology based on the health, safety, and environment engineering. *International journal of environmental research and public health*, 17(9), 3236.
- Galante, E., Bordalo, D., ve Nobrega, M. (2014). Risk assessment methodology: quantitative HazOp. *Journal of Safety Engineering*, 3(2), 31-36.
- Gul, M., Guven, B., ve Guneri, A. F. (2018). A new Fine-Kinney-based risk assessment framework using FAHP-FVIKOR incorporation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 53, 3-16.
- Kabakulak, T. (2019). Bir Tekstil İşletmesinde Risk Değerlendirme Uygulaması : 5x5 Matris ve HAZOP. *Karaelmas Journal of Occupational Health and Safety*, 3(2), 97-111. <https://doi.org/10.33720/kisgd.581677>
- Kilian, P., Köhler, A., Van Bergen, P., Wörz, M., Schneider, M., Groh, T., ... ve Dazer, M. (2023). Best practices for advanced modeling of safety mechanisms in an FTA. *IEEE Access*, 11, 60109-60129.
- Marhavilas, P. K., Koulouriotis, D., ve Gemeni, V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24(5), 477-523.
- Nuchpho, P., Nansaarn, S., ve Pongpullponsak, A. (2014, March). Risk Assessment in the organization by using FMEA Innovation: A Literature Review. In *Proceedings of the 7th International Conference on Educational Reform*

- (ICER 2014). *Innovations and Good Practices in Education: Global Perspectives* (pp. 781-789).
- Oturakçı, M., Dağsuyu, C., ve Kokangül, A. (2015). A new approach to Fine Kinney method and an implementation study. *Alphanumeric Journal*, 3(2), 83-92.
- Soykan, O. (2018). Endüstriyel balıkçı gemilerinde L tipi matris yöntemi ile risk değerlendirmesi ve kullanılabilirliği. *Ege Journal of Fisheries & Aquatic Sciences (EgeJFAS)/Su Ürünleri Dergisi*, 35(2).
- Tixier, J., Dusserre, G., Salvi, O., ve Gaston, D. (2002). Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. *Journal of Loss Prevention in the process industries*, 15(4), 291-303.
- Vitrano, G., ve Micheli, G. J. L. (2024). Effectiveness of Occupational Safety and Health interventions: a long way to go. *Frontiers in public health*, 12, 1292692. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1292692>
- Yağmur, B., ve Arslan, O. (2024). On the Grounding of Ships Determination of Risk Factors with Fault Tree Analysis (FTA). *Denizcilik Araştırmaları Dergisi: Amfora*, 3(6), 76-98. <https://izlik.org/JA45JM86ZR>

Atık Polipropilen Agregalı LC³ Esaslı Harçların Özellikleri

Nazım Çağatay DEMİRAL¹

Aylin ÖZODABAŞ²

- 1- Arş. Gör.; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü. mü.cagatay.demiral@bilecik.edu.tr ORCID No: 0000-0001-5927-7299
- 2- Doç. Dr.; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü. ORCID No: 0000-0002-6011-980X

ÖZET

Bu çalışmada, düşük klinkerli LC³ tipi bağlayıcı sistemi içinde doğal ince agreganın atık polipropilen (PP) agrega ile hacimsel olarak ikame edilmesinin taze ve sertleşmiş harç özelliklerine etkisi incelenmiştir. CEM I 42,5 R çimentosu, 800 °C'de 1 saat kalsine edilen kil ve öğütülmüş kireçtaşı kullanılarak üçlü bağlayıcı matrisi hazırlanmış; doğal kum hacimce %5, %10 ve %15 oranlarında PP agrega ile değiştirilmiştir. Kontrol ve PP içeren serilerde yayılma tablası deneyi, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı, 28 günlük su emme, görünür porozite ve kuru birim hacim ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Kontrol LC³ harcında 7 ve 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 25 MPa ve 42 MPa olarak belirlenmiştir. PP5 serisi 28 günlük dayanımda kontrolün üzerinde kalırken, PP10 ve PP15 serilerinde ortalama dayanım değerleri daha düşük bulunmuştur. PP ikamesi kuru hacimsel yoğunluğu azaltmış, su emme ve görünür porozite değerlerini ise genel olarak artırmıştır. Bulgular, sınırlı düzeyde PP ikamesinin LC³ matrisli harçlarda hafifletme ve atık değerlendirme açısından uygulanabilir bir seçenek oluşturabileceğini; ancak daha yüksek ikame oranlarında boşluk yapısı, plastik agreganın düşük rijitliği ve olası arayüz zayıflığının mekanik performansı sınırlayabileceğini göstermektedir. Çalışma, plastik atıkların düşük karbonlu bağlayıcılarla birlikte kullanımına yönelik ön deneysel veri sunmakta ve optimum ikame oranının karışım performansı üzerinden değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Bu deney kapsamındaki aritmetik ortalamalar dikkate alındığında, %5 hacimsel PP ikamesi en dengeli sonuçları vermiştir.

Anahtar Kelimeler – LC³; kalsine kil; atık polipropilen agrega; görünür porozite; basınç dayanımı; sürdürülebilir harç

GİRİŞ

Çimento esaslı yapı malzemeleri, yüksek üretim hacimleri nedeniyle doğal kaynak tüketimi ve karbon salımı bakımından inşaat sektörünün en kritik bileşenleri arasında yer almaktadır. Portland çimentosu üretimindeki klinkerleşme süreci hem yüksek sıcaklık gereksinimi hem de kireçtaşının kalsinasyonu nedeniyle önemli miktarda CO₂ salımına yol açmaktadır. Bu nedenle klinker oranını azaltan, yerel hammaddelerle üretilebilen ve yeterli mekanik performans sağlayabilen alternatif bağlayıcı sistemleri sürdürülebilir yapı malzemeleri açısından önem kazanmıştır (Scrivener vd., 2018; Cancio Díaz vd., 2017).

Kireçtaşı-kalsine kil çimentosu (LC³), klinkerin bir bölümünün kalsine kil ve ince öğütülmüş kireçtaşı ile ikame edilmesine dayanan üçlü bir bağlayıcı sistemidir. Metakaolin içeren kalsine kilin puzolanik reaktivitesi ve kireçtaşının alüminat fazlarıyla etkileşimi, C-A-S-H jelleri ile karboalüminat fazlarının oluşumunu destekleyerek düşük klinkerli bağlayıcılarda dayanım gelişimine katkı sağlayabilmektedir (Antoni vd., 2012; Alujas vd., 2015; Avet

ve Scrivener, 2018; Dhandapani vd., 2018). Bu yaklaşım, yalnızca bağlayıcı kaynaklı çevresel yükü azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda düşük karbonlu harç ve beton tasarımları için uygulanabilir bir zemin oluşturmaktadır. Sürdürülebilirlik açısından ikinci önemli konu doğal agrega tüketimi ve plastik atıkların yönetimidir. Atık plastiklerin çimento esaslı harç ve betonlarda agrega olarak değerlendirilmesi, doğal kum tüketimini azaltma ve plastik atıkları katma değerli yapı ürünlerine dönüştürme potansiyeli taşır. Bununla birlikte plastik agregaların düşük yoğunluğu, hidrofobik yüzeyi ve mineral agregalara göre daha düşük elastisite modülü, taze halde işlenebilirliği ve sertleşmiş halde basınç dayanımını olumsuz etkileyebilmektedir (Saikia ve de Brito, 2012; Gu ve Ozbakkaloglu, 2016; Babafemi vd., 2018; Sharma ve Bansal, 2016). Polipropilen (PP) esaslı agregalar bu çerçevede hafif harç üretimi açısından dikkat çekse de çimento hamuru ile kurdukları arayüz bağının sınırlı olması, boşluk yapısı ve dayanım kaybı bakımından kontrollü biçimde değerlendirilmelidir. Bu davranış PP agregalar için doğrudan raporlandığı gibi, PET, PC, PVC ve karışık plastik agregalarla yapılan çalışmalarda da benzer eğilimler plastik agrega literatürü kapsamında bildirilmiştir (Hannawi vd., 2010; Marzouk vd., 2007; da Silva vd., 2014; Alrshoudi vd., 2022; Thorneycroft vd., 2018; Al-Noaimat vd., 2025).

Son yıllarda LC³ veya LC² tipi düşük karbonlu bağlayıcıların geri dönüştürülmüş plastik bileşenlerle birlikte kullanımı da araştırılmaya başlanmıştır. Babafemi vd. (2024), LC² tipi bağlayıcı içeren 3B yazdırılabilir betonlarda RESIN8 geri dönüştürülmüş plastik agregayı; Al-Noaimat vd. (2025) ise PVC atıklarını LC³ harçlarda agrega olarak değerlendirmiştir. Buna karşılık Mhene ve Babafemi (2025), LC³ betonunda geri dönüştürülmüş ince agrega ve polipropilen lif kullanımını incelemiştir. Bu çalışmalar alanın geliştiğini göstermekle birlikte, atık PP agreganın düşük oranlı hacimsel ikame ile LC³ tipi harçlarda birlikte değerlendirilmesi hâlâ ayrıntılı deneysel veriye ihtiyaç duyan güncel bir konudur.

Bu çalışmada, LC³ tipi bağlayıcı matrisi içinde doğal ince agreganın hacimsel olarak %5, %10 ve %15 oranlarında atık PP agrega ile ikame edilmesinin taze harç yayılma davranışı, su emme, görünür porozite ve basınç dayanımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bulgular, LC³ kimyası ve plastik agrega literatüründeki temel mekanizmalarla ilişkilendirilerek, doğrudan ölçülmeyen mikroyapısal süreçler kesin sonuç gibi sunulmadan tartışılmıştır.

MALZEME VE YÖNTEM

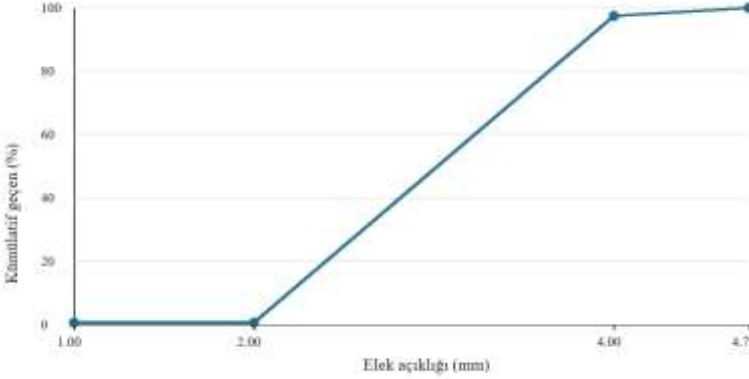
Deneysel çalışmada ana bağlayıcı bileşen olarak CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmış; LC³ tipi üçlü bağlayıcı matrisi oluşturmak üzere kalsine kil ve ince öğütülmüş kireçtaşı ilave edilmiştir. Bağlayıcı kompozisyonu çimento, kalsine kil ve kireçtaşı için sırasıyla %55, %30 ve %15 olacak şekilde düzenlenmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0,50, akışkanlaştırıcı/bağlayıcı oranı ise %1 olarak sabit tutulmuştur. Kalsine kil bileşeni, ham kaolin kilinin kül

fırınında 10 °C/dakika ısıtma hızıyla 800 °C'ye çıkarılarak bu sıcaklıkta 1 saat tutulmasıyla hazırlanmış ve puzolanik bileşen olarak değerlendirilmiştir. PP agregadan alınan temsili deney numunesi dörde bölme yöntemiyle azaltılmış, 1000 g numune üzerinde elek analizi yapılmış ve tane boyutu dağılımı Tablo 1 ile Şekil 1'de verilmiştir. Elek analizinde 4,75 mm, 4,00 mm, 2,00 mm ve 1,00 mm göz açıklığına sahip elekler ile toplama tavaşı kullanılmıştır. Eleme sonrasında her elek üzerinde kalan kütle tartılmış, kümülatif kalan ve kümülatif geçen değerleri hesaplanmıştır.

Elek analizi, PP agreganın büyük bölümünün 2,00-4,00 mm aralığında toplandığını göstermektedir. Bu dağılım, atık PP agreganın doğal ince agreganın belirli hacimsel oranlarda ikamesi için 4,75 mm altı ince agrega fraksiyonu olarak değerlendirildiğini göstermektedir.

Tablo 1: Atık polipropilen agregaya ait elek analizi sonuçları.

Elek açıklığı (mm)	Elekte kalan (g)	Kümülatif kalan (g)	Kümülatif geçen (%)
4,75	1,5	1,5	99,85
4,00	24,5	26,0	97,40
2,00	969,0	995,0	0,50
1,00	0,5	995,5	0,45
Tava	4,5	1000,0	0,00



Şekil 1: Atık PP agreganın granülometri eğrisi.

Karışım tasarımı, doğal kumun belirli hacim oranlarında PP agrega ile ikame edilmesi esasına göre hazırlanmıştır. Çimento, kalsine kil, kireçtaşı, su ve akışkanlaştırıcı oranları tüm serilerde sabit tutulmuş; değişken parametre yalnızca hacimsel PP agrega ikame oranı olmuştur. Tablo 2'de çimento, kalsine kil ve kireçtaşı sütunları bağlayıcı içindeki kütle oranları; kum ve PP sütunları ise toplam ince agrega hacmindeki payları göstermektedir. Su sütu-

nu su/bağlayıcı oranını, akışkanlaştırıcı sütunu ise akışkanlaştırıcı/bağlayıcı oranını ifade etmektedir. PP0 kontrol karışımı PP içermeyen LC³ tipi kontrol serisi olarak tanımlanmış, PP5, PP10 ve PP15 serilerinde doğal ince agrega sırasıyla hacimce %5, %10 ve %15 oranında atık PP agrega ile ikame edilmiştir. Numuneler 50 × 50 × 50 mm boyutlu küp kalıplarda üretilmiş ve 20 ± 1 °C'de suda kür edilmiştir.

Tablo 2: Harç serilerinin bağlayıcı bileşimi, su/bağlayıcı oranı ve hacimsel ince agrega dağılımı.

Karışım	Çimento (% bağlayıcı kütlesi)	Kalsine kil (% bağlayıcı kütlesi)	Kireçtaşı (% bağlayıcı kütlesi)	Su/bağlayıcı	Akışkanlaştırıcı/bağlayıcı (%)	Kum (% toplam agrega hacmi)	PP (% toplam agrega hacmi)
PP0	%55	%30	%15	0,50	%1	%100	%0
PP5	%55	%30	%15	0,50	%1	%95	%5
PP10	%55	%30	%15	0,50	%1	%90	%10
PP15	%55	%30	%15	0,50	%1	%85	%15

Taze harçların işlenebilirliği TS EN 1015-3/A2'ye uygun yayılma tablası deneyiyle belirlenmiştir. Yayılma konisi temizlenip nemlendirildikten sonra sarsma tablasının merkezine yerleştirilmiş, taze harç tabakalar halinde doldurulmuş ve yüzey düzeltildikten sonra koni düşey olarak kaldırılmıştır. Tabla 15 kez düşürüldükten sonra harcın birbirine dik iki doğrultudaki çapı ölçülmüş ve ortalama değer yayılma çapı olarak kaydedilmiştir. Basınç dayanımı deneyleri ASTM C109/C109M-26 standardındaki 50 × 50 × 50 mm harç küp numunesi geometrisi ve deney prosedürü esas alınarak 7 ve 28 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş; yükleme hızı 900-1800 N/s aralığında uygulanmıştır.

Su emme, görünür porozite ve kuru birim hacim ağırlık deneyleri 28 günlük numuneler üzerinde Arşimet esaslı hidrostatik tartım yöntemiyle yapılmıştır. Numuneler, belirlenen kür süresinin sonunda 105 ± 5 °C sıcaklıktaki etüvde en az 24 saat kurutulmuştur. Etüvden çıkarılan numuneler desikatörde 20-25 °C sıcaklığa kadar soğutulduktan sonra tartılmış ve kuru kütleleri belirlenmiştir. Kuru kütlesi belirlenen numuneler yaklaşık 21 °C sıcaklıktaki su içerisinde en az 48 saat bekletilmiştir. Su içerisinde 48 saat bekletilen numuneler sudan çıkarılmış, yüzeylerindeki serbest su nemli bir bez yardımıyla uzaklaştırılmış ve suya doymun yüzey kuru kütleleri kaydedilmiştir. Ardından numunelerin su içindeki askı kütleleri belirlenmiştir.

Su emme, görünür porozite ve kuru birim hacim ağırlık hesaplarında W_d suya doymun yüzey kuru kütleyi, W_k kuru kütleyi, W_s su içindeki askı kütlesini ve ρ_k kuru hacimsel yoğunluğu ifade etmek üzere sırasıyla $SE (\%) =$

$[(W_d - W_k) / W_k] \times 100$, $P (\%) = [(W_d - W_k) / (W_d - W_s)] \times 100$ ve $\rho_k = [W_k / (W_d - W_s)] \times \rho_{su}$ eşitlikleri kullanılmıştır. Kuru birim hacim ağırlık hesabında deney sıcaklığındaki su yoğunluğu yaklaşık $1,00 \text{ g/cm}^3$ kabul edilmiştir. Her deney için her seride üç numune kullanılmış ve sonuçlar aritmetik ortalama olarak verilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

LC³ tipi bağlayıcı matrisinde doğal kumun farklı oranlarda atık PP agrega ile hacimsel olarak ikame edilmesi, taze harçların yayılma davranışı üzerinde sınırlı fakat izlenebilir bir etki oluşturmuştur. Tablo 3'te görüldüğü üzere PP0 kontrol serisinde ortalama yayılma çapı 18,0 cm olarak ölçülmüştür. PP5 serisi 18,5 cm ile kontrolün hafif üzerinde kalmış; PP10 ve PP15 serilerinde yayılma çapı sırasıyla 17,5 cm ve 16,5 cm'ye düşmüştür. Buna göre düşük hacimsel PP ikamesi taze hal davranışında belirgin bir kayıp oluşturmamış, ancak ikame oranı %10 ve %15'e çıktığında yayılma çapında kademeli azalma görülmüştür. Bu değişim; hidrofobik yüzey, tane şekli, dar granülometri ve değişen paketlenme koşullarının birlikte etkisiyle açıklanabilecek olası bir davranıştır (Saikia ve de Brito, 2012; Gu ve Ozbakkaloglu, 2016; Alrshoudi vd., 2022). Bu nedenle sonuç, standart bir kabul aralığı verilmeden 'uygunluk' sınıflandırması şeklinde değil, ölçülen yayılma çaplarındaki eğilim olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 3: Harç serilerinin yayılma tablası deney sonuçları.

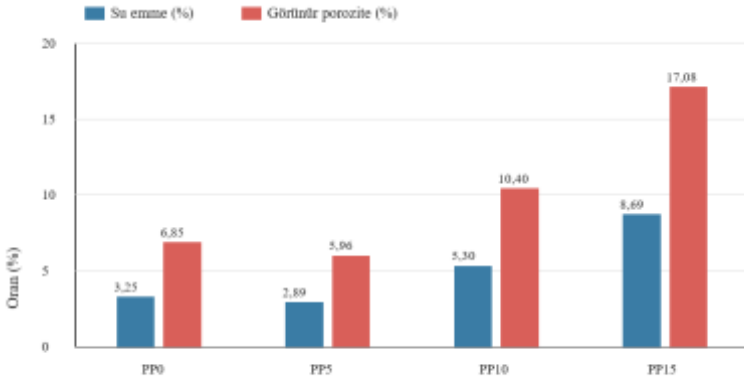
Karışım	Atık PP ikamesi (hacimce)	Ortalama yayılma çapı (cm)
PP0	%0	18,0
PP5	%5	18,5
PP10	%10	17,5
PP15	%15	16,5

Sertleşmiş harçların su emme ve görünür porozite sonuçları Şekil 2'de, kuru birim hacim ağırlık değerleri ise Tablo 4'te verilmiştir. PP0 kontrol serisinde su emme %3,25, görünür porozite %6,85 ve kuru birim hacim ağırlık $2,11 \text{ g/cm}^3$ olarak hesaplanmıştır. PP5 serisinde su emme %2,89'a, görünür porozite ise %5,96'ya düşmüş; kuru birim hacim ağırlık $2,06 \text{ g/cm}^3$ olmuştur. PP10 serisinde su emme %5,30, görünür porozite %10,40 ve kuru birim hacim ağırlık $1,96 \text{ g/cm}^3$ olarak hesaplanırken, PP15 serisinde bu değerler sırasıyla %8,69, %17,08 ve $1,97 \text{ g/cm}^3$ olmuştur. Bu sonuçlar, %5 hacimsel PP ikamesinin kontrol numunesine göre su emme ve görünür poroziteyi sınırlı ölçüde azalttığını; %10 ikamede bu değerlerin ara seviyeye yükseldiğini, %15 ikamede ise boşluk yapısındaki olumsuz etkinin belirginleştiğini göstermektedir. Bu eğilim, yüksek PP oranlarında yerleştirme ve sıkıştırma

koşullarının daha olumsuz hâle gelmesi ve plastik tanecik-çimento hamuru arayüzünün mineral agrega arayüzüne göre daha zayıf kalmasıyla ilişkilendirilebilir (Hannawi vd., 2010; Scrivener vd., 2004).

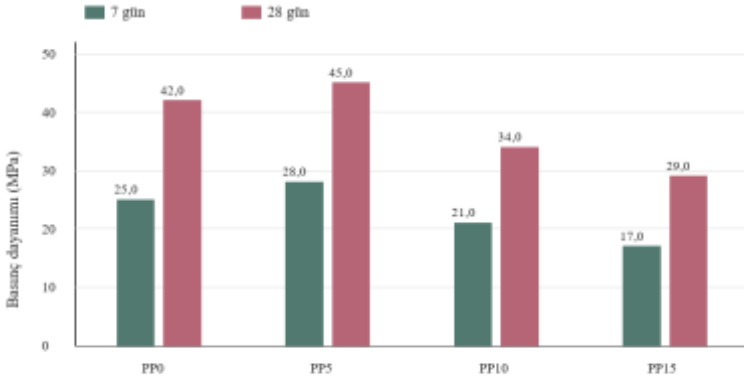
Tablo 4: Sertleşmiş harçların su emme, görünür porozite ve Kuru birim hacim ağırlık değerleri.

Karışım	Su emme (%)	Görünür porozite (%)	Kuru birim hacim ağırlık (g/cm ³)
PP0	3,25	6,85	2,11
PP5	2,89	5,96	2,06
PP10	5,30	10,40	1,96
PP15	8,69	17,08	1,97



Şekil 2: PP ikame oranına bağlı su emme ve görünür porozite değerleri.

Basınç dayanımı sonuçları Şekil 3'te sunulmuştur. PP0 kontrol serisinde 7 ve 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 25,0 MPa ve 42,0 MPa olarak elde edilmiştir. PP5 serisinde 7 günlük dayanım 28,0 MPa, 28 günlük dayanım ise 45,0 MPa olarak belirlenmiştir. Böylece PP5 serisi kontrol numunesine göre 7 günde yaklaşık %12,0, 28 günde yaklaşık %7,1 daha yüksek dayanım vermiştir. Buna karşılık PP10 serisinde 7 ve 28 günlük dayanımlar sırasıyla 21,0 MPa ve 34,0 MPa, PP15 serisinde ise 17,0 MPa ve 29,0 MPa olarak ölçülmüştür. Kontrole göre 28 günlük dayanım PP10'da yaklaşık %19,0, PP15'te ise yaklaşık %31,0 daha düşüktür. PP5'e kıyasla PP15 serisindeki 28 günlük dayanım kaybı yaklaşık %35,6'dır. Bu eğilim, daha yüksek PP oranlarında plastik agreganın düşük rijitliği, agrega-matris arayüzünün zayıflaması ve artan boşlukluluğun etkili olabileceğini düşündürmektedir (Thornycroft vd., 2018; Babafemi vd., 2018; Alrshoudi vd., 2022).



Şekil 3: PP ikame oranına bağlı 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri.

Dayanım gelişimi 7 günden 28 güne geçişte PP0, PP5, PP10 ve PP15 serileri için sırasıyla yaklaşık %68,0, %60,7, %61,9 ve %70,6 olarak hesaplanmıştır. En yüksek göreceli dayanım artışı PP15 serisinde görülmesine rağmen, bu serinin mutlak 28 günlük basınç dayanımı diğer serilerin altında kalmıştır. Bu nedenle yaşa bağlı yüzde artışlar mutlak basınç dayanımı değerleriyle birlikte değerlendirilmelidir. LC³ matrisinde kalsine kilin puzolanik reaksiyonu ve kireçtaşının alüminat fazlarıyla etkileşimi ileri yaşlarda ek hidrasyon ürünlerinin oluşmasına katkı sağlayabilir. Bununla birlikte yüksek PP ikame oranlarında artan görünür porozite ve olası agrega-matris arayüz zayıflığı, bağlayıcı sistemin dayanım gelişimine sağladığı katkıyı sınırlandırmış olabilir (Antoni vd., 2012; Dhandapani vd., 2018).

SONUÇ

LC³ tipi bağlayıcı sistemi kullanılarak üretilen harçlarda doğal kumun atık PP agrega ile hacimsel olarak ikame edilmesi, taze hal davranışı, görünür porozite, su emme, kuru birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı gibi ölçülen özelliklerde değişimlere yol açmıştır. Yayılma çapı PP0 kontrolünde 18,0 cm iken PP5'te 18,5 cm, PP10'da 17,5 cm ve PP15'te 16,5 cm olarak ölçülmüştür. Su emme ve görünür porozite açısından PP5 serisi kontrol numunesine göre daha düşük değerler göstermiş; PP10'da su emme %5,30 ve görünür porozite %10,40 düzeyine, PP15'te ise sırasıyla %8,69 ve %17,08 düzeyine yükselmiştir. Kuru birim hacim ağırlık PP0'da 2,11 g/cm³ iken PP5'te 2,06 g/cm³, PP10'da 1,96 g/cm³ ve PP15'te 1,97 g/cm³ olarak hesaplanmıştır.

Basınç dayanımı sonuçları kontrol numunesiyle birlikte değerlendirildiğinde, PP5 serisinin 7 ve 28 günlük dayanımları PP0 kontrolünün üzerinde kalmış; PP10 ve PP15 serilerinin ortalama basınç dayanımları ise kontrol serisine göre daha düşük bulunmuştur. 28 günlük dayanım PP0'da 42,0 MPa, PP5'te 45,0 MPa, PP10'da 34,0 MPa ve PP15'te 29,0 MPa olarak belirlenmiştir. Buna göre %5 hacimsel PP ikamesi hem taze hal hem fiziksel özellikler hem

de basınç dayanımı bakımından kontrol numunesine göre dengeli bir performans göstermiş; ikame oranı %10 ve üzerine çıktığında ise görünür porozite artışı ve dayanım kaybı belirginleşmiştir. Atık PP agreganın LC³ esaslı harçlarda kullanımı doğal kum tüketimini azaltma ve plastik atıkları değerlendirme açısından potansiyel taşımaktadır. Bu deney kapsamındaki aritmetik ortalamalar dikkate alındığında, %5 hacimsel ikame mekanik ve fiziksel performans açısından en dengeli sonuçları vermiştir.

TEŞEKKÜR

Numune üretimi ve deneysel çalışmaların yürütülmesindeki katkıları için Melis Aykaç, Pınar Kamışoğlu ve İremnur Yazıcı'ya teşekkür ederiz.

REFERANSLAR

- Al-Noaimat, Y. A., Sambucci, M., Chougan, M., El-Seidy, E., Biblioteca, I., Valente, M., Tirillò, J., Al-Kheetan, M. J., & Ghaffar, S. H. (2025). Sustainable repurposing of polyvinyl chloride waste as aggregates in limestone-calcined clay cement. *Journal of Cleaner Production*, 491, 144862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144862>
- Alrshoudi, F., Samad, U. A., & Alothman, O. Y. (2022). Evaluation of the effect of recycled polypropylene as fine aggregate replacement on the strength performance and chloride penetration of mortars. *Polymers*, 14(14), 2806. <https://doi.org/10.3390/polym14142806>
- Alujas, A., Fernandez, R., Quintana, R., Scrivener, K. L., & Martirena, F. (2015). Pozzolan reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. *Applied Clay Science*, 108, 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.028>
- Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F., & Scrivener, K. L. (2012). Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement and Concrete Research*, 42(12), 1579-1589. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>
- ASTM International. (2026). ASTM C109/C109M-26, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 50 mm [2 in.] Cube Specimens). ASTM International. <https://www.astm.org/Standards/C109.htm>
- Avet, F., & Scrivener, K. (2018). Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 107, 124-135. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.016>
- Babafemi, A. J., Norval, C., Kolawole, J. T., Chandra Paul, S., & Ibrahim, K. A. (2024). 3D-printed limestone calcined clay cement concrete incorporating recycled plastic waste (RESIN8). *Results in Engineering*, 22, 102112. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102112>
- Babafemi, A. J., Savija, B., Paul, S. C., & Anggraini, V. (2018). Engineering properties of concrete with waste recycled plastic: A review. *Sustainability*, 10(11), 3875. <https://doi.org/10.3390/su10113875>
- Cancio Díaz, Y., Sánchez Berriel, S., Heierli, U., Favier, A. R., Sánchez Machado, I. R., Scrivener, K. L., Martirena Hernández, J. F., & Habert, G. (2017). Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies. *Development Engineering*, 2, 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2017.06.001>

- da Silva, A. M., de Brito, J., & Veiga, R. (2014). Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars. *Construction and Building Materials*, 71, 226-236. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.026>
- Dhandapani, Y., Sakthivel, T., Santhanam, M., Gettu, R., & Pillai, R. G. (2018). Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 107, 136-151. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.005>
- Gu, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*, 51, 19-42. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005>
- Hannawi, K., Kamali-Bernard, S., & Prince, W. (2010). Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste Management*, 30(11), 2312-2320. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.028>
- Marzouk, O. Y., Dheilly, R. M., & Queneudec, M. (2007). Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Management*, 27(2), 310-318. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.012>
- Mhene, T. M., & Babafemi, A. J. (2025). Quasi-static strength and long-term characterisation of LC3 concrete: Effect of recycled fine aggregate and polypropylene fibre. *Construction and Building Materials*, 492, 143071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143071>
- Saikia, N., & de Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, 34, 385-401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>
- Scrivener, K. L., Crumbie, A. K., & Laugesen, P. (2004). The Interfacial Transition Zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface Science*, 12(4), 411-421. <https://doi.org/10.1023/B:INTS.0000042339.92990.4c>
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2-26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Sharma, R., & Bansal, P. P. (2016). Use of different forms of waste plastic in concrete - A review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 473-482. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.042>
- Thorneycroft, J., Orr, J., Savoikar, P., & Ball, R. J. (2018). Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. *Construction and Building Materials*, 161, 63-69. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127>
- Türk Standardları Enstitüsü. (2007). TS EN 1015-3/A2, Kâgir harcı - Deney metotları - Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile). Türk Standardları Enstitüsü.

Türk Enerji Birliği Perspektifinde Türk Devletleri Arasında HVDC Elektrik Enterkonneksiyonu: Teknik ve Stratejik Bir Değerlendirme

Turan AKIL^{1*}

¹Yazılım Geliştirme Bölümü / Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Karaman, Türkiye (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3475-6389>) *(turancakil23@gmail.com)

ÖZET

Küresel enerji dönüşümü, yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının artması ve ülkelerin enerji arz güvenliğini güçlendirme gereksinimi, ulusal elektrik sistemleri arasındaki sınır ötesi bağlantıların stratejik önemini artırmaktadır. Türk Devletleri Teşkilatı (TDT) coğrafyası; Kazakistan, Özbekistan, Türkmenistan ve Azerbaycan'ın enerji kaynakları ile Türkiye ve Avrupa enerji piyasaları arasında önemli bir enerji koridoru oluşturabilecek coğrafi ve ekonomik özelliklere sahiptir. Türk Enerji Birliği Raporu 2025'te TDT ülkeleri arasında enerji kaynaklarının ortak değerlendirilmesi, iletim altyapılarının modernizasyonu ve iletim seviyesinde Ultra Yüksek Gerilim Doğru Akım (UHVDC) tabanlı bir enterkonnekte şebekenin oluşturulması önerilmektedir. Bu çalışmada söz konusu yaklaşım, güncel Yüksek Gerilim Doğru Akım (HVDC) teknolojileri açısından teknik olarak incelenmiştir. Hat komütasyonlu dönüştürücü (LCC-HVDC), gerilim kaynaklı dönüştürücü (VSC-HVDC), modüler çok seviyeli dönüştürücü (MMC-HVDC) ve çok terminalli HVDC (MTDC) yapılarının Türk Devletleri arasındaki muhtemel elektrik entegrasyonunda kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Çalışmada Orta Asya-Hazar-Azerbaycan-Nahçıvan-Türkiye-Avrupa doğrultusunda kademeli bir Türk Enerji HVDC Koridoru önerilmektedir. Önerilen yapının enerji transferinin yanında yenilenebilir enerji entegrasyonu, asenkron elektrik sistemlerinin bağlanması, güç akışlarının kontrolü, sistem kararlılığı ve bölgesel elektrik ticaretine katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler – Türk Enerji Birliği, Türk Devletleri Teşkilatı, HVDC, enerji enterkonneksiyonu, enerji arz güvenliği.

I. GİRİŞ

Bu Enerji sistemleri, ekonomik kalkınmanın yanı sıra ülkelerin stratejik bağımsızlığı ve ulusal güvenliği üzerinde doğrudan etkili olan temel altyapılardan biridir. Elektrik enerjisinin üretim yapısının giderek daha fazla yenilenebilir enerji kaynaklarına dayanması ise elektrik şebekelerinin klasik ulusal sınırların ötesinde değerlendirilmesini gerekli hale getirmektedir. Güneş ve rüzgâr üretiminin değişken karakteri, farklı coğrafyalardaki üretim ve tüketim profillerinin birbirini tamamlaması ve elektrik ticaretinin gelişmesi, güçlü bölgesel enterkonneksiyonların oluşturulmasını enerji dönüşümünün temel bileşenlerinden biri haline getirmiştir. Türk Enerji Birliği Raporu 2025; Türkiye, Azerbaycan, Kazakistan, Kırgızistan, Özbekistan, Türkmenistan, Macaristan ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'nin enerji kaynaklarını, üretim ve tüketim yapılarını, elektrik iletim-dağıtım altyapılarını ve enerji piyasalarını karşılaştırmalı olarak ele almaktadır [1]. Raporun temel amaçlarından biri, TDT ülkeleri arasında

kamu ve özel sektör enerji iş birliklerini artırmak ve Türk Dünyası'nda faaliyet gösterecek mühendislik ve enerji firmalarına sistematik bir altyapı oluşturmaktır. Raporda Orta Asya'daki önemli enerji kaynaklarının Türkiye'nin artan elektrik talebinin desteklenmesinde kullanılabileceğine dikkat çekilmekte; bunun yanında bazı ülkelerde yaşanan elektrik altyapısının modernizasyonunun Türk mühendislik ve enerji şirketleri açısından yeni bir iş birliği alanı oluşturabileceği değerlendirilmektedir [1]. Bu yaklaşımın en ileri teknik önerilerinden biri, TDT ülkeleri arasında iletim seviyesinde UHVDC tabanlı bir enterkonnekte sistem kurulmasıdır [1]. Böyle bir sistemin temel hedefi Orta Asya'daki elektrik üretim potansiyelini Türkiye'ye, devamında ise Avrupa elektrik sistemine ulaştırabilecek yüksek kapasiteli bir elektrik koridorunun meydana getirilmesidir.

Bu öneri güncel gelişmeler açısından daha da anlamlı hale gelmiştir. Türkiye'nin 2035 yılına yönelik enerji dönüşümü planlarında, büyük ölçekli yenilenebilir üretimin şebekeye entegrasyonu ve doğu-batı yönündeki güç transferlerinin güçlendirilmesi amacıyla HVDC tabanlı iletim yatırımlarına yer verilmektedir [2]. Bunun yanı sıra Azerbaycan, Kazakistan ve Özbekistan arasında yenilenebilir elektriğin geliştirilmesi ve iletimini kapsayan stratejik ortaklık girişimleri Hazar geçişli elektrik koridorunun teknik fizibilitesini gündeme taşımıştır [11], [12]. Bu çalışmanın amacı, Türk Enerji Birliği Raporu'nda ortaya konulan UHVDC şebeke yaklaşımını güncel HVDC teknolojileri ışığında geliştirmek ve Türk Devletleri arasında uygulanabilecek kademeli bir HVDC elektrik koridoru mimarisi önermektir.

II. TÜRK DEVLETLERİ ARASINDA ELEKTRİK ENTEGRASYONUNUN TEKNİK TEMELİ

Türk Devletleri coğrafyası enerji kaynakları bakımından homojen bir yapıya sahip değildir. Azerbaycan, Kazakistan ve Türkmenistan hidrokarbon kaynakları bakımından güçlü konumdayken, Kazakistan ve Özbekistan'da büyük ölçekli güneş ve rüzgâr yatırımları giderek hızlanmaktadır. Kırgızistan'ın hidroelektrik potansiyeli yüksekken Türkiye hem hızla büyüyen yenilenebilir enerji üretim kapasitesine hem de ENTSO-E sistemiyle bağlantılı gelişmiş bir elektrik piyasasına sahiptir. Macaristan ise Avrupa elektrik sisteminin içerisinde bulunması nedeniyle Türk Dünyası'ndan Avrupa'ya uzanan bir elektrik ticaret zincirinin potansiyel uç noktalarından birini oluşturmaktadır [1]. Orta Asya elektrik sistemi hâlihazırda tamamen izole bir yapı değildir. Özbekistan'ın enerji sistemi Kazakistan ve Kırgızistan başta olmak üzere Orta Asya Birleşik Enerji Sistemi ile bağlantılı çalışmakta ve 220-500 kV seviyelerinde bölgesel bağlantılar bulunmaktadır [1]. Türkmenistan'da ise 110, 220 ve 500 kV yüksek gerilim iletim altyapıları kullanılmakta ve Özbekistan ile diğer komşu ülkelere sınır ötesi elektrik bağlantıları bulunmaktadır [1]. Bununla birlikte Türkiye'nin ENTSO-E ile senkron paralel çalışan elektrik sistemi ile

Orta Asya sistemlerinin doğrudan AC olarak bütünleştirilmesi önemli teknik ve işletme kısıtları ortaya çıkarabilir. Frekans kontrol standartları, kısa devre seviyeleri, rezerv politikaları, koruma sistemleri ve şebeke kodlarının farklı olması, geniş alanlı senkron AC bağlantısının uygulanmasını zorlaştırmaktadır. HVDC burada önemli bir avantaj ortaya çıkarmaktadır. Doğru akım bağlantısında iki AC sistemin aynı frekansta veya aynı faz açısında çalışması zorunlu değildir. Dolayısıyla HVDC sistemleri, birbirinden bağımsız senkron alanlar arasında kontrollü ve asenkron elektrik alışverişine olanak sağlamaktadır. Türkiye'nin İran bağlantısında kullanılan Back-to-Back yaklaşımının temel teknik mantığı da bu özelliğe dayanmaktadır. Türk Enerji Birliği Raporu, ENTSO-E dışındaki sistemlerle elektrik alışverişinde Back-to-Back ve DC bağlantı yöntemlerinin kullanılabilirliğini belirtmektedir [1].

Bu nedenle Türk Enerji Birliği açısından hedef yalnızca yeni AC enerji iletim hatlarının kurulması değil, farklı senkron alanları birbirine bağlayabilecek AC/DC hibrit bir bölgesel enerji sistemi oluşturulması olmalıdır.

III. HVDC TEKNOLOJİSİNİN TÜRK ENERJİ BİRLİĞİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

A. HVDC'nin Temel Teknik Avantajı

HVDC sistemlerinin temel avantajı, yüksek miktarda elektrik enerjisinin uzun mesafelere kontrollü biçimde taşınabilmesidir. Bir DC iletim hattında aktarılan güç gerilim ve akımın çarpımıyla ifade edilir. Hat üzerinde oluşan iletim kaybı ise akımın karesi ile iletken direncinin çarpımına bağlıdır. Bu nedenle aktarılan güç sabit tutulduğunda DC gerilim seviyesinin yükseltilmesi akımı ve buna bağlı I^2R kayıplarını önemli ölçüde azaltır. UHVDC teknolojisinin binlerce kilometrelik ve GW seviyesindeki enerji koridorlarında öne çıkmasının temel nedenlerinden biri budur.

$$P_{DC} = V_{DC} \cdot I_{DC} \quad (1)$$

$$P_{kayıp} = I_{DC}^2 \cdot R \quad (2)$$

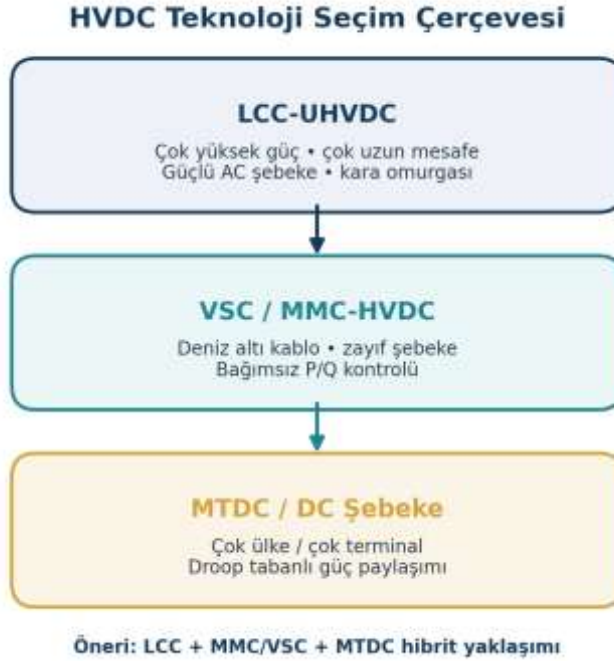
$$I_{DC} = P_{DC} / V_{DC} \quad (3)$$

$$P_{kayıp} = (P_{DC} / V_{DC})^2 \cdot R \quad (4)$$

Denklem (1,2,3 ve 4)'te DC şebekelerdeki güç ifadeleri verilmiştir. HVDC ayrıca AC iletim hatlarında özellikle uzun kablolarda ortaya çıkan reaktif güç ve kapasitif şarj akımı problemlerinin büyük bölümünü ortadan kaldırmaktadır. Bu özellik, Hazar Denizi veya Karadeniz gibi deniz altı geçişlerinin bulunduğu enerji koridorları açısından son derece önemlidir. Güncel çalışmalar HVDC'nin uzun mesafeli yüksek güç transferi, deniz altı iletim, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve farklı senkron alanların bağlantısı açısından giderek daha önemli hale geldiğini göstermektedir [3], [4].

B. LCC-HVDC ve UHVDC

Klasik LCC-HVDC sistemleri yüksek güç ve uzun mesafe uygulamalarında olgunlaşmış bir teknoloji durumundadır. Özellikle güçlü AC şebekeler arasında birkaç GW büyüklüğünde enerji aktarılması söz konusu olduğunda LCC-HVDC, yüksek güç taşıma kapasitesi ve nispeten düşük iletim kayıpları nedeniyle avantaj sağlamaktadır. UHVDC uygulamalarında DC gerilimin ± 800 kV ve daha yüksek seviyelere çıkarılması, çok uzun mesafelerde büyük güçlerin taşınmasını mümkün hale getirmektedir. Bu nedenle Kazakistan ve Özbekistan gibi geniş coğrafyalardaki yüksek kapasiteli üretim bölgelerinden Hazar kıyısına kadar uzanan kara tabanlı ana iletim omurgalarında LCC-UHVDC seçenekleri teknik ve ekonomik fizibilite çalışmalarında mutlaka değerlendirilmelidir. Şekil 1' de HVDC şebeke için seçilecek çerçeve yapı gösterilmiştir.



Şekil 1. Türk Enerji Birliği için önerilen HVDC teknoloji seçim çerçevesi

C. VSC-HVDC ve MMC Teknolojisi

VSC-HVDC'nin temel üstünlüğü aktif ve reaktif gücün birbirinden bağımsız şekilde kontrol edilebilmesidir. Bunun yanı sıra zayıf veya pasif şebekelerin beslenebilmesi, güç akışının hızlı biçimde tersine çevrilebilmesi ve AC sistemine gerilim desteği sağlanabilmesi mümkündür. Güncel VSC-HVDC kontrol literatürü bu sistemlerin yenilenebilir enerji entegrasyonu ve farklı şebeke şartlarında hızlı güç kontrolü bakımından önemli üstünlükler

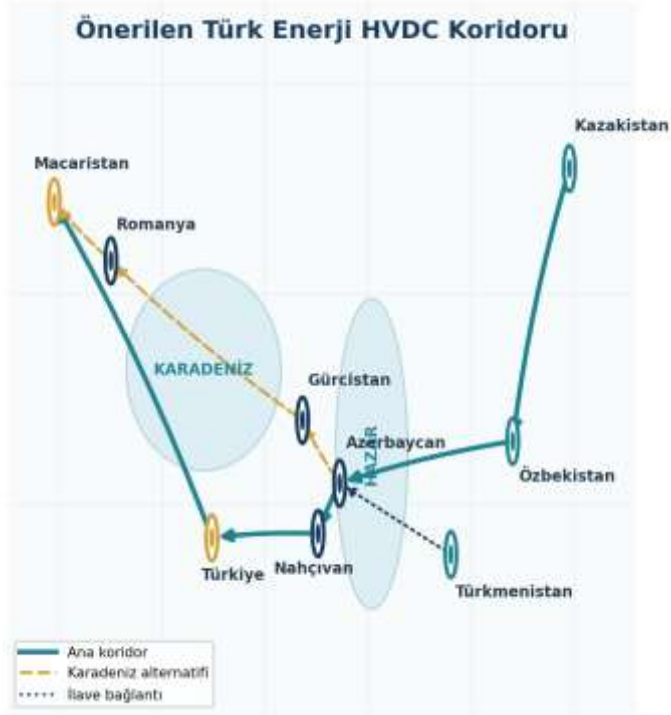
sunduğunu göstermektedir [5]. VSC teknolojisinin günümüzdeki en önemli uygulamalarından biri Modüler Multilevel Converter (MMC) yapısıdır. MMC; düşük harmonik içeriği, modüler yapısı, yüksek gerilim seviyelerine ölçeklenebilirliği ve AC tarafında daha yüksek kontrol kabiliyeti nedeniyle yeni nesil HVDC projelerinin temel dönüştürücü teknolojilerinden biri haline gelmiştir [4], [6]. Özellikle Hazar Denizi'ndeki deniz altı elektrik kablosu ile Nahçıvan-Türkiye veya Karadeniz geçişi gibi bağlantılarda MMC tabanlı VSC-HVDC, teknik açıdan önemli bir seçenek olarak değerlendirilmelidir.

D. Çok Terminalli HVDC

İki nokta arasındaki klasik HVDC bağlantısından farklı olarak Multi-Terminal HVDC (MTDC), aynı DC omurgasına birden fazla dönüştürücü istasyonunun bağlanmasına izin vermektedir. Böylelikle tek bir iletim hattı veya DC şebeke üzerinden farklı ülkeler arasında elektrik üretimi, tüketimi ve ticareti gerçekleştirilebilir. Türk Enerji Birliği açısından uzun vadede Kazakistan-Özbekistan-Azerbaycan-Türkiye-Avrupa ekseninde çok terminalli bir sistem düşünülebilir. MTDC sistemlerinde DC gerilim kontrolünün birden fazla istasyon arasında paylaştırılması için droop tabanlı kontrol yaklaşımları kullanılabilir. Böylelikle tek bir istasyonun tüm DC gerilim kontrolünü üstlenmesi yerine, farklı terminaller güç dengesindeki değişimlere ortak tepki verebilir. Güncel çalışmalar droop tabanlı kontrol yöntemlerinin genişletilebilirlik, DC gerilim kontrolü ve güç paylaşımı açısından önemli avantajlar sağladığını göstermektedir.

IV. ÖNERİLEN TÜRK ENERJİ HVDC KORİDORU

Bu çalışmada Türk Enerji Birliği için tek aşamada kurulacak devasa bir UHVDC şebeke yerine kademeli AC/DC hibrit mimari önerilmektedir. Bu yaklaşım, mevcut ulusal AC şebekelerin korunmasına, farklı senkron alanların HVDC üzerinden kontrollü biçimde bağlanmasına ve yatırımın aşamalı olarak ölçeklendirilmesine imkân verebilir.



Şekil 2. Orta Asya-Hazar-Azerbaycan-Türkiye-Avrupa ekseninde önerilen Türk Enerji HVDC Koridorunun kavramsal gösterimi

A. Orta Asya Üretim Merkezi

Koridorun doğu kesiminde Kazakistan ve Özbekistan'ın büyük güneş ve rüzgâr üretim bölgelerinin ortak enerji havuzu biçiminde değerlendirilmesi mümkündür. Bu üretimin klasik AC sistemlerle Hazar kıyısına kadar taşınmasının yanında, güç kapasitesi ve mesafe arttıkça UHVDC seçeneklerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Azerbaycan, Kazakistan ve Özbekistan arasında yeşil enerjinin geliştirilmesi ve iletimine yönelik stratejik ortaklık girişimleri, Hazar üzerinden elektrik iletim koridoru oluşturulmasını güncel bir bölgesel proje başlığı haline getirmiştir [11], [12]. Bu nedenle Türk Enerji Birliği Raporu'nda ortaya konulan Orta Asya-Avrupa enerji entegrasyonu yaklaşımı, yeni bölgesel enerji projeleriyle önemli ölçüde örtüşmektedir. Tablo 1' de kademeli yapı gösterilmiştir.

Tablo I. Önerilen Türk Enerji HVDC Koridorunun Kademeli Yapısı

Aşama	Bölge	Önerilen yapı	Temel amaç
I	Kazakistan-Özbekistan	AC güçlendirme + HVDC terminal hazırlığı	Yenilenebilir üretimin toplanması
II	Orta Asya-Hazar	LCC-UHVDC / VSC-HVDC karşılaştırması	Büyük güçlerin Hazar kıyısına taşınması
III	Hazar-Azerbaycan	Deniz altı VSC/MMC-HVDC	Asenkron sistem bağlantısı
IV	Azerbaycan-Nahçıvan-Türkiye	AC/HVDC hibrit enterkonneksiyon	Türkiye sistemine bağlantı
V	Türkiye içi	Ulusal HVDC omurgası	Doğu-batı büyük güç transferi
VI	Türkiye-Avrupa	MTDC / sınır ötesi bağlantı	Avrupa enerji piyasasına erişim

B. Hazar Denizi Geçişi

Hazar Denizi elektrik bağlantısı, önerilen Türk Enerji Koridorunun teknik açıdan en kritik bileşenlerinden biridir. Uzun deniz altı AC kablolarında oluşan kapasitif şarj akımları kullanılabilir aktif güç taşıma kapasitesini sınırlandırdığından, bu bölüm için HVDC teknolojisi güçlü bir adaydır. VSC/MMC-HVDC tercih edilmesi, yalnızca deniz altı kablunun teknik özelliklerinden değil, Orta Asya sistemi ile Azerbaycan sistemi arasındaki senkronizasyon gereksiniminin ortadan kaldırılmasından da kaynaklanmaktadır. Böyle bir bağlantı iki sistem arasında frekans bozucu etkilerin yayılmasını sınırlandırabilir, transfer edilen aktif gücün hassas biçimde belirlenmesini sağlayabilir, AC şebekeye gerilim desteği sunabilir ve gelecekte yeni terminallerin sisteme dahil edilmesini kolaylaştırabilir.

C. Hazar Denizi Geçişi

Koridorun ikinci kritik bölümü Azerbaycan'daki üretimin Nahçıvan üzerinden Türkiye'ye aktarılmasıdır. Türk Enerji Birliği Raporu'nda Nahçıvan üzerinden Türkiye-Azerbaycan enterkonneksiyonunun stratejik önemi vurgulanmıştır [1]. Bu bağlantının geliştirilmesi, Orta Asya-Hazar-Azerbaycan hattının Türkiye elektrik sistemine bağlanabileceği fiziksel koridoru güçlendirebilir. Bağlantı mimarisinde AC, Back-to-Back HVDC veya uzun vadede noktadan noktaya VSC-HVDC seçeneklerinin; kısa devre gücü, şebeke kodları, transfer kapasitesi ve gelecekteki genişleme senaryoları birlikte dikkate alınarak değerlendirilmesi gerekir.

D. Türkiye HVDC Omurgası

Önerilen sistemde Türkiye yalnızca enerji tüketicisi veya transit ülke olarak değerlendirilmemelidir. Türkiye'nin planlanan ulusal HVDC altyapısı, Türk Enerji Koridorunun Avrupa'ya bağlanmasında ana omurga işlevi görebilir.

Böylece doğudan gelen yüksek kapasiteli elektrik transferi, ülke içindeki üretim-tüketim merkezleri ve batıdaki ENTSO-E bağlantılarıyla koordineli biçimde yönetilebilir. Türkiye'nin HVDC teknik kapasitesini geliştirmeye yönelik çalışmaların ilerlemesi, uzun vadede Orta Asya'dan Avrupa'ya uzanan kontrollü bir DC koridorunun mühendislik temelini güçlendirebilir [2], [16].

V. KONTROL, KARARLILIK VE KORUMA PROBLEMLERİ

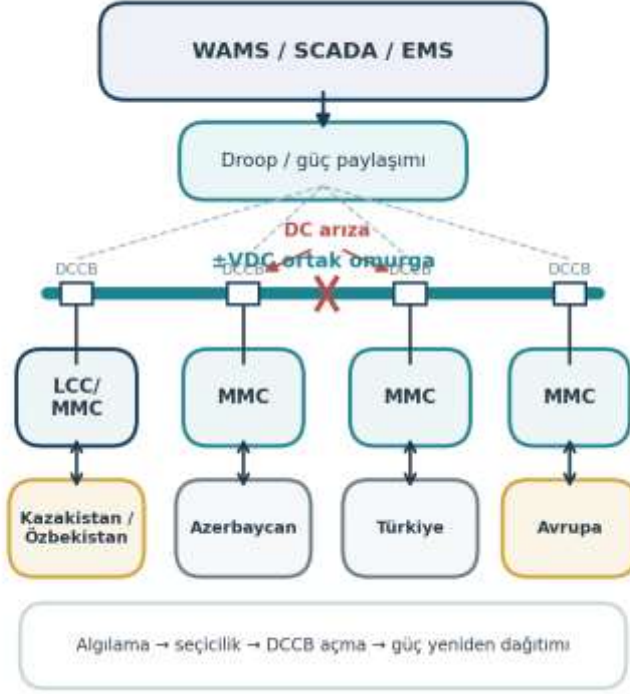
A. Güç Akışı ve Sistem Kararlılığı

VSC-HVDC sistemlerinin en önemli avantajlarından biri aktif ve reaktif gücün hızlı kontrol edilebilmesidir. Bu özellik, yenilenebilir kaynaklardaki üretim değişimlerinin komşu AC sistemlere olan etkisini sınırlandırmak açısından değerlidir. Düşük ataletli şebekelerde yeni nesil HVDC dönüştürücülerinden yalnızca güç transferi değil, frekans desteği ve şebeke oluşturma fonksiyonları da beklenmektedir. Grid-forming kontrol yaklaşımları, özellikle inverter tabanlı üretimin yüksek olduğu sistemlerde gerilim ve frekans kararlılığının desteklenmesi bakımından giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

B. DC Arızaları ve Koruma

HVDC şebekelerinin en kritik teknik problemlerinden biri DC tarafı kısa devre arızalarıdır. AC sistemlerin aksine DC akımında doğal sıfır geçişinin bulunmaması, arıza akımının kesilmesini zorlaştırmaktadır. VSC tabanlı MTDC sistemlerinde bazı koruma fonksiyonlarının arızayı birkaç milisaniye içerisinde tespit edip ayırması gerekebilir [8]. Bu nedenle Türk Enerji HVDC Koridorunda yüksek hızlı DC kesiciler, akım sınırlama reaktörleri, traveling-wave tabanlı koruma, diferansiyel koruma, haberleşme destekli pilot koruma ve gelişmiş sinyal işleme yöntemlerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Güncel literatürde özellikle çok terminalli DC şebekelerde fault-current-limiting ve hızlı DC kesici koordinasyonu önemli araştırma alanları arasındadır [8], [9]. Şekil 3'te kontrol ve koruma mimarisi gösterilmiştir.

MTDC Kontrol ve Koruma Mimarisi



Şekil 3. Çok terminalli HVDC şebekede geniş alan kontrolü ve DC arıza izolasyonu için kavramsal mimari

C. Siber Güvenlik ve Geniş Alan Kontrolü

TDT ülkelerini kapsayacak MTDC şebekesi büyük ölçüde haberleşme ve sayısal kontrol sistemlerine bağımlı olacaktır. Bu nedenle SCADA, WAMS, PMU, converter control ve HVDC koruma sistemlerinin ortak bir siber güvenlik standardı altında çalışması gerekir. Özellikle çok terminalli bir sistemde yanlış veri enjeksiyonu veya haberleşme kaybı yalnızca tek bir ülkenin şebekesini değil bölgesel güç transferlerini etkileyebilir. Bu nedenle fiziksel enerji enterkonneksiyonu ile ortak enerji haberleşme ve siber güvenlik altyapısının geliştirilmesi uzun vadeli hedefler arasında yer almalıdır.

VI. EKONOMİK VE STRATEJİK ETKİLER

Türk Enerji HVDC Koridorunun sağlayacağı faydalar yalnızca elektrik mühendisliği kapsamında değerlendirilmemelidir. Üretim kaynaklarının coğrafi olarak çeşitlendirilmesi Türkiye başta olmak üzere ithalata bağımlı ülkelerin enerji arz güvenliğini güçlendirebilir. Kazakistan ve Özbekistan'ın yüksek güneş ve rüzgâr potansiyelinin daha büyük pazarlara erişimi ise yenilenebilir enerji yatırımlarının ekonomik

yapılabilirliğini artırabilir. Farklı ülkelerdeki günlük ve mevsimsel yük profillerinin farklı olması ortak rezerv kullanımına olanak verebilir. Bir ülkede oluşan üretim fazlasının diğer ülkedeki pik talebin karşılanması için kullanılması toplam sistem rezerv gereksinimini ve bazı durumlarda enerji maliyetlerini azaltabilir. Türkiye, bu yapı içerisinde yalnızca enerji ithal eden bir ülke yerine elektriğin üretildiği, dönüştürüldüğü, ticaretinin gerçekleştirildiği ve Avrupa'ya aktarıldığı bölgesel bir enerji merkezi rolü üstlenebilir. Avrupa'da sınır ötesi transfer kapasitesinin artırılması ve yeni enerji koridorlarının geliştirilmesi yönündeki planlama yaklaşımı, Türk Dünyası-Hazar-Türkiye ekseninin uzun vadeli önemini artırmaktadır [15]. Bu çerçevede Hazar sonrasında iki tamamlayıcı güzergâh düşünülebilir: Azerbaycan-Nahçıvan-Türkiye-Avrupa koridoru ile Azerbaycan-Gürcistan-Karadeniz-Romanya-Macaristan koridoru. İki koridorun uzun vadede çok terminalli veya hibrit AC/DC mimari içerisinde koordineli işletilmesi, bölgesel elektrik ticaretinin esnekliğini ve arz güvenliğini artırabilir.

Orta Asya → Hazar → Azerbaycan → Nahçıvan → **Türkiye** → Avrupa
Orta Asya → Hazar → Azerbaycan → Gürcistan → Karadeniz →
Romanya → Macaristan

VII. TÜRK ENERJİ BİRLİĞİ İÇİN KADEMELİ UYGULAMA MODELİ

A. Aşama 1- Ulusal Şebekelerin Güçlendirilmesi ve Standartlaşma

TDT ülkelerinde iletim şebekesi, koruma sistemleri, şebeke kodları ve SCADA altyapısı ortak teknik kriterler açısından değerlendirilmelidir. İletim sistemi işletmecileri arasında sürekli çalışan bir teknik koordinasyon mekanizması oluşturulması, veri paylaşımı ve ortak planlama açısından ilk adım olmalıdır.

B. Aşama 2- Noktadan Noktaya HVDC Koridorları

İlk yatırımlar doğrudan tam MTDC sistem yerine ekonomik olarak uygulanabilir noktadan noktaya projeler şeklinde gerçekleştirilmelidir. Hazar geçişi, Nahçıvan-Türkiye bağlantısı ve Türkiye içerisindeki HVDC koridorları bu aşamanın temel yapı taşlarını oluşturabilir.

C. Aşama 3- Çok Terminalli Türk Enerji DC Şebekesi

İlk HVDC bağlantıları devreye alındıktan sonra dönüştürücü istasyonları çok terminalli çalışmaya uygun biçimde genişletilebilir. Kazakistan, Özbekistan, Azerbaycan ve Türkiye terminalleri ortak bir DC omurgası veya kademeli olarak oluşturulan alan DC şebeke üzerinden bağlanabilir. Uzun vadede Türkmenistan ve KKTC'nin de uygun bağlantı modelleriyle sisteme dahil edilmesi değerlendirilebilir. Türk Enerji Birliği Raporu'nda KKTC'nin Türkiye ile deniz altı elektrik bağlantılarının geliştirilmesi önerilmektedir [1]. Bu yaklaşım, ilk yatırım maliyetini kontrol altında tutarken gelecekteki sistem genişlemesine imkân verebilir.

VIII. SONUÇLAR

Türk Devletleri arasındaki enerji iş birliğinin yalnızca petrol ve doğal gaz ticareti çerçevesinde değerlendirilmesi, küresel enerji sistemindeki dönüşüm göz önüne alındığında yeterli değildir. Elektrik enerjisi, önümüzdeki dönemde Türk Dünyası arasındaki enerji entegrasyonunun temel bileşenlerinden biri olmaya adaydır. Türk Enerji Birliği Raporu 2025'te önerilen UHVDC enterkonnekte şebeke yaklaşımı, bu açıdan stratejik öneme sahip bir vizyon ortaya koymaktadır. Raporda Orta Asya'daki enerji kaynaklarının elektrik enerjisine dönüştürülerek Türkiye ve Macaristan'a, buradan da Avrupa'ya aktarılması öngörülmektedir [1]. Bu çalışmada gerçekleştirilen teknik değerlendirme, söz konusu hedefin tek tip bir UHVDC teknolojisinden ziyade LCC-UHVDC, VSC-HVDC, MMC ve MTDC teknolojilerinin birlikte kullanıldığı kademeli bir AC/DC hibrit mimari üzerinden geliştirilmesinin daha uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Çok yüksek kapasiteli kara bağlantılarında LCC-UHVDC; asenkron şebeke bağlantıları, deniz altı kabloları ve gelecekteki çok terminalli yapı için ise MMC tabanlı VSC-HVDC teknolojileri ön plana çıkmaktadır. Bölgesel yeşil enerji koridoru girişimleri, Hazar geçişli elektrik iletimine yönelik fizibilite çalışmaları, Azerbaycan-Nahçıvan-Türkiye bağlantısına ilişkin teknik çalışmalar ve Türkiye'nin HVDC altyapısını geliştirme hedefleri birlikte değerlendirildiğinde, Orta Asya'dan başlayarak Hazar Denizi, Azerbaycan, Nahçıvan ve Türkiye üzerinden Avrupa'ya uzanabilecek yeni bir elektrik enerji koridorunun teknik zemini giderek güçlenmektedir. Bu nedenle uzun vadede hedef, yalnızca ülkeler arasında birkaç enterkonneksiyon hattının kurulması değil; ortak teknik standartlara, koordineli sistem işletmesine, gelişmiş koruma ve siber güvenlik altyapısına ve kademeli olarak çok terminalli HVDC mimarisine sahip bir Türk Enerji Elektrik Ağı'nın oluşturulması olmalıdır. Böyle bir yapı enerji arz güvenliğinin güçlendirilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanılması ve Türk Dünyası'nın Avrupa-Asya enerji sistemindeki stratejik rolünün artırılması açısından önemli bir adım olacaktır.

TEŞEKKÜR

Türk Enerji Birliği Proje Grubunun kıymetli üyelerine ve 27. EMO Ankara Şubesi Yönetim Kurulu'na çok teşekkür ediyorum.

KAYNAKLAR

- [1] Elektrik Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, Türk Enerji Birliği Raporu 2025, Türk Enerji Birliği Proje Grubu, Ankara, Mart 2025.
- [2] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Renewable Energy 2035 Roadmap - Green Transmission Infrastructure, Ankara, 2024.
- [3] ENTSO-E, Research, Development and Innovation Roadmap 2024-2034, Brussels, 2024.

- [4] I. El Myasse, A. El Magri, K. El Mezdi, S. Ashfaq, M. A. Rhondali and P. Kumar, "A comprehensive review of HVDC transmission systems: From fundamental concepts to emerging technologies," *Energy Reports*, 2026.
- [5] J. R. Camarillo-Peñaranda, A. C. Cunha, B. W. França, F. de Abreu Oliveira and L. de Oliveira Senna, "A review on VSC-HVDC control schemes," *Annual Reviews in Control*, vol. 59, 2025.
- [6] Z. He, J. Yang, G. Tang, Y. Yang, Z. Du and S. Zhang, "Key technologies and development trends of VSC-HVDC transmission for offshore wind power," *Renewable Energy System and Equipment*, vol. 1, no. 1, pp. 35-49, 2025.
- [7] A. Raza, Y. Chen, M. Li, Y. A. Bhutto, A. Ali and A. Ali, "DC voltage and active power regulations in multi terminal high voltage direct current transmission system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 209, 2025.
- [8] J. S. Farkhani, Ö. Çelik, K. Ma, C. L. Bak and Z. Chen, "A comprehensive review of potential protection methods for VSC multi-terminal HVDC systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 192, 2024.
- [9] J. He, L. Xue, B. Li, Y. Li, E. Prieto-Araujo and O. Gomis-Bellmunt, "Protection and fault ride-through techniques of VSC-HVDC systems for offshore wind power transmission—Research status, challenges, and prospects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 210, 2025.
- [10] K. Kim et al., "Coordinate control of multi-infeed VSC-HVDC for enhancing power system reliability," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 166, 2025.
- [11] Asian Development Bank, Central Asia Regional Economic Cooperation Program: Caspian Sea Green Energy Corridor Project, project documentation, 2024-2026.
- [12] Ministry of Energy of the Republic of Azerbaijan, Central Asia-Azerbaijan Green Energy Corridor Stage-I Feasibility Study, Baku, 2026.
- [13] Ministry of Energy of the Republic of Azerbaijan, Azerbaijan (Nakhchivan)-Türkiye Energy Interconnector and Green Energy Corridor Developments, 2026.
- [14] Organization of Turkic States, Garabagh Declaration of the Informal Summit of the Heads of State of the Organization of Turkic States, Shusha, 2024.
- [15] ENTSO-E, Ten-Year Network Development Plan 2024, Brussels, 2024.
- [16] Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), Consultancy Services for Preparation of HVDC and Owner's Engineer Technical Specifications - DB.HVDC.P1, Ankara, 2026.

