

MÜHENDİSLİKTE GÜNCEL EĞİLİMLER VE İLERİ ÇALIŞMALAR



All Sciences Academy

*MÜHENDİSLİKTE
GÜNCEL
EĞİLİMLER VE
İLERİ
ÇALIŞMALAR*

Editör
Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA





Mühendislikte Güncel Eğilimler ve İleri Çalışmalar
Editör: Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA

Dizayn: All Sciences Academy Design

Basım Tarihi: Temmuz 2026

Yayıncı Sertifika Numarası: 72273

ISBN: 978-625-8839-12-8

© All Sciences Academy

www.allsciencesacademy.com

allsciencesacademy@gmail.com

İÇERİK

1. Bölüm	6
Termoset Plastiklerin Geri Dönüşümü	
<i>Berfin GÜRSU, İlyas KARTAL, Halil DEMİNER</i>	
2. Bölüm	21
Madencilikte Çarpışma Önleme Sistemleri Üzerine Bir İnceleme	
<i>Zekeriya DURAN, Bülent ERDEM</i>	
3. Bölüm	50
Polistiren ve Polistiren Nanokompozitlerinin Morfolojik, Yapısal ve Termal Özelliklerinin Değerlendirilmesi	
<i>Ceyda BİLGİÇ, Şafak BİLGİÇ</i>	
4. Bölüm	73
Cambay Rift Havzası'nın (Hindistan) Tektonik Yapısının Manyetik ve Sismolojik Verilerle Değerlendirilmesi	
<i>Sercan KAYIN, M. Nuri DOLMAZ</i>	
5. Bölüm	89
Süperkapasitörler ve Polimer Kompozitlerde Kullanılan İletken Polimerlere Genel Bakış	
<i>Özlem DİKTAŞ, İlyas KARTAL</i>	
6. Bölüm	107
İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemleri Kapsamında İş Kazalarının ve Meslek Hastalıklarının İncelenmesi ve Değerlendirilmesi	
<i>Türkey Ercan ŞENGÖZ, Fatma BOSTAN, İlyas KARTAL</i>	
7. Bölüm	128
Finansal Piyasalarda Stokastik Volatilite Modelleri	
<i>Mehmet Ali AKINLAR, Dilber SARIKAHYA</i>	

Termoset Plastiklerin Geri Dönüşümü

Berfin GÜRSU¹

İlyas KARTAL²

Halil DEMİRER³

- 1- Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği.
berfingers20@gmail.com ORCID No: 0009-0005-7894-8672
- 2- Doç. Dr.; Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği.
ilyaskartal@marmara.edu.tr ORCID No: 0000-0001-9677-477X
- 3- Prof. Dr.; Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği.
hdemirer@marmara.edu.tr ORCID No: 0000-0001-7870-5797

ÖZET

Termoset plastikler, çapraz bağlı kovalent ağ yapıları nedeniyle çözücülerde çözünmeyen, ısıtıldıklarında erimeyen ve kürlleme sonrasında yeniden şekillendirilemeyen polimerlerdir. Bu özellikler termosetlere yüksek mekanik dayanım, kimyasal direnç ve ısı kararlılık kazandırırken, kullanım ömrü sonunda geri dönüştürülmelerini zorlaştırmaktadır. Geleneksel termoset atıkları çoğunlukla depolama, yakma, mekanik öğütme, termal işlem veya piroliz gibi yöntemlerle değerlendirilmektedir. Ancak bu yöntemler yüksek enerji tüketimi, düşük ürün kalitesi, sınırlı ekonomik verimlilik ve malzeme kaybı gibi sorunlar içermektedir. Bu nedenle son yıllarda termosetlerin daha sürdürülebilir şekilde geri dönüştürülebilmesi için dinamik kovalent bağlara dayalı polimer ağları önem kazanmıştır. Dinamik kovalent bağlar, çapraz bağlı ağların kontrollü biçimde yeniden düzenlenmesini sağlayarak termosetlere onarılabilirlik, yeniden şekillendirilebilirlik ve tekrar işlenebilirlik kazandırır. Bu alanda özellikle vitrimerler dikkat çekmektedir. Vitrimerler, ısı etkisiyle bağ değişim reaksiyonları gösterebilen, viskoelastik davranış sergileyen ve buna rağmen çözünmez ağ yapısını koruyan yenilikçi termoset malzemelerdir. Epoksi reçine, poliüretan ve silikon reçine gibi farklı termoset sistemlerine dinamik bağların eklenmesiyle geri dönüştürülebilir ve çevre dostu malzemeler geliştirilebilir. Sonuç olarak, dinamik polimer ağları termoset plastik atıklarının azaltılması ve sürdürülebilir malzeme tasarımı açısından umut verici bir yaklaşım sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Termoset Plastikler, Geri Dönüşüm, Dinamik Kovalent Bağlar, Vitrimer, Epoksi Reçine, Çapraz Bağlı Ağlar.

GİRİŞ

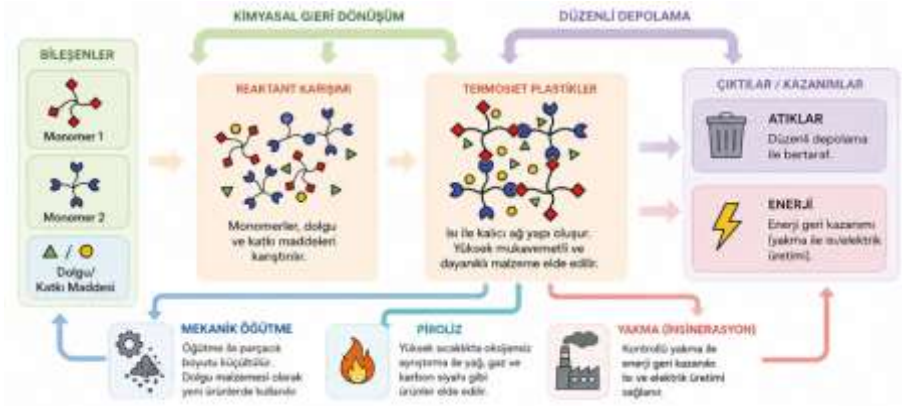
Termoset plastikler genellikle termoplastiklerin özelliklerinden tamamen farklı iki fiziksel özelliğe sahiptir. Bunlardan ilki, her türlü reaktif olmayan çözücüde yaygın olarak çözünmemesidir. Termoplastik polimerlerin çözünmesine göre, çözücü yapıya nüfuz ederek doğrusal zincirleri şişirir ve ardından bu zincirler arasındaki moleküller arası etkileşimleri bozarak tüm polimeri gevşetir ve çözer. Termoset polimer iyi bir çözücüye maruz kaldığında da benzer şişme fenomenleri meydana gelir. Ancak, termoplastik polimerin doğrusal yapısının aksine, termoset polimerdeki çapraz bağlanma noktaları, Van der Waals kuvveti, dipol-dipol veya hidrojen bağı gibi zayıf etkileşimlerden ziyade, güçlü bir kovalent bağlara dayanır. Bu nedenle, çözücü molekülleri, yüksek sıcaklıklarda bile çapraz bağlı ağları parçalamak yerine sadece şişirebilir. Termoset polimerin ikinci önemli özelliği, termal bozunmadan önce yüksek sıcaklıkta işleme sırasında erimeyen veya şekillendirilemeyen davranış sergilemesidir. Bununla birlikte, termoplastik polimerlerde, doğrusal omurgaları bir arada tutan bu kovalent olmayan

molekül içi veya moleküller arası kuvvetler ısıya karşı özellikle hassastır ve termal işlem altında polimer zincirlerinin gevşemesine ve serbest hareket etmesine neden olur. Çapraz bağlı ağ durumunda, kalıcı bağlantı noktalarının devreye girmesiyle polimer zincirlerinin kayması önemli ölçüde bastırılabilir. Sıcaklık, kovalent bağları koparacak kadar yüksek bir seviyeye ulaşmadıkça, termoset polimerler katı benzeri performanslarını korurlar, ancak polimer zincirleri termal olarak gevşediğinde yumuşarlar. Farklı sıcaklıklarda malzemenin sertlik değişimi, termoset plastiklerin fiziksel özelliklerini anlamak açısından önemlidir. Prensip olarak, çapraz bağlanma işlemi sırasındaki rastgele yönelim nedeniyle, bir termoset polimer ağı genellikle düşük bir sıcaklık aralığında yüksek modül değerine karşılık gelen sert camsı bir durumda kalan amorf bir yapıya sahiptir. Sıcaklık belirli bir aralıkta arttıkça, camsı durum, polimer ağındaki zincir gevşeme süreciyle birlikte elastik bir duruma dönüşür. Bu sıcaklık aralığı, camsı geçiş sıcaklığı (T_g) olarak tanımlanır ve ısıtma işlemi süresince sertlik ve modülde meydana gelen belirgen değişikliği açıklar.

Polimer ağlarındaki çapraz bağlanma noktalarının kalıcı bir biçimde oluştuğu gerçeği göz önüne alındığında, termoset plastikler, nihai şekilleri kimyasal olarak sabitlendiğinde yeniden işlenemez. Termoset polimerlerin kalıcı olarak sabitlenmiş özelliği, kütleme reaksiyonunun ve şekillendirme işleminin aynı anda tamamlanmasını gerektirir. Şekillendirme işlemi için kullanılan kalıp, aynı zamanda polimerizasyon için bir kimyasal reaktör görevi de görür. Kalıcı ağların çözünmez ve erimez özellikleri nedeniyle, kusurlu ürünler atılır ve sürdürülebilir bir şekilde yeniden işlenmesi olası değildir (Winn e 2019).

TERMOSET PLASTİKLERİN GERİ DÖNÜŞÜM STRATEJİLERİ

Fosil kaynaklı termosetlerin kullanım alanlarının genişlemesi ve sürekli tüketimi ile birlikte, termoset plastik atıklarının varlığı, son dönemlerde en yoğun şekilde endişe duyulan sorunlarından biri haline gelmektedir. Uzun zamandır, geleneksel termoset malzemeler, parçalanması ve geri dönüştürülmesi en zor malzeme türlerinden biri olarak sınıflandırılmaktadır. Çoğu termoset plastik atığının mevcut yönetimi, depolama (veya yakma/yanma) yöntemlerine dayanmaktadır. Bu zorluk karşısında, termoset malzemelerin tekrar tekrar kullanılması için uygulanabilir yöntemlerin geliştirilmesi son zamanlarda çalışılan konulardandır (Post 2020).



Şekil 1. Termoset plastiklerin geri dönüşüm stratejisinin özeti

Mekanik Geri Dönüşüm

Mekanik geri dönüşüm sürecinin başında, termoset plastiklerin boyutunu 100 mm'nin altına düşürmek için genellikle uygun kesme işlemi tercih edilir. Bu işlem, metal parçaların çıkarılmasını kolaylaştırır ve ayrıca atıkların taşınmasına yardımcı olur. İnce öğütme ile, termoset hurdanın boyutu daha da küçültülebilir (0,5–10 mm). Daha sonra santrifüj eleklerle sınıflandırılan bu ince parçacıklar, farklı kalitede fraksiyonlara ayrılabilir (Pickering 2006). Bu işleme yöntemlerinin uygulanması nispeten basit olmasına rağmen, yüksek enerji tüketimi ve geri dönüştürülmüş ürünün zayıf mekanik özellikleri, mekanik geri dönüşüm stratejisinin yaygın olarak uygulanmasını kısıtlamaktadır.

Termal Geri Dönüşüm

Termoset plastikler için geleneksel ısı işlemleri; yalnızca enerji geri kazanımı amaçlı yakma, enerji geri kazanımı ile birlikte karışık elyaf ve dolgu maddelerinin geri dönüşümü için yakma ve anaerobik yakma olmak üzere üç kategoriye ayrılabilir. İlk strateji, termoset atıkların yeniden değerlendirilmesi açısından en basit yöntem olsa da, bu süreçten hiçbir malzeme geri dönüştürülemediğinden geri dönüşüm stratejileri kapsamı dışında kalmaktadır. Bu durumda, matrisi enerji olarak yakmak ve malzeme geri kazanımı için karışık lifleri veya diğer yanmaz dolgu maddelerini toplamak amacıyla akışkan yataklı yanma yöntemi geliştirilmiştir. Yani, termoset atıklar akışkan yataklı reaktöre eklenmeden önce küçük parçalara ayrıştırılır. 450–550 °C'ye kadar ısıtıldıktan sonra, epoksi reçine gibi termoset matris çıkarılabilir ve geriye kalan ürünler esas olarak bu yanmaz dolgu maddelerinden oluşur. Ticari kullanılabilirlik 2010 yılında Pickering tarafından tahmin edilmiş ve işleme kapasitesinin yalnızca 10.000 ton/yılın üzerine çıktığında geri dönüşüm sürecinin ekonomik olabileceği öne sürülmüştür (Pickering 2000).

Anaerobik yanma, termoset ağı küçük moleküllere depolimerize edebilir ve daha az miktarda karbondioksit üretebilir. Oksijen yokluğunda, bu yöntem piroliz geri dönüşüm süreci olarak da tanımlanır. Piroliz sıcaklığı, çeşitli bozunma gereksinimlerine göre 300 ila 800 °C arasında değişebilir. Anaerobik atmosfer altında, karbon bazlı polimer yapısı şiddetli oksidasyondan etkili bir şekilde korunur ve böylece küçük molekülü ürünlerin oluşmasına yol açar. Hızlı gelişmeye rağmen, yüksek enerji tüketimi, karmaşık ürün bileşeni, istenmeyen ayrışma ve düşük ekonomik fizibilite dahil olmak üzere piroliz stratejisinin endüstriyel uygulamalarının önünde hala engeller bulunmaktadır.

Kimyasal Geri Dönüşüm

Yukarıda bahsedilen geleneksel geri dönüşüm stratejileri on yıllardır araştırılıyor olsa da, muazzam enerji tüketimi ve geri dönüştürülmüş ürünün toplanmasında verimlilik sınırlamaları gibi zorluklarla karşı karşıya oldukları için, termoreaktif polimer endüstrisinde pratik uygulamalardan hâlâ çok uzaktırlar. Bu nedenle, düşük enerji girdisiyle bozunabilir veya geri dönüştürülebilir yapılar tasarlamak için yeni yaklaşımlara acil ihtiyaç duyulmaktadır. Denge kontrolü altında tersinir bağlanma-kopma stratejisi olarak bilinen dinamik kovalent kimya, organik sentez, polimer birleştirme, malzeme geliştirme ve biyolojik uygulamalarda cazip bir yenilik olarak ortaya çıkmıştır (Zhang 2018).

Dinamik kovalent bağın kopması, sağlam bir şekilde çapraz bağlanmış ağı geçici olarak kimyasal olarak aktif parçalara ayırabilir (Chakma ve Konkolewicz 2019). Sıradan organik yapılardaki geri dönüşümsüz yıkımdan farklı olarak, bu aktif fragmanlar dinamik bağların kontrol edilebilir oluşumu yoluyla çarpıcı bir şekilde yeniden bağlanabilir. Geleneksel geri dönüşüm stratejisi orijinal reaktif maddenin yeniden üretilmesini neredeyse imkansız kıldığından, termoset mimarisine dinamik kovalent bağların dahil edilmesi, termoset atıklarından reaktif monomerlerin veya reaktif karışımların tam olarak geri dönüştürülmesine yaklaşmak için uygulanabilir bir yol gibi görünmektedir.

DİNAMİK POLİMER AĞLARI

Belirli bir polimer ağında, dinamik kovalent bağların varlığı, zincir segmentleri arasında değişim reaksiyonlarına yol açabilir. Bu tersinir değişim, polimer zincirlerinin difüzyonunu teşvik ederek, ısı ile sertleşen plastiğe esneklik ve yeniden işlenebilirlik kazandırır. Isı ile sertleşen plastiklerin geri dönüşümü için polimer ağlarına birçok dinamik kovalent bağ eklenmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, dinamik kovalent kimyanın yalnızca laboratuvar ölçeğinde değil, endüstriyel ölçekte yeniden işlenebilir termosetlerin geliştirilmesinde de önemli bir strateji haline geldiğini göstermektedir (Maes et al., 2025). Tersinir bağların çeşitliliği, polimer ağlarının içsel fiziksel

özelliklerini etkileyebilecek farklı mekanizma yolları sağlar. Bazı dinamik ağlardaki değişim mekanizmaları henüz net olarak anlaşılamamış olsa da, önceki literatürlerin özetlenmesi yoluyla, değiştirilebilir polimer ağlarındaki mekanizma yolları dört kategoriye ayrılabilir: ilave/çıkarma yolu, çıkarma/ilave yolu, uyumlu yol ve küçük molekül aracılı yol. Bu reaksiyon yollarının, tersinir bağlarla tam olarak aynı mekanizma değil, ağ yeniden düzenleme süreçlerinin mekanizmaları olduğu belirtilmelidir (Scheutz 2019).

GERİ DÖNÜŞTÜRÜLEBİLİR TERMOSET PLASTİKLER

Değiştirilebilir kovalent bağlar, dinamik polimer ağlarının geliştirilmesi için önemli fırsatlar sunmaktadır. Çapraz bağlı ağlara dinamik yapıların eklenmesi, termoset malzemelere onarılabilirlik, yeniden şekillendirilebilirlik, geri dönüştürülebilirlik ve uyarlanabilirlik gibi yeni özellikler kazandırabilir. Bu özellikler geleneksel termosetlerde nadiren bulunurken, dinamik kimya sayesinde elde edilebilir. Daha önce vurgulandığı gibi, polimer ağındaki bağ yeniden düzenlenmesi başlıca dört farklı mekanizma ile açıklanabilir. Her bir yol, ısıtma veya diğer çevresel uyarılar altında dinamik ağların farklı fiziksel özellikler kazanmasını sağlar.

Bir yandan, bu dört farklı dinamik ağın tümü ısıtıldığında akış gösterebilir ve bu durum viskoelastik davranışı açıklar. Aynı anda hem elastik hem viskoz davranış sergileyen bu ağlar, uzun süreli gerilme altında kalıcı şekil değişimine uğrayabilir. Zincir difüzyonunun varlığı nedeniyle viskoelastisite, geri dönüştürülebilir termosetlerin tasarımında kritik bir rol oynar.

Diğer yandan, yeniden düzenlenme mekanizmaları polimer ağlarının çözünürlüğünü önemli ölçüde etkiler. Ayrışmalı ve küçük molekül aracılı mekanizmalarda, bağlantının geçici azalması ağın küçük parçacıklara ayrılmasına neden olabilir. İyi bir çözücünün şişirme etkisi de Van der Waals veya hidrojen bağlarını zayıflatarak çözülmeye katkıda bulunabilir. Bu tür dinamik ağlar, ısıtıldığında eriyebilir veya çözücülerde çözünebilir ve bu yönüyle termoplastiklere benzer.

Buna karşılık, birleşmeli ve eşzamanlı mekanizmalarda çapraz bağ yoğunluğu azalmaz, hatta geçici olarak artabilir. Bu nedenle bu tür ağların çözünmesi zordur. Hem eriyebilir hem çözünmez özellik gösteren bu özel ağlar “vitrimler” olarak adlandırılır (Denissen, 2016).

Vitrimler, dinamik ağlara dayanan yeni bir termoset plastik malzeme sınıfıdır ve 2011 yılında Leibler ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilmiş ve adlandırılmıştır (Montarnal, 2011). Geleneksel çapraz bağlı ağlarla karşılaştırıldığında, vitrimler dinamik bağ değişim reaksiyonları yoluyla topolojik dalgalanmalar yaşayabilir ve bu durum termal şekillendirilebilirlik ile sonuçlanır. Vitrimlerin viskoelastik davranışı, Arrhenius yasasına göre dinamik bağların değişim hızı ile yüksek derecede ilişkilidir. Isıtma sıcaklığının artması, değişim reaksiyonunu önemli ölçüde hızlandırabilir ve

dinamik ağın gevşemesini hızlandırır. Zincir difüzyonu ve segment değişimi sayesinde vitrimler kolaylıkla onarılabilir, kaynak yapılabilir, sabitlenebilir ve yeniden şekillendirilebilir; bu da geri dönüşüm için temel oluşturur. Ayrıca kalıcı bağlantı (bağlanma sürekliliği), vitrimer ağının çözünmezliğini sağlar ve malzemenin inert çözücüler tarafından bozulmasını engeller. Bu nedenle, vitrim malzemelerin çözelti döküm yöntemiyle yeniden işlenmesi oldukça zordur.

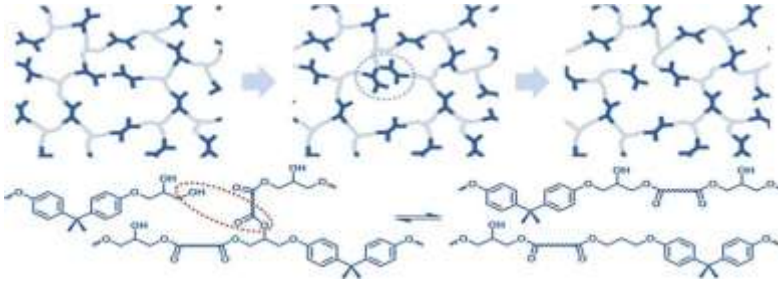
Genel olarak, vitrimlerin viskoelastik davranışını tanımlamak için iki geçiş sıcaklığı kullanılır: cam geçiş sıcaklığı (T_g) ve topoloji donma geçiş sıcaklığı (T_v). T_g , camsı durum ile kauçuksu durum arasındaki faz geçiş sıcaklığı olarak bilinmektedir; T_v ise dinamik bağ değişim reaksiyonunun başladığı sıcaklığı ifade eder. Vitrimer ağı, T_g 'den daha yüksek bir T_v değerine sahipse, sıcaklık T_v 'ye ulaşmadan önce malzeme kauçuksu davranış gösterir. T_v 'nin üzerine çıktığında ise elastomer, gerilme gevşemesi ve şekil manipülasyonu açısından avantajlı olan viskoelastik bir sıvıya dönüşür. Buna karşılık, T_v 'nin T_g 'den düşük olduğu durumda, vitrimer malzeme bağ değişim reaksiyonunun gerçekleşeceği sıcaklığa ulaşmadan önce termoset plastik gibi davranır. Ancak bu durumda T_v , ağ yeniden düzenlenmesinin başlangıç sıcaklığı olarak kabul edilemez; çünkü T_g 'nin altında segmental hareketler neredeyse gözlenmez. Bu durumda malzeme ancak T_g 'ye ulaşıldıktan sonra viskoelastik davranış gösterebilir. Difüzyon kontrollü yeniden düzenlenme reaksiyonlarına dayanarak, termoset plastiklerin geri dönüştürülebilir ve yeniden işlenebilir olması beklenmektedir.

Epoksi Reçine

Epoksi reçine, molekül başına birden fazla epoksi veya oksiran grubu içeren ve kürleme ajanı ile reaksiyona girdikten sonra termoset yapıya dönüşebilen bir yapıdadır (Capricho, 2020). Yüksek derecede çapraz bağlı ağ yapısı, epoksi reçinenin dayanıklılığını önemli ölçüde artırır ve bu durum malzeme performansını belirler. Orta düzeyde kürlenme hızı ve üstün mekanik özellikleri sayesinde epoksi reçine, polimer endüstrisinde en yaygın termoset malzemelerden biri haline gelmiştir. Sağladığı benzersiz işlenebilirlik ve yapışma özellikleri sayesinde kaplamalar, mühendislik yapıştırıcıları ve iletken yapıştırıcılar gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca hafiflik, yüksek mukavemet, kimyasal direnç ve termal kararlılık gibi avantajları, havacılık ve uzay sanayinde yapısal parçaların üretiminde kullanılan fiber takviyeli kompozitlerde uygulanmasını mümkün kılar. Yaygın kullanımı ve hızlı gelişimi nedeniyle epoksi reçineler ticari termoset pazarının yaklaşık %70'ini oluşturmaktadır. Bununla birlikte, epoksi reçinelerin artan kullanımı, geleneksel termosetlerde bozunabilirlik ve geri dönüştürülebilirlik eksikliği nedeniyle çevresel kirliliği kaçınılmaz hale getirmektedir. Bu sorunların çözümü için, epoksi reçineye dinamik kovalent bağların dahil edilmesine yönelik birçok çalışma yapılmış olup, bu durum

çapraz bağlı ağın yeniden işlenebilirliğini önemli ölçüde artırmıştır (Altuna, 2018).

Güncel çalışmalarda epoksi vitrimerlerin yalnızca yeniden işlenebilirlik değil, aynı zamanda yüksek mekanik dayanım, alev geciktiricilik ve karbon fiber kompozitlerde geri dönüşüm potansiyeli sunduğu gösterilmiştir (Tian et al., 2024; Barnett et al., 2024). Epoksi bazlı vitrimer ilk olarak L. Leibler tarafından, polimer ağında değişim reaksiyonu olarak transesterifikasyon kullanılarak geliştirilmiştir (Şekil 15) (Montarnal, 2011). Bu ağ yapısı, %5–10 $\text{Zn}(\text{acac})_2$ katalizörlüğü altında, bisfenol A diglisidil eteri (DGEBA) ile yağ asidi dikarboksilik ve trikarboksilik asit karışımının reaksiyonu ile kürlenmiş klasik epoksi sistemlerde dahi şekillendirilebilir, onarılabilir ve geri dönüştürülebilir özellikler sergilemektedir. Bu tür epoksi bazlı vitrimer, T_g sıcaklığına kadar ısıtıldığında akışkan özellik gösterse de, oda sıcaklığında 1.8 GPa elastik modül ve 55 MPa kopma gerilmesi ile geleneksel epoksi reçine gibi mekanik davranış sergiler.

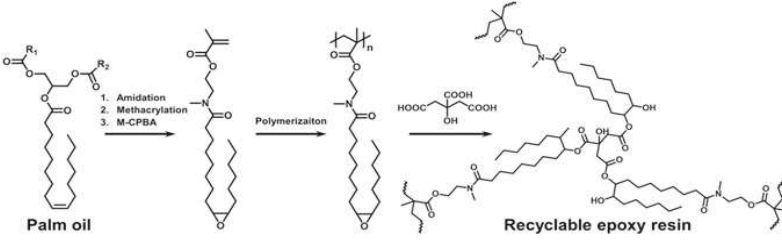


Şekil 2. Epoksi bazlı vitrimer ve ağ yeniden düzenlenmesi sırasında transesterifikasyon yoluyla değişim sürecinin şematik gösterimi

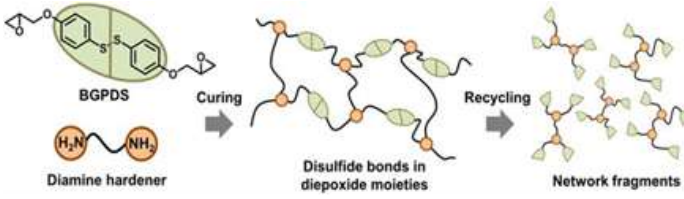
Şekillendirilebilirlik açısından, epoksi bazlı vitrimerler 3B yazdırma gibi ileri üretim tekniklerinde de kullanılabilir (Shi, 2017). Tipik olarak DGEBA ve Pripol 1040 yağ asitleri, susuz etilen glikol içinde çözülerek şırınga ve nozul aracılığıyla ekstrüde edilebilen bir karışım oluşturulur. Mürekkebin reolojik özelliklerini ayarlamak için sisteme %18 ağırlıkça nanokil eklenir. Klasik ekstrüzyon tabanlı yazıcılar kullanılarak önceden belirlenmiş şekillerde epoksi reçine modeli basılabilir ve ardından mekanik dayanım için kürlenebilir. $\text{Zn}(\text{ac})_2$ katalizörü eklendiğinde, epoksi reçine sadece karmaşık yapılar oluşturmakla kalmaz, aynı zamanda baskı mürekkebi olarak defalarca geri dönüştürülebilir.

Günümüzde epoksi reçinelerin yaklaşık %90'ı bisfenol A'dan üretilmektedir ve bu maddenin özellikle bağırsıklık ve üreme sistemine zararlı olduğu kanıtlanmıştır. Bu nedenle birçok ülke, içecek şişeleri, gıda ambalajları ve tıbbi cihazlarda kullanımını yasaklamıştır. Biyobazlı epoksi vitrimerler üzerine yapılan güncel derlemeler, bitkisel yağ, lignin ve vanilin gibi yenilenebilir kaynakların geri dönüştürülebilir termoset üretiminde

önemli adaylar olduğunu ortaya koymaktadır (Kumar et al., 2024). Örneğin palmye yağı kullanılarak doymamış yağ zincirleri 3-kloroperoksibenzoik asit (m-CPBA) ile epoksitlenmiştir (Mu, 2020). Zincir uçlarına metil metakrilat grupları eklenerek serbest radikal polimerizasyonu ile dayanım artırılmıştır. Sitrik asit çapraz bağlayıcı olarak kullanılarak ester bağları oluşturulmuş ve mekanik olarak güçlü bir epoksi ağı elde edilmiştir. Ester bağlarının değişim yeteneği sayesinde bu biyobazlı epoksi reçine, 170 °C'ye kadar ısıtıldığında yeniden düzenlenebilir ve geri dönüştürülebilir.



Şekil 3. Palm yağı bazlı mekanik olarak geri dönüştürülebilir epoksi reçinelerin sentetik yolu



Şekil 4. Disülfid bazlı epoksi reçinenin şematik gösterimi ve geri dönüşüm mekanizması

Poliüretan

Poliüretan, poliizosiyanatlar ile poliollerin poliaddisyon reaksiyonu yoluyla sentezlenen bir polimer sınıfıdır. Kimyasal ve morfolojik bileşenlerine bağlı olarak poliüretan, termoset veya termoplastik davranış sergileyebilir. Termoset poliüretanlar genellikle çapraz bağlı bir ağ oluşturabilmek için en az bir monomerin üç veya daha fazla fonksiyonel gruba sahip olmasını gerektirir. Poliüretan hammaddelerinin birçok türü arasında, bunların yaklaşık %66'sı köpük uygulamalarında kullanılmaktadır (Engels, 2013). Bir yandan, esnek poliüretan köpükler; verimli üretim süreci, yüksek nefes alabilirlik ve uzun kullanım ömrü nedeniyle minder, yatak ve diğer yumuşak mobilyaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Öte yandan, kapalı gözenekli yüksek derecede çapraz bağlı poliüretanlar, yapı uygulamaları ve elektrik yalıtımı için uygun olan rijit köpüklere dönüştürülebilir. Köpük malzemelerinin yanı sıra, termoset poliüretanlar kaplamalar, boyalar, elastomerler ve fiber kompozitler gibi alanlarda da

kullanılmaktadır. Sınırlı fosil yakıtlara bağımlılık nedeniyle, petrol türevi poliüretan malzemelerin maliyeti hızla artmakta ve bu durum geri dönüştürülebilir poliüretanları ön plana çıkarmaktadır. Üretan bağları yüksek sıcaklık altında dinamik değişim reaksiyonları geçirebilir ve tüm çapraz bağlı polimer ağını yeniden düzenleyebilir. Transkarbamoylasyon reaksiyonu sayesinde, bu tür poliüretan bazlı termosetler yeniden işlenebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik kazanarak çevresel yükü kısmen azaltabilir.

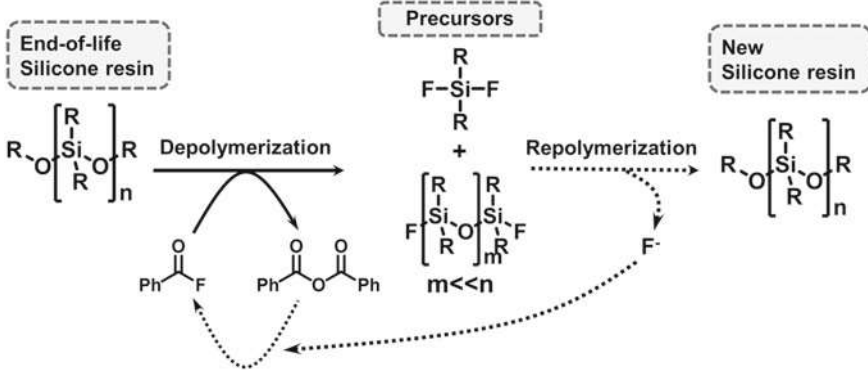
Organotin bileşikler, özellikle dibütildin dilaurat (DBTDL), poliüretanlarda karbamat bağlarının oluşumunu teşvik etmek için kullanılan klasik katalizörlerdir. Bu bileşikler, polimerizasyon reaksiyonunda yalnızca %0.5–2.0 ağırlık oranında kullanılarak Lewis asidi görevi görür ve çoğu zaman dikkate değer katalitik verimlilik sergiler. Bazı araştırmacılar, metal katalizörlerin malzemeden uzaklaştırılmasının zorluğunun toksisite gibi olumsuz etkilere yol açabileceğini düşünse de, artık organotin bileşikler poliüretan termosetlerin geri dönüşüm sorunlarının çözümünde önemli fırsatlar da sunmaktadır. Örneğin, geri dönüştürülebilir tipik bir poliüretan termoset; (polietilen glikol)diol (PEG), gliserol (GLY) ve hekzametilen diizosiyanatın (HDI), DBTDL ile birlikte karıştırılmasıyla üretilir (Zheng, 2016).

Silikon Reçine

Silikon reçine, yüksek derecede çapraz bağlı yapıya sahip bir termoset poliorganosiloksandır ve genellikle inorganik silikon-oksijen omurgası (...–Si–O–Si–O–...) ile organik alkil yan zincirlerinden oluşur. Diğer organik reçinelerle karşılaştırıldığında sahip olduğu benzersiz yapı nedeniyle silikon reçine mükemmel ısı dayanımı özellikleri gösterir. 350 °C’de 24 saat ısıtıldıktan sonra, yaygın organik reçinelerde kütle kaybı %70–99 arasında olurken, silikon reçinelerde bu değer genellikle %20’nin altındadır. Organosilikon malzemelerin bir diğer önemli özelliği, geniş sıcaklık ve frekans aralığında sergiledikleri mükemmel elektriksel yalıttır. Ayrıca, üstün hava koşullarına dayanıklılığı sayesinde silikon reçineler ultraviyole ışınımına ve nemli ortamlara karşı yüksek kararlılık gösterir. Bu özellikler, elektriksel yalıtım kaplamaları, ısıya dayanıklı boyalar, cam yüzey işlemleri ve yapısal olarak kararlı elastomerler gibi geniş uygulama alanlarını mümkün kılar. En yaygın organosilikonlardan biri olan polidimetilsiloksan (PDMS), basit hazırlanabilirliği ve düşük maliyeti nedeniyle mikroakışkan teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çapraz bağlı silikon ağına kürlendikten sonra, yüksek sıcaklık işlemlerinde dahi tamamen çözünmez ve erimez hale gelir. Yüksek kararlılığı ve üstün fiziksel özellikleri silikon reçinelerin, özellikle PDMS’in, yaygın kullanımını sağlarken; aynı zamanda bozunabilirlik, yeniden işlenebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik özelliklerini de sınırlar. Si–O bağının yüksek bağ enerjisi (369 kJ/mol) nedeniyle, geleneksel silikon ağlarında bağ değişiminin gerçekleşmesi oldukça zordur. Bu nedenle, bazı araştırmacılar Si–O bağının dinamik oluşum ve parçalanma

süreçlerini teşvik edecek katalitik sistemlerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Bu katalizörler sayesinde termoset silikon reçineler sürdürülebilir uygulamalar için geri dönüştürülebilir hale getirilebilir.

Müller–Rochow sentezi ve ardından gelen hidroliz ile kolayca elde edilebilmesine rağmen, silikon malzemelerin üretimi klorometan gibi başlangıç reaktiflerine ulaşmak için yüksek enerji girdisi gerektirir. Bu durumda, düşük enerji tüketimi sağlayan düşük sıcaklıkta depolimerizasyon yöntemleri silikon geri dönüşümü için uygun bir yaklaşım sunar. Ancak, silikonlardaki Si–O bağının bozunma sıcaklığının yaklaşık 200 °C olduğu belirlenmiştir ve bu durum çevre dostu geri dönüşüm süreçlerini ciddi şekilde sınırlar. Kullanım ömrünü tamamlamış polieterlerin güvenilir bozunma reaksiyonlarından ilham alınarak, çinko veya demir tuzları gibi basit metal katalizörlerin varlığında benzoyl florür yardımıyla Si–O bağları kırılabilir ve yeni Si–F bağları oluşturulabilir (Şekil 20) (Enthaler, 2014). Si–O bağlarının kopmasıyla birlikte, tüm polisiloksan omurgası R_2SiF_2 veya $FR_2SiOSiR_2F$ gibi düşük molekül ağırlıklı parçalara ayrışabilir. Bu bozunma ürünleri daha sonra hidroliz reaksiyonları ile yeniden polisiloksan yapısını oluşturabilir.



Şekil 5. Polisiloksanların dönüşümü için geri dönüşüm yaklaşımı

Bu strateji etkili bir geri dönüşüm yöntemi sunmasına rağmen, benzoyl florürün kararsız yapısı ve yüksek maliyeti uygulama potansiyelini ciddi şekilde sınırlar. Bu nedenle, bozunma sürecinde benzoyl florür yerine asit klorürleri/KF veya benzoik anhidrit/KF sistemlerinin kullanıldığı geliştirilmiş yöntemler önerilmiş olup, bunlar da dikkate değer verimlilik göstermektedir.

Temel olarak silikon atomunun florofilik özelliğine ve Lewis asidi katalizörlerinin aktivasyonuna dayanan bu yaklaşım ile polisiloksan malzemeler yeniden polimerleşebilir küçük moleküllere dönüştürülebilir. Ancak bu stratejinin; yan ürün kalıntılarının oluşması, fosil kaynaklı reaktiflere ihtiyaç duyulması ve yüksek maliyet gibi birçok dezavantajı bulunmaktadır. Bu bağlamda, bor triflorür dietil eterat (BF_3OEt_2), polisiloksan bozunmasını katalize etmek için umut verici bir alternatif olarak önerilmiştir (Döhlert, 2015).

Polisiloksan ağlarının yeniden düzenlenme reaksiyonları geçirmesi zor olsa da, Si-O bağlarının dinamik değişimi tamamen imkânsız değildir. Alkoksisilan hidroliz hızının komşu amin gruplarının etkisiyle geniş bir aralıkta değiştiği doğrulanmıştır (Şekil 21). Amin grubunun varlığı, Si-O bağının değişim kabiliyetini artırarak polisiloksan ağlarının yeniden düzenlenmesi için önemli bir fırsat sunar (Nishimura, 2017).

SONUÇ

Kolay ölçeklenebilir üretim ve basit ayarlanabilirlik özellikleri sayesinde termoset malzemeler son yıllarda giderek artan bilimsel ve endüstriyel ilgi görmektedir ve bu araştırma alanının gelecekte daha fazla önem kazanması beklenmektedir. Termoset plastiklere olan talebin artmasıyla birlikte, kullanım ömrünü tamamlamış malzemelerin birikimi dünya genelinde ciddi bir çevresel yük oluşturmaktadır. Sürdürülebilir enerji kullanımı ve çevre koruma gereksinimleri doğrultusunda, bozunabilir ve geri dönüştürülebilir termoset plastiklerin geliştirilmesi, polimer atıklarının azaltılmasında umut verici bir çözüm olarak görülmektedir. Geleneksel atık yönetimi yöntemleri çoğunlukla düşük kaliteli malzemelerin aşağı dönüşümü veya enerji geri kazanımı amacıyla termal geri dönüşüme dayanmakta olup, bu durum geri dönüşüm döngüsü sayısını önemli ölçüde sınırlamaktadır. Buna karşılık, dinamik kovalent polimer ağlarına dayanan termoset plastikler çoklu geri dönüşüm avantajı sunmaktadır. Isıya duyarlı dinamik kovalent bağlar, çapraz bağlı ağların ısıtıldığında yeniden düzenlenmesini mümkün kılar ve böylece termoset polimerlere termoplastiklere benzer yeniden işlenebilirlik kazandırır. Bu bölümde, yeniden işlenebilir termosetlerin geliştirilmesi amacıyla bağ değişim reaksiyonlarının kullanımına yönelik önemli çalışmalar özetlenmiştir. Vitrimeler, en umut verici yeniden düzenlenebilir ağ yapısı olarak geri dönüştürülebilir termoset plastiklerin geliştirilmesinde öncü araştırmaların merkezinde yer almaktadır. Özellikle biyobazlı vitrimeler, yenilenebilir hammaddelerden üretilebilmeleri ve çoklu geri dönüşüm potansiyelleri sayesinde sürdürülebilir termoset malzemelerin geleceğinde öne çıkan bir araştırma alanıdır (Albertini et al., 2026).

REFERANSLAR

- Albertini, E., Dalle Vacche, S., ve Vitale, A. (2026). Bio-based vitrimers: Chemistry, performance and applications. *RSC Applied Polymers*, 4, 892-922. <https://doi.org/10.1039/D5LP00408J>
- Altuna, F. I., ve diğerleri. (2018). Epoxy vitrimers: The effect of transesterification reactions on the network structure. *Polymers*, 10, 16.
- Barnett, P. R., Brackenridge, J. A., Advincula, A. A., Taussig, L. A., ve Nepal, D. (2024). Reformable and sustainable thermosetting carbon fiber composites from epoxy vitrimer. *Composites Part B: Engineering*, 274, 111270. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111270>

- Capricho, J. C., ve diğerleri. (2020). Multifunctionality in epoxy resins. *Polymer Reviews*, 60, 1-41.
- Chakma, P., ve Konkolewicz, D. (2019). Dynamic covalent bonds in polymeric materials. *Angewandte Chemie International Edition*, 58, 9682-9695.
- Denissen, W., ve diğerleri. (2015). Vinylogous urethane vitrimers. *Advanced Functional Materials*, 25, 2451-2457.
- Denissen, W., ve diğerleri. (2016). Vitrimers: Permanent organic networks with glass-like fluidity. *Chemical Science*, 7, 30-38.
- Döhlert, P., ve diğerleri. (2015). Recycling concept for end-of-life silicones: Boron trifluoride diethyl etherate as depolymerization reagent to produce difluorodimethylsilane as useful commodity. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3, 163-169.
- Engels, H.-W., ve diğerleri. (2013). Polyurethanes: Versatile materials and sustainable problem solvers for today's challenges. *Angewandte Chemie International Edition*, 52, 9422-9441.
- Enthaler, S. (2014). Zinc-catalyzed depolymerization of end-of-life polysiloxanes. *Angewandte Chemie International Edition*, 53, 2716-2721.
- Fang, Z., ve diğerleri. (2017). Healable, reconfigurable, reprocessable thermoset shape memory polymer with highly tunable topological rearrangement kinetics. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9, 22077-22082.
- Fortman, D. J., ve diğerleri. (2019). Reprocessing cross-linked polyurethanes by catalyzing carbamate exchange. *Macromolecules*, 52, 6330-6335.
- Hendriks, B., ve diğerleri. (2017). Poly(thioether) vitrimers via transalkylation of trialkylsulfonium salts. *ACS Macro Letters*, 6, 930-934.
- Imbernon, L., ve diğerleri. (2015). Chemically crosslinked yet reprocessable epoxidized natural rubber via thermo-activated disulfide rearrangements. *Polymer Chemistry*, 6, 4271-4278.
- Kumar, S., Krishnan, S., ve Prabakaran, K. (2024). Renewable resource-based epoxy vitrimer composites for future application: A comprehensive review. *ACS Sustainable Resource Management*, 1(9), 2086-2107. <https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.4c00200>
- Liu, C., ve diğerleri. (2020). Tunable structural color patterns based on the visible-light-responsive dynamic diselenide metathesis. *Advanced Materials*, 32, 1907569.
- Liu, W.-X., ve diğerleri. (2017). Oxime-based and catalyst-free dynamic covalent polyurethanes. *Journal of the American Chemical Society*, 139, 8678-8684.
- Lu, Y.-X., ve diğerleri. (2012). Making insoluble polymer networks malleable via olefin metathesis. *Journal of the American Chemical Society*, 134, 8424-8427.
- Maes, S., Badi, N., Winne, J. M., ve Du Prez, F. E. (2025). Taking dynamic covalent chemistry out of the lab and into reprocessable industrial thermosets. *Nature Reviews Chemistry*, 9(3), 144-158. <https://doi.org/10.1038/s41570-025-00686-7>
- Montarnal, D., ve diğerleri. (2011). Silica-like malleable materials from permanent organic networks. *Science*, 334, 965.
- Mu, S., ve diğerleri. (2020). Recyclable and mechanically robust palm oil-derived epoxy resins with reconfigurable shape-memory properties. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8, 5296-5304.

- Nishimura, Y., ve diğerleri. (2017). Silyl ether as a robust and thermally stable dynamic covalent motif for malleable polymer design. *Journal of the American Chemical Society*, 139, 14881-14884.
- Pickering, S. J. (2006). Recycling technologies for thermoset composite materials: Current status. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37, 1206-1215.
- Pickering, S. J., ve diğerleri. (2000). A fluidised-bed process for the recovery of glass fibres from scrap thermoset composites. *Composites Science and Technology*, 60, 509-523.
- Post, W., ve diğerleri. (2020). A review on the potential and limitations of recyclable thermosets for structural applications. *Polymer Reviews*, 60, 359-388.
- Reutenauer, P., ve diğerleri. (2009). Room temperature dynamic polymers based on Diels-Alder chemistry. *Chemistry: A European Journal*, 15, 1893-1900.
- Röttger, M., ve diğerleri. (2017). High-performance vitrimers from commodity thermoplastics through dioxaborolane metathesis. *Science*, 356, 62.
- Scheutz, G. M., ve diğerleri. (2019). Adaptable crosslinks in polymeric materials: Resolving the intersection of thermoplastics and thermosets. *Journal of the American Chemical Society*, 141, 16181-16196.
- Shi, Q., ve diğerleri. (2017). Recyclable 3D printing of vitrimer epoxy. *Materials Horizons*, 4, 598-607.
- Skene, W. G., ve diğerleri. (2004). Dynamers: Polyacylhydrazone reversible covalent polymers, component exchange, and constitutional diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101, 8270.
- Takahashi, A., ve diğerleri. (2016). Degradable epoxy resins prepared from diepoxide monomer with dynamic covalent disulfide linkage. *Polymer*, 82, 319-326.
- Tian, P.-X., Li, Y.-D., Hu, Z., ve Zeng, J.-B. (2024). Fire-resistant and high-performance epoxy vitrimers for fully recyclable carbon fiber-reinforced composites. *Materials Today Chemistry*, 36, 101965. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2024.101965>
- Vougioukalakis, G. C., ve diğerleri. (2010). Ruthenium-based heterocyclic carbene-coordinated olefin metathesis catalysts. *Chemical Reviews*, 110, 1746-1787.
- Winne, J. M., ve diğerleri. (2019). Dynamic covalent chemistry in polymer networks: A mechanistic perspective. *Polymer Chemistry*, 10, 6091-6108.
- Xu, G., ve Wang, J. (2025). High-performance and recyclable silicone rubber vitrimer composites via dual crosslinking of dynamic boronic ester bonds and interfacial hydrogen bonds. *Polymer*, 338, 129064. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2025.129064>
- Xu, X.-Q., ve diğerleri. (2018). A degradable and recyclable photothermal conversion polymer. *Chemistry: A European Journal*, 24, 9769-9772.
- Ying, H., ve diğerleri. (2014). Dynamic urea bond for the design of reversible and self-healing polymers. *Nature Communications*, 5, 3218.
- Zhang, Z. P., ve diğerleri. (2018). Polymer engineering based on reversible covalent chemistry: A promising innovative pathway towards new materials and new functionalities. *Progress in Polymer Science*, 80, 39-93.
- Zheng, N., ve diğerleri. (2016).

Madencilikte arpışma nleme Sistemleri zerine Bir İnceleme

Zekeriya DURAN¹

Bülent ERDEM²

- 1- Dr. Öğr. Üyesi; Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Sivas Teknik Bilimler MYO Madencilik ve Maden ıkarma Bölümü. zduran@cumhuriyet.edu.tr ORCID No: 0000-0002-9327-8567
- 2- Prof. Dr.; Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü. bulent@cumhuriyet.edu.tr ORCID No: 0000-0002-1226-9248

ÖZET

Bu derlemede, son çeyrek yüzyılda (1999-2026) madencilik çarpışma önleme sistemleri (CAS) ile ilgili literatür incelenmektedir. Çok sayıda makaleden derlenen bilgi ışığında, yeraltı ve yerüstü maden sahaları için ultra geniş bant (UWB) teknolojisi, radar algılayıcıları, Işık Algılama ve Menzil Belirleme (LiDAR) teknolojisi, bilgisayarlı görüş, Araçtan Her Şeye (V2X) iletişimi ve algılayıcı kaynaşımı tekniklerini kullanan çeşitli madencilik CAS donanım ve yazılımları ele alınmıştır. Sonuçlar, UWB ve radar teknolojisinin küresel konumlama sisteminin (GPS) bulunmadığı yeraltı madenlerinde gelişmiş performans sunduğunu; santimetre düzeyinde hassasiyet (10-30 cm) ve 200 m menzil sağladığını, algılayıcı kaynaşımı sistemlerinin (özellikle V2X, Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS), radar ve görüş temelli olanların) ise açık ocaklarda en etkili olduğunu ve görüş mesafesinin sınırlı olduğu durumlarda bile %90'a varan tespit doğruluğu sunduğunu göstermektedir. Ancak literatürde ABD Maden Güvenliği ve Sağlık İdaresi (MSHA) yönetmelikleri, ISO 21815, Örtükazı Makineleri Güvenliği Yuvarlak Masası (EMESRT) veya Uluslararası Madencilik ve Metaller Konseyi (ICMM) “en iyi endüstriyel uygulamalar” gibi uluslararası madencilik güvenliği standartlarına uyum konusunda eksiklikler bulunmaktadır; incelenen yayınların yalnızca küçük bir bölümü belirli bir standarda atıfta bulunmuş veya bu standartları değerlendirmiştir. Bu bölümde güncel teknoloji özetlenmiş, yeraltı ve yerüstü madenlerinde sistem verimliliği karşılaştırılmış ve üretici sertifikalarının bulunmadığı durumlar değerlendirilerek madenlerde emniyetli ve verimli kullanıma yönelik teknik uyumluluk modeli geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler – CAS, GNSS, GPS, LiDAR, RFID, UWB, V2X

GİRİŞ

Yeraltı ve yerüstü madencilğinde hareketli ekipmanların, araçların ve işçilerin çarpışmasına yol açabilecek birçok tehlikeli durum bulunmaktadır. Madenlerdeki çalışma ortamı; düşük görüş mesafesi, yetersiz aydınlatma, toz, sis, yeraltında GPS sinyalinin kaybı, dar geçitler ve çok sayıda ağır maden makinesinin etkileşimi nedeniyle karmaşıklaşabilmektedir. Bu zorlu koşullarda işlevsel, güvenilir ve yüksek performanslı çarpışma önleme sistemlerine ihtiyaç vardır (Qian vd., 2022). Son yıllarda Endüstri 4.0'ın gelişimiyle birlikte çarpışma önleme teknolojilerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiş, bu da bu sistemlerin performansını belirgin biçimde artırmıştır. Bu gelişmeler sayesinde madencilik sektöründe kaza ve yaralanmalarda dikkat çekici bir azalma yaşanmış, sektör daha güvenli bir yapıya kavuşmuştur (Imam vd., 2023).

Günümüzde ve son yirmi yılda madencilikte kullanılan teknolojiler arasında, yalnızca birkaç metre menzile ve düşük konumlandırma hassasiyetine sahip erken dönem elektromanyetik alan ve Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID) tabanlı yakınlık algılama sistemleri bulunmaktadır (Ruff, 2020). Bunun yanında, bilgisayarlı görü ve yapay zekâ gibi algılayıcılar kullanılarak ortamdaki nesnelerin hassas konum bilgilerini sağlayan UWB (Kianfar vd., 2020), milimetrik dalga radarı ve LiDAR (Imam vd., 2023) gibi ileri algılayıcı teknolojileri geliştirilmiştir. Ayrıca Çarpışma Önleme/Uyarı Sistemleri (CXS) (Hrica vd., 2022) sayesinde kazaların önlenmesine yönelik önemli teknolojik ilerlemeler kaydedilmiştir.

Tüm sistemlerin kendine özgü güçlü ve zayıf yönleri ile yeraltı ve yerüstü madenciliği gibi hedef ortamları vardır. Bu literatür incelemesinde, yeraltı ve yerüstü ocak ortamlarındaki performans değerlendirilerek ve literatürde madenlerde güvenliğe ilişkin düzenlemeler ile standartlara uyumun nasıl ele alındığı incelenerek madenlerde verimli çarpışma önleme çözümlerinin sağlanmasının önemi tartışılmaktadır. Sonuç olarak, bu inceleme ile son yirmi beş yılda madencilikte geliştirilen ve uygulanan çarpışma önleme teknolojileri, bu sistemlerin yeraltı ve yerüstü operasyonlarındaki performansı ve farklı sistemlerin kullandığı nicel performans ölçütleri araştırılmıştır.

2. ARKA PLAN VE TEORİK TEMELLER

2.1. Madenlerde Çarpışma Tehlikeleri

ABD madencilik sektöründe motorlu taşıma araçlarıyla ilişkili kazalar, madenciler için en önemli güvenlik sorunlarından biri olmaya devam etmekte ve yıllık bazda en fazla ölüme neden olan unsur olarak görülmektedir (Hrica vd., 2022). Ayrıca maden sahalarında, karayolu taşımacılığından farklı olarak sektöre özgü çarpışma tehlikeleri bulunmaktadır. Yeraltı madenlerinde dar alanlar, sınırlı aydınlatma, yüksek nem, kömür tozu birikimi ve GPS sinyali eksikliği gibi sorunlar vardır (Cunha ve Youcef-Toumi, 2018; Qian vd., 2022; Imam vd., 2023). Açık ocak madenlerinde ise geniş çalışma alanları, değişken hava koşulları (örneğin sis ve toz fırtınaları), aynı anda hareket eden çok sayıda araç ve büyük kamyonların yakınındaki kör noktalar gibi sorunlar yaşanmaktadır (Ruff, 2020; Hrica vd., 2022; Dantas vd., 2025). Her iki ortamda da maden makineleri (kamyonlar, sürekli kazı makineleri, mekikler, yükleyiciler) işçilerle etkileşim halindedir. Bu durum personel için tehlikeli çarpışma ortamları oluşturmaktadır.

Madencilikte etkili çarpışma önleme sistemleri, otomotiv ya da endüstriyel uygulamalardan farklı olarak bazı temel gereksinimleri karşılamalıdır. Birincisi, GPS'in olmadığı alanlarda güvenilir şekilde çalışabilmeleri gerekir; bu da farklı konumlandırma teknolojilerine ihtiyaç duyar (Shahmoradi vd., 2020; Patrucco vd., 2021). İkincisi, toz, sis, nem, basınç, yüksek sıcaklık ve karanlık nedeniyle oluşan düşük görüş koşullarında

iyi performans göstermeleri gerekir (Imam vd., 2023). Üçüncüsü, ağır maden makinelerinin durma mesafelerini hesaba katacak yeterli algılama menziline sahip olmaları gerekir; bu mesafe yüklü kamyonlar için 100 metreyi aşabilir (Ruff ve Holden, 2003). Dördüncüsü, zamanında uyarı ve müdahale için saniyenin altında yanıt süresiyle düşük gecikme sağlamaları gerekir (Qian vd., 2022). Son olarak, operatör güvenliğini korumak ve sistemin devre dışı bırakılmasını önlemek için yanlış alarm sayısı azaltılmalıdır (Qian vd., 2022).

Madencilikte çarpışma önleme teknolojilerinin evrimi, algılayıcı geliştirme ve kablosuz iletişimdeki teknolojik iyileştirmeleri yansıtmaktadır. 2000'li yıllardaki ilk sistemler elektromanyetik alan ölçümlerine ve RFID etiketlerine dayanıyordu. Birkaç metre içinde temel yakınlık tespiti sağlıyor, ancak doğruluk sorunlarıyla karşılaşılıyor ve sık sık yanlış alarmlar üretiyorlardı (Holden ve Ruff, 2001; Ruff ve Holden, 2003). 2010'lu yıllarda, santimetre düzeyinde konumlandırma doğruluğu ve yeraltı ortamlarında güçlü performans sunan UWB teknolojisi tanıtıldı (Kianfar vd., 2020). Aynı dönemde radar sistemleri, özellikle milimetrik dalga radarı, tozlu veya sisli koşullarda etiketlenmemiş engelleri tespit etmede etkili hale geldi (Xiao vd., 2020; Yuan ve Chen, 2023; Chaulya vd., 2024). 2020'li yıllardaki en son gelişmeler ise algılayıcı kaynaşımına odaklanmaktadır. Bu yaklaşım, her teknolojinin güçlü yönlerinden yararlanarak UWB, radar, LiDAR, kameralar ve V2X iletişimini birleştirmektedir (Kianfar vd., 2020; Hrica vd., 2022; Imam vd., 2023).

2.2. Teknoloji Sınıflandırması ve Algılama Yaklaşımları

Bu bölümde, karşılaştırmalı analizlere temel oluşturmak amacıyla literatürde tanımlanan çarpışma önleme teknolojileri, birincil algılama modlarına göre sınıflandırılmaktadır.

UWB algılayıcıları, cihazlar arasında kablosuz iletişim yoluyla konumu hassas biçimde belirleyen bir telsiz frekansı teknolojisi kullanır. En yeni uygulamalar cep telefonları, araba anahtarları ve benzeri cihazlarda konum belirleme ve algılayıcı verisi toplama üzerine odaklanmaktadır (Wisiak vd., 2022). UWB ayrıca geniş bir frekans spektrumu üzerinde yüksek bant genişliğine sahip bir telsiz sinyalidir. Pikosaniye ile nanosaniye arasında değişen kısa süreli atışlara ve yaklaşık %0,5'lik düşük görev döngüsü oranına sahiptir; bu da sinyalin düşük enerjiyle bilgi taşımasını sağlar (Nekoogar, 2011; Kianfar vd., 2020). UWB teknolojisi, kısa menzilli, yüksek iletim hızlı ve mesafeyi değerlendirmek için ince çözünürlük sunabilen bir teknolojidir (Liu vd., 2017).

UWB teknolojisi, GPS'in çalışmadığı ortamlarda hassas konumlandırma sağlayabilmesi sayesinde yeraltı madenciliğinde çarpışma önlemede öne çıkan bir yaklaşım haline gelmiştir. ABD Federal Komisyonu, UWB sistemlerinin geniş bir frekans spektrumunda (-41,3 dBm/MHz güç spektral yoğunluğu salınım limitiyle 3,1-10,6 GHz) çalıştığını belirtmektedir. Frekans aralığı, kısa süreli atışlar (ABD'de 3,8-4,2 GHz, Avrupa'da 6-8,5

GHz) gönderilerek kullanılır; bu da uçuş süresi hesaplamalarıyla hassas mesafe ölçümü yapılmasına olanak tanır (Kianfar vd., 2020).

UWB'nin yeraltı uygulamalarındaki etkinliği birçok çalışmada gösterilmiştir. Yeraltı raylı taşımacılıkta UWB kablolu algılayıcı ağı tabanlı bir çarpışma önleme sistemi geliştirilmiş, 10 cm konumlandırma hassasiyeti ve 6,8 Mbps'ye kadar veri iletim hızı elde edilmiştir (Liu vd., 2017). Kianfar vd. (2020), yeraltı operasyonlarında 10-30 cm arasında konumlandırma doğruluğu bildirmiş ve yaklaşık %0,5 görev döngüsü oranıyla güç tüketiminin azaldığını belirtmiştir. Yeraltı maden CAS anketinde, UWB tabanlı sistemlerin 100 metreye kadar menzilde santimetre düzeyinde hassas konumlandırma sağlayabildiği ve uçtan uca gecikmelerin birkaç nanosaniyeye indirilebildiği vurgulanmıştır (Qian vd., 2022). UWB, kısa mesafelerde hızlı ve güvenilir veri iletimi sağlar. Hassasiyeti, iletim hızı ve güvenilirliği sayesinde karmaşık, alan kısıtlı ortamlarda hareketli varlıkların iç mekân konumlandırması için yaygın olarak kullanılmakta; bu durum onu madencilikte kullanım için ideal hale getirmektedir (Wisiak vd., 2022).

UWB teknolojisi, nispeten düşük maliyetle yüksek doğruluk ve düşük gecikme süresi sunar. Çarpışma önleme amacıyla kullanılabilen UWB, çeşitli mesafe ölçüm algoritmalarıyla sorunsuz biçimde bütünleşir. UWB sistemleri, geniş bir frekans spektrumu boyunca telsiz atışları yayan bir verici kullanır. Bir alıcı ile eşleştirildiğinde, kısa bir zaman aralığında atış dizisini yakalayabilir. UWB esas olarak mesafe ölçümleri için kullanılır; bu nedenle madenciler ile araçlar arasındaki mesafeyi tahmin etmek üzere bir mesafe ölçer olarak uygulanabilir ve teorik doğruluğu 0,1-0,5 m'dir (Qian, 2024).

UWB'nin teknik avantajları arasında yüksek uzamsal çözünürlük, düşük güç tüketimi, büyük miktarda veri aktarımı, dar alanlarda düşük sinyal kirliliği ve engellerden geçebilme özelliği bulunmaktadır (Liu vd., 2017; Kianfar vd. 2020; Qian, 2024). UWB tekniği, Görüş Hattı (LoS) durumunda 100 m'ye kadar ölçüm aralığında santimetre düzeyinde doğruluk (Qian vd., 2022), başka bir çalışmada ise iç mekân konumlandırma uygulamalarında desimetre düzeyinde doğruluk sağlayabilmektedir (Li vd., 2020). Ancak UWB sistemlerinin altyapı kurulumu (ankraj düğümleri) gerektirmesi, farklı ülkelerde frekans tahsis konusunda düzenleyici kısıtlamalarla karşılaşabilmesi (Kianfar vd. 2020) ve konumlandırma teknolojisi ekipman maliyetinin nispeten yüksek olması, büyük ölçekli uygulamalarını sınırlandırmaktadır (Qin vd., 2025).

Açık maden ocaklarında sis yoğunluğu, görüş mesafesini kısıtlayarak sürücünün güvenli şekilde ilerlemesini engellediği için sürüş açısından en kabul edilemez senaryolardan biridir. Açık ocak madenlerinde pratikte farklı teknolojiler uygulanmış olsa da, görüntü tabanlı gelişmiş sürüş destek sistemleri etkili bir yaklaşım sunmaktadır. Bu nedenle, kötü hava koşullarında ağır vasıtaların sürüşünü kolaylaştırmak amacıyla görüntü işleme ile V2X-GNSS-radar tabanlı navigasyon teknolojileri bir araya getirilebilir. Bu sistem çok aşamalı bir güvenlik düzeyi sağlayabilmektedir. Zira mevcut

teknolojilerin bir kısmı, görüş mesafesi 5 m'den az olduğunda tek başına yararlı bilgi üretmek ve sürücünün görüntü kalitesini yeniden kazanmasını sağlamak için yeterli değildir. Ayrıca deney sonuçları, CNN tabanlı bir algoritmanın nesne algılama özelliği sayesinde görüntü kalitesinde artış olduğunu ortaya koymuştur (Chaulya vd., 2024). Radar teknolojisi, özellikle milimetrik dalga radarı, etiketlenmemiş engelleri ve düşük görüş koşullarını algılamada önemli avantajlar sunar. Radar sistemleri elektromanyetik dalgalar yayarak yansıyan sinyalleri işler, nesnelerin mesafesini, hızını ve açısız konumunu tahmin eder; böylece aktif etiketi olmayan kayaları, toprak setlerini ve diğer engelleri tespit etmek için kullanılabilir (Ruff, 2007; Chaulya vd., 2024).

Hrica vd., maden kamyonları için çarpışma önleme teknolojilerini incelemiş ve radar tabanlı sistemlerin, genellikle tam durumsal farkındalık için 360 derece kamera sistemleriyle desteklenen, açık ocak madencilğinde kullanılan başlıca teknolojiler arasında olduğunu belirtmiştir (Hrica vd., 2022). Chaulya vd., (2024) sisli açık ocak koşullarında radarın etkinliğini, kayalar ve toprak setleri gibi etiketlenmemiş nesneleri tespit ederek göstermiş; yardımcı olarak kameralar ve V2X teknolojisi kullanmıştır. Yuan ve Chen (2023), yeraltı galerilerindeki görüş engelleri ve düşük ışık seviyeleri sorununu, vagon çarpışmalarını önlemek amacıyla milimetrik dalga radarı kullanarak çözmüştür.

Açık ocak madenlerinde kullanılan ağır yük kamyonları, çok büyük boyutları nedeniyle sürücülerin görüşünü kısıtlamakta, bu da kör noktalardaki diğer araçların görülmesini zorlaştırmaktadır. Ayrıca madenlerdeki nakliye güzergâhlarının fazla değişmemesi, sürücülerin dikkatinin dağılmasına ve zaman zaman çarpışmalara yol açmasına neden olmaktadır. Radar ve kızılötesi mesafe ölçümü gibi teknolojiler, virajlarda karşı yönden gelen araçları tespit etmekte zorlanmakta ve toz gibi olumsuz çevresel koşullardan etkilenmeleri nedeniyle yanlış alarmlara neden olmaktadır. Radyal Bazlı Fonksiyon (RBF) ağı ve WiFi tabanlı modeller, açık ocak madenlerinde ağır yük kamyonları için çarpışma önleme ve uyarı sistemi olarak kullanılabilir. Sistemde, her maden kamyonunun orta kısmına bir WiFi mesafe ölçüm modülü monte edilir. İki kamyon arasındaki mesafe tanımlanan değerden az olduğunda, sürücünün yakınında başka araçlar bulunduğunu ve sürüş güvenliğine dikkat etmesi gerektiğini belirten bir erken uyarı sinyali gönderilir. WiFi mesafe ölçümündeki hata, uzun mesafelerde kolayca dalgalanma gösterebilir; ancak WiFi mesafe ölçümü, uzun ölçüm mesafesi, hava koşullarından ve tozdan kolayca etkilenmemesi ve düşük maliyet gibi avantajlara sahiptir (Xiao vd., 2020).

Özgün uygulamalara bir başka örnek olarak, gerçek zamanlı mesafe ölçümü için Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga (FMCW) radarı kullanan, 100 metre mesafede sesli ve ışıklı alarm, 50 metre mesafede ise otomatik frenleme sağlayan maden lokomotifleri için IVS-179 radar algılayıcı sistemi gösterilebilir (Cai vd., 2018). Yeraltı maden işletmelerinde çalışan personel

ile ağır makineler arasındaki çarpışmalardan kaynaklanan kazaların önlenmesi için Yakınlık Algılama Sistemleri (PDS) kritik güvenlik cihazları olarak değerlendirilmektedir. Bu sistemler, algılayıcı teknolojisi ve tanımlanmış uyarı bölgeleri sayesinde kaza riskini önemli ölçüde azaltabilmektedir. Ancak, günlük operasyonların zorlu koşullarına tam uyum sağlayabilmeleri için ek teknolojik geliştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, gelecekteki gelişmelerin giderek daha fazla radar tabanlı sistemlere dayanacağı öngörülmektedir. Bunun nedeni, radar teknolojisinin zorlu çevre koşullarında dayanıklı ve güvenilir olması ve görüş hattı gerektirmeden çalışabilmesidir. Bu özellikler, özellikle yeraltı madenciliğinde iş güvenliği açısından radar tabanlı çözümleri öne çıkarmaktadır (Sifferlinger, 2016).

LiDAR teknolojisi, özellikle otonom araçların navigasyonu ve madenlerde engel tespiti için kullanışlı olan yüksek çözünürlüklü, üç boyutlu uzamsal haritalama sağlar. LiDAR sistemleri, lazer atışları yaparak ve yansıyan ışığın uçuş süresini ölçerek çevrenin ayrıntılı nokta bulutlarını üretir (Peng vd., 2024).

LiDAR'ın ortamın doğru geometrik modellerini oluşturma yeteneğinden yararlanılarak insansız maden araçlarının engel tespiti ve takibi için üç boyutlu LiDAR tabanlı bir sistem geliştirilmiştir (Zhang vd., 2022). Yeraltı madenlerinde insansız kara araçlarının (UGV'ler) gerçek zamanlı hareket planlaması ve çarpışmadan kaçınması için LiDAR kullanılmış; sistem, dinamik engellerin üç boyutlu haritalanmasını ve tespitini sağlamıştır (Abdukodirov ve Benndorf, 2025). Derin yeraltı madenciliği için tasarlanmış otonom mobil inceleme robotlarında, navigasyon ve tehlike tanımlama amacıyla maden galerilerinin üç boyutlu modellerini oluşturmak için LiDAR kullanılmıştır (Abdukodirov ve Benndorf, 2025).

LiDAR'ın başlıca avantajı, yüksek uzamsal çözünürlüğü ve özellikle doğru konumlandırma ile yol planlaması gerektiren otonom sistemler için önemli olan çevrenin ayrıntılı modellerini üretebilmesi ve karanlık yeraltı ortamlarında navigasyon için en gelişmiş algılayıcılardan biri olmasıdır (Abdukodirov ve Benndorf, 2025; Konieczna-Fuławka vd., 2025). Ancak yeraltı madenlerinde yaygın olan toz, nem ve zayıf aydınlatma koşulları LiDAR performansını düşürebilir ve bu teknoloji genellikle UWB veya radardan daha yüksek güç tüketimi gerektirir (Imam vd., 2023).

Genellikle yapay zekâ (YZ) ve derin öğrenme algoritmalarıyla bütünleştirilen bilgisayar görüşü sistemleri, madencilik ortamının anlamsal olarak anlaşılmasını sağlayarak nesnelerin (araçlar, personel, engeller) sınıflandırılmasına ve çarpışma risklerinin tahmin edilmesine olanak tanır. Bu sistemler çoğunlukla evrimsel sinir ağları (CNN) veya diğer makine öğrenme modelleriyle birlikte kameralar (görünür ışık, kızılötesi veya termal) kullanır.

Imam vd. (2023), yeraltı madenlerinde yaya tespitine odaklanan, bilgisayar görüşüne dayalı çarpışma önleme sistemlerini ayrıntılı biçimde incelemiştir. Analizleri, aydınlatma koşulları yeterli olduğunda bilgisayar

görüşü sistemlerinin kazaları azaltmada etkili olduğunu, ancak performansın algılayıcıların yerleştirilmesi, aydınlatma kalitesi ve tıkanıklıklardan büyük ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Fisher vd. (2017) ise yeraltı madenleri için geliştirilen patentli bir çarpışma önleme sisteminde, bilgisayar görüşünü varlık takibi ve hareket algılama ile birleştirerek çarpışma tehditlerini tespit etmek ve bunlara tepki vermek amacıyla görüntü verilerini gerçek zamanlı olarak işlemiştir.

Bu incelemeler sonucunda belirlenen en gelişmiş uygulama, Chauhya vd. (2024) tarafından geliştirilen, V2X, GNSS, radar ve kamera tabanlı akıllı sistemdir. Sisli açık ocak koşullarında V2X, GNSS, radar ve kızılötesi kamera verileriyle birleştirildiğinde %90 tespit doğruluğu elde edilmiştir. Algılayıcı kaynaşımı yaklaşımı, düşük görüş koşullarında bilgisayarlı görüş sınırlamalarının, tamamlayıcı algılama yöntemleriyle aşılabileceğini göstermiştir. Sistem, Araçtan Araca (V2V), Araçtan Altyapıya (V2I) ve Araçtan Yayaya (V2P) protokollerini içeren V2X iletişimiyle, tamamen algılayıcı tabanlı çarpışma önleme sistemlerinden, araçların ve altyapının konum, hız ve niyet bilgilerini aktif olarak paylaştığı işbirlikçi farkındalık sistemlerine doğru bir dönüşümü temsil etmektedir. Ayrıca, ağır maden makineleri için geliştirdikleri akıllı sistemlerde durumsal farkındalığı görüş hattının ötesine genişletmek amacıyla V2X iletişimini GNSS, radar ve kameralarla birleştirmişlerdir. Sisli koşullarda yapılan saha testlerinde, V2X desteği etkili görüş mesafesini yaklaşık 30 metreden (yalnızca kamera) 200 metreye çıkararak daha erken çarpışma uyarıları ve uyarlanabilir hız kontrolü sağlamıştır.

Sabniveesu vd. (2015), yerüstü madenlerinde zamanında yakınlık uyarısı ve çarpışma önleme sorunlarını gidermek için kullanımı kolay, geçici modda çalışan bir kablosuz iletişim teknolojisinin kullanımını ve ayrıca madenlerde uzun vadeli araç trafiği analizine yönelik bulut tabanlı bir kayıt çerçevesinin tasarımını inceleyen bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, uzun menzilli uyarılar (10-100 m) için GPS ve WiFi (IEEE 802.11a/b/p) telsizleri; engelleri ve araçları çok daha küçük, kısa menzilli ve bölge tabanlı tespit (<10 m) için ise IEEE 802.15.4 telsizleri kullanılarak yerüstü madenlerinde yakınlık uyarısı için kablosuz ad hoc ağların uygulanabilirliği araştırılmıştır.

V2X sistemleri, görüş hattı dışı farkındalık ve niyetin (örneğin planlanan manevralar) iletilmesi avantajını sağlar; ancak ağ etkilerinin elde edilebilmesi için yaygın dağıtım ve standartlaştırılmış protokollere ihtiyaç duyar (Chauhya vd., 2024). V2X sistemleri ayrıca, yeraltı ortamlarında sürdürülmesi güç olan güvenilir kablosuz iletişim altyapısına bağlıdır.

Tek bir algılama teknolojisiyle tüm çarpışma senaryolarını çözmek mümkün değildir. Bu nedenle son araştırmalar, farklı teknolojileri bir araya getiren algılayıcı kaynaşımı mimarilerine yönelmiştir. Çeşitli algılayıcılardan gelen verileri birleştirerek bu sistemler algılama yeteneklerini artırabilir, yanlış alarmları azaltabilir ve çalışma alanlarını genişletebilir.

Damperli kamyonların geniş kör noktaları ve yoğun çalışma koşullarında artan çarpışma riskini azaltmak için bir sistem geliştirilmiştir. Araç çevresine yerleştirilen dört lazer radar (ön sol, ön orta, ön sağ ve arka), geniş açılı siyah-beyaz ve renkli kameralardan oluşan kamera grubu, hız algılayıcıları ve yön değişim açısı algılayıcıları aracılığıyla çevre sürekli izlenir. Bu algılayıcılardan gelen veriler araç içindeki bilgisayar terminalinde işlenerek 360° kapsama alanına sahip 3D nokta bulutu oluşturulur; kamera görüntüleriyle birleştirilerek engellerin konturları çıkarılır ve hız-yön tahminleri yapılır. Sistem, engellerin ve aracın gelecekteki rotalarını karşılaştırarak çarpışma olasılığını öngörür; risk algılandığında sürücüyeye görsel ve sesli uyarılar verir. Böylece 150 metreye kadar engeller tahmin edilebilir, en küçük 100 mm boyutundaki engeller algılanabilir ve araç çevresinde %98'den fazla kapsama sağlanır. Geliştirilen sistem, ek cihaz gerektirmeden yüksek güvenlik sunar, lazer radar ve kamera sistemlerinin maliyetli olması ve çevresel parazitlere duyarlılığı dezavantajlar arasında yer almaktadır (Zhang vd., 2020). Diğer taraftan V2X, GNSS, radar ve CNN tabanlı kamera işlemeyi birleştiren son teknoloji algılayıcı kaynaşımı sistemi geliştirilmiştir. Bu birleşim, özellikle sisli koşullarda faydalı olan artırılmış gerçeklik ekranları ve uyarlanabilir araç kontrolüne olanak sağlamıştır (Chaulya vd., 2024). Sifferlinger ise gelecekteki yakınlık algılama sistemlerinin, bireysel teknolojilerin eksikliklerini gidermek için radar, uçuş süresi algılayıcıları ve optik/kızılötesi kameraları birleştireceğini öne sürmüştür (Sifferlinger, 2016).

Algılayıcı kaynaşımının en belirgin avantajı sağlamlıktır. Tek bir algılayıcı türü yetersiz kaldığında (örneğin sisli ortamlarda kameralar ya da sinyalin kirlendiği alanlarda UWB), diğer algılayıcılar algılamayı güçlü biçimde sürdürebilir (Liu vd., 2017; Kianfar vd. 2020; Qian, 2024). Ancak bu kaynaşım sistemlerinin daha karmaşık olmaları, gelişmiş veri bütünleştirme algoritmaları gerektirmeleri ve genellikle daha yüksek maliyet ile güç tüketimine sahip olmaları gibi kendine özgü zorlukları da vardır (Kianfar vd. 2020; Imam vd., 2023; Qin vd., 2025).

2.3. Maden Ortamına Özgü Uygulamalar

Çarpışma önleme sistemleri söz konusu olduğunda, performans ve tasarım gereksinimleri yeraltı ve açık maden ocakları arasında önemli farklılıklar gösterebilir. Bu bölümde, teknolojinin nasıl uygulandığı ve her ortamın gerektirdiği özgün performans özellikleri ele alınacaktır.

Yeraltı madenciliği uygulamaları: Yeraltı madenciliği, çarpışma önleme sistemleri için en zorlu koşulları sunar. GPS sinyalinin kesilmesi, dar alanlar, yetersiz aydınlatma, yüksek nem, toz birikimi ve karmaşık üç boyutlu yerleşim düzenleri süreci zorlaştırır. Araştırmalar, UWB tabanlı sistemlerin GPS'e bağlı kalmadan doğru konumlandırma sağlayabildiği için yeraltı uygulamaları için en uygun seçenek olduğunu göstermektedir.

Sürekli kazı makineleri, yeraltı kömür madenciliğinde en yüksek riskli çarpışma senaryoları arasında yer alır. Bu büyük makineler genellikle personelle yakın temas hâlinde çalışır ve bu durum tehlikelidir. Ciddi yaralanmalara veya ölümlere yol açabilecek bu makinelerden kaynaklanan kazaları önlemek amacıyla, etraflarında akıllı yakınlık algılama bölgelerinin nasıl tasarlanacağı incelenmiştir. Çalışma alanlarında yakınlık algılama sistemi bölgelerinin doğru yapılandırılmasıyla, geleneksel bir sisteme eşdeğer koruma sağlanmasının mümkün olduğu belirtilmiştir (Bissert vd., 2016). Başka bir çalışmada ise, sürekli kazı makineleri için yakınlık algılama sistemlerinin; mekikler, kömür taşıyıcıları, kepçeler, yükleme makineleri ve tavan saplama makineleri dâhil çeşitli ekipmanla meydana gelebilecek çarpışmalara karşı işçileri koruması gerektiği vurgulanmıştır. Özellikle radar, uçuş süresi ve kamera tabanlı sistemlerin gelecekte daha güvenilir çözümler sunacağı, çünkü bu teknolojilerin kişiyi üzerinde etiket olmadan da algılayabildiği ifade edilmiştir. Ancak yeraltı koşullarında toz, nem ve metal parazitleri nedeniyle bu sistemlerin özel uyarlamalara ihtiyaç duyduğu da vurgulanmıştır (Sifferlinger, 2016). Bu sistemler, elektromanyetik alan ölçümlerini RFID iletişimiyle birlikte kullanarak, bir kişi tehlikeli bir alana girdiğinde makineleri otomatik olarak kapatan algılama bölgeleri oluşturur.

2015 yılında MSHA, sürekli kazı makinelerinde yakınlık algılama sistemlerini zorunlu kılan ve hem yeni hem de mevcut makineler için belirli uyumluluk süreleri öngören nihai bir kural yayımlamıştır. Ancak mevcut eğitim ve güvenlik kurallarının bu kazaları önlemede yetersiz kaldığı ifade edilmiştir. Bu nedenle ABD, Güney Afrika ve diğer ülkelerde hızla yaygınlaşan yakınlık algılama sistemleri incelenmiş; bu sistemlerin kazaları önlemede önemli bir adım olduğu, ancak fonksiyonel güvenlik açısından hâlâ eksiklikler barındırdığı belirtilmiştir. Ayrıca bu sistemlerin ciddi kazaları azaltmaya yardımcı olmasına rağmen tespit edilemeyen arızalar ve sık sık yanlış alarmlar gibi sorunlarla karşılaştığı, bunun da operatörlerin sistemleri devre dışı bırakmasına yol açabileceği belirtilmiştir. Bu nedenle gelecekte radar, uçuş süresi ve kamera tabanlı çözümlerin daha güvenilir olacağı, çünkü bu teknolojilerin kişileri üzerinde etiket taşımalarına gerek kalmadan algılayabildiği ifade edilmiştir. Ancak yeraltı koşullarında toz, nem ve metal parazitleri nedeniyle bu sistemlerin özel uyarlamalara ihtiyaç duyduğu da belirtilmiştir (Sifferlinger, 2016).

Güvenliğin en üst düzeyde önem taşıdığı yeraltı ocaklarında, raylı sistem gerektirmeyen ulaşım araçları ve raylı lokomotifler için tasarlanan sistemler, dar ve loş tünellerde hem araçları hem de insanları tespit edebilen, etkili çarpışma önleme mekanizmalarına ihtiyaç duyar. Metalik ve metalik olmayan yeraltı madenleri için UWB tabanlı özel bir sistem geliştirilmiştir. Bu sistem, 10 cm konumlandırma doğruluğuna sahiptir ve gece sürüşlerinde görüş mesafesinin kısıtlı olduğu kıvrımlı galerilerde kullanılmaya başlandığından beri kişisel yaralanma olaylarının önemli ölçüde azalmasını sağlamıştır. Sistem, araç köşelerine yerleştirilen iletim cihazları ile işçilerin

taşıdığı etiket cihazları arasındaki mesafeyi ölçerek tehlikeli yaklaşımları algılar ve sürücü ile işiçi sesli ve görsel uyarılarla uyarır (Liu vd., 2017).

Yeraltı kömür madenlerinde, ekipmanlar arasında veya çalışan personel ile ekipman arasında meydana gelen çarpışma gibi güvenlik kazalarına yönelik olarak, işletmedeki mevcut aktif güvenlik teknolojilerinin artı ve eksi yönleri analiz edildikten sonra UWB tabanlı, yüksek hassasiyetli bir mesafe ölçüm sistemi tasarlanmıştır. Sistem, saat farkının etkisini azaltarak mesafe ölçüm doğruluğunu artırır ve yanlış alarm oranını düşüren Simetrik Çift Taraflı İki Yönlü Mesafe Ölçümü algoritmasını kullanmaktadır. Cihaz, personel izinsiz giriş alarmı, araç yaklaşma alarmı ve aracın otomatik olarak durdurulması gibi işlevlere sahiptir. Sonuçlar, sistemin 20 m mesafe içinde maksimum mesafe ölçüm hatasının $\pm 0,13$ m olduğunu, bunun da araç aktif güvenlik çarpışma önleme gereksinimlerini tam olarak karşıladığını göstermektedir. İzinsiz giriş önleme ve yaklaşma alarm cihazlarının araştırılması ve uygulanması sayesinde, araçlarla personel arasındaki ve araçlar arasındaki çarpışma kazaları etkili bir şekilde önlenmektedir. Böylece yeraltı personelinin güvenliği artırılmakta ve yeraltı yardımcı ulaşımının verimliliği iyileştirilmektedir (Du, 2022).

Cai vd., IVS-179 radar algılayıcılarını kullanarak özellikle ocak lokomotifleri için milimetrik dalga radar tabanlı bir çarpışma önleyici uyarı sistemi geliştirmiştir (Cai vd., 2018). Bu sistem, engellere olan mesafeyi gerçek zamanlı olarak gösterir ve kademeli uyarılar sunar: 100 metrede sesli ve ışıklı uyarı devreye girer, 50 metreye ulaşıldığında ise otomatik frenleme yapılır. Simülasyon testleri, en uygun koşullarda 100 ve 160 metre mesafelerdeki birden fazla hedefin doğru şekilde takip edilebildiğini ortaya koymuştur.

Otonom ve Denetim Araçları: Yeraltı madenlerinde otonom araçların ve denetim robotlarının yaygınlaşması, insan müdahalesi olmadan güvenli navigasyon sağlayan gelişmiş çarpışma önleme yeteneklerini zorunlu kılmaktadır. Yeraltı kömür madenlerindeki iş güvenliğini artırmaya yönelik otonom denetim dronları için ultra geniş bantlı bir radar çözümü sunulmuş, sistemin yüksek kömür tozu ve nem içeren ortamlardaki performansı doğrulanmıştır. Çalışmada, UWB radarın bu koşullarda daha güvenilir algılama sağladığı ve dronun hem engel algılama/çarpışmadan kaçınma hem de galeri duvarlarını haritalama görevlerini yerine getirebildiği gösterilmiştir. Böylece dronun, işçilerin riskli bölgelerde geçirdiği süreyi azaltarak iş güvenliğini artırdığı ve kömür ocaklarında denetim süreçlerini daha verimli hale getirdiği ifade edilmiştir (Shahmoradi vd., 2020). Konieczna-Fuławka vd. (2025), derin yeraltı madencilikine yönelik otonom mobil denetim robotlarını inceledikleri çalışmalarında derin pekiştirmeli öğrenme tabanlı yerel engel önleme, akustik tabanlı algılama ve 3B maden modelleme amaçlı LiDAR bütünleşmesine odaklanmıştır. Benzer şekilde Abdukodirov ve Benndorf (2025), yeraltı ortamlarındaki insansız kara araçları için gerçek zamanlı 3B haritalama ve çarpışma önleme amacıyla LiDAR verilerinden

yararlanan yol planlama algoritmaları geliştirmiştir. Yeraltı ortamları dar, karmaşık ve tehlikeli olduğundan güvenli ve verimli operasyonlar için gelişmiş yol planlama stratejilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmada hem küresel hem de yerel yol planlama yöntemleri ele alınmış; grafik tabanlı algoritmalar (Dijkstra ve Karınca Kolonisi Optimizasyonu), rnekleme tabanlı yaklaşımlar (RRT), doğa esinli yöntemler ve pekiştirmeli öğrenme stratejileri karşılaştırılmıştır. Ayrıca algılayıcı bütünleşmesi ile Robot alışma Sistemi (ROS) altyapısının bu sistemlerdeki kritik rolü vurgulanmıştır.

Bu otonom sistemlerin, personelin tehlikeli ortamlara maruziyetini azaltma potansiyeli sayesinde yeraltı maden güvenliğinde kritik bir rol oynadığı belirtilmektedir. Ancak bu teknolojilerin etkinliğinin, operatör kontrollü ekipmanlara kıyasla daha yüksek düzeyde algılama desteği ve hata emniyetli mekanizmaların yapılandırılmasına bağlı olduğu ifade edilmektedir (Konieczna-Fuławka vd., 2025).

Yerüstü madencililiği uygulamaları: Son yıllarda açık maden işletmelerinde çarpışma sorununun önemi göz önüne alındığında araçlar için yakınlık uyarı teknolojileri üzerine kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Bu teknolojilerin en önemlileri aşağıda verilmiştir (Sabniveesu vd., 2015).

Ultrasonik algılayıcılar: Bu cihazlar genellikle 40-250 kHz frekans aralığında çalışır ve kısa süreli ultrasonik dalga atışları yayar; bu dalgalar sert bir yüzeye arpıktıklarında geri yansır (Massa, 1999; Sabniveesu vd., 2015). Ardından yankı süresi, engellere olan mesafeyi tahmin etmek için kullanılır. Ancak ultrasonik sistemler doğrudan görüş hattı gerektirir ve yol üzerindeki herhangi bir nesne yakınlık alarmını tetikler. Bu durum yanlış alarmlara yol açabilir. Ayrıca bu cihazların menzili genellikle çok kısadır (<10 m). Sonuç olarak bu algılayıcılar çoğunlukla normal araçlarda park yardımı için kullanılır ancak büyük yerüstü maden araçlarında yakınlık uyarısı için genellikle uygun değildir (Sabniveesu vd., 2015).

Atışlı radar ve LiDAR tabanlı sistemler: Radar tabanlı yakınlık uyarı sistemi (Ruff, 2006) ve LIDAR'lar (Guenther vd., 2010), yakınlık uyarısında kullanılan iki umut vadeden teknolojidir. Kavramsal olarak ultrason yankılanmasına benzer şekilde çalışırlar, ancak daha geniş menzile sahiptirler ve mesafe ölçümünde çok daha hassastırlar. Bununla birlikte, yol üzerindeki herhangi bir engelin algılanmasıyla tetiklenebildikleri için yanlış alarm sorunlarıyla karşı karşıya kalırlar. Örneğin büyük kamyonlarda, lastikler ile büyük toprak ve kaya yığınları gibi engeller, algılama yeteneklerini sınırlandırabilir. Algılamada eksiklik yaşanma ihtimali de vardır; örneğin personel, bu sistemlerin görüş alanının tam altından geçtiğinde algılanmayabilir (Ruff, 2006; Walker, 2026). Ayrıca bu sistemler genellikle pahalıdır ve zorlu koşullarda çalışan maden kamyonlarına monte edilmeleri oldukça güçtür (Sabniveesu vd., 2015).

Kamera tabanlı sistemler: Açık maden işletmelerinde kullanılan büyük iş makinelerinin kr noktalarından kaynaklanan çarpışma risklerini azaltmak amacıyla nesne tanıma tabanlı bilgisayarlı görü teknolojileri kullanılmaktadır.

Bu alandaki gelişmeler, araçlara bütünleşik kamera tabanlı çarpışma tespit sistemlerinin yaygınlaşmasını sağlamış; GPS destekli ve stereo kamera tabanlı sistemler bu kapsamda öne çıkan çözümler arasında yer almıştır (Ruff ve Steele, 2004). Ancak kamera tabanlı sistemler yeterli aydınlatma gerektirir ve sis, toz veya lenslerde kir bulunduğunda iyi performans göstermez. Ayrıca birden fazla kamera kullanıldığında, engelleri doğru şekilde işaretlemek ve terminalde doğru görüntüyü sunmak için güvenilir görüntü tanıma algoritmalarına ihtiyaç duyulur; sürücünün sürekli olarak birden fazla ekran arasında geçiş yapması mümkün değildir. Bu tür güvenilir sistemleri tasarlamak zordur. Bu nedenle kameralar genellikle diğer yakınlık algılama teknolojilerini tamamlayıcı sistemler olarak kullanılır; örneğin, belirli bir yönde radar tarafından bir engel algılanırsa, o taraftaki kamera görüntüsü terminalde aktarılır (Sabniveesu vd., 2015).

RFID ve elektronik etiket tabanlı sistemler: Bu sistemler, araçlara ve personele yerleştirilen cihazların periyodik olarak elektromanyetik dalgalar yayması prensibiyle çalışır. Bu cihazlar, diğer cihazlar tarafından iletilen sinyalleri de algılayabilir ve cihazlar yeterince yakın olduğunda sinyal gücü, bir yakınlık alarmını tetiklemek için gerekli düzeye ulaşır. Bu sistemler kolay kurulabilir, görüş hattına bağlı değildir ve genellikle 12-18 m menzile sahiptir. Ancak mevcut sistemler çoğunlukla yalnızca yakın çevrede bulunan diğer araçların veya personelin varlığını tespit etmek üzere tasarlanmıştır; bir konumun veya yönün tam olarak belirlenmesini sağlamaz (Marks ve Teizer, 2012). Öte yandan, 2,4 GHz frekansında çalışan IEEE 802.15.4 telsiz standardını kullanan RF tabanlı bir yakınlık uyarı sistemi geliştirilmiştir. Kamyona yerleştirilmiş birden fazla RF cihazı, alınan telsiz sinyal gücü göstergesine dayanarak aracın çevresindeki bir engeli doğru biçimde tespit edebilmektedir (Sabniveesu vd., 2015).

GPS tabanlı sistemler: GPS cihazları 3-4 m hassasiyetle konum tahmini yapabilir. Bu cihazlar, yaklaşan araçları tespit etmek ve çarpışmayı önlemek amacıyla kablosuz iletişimle birlikte giderek daha sık kullanılmaktadır. Daha uzak mesafelerde (>10 m) çarpışma tespiti için GPS tabanlı bir sistem kullanılarak bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, GPS sistemlerinin yakınlarda bir engel bulunduğunu tahmin edebilseler de bu engelin yönünü doğru belirleyebilecek kadar hassas olmadıkları belirtilmiştir. Bu nedenle daha yakın mesafeler için RF tabanlı bir sistem kullanılmıştır (Sabniveesu vd., 2015).

Açık maden işletmeleri, geniş operasyon alanları, yoğun araç trafiği ile sis, toz veya yağmur gibi değişken meteorolojik koşullar nedeniyle karmaşık bir yapı sergiler. Bu ortamlarda hem etiketli hem de etiketsiz engellerin uzun mesafelerden tespit edilmesi gerekliliği, çarpışma önleme sistemlerinin uzun menzilli algılama ve algılayıcı kaynaşımı teknolojilerine odaklanmasını zorunlu kılar.

Maden kamyonları, kısıtlı operatör görüş açısı ve tam yük altında 100 metreyi aşan duruş mesafeleri nedeniyle açık işletmelerde en yüksek riskli

mobil ekipman grubunu oluşturur. Hrica vd. tarafından yapılan literatür incelemesi, bu araçlarda temel koruma teknolojisi olarak radar tabanlı sistemler ile 360 derece kamera dizilimlerinin kullanıldığını göstermektedir (Hrica vd., 2022). Ruff, açık ocaklarda kullanılan ekipmanlardaki yakınlık uyarı sistemlerini değerlendirdiği çalışmasında radar tabanlı bir sistemin doğruluğunu ve kamyon çarpışmalarını önlemedeki güvenilirliğini analiz etmiştir (Ruff, 2007).

Mevcut çalışmalar arasında öne çıkan en gelişmiş sistemlerden biri, Chaulya vd. tarafından önerilen V2X, GNSS, radar ve kamera bileşenlerinden oluşan yapıdır (Chaulya vd., 2024). Sisli hava koşullarında adaptif kontrol sağlamak amacıyla geliştirilen bu algılayıcı kaynaşımı yaklaşımı, CNN tabanlı nesne tespitinde %90 doğruluk oranına ulaşmıştır. Sistem, yoğun siste kamera ile 30 metre olan kısıtlı görüş mesafesini V2X iletişimiyle 200 metreye çıkarmış, operatörlere artırılmış gerçeklik arayüzü sunmuş ve gerçek zamanlı görünürlük koşullarına göre hız denetimi yapmıştır.

Damperli kamyonlar ve benzeri ağır maden makineleri, büyük gövdeleri ve çok sayıda kör nokta nedeniyle kapsamlı çevresel denetime ihtiyaç duyar. Zhao vd., aracın farklı noktalarına yerleştirilen çoklu lazer radarları, kamera tabanlı nesne tanıma ve araç dinamiği algılayıcılarını birleştiren bir güvenlik sistemi geliştirmiştir. Bu kaynaşım yaklaşımı, araç çevresinde %98'den fazla kapsama sağlayarak kaza riskini önemli ölçüde azaltmıştır (Zhang vd., 2020).

Kablosuz ağ tabanlı yaklaşımlar, açık işletmelerin fiziksel yapısı sayesinde GPS ve uzun menzilli iletişim olanaklarından yararlanır. Sabniveesu vd. tarafından geliştirilen sistem, 10 ile 100 metre arasındaki uyarılar için GPS destekli ad hoc Wi-Fi (IEEE 802.11a/b/p) birimlerini, 10 metrenin altındaki yakınlık tespitleri için ise düşük güç tüketimli IEEE 802.15.4 telsizlerini kullanmaktadır (Sabniveesu vd., 2015). Bu çift katmanlı yapı, hem araçlar arası uzun mesafe güvenliğini hem de kısa mesafeli personel korumasını senkronize eder. Kablosuz ağların temel avantajı, yalnızca anlık mesafeye değil, öngörülen hareket yörüngelerine dayalı proaktif uyarılar üretebilmesidir. Ancak bu tür sistemlerin operasyonel başarısı doğrudan ocak sahasındaki kesintisiz GPS erişimine ve kablosuz ağ kapsamına bağlıdır.

2.4. Sistem Verimliliğinin Karşılaştırmalı Analizi

Bu bölümde literatürde yer alan nicel performans verileri sentezlenerek farklı çarpışma önleme teknolojilerinin verimliliği; konumlandırma hassasiyeti, algılama menzili, gecikme süresi, algılama doğruluğu ve kapsama alanı gibi temel parametreler üzerinden karşılaştırılmaktadır.

Konumlandırma hassasiyeti: çarpışma önleme sistemlerinde araçların, personelin ve çevredeki tehlikelerin konumlarının belirlenmesinde kritik bir parametredir. Literatür incelendiğinde kullanılan teknolojiye bağlı olarak bu hassasiyet değerlerinde belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir.

Yeraltı ortamlarında en yüksek konumlandırma hassasiyetini UWB sistemleri sağlamaktadır. Liu vd. (2017), geliştirdikleri UWB kablosuz algılayıcı ağında 10 cm hassasiyet bildirirken Kianfar vd. (2020), yeraltı madencilik faaliyetlerinde 10-30 cm arasında değişen hassasiyet değerleri elde etmiştir. Qian vd. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışma, UWB tabanlı sistemlerin 100 metrelik menzile içinde santimetre düzeyinde doğruluk sağlayabildiğini teyit etmektedir. Bu hassasiyet düzeyi, özellikle dar yeraltı galerilerinde otonom araç navigasyonu gibi düşük toleranslı uygulamalar için temel bir gerekliliktir.

Açık ocak işletmelerinde kullanılan GNSS genellikle metre düzeyinde hassasiyet sunmaktadır. Bu değer, uzun menzilli V2V çarpışma önleme sistemleri için yeterli olsa da, yeraltı madenleri gibi kısıtlı alanlarda sinyal engellenmesi, yol yayılımı ve görüş hattı olmaması (NLOS) sorunları nedeniyle hassas konumlandırma gereksinimlerini karşılamada yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar GNSS yerine UWB tabanlı bir iç mekân konumlandırma sistemi geliştirmiştir. GNSS'in yetersiz kaldığı bu ortamlarda, UWB'nin yüksek doğruluk, yol yayılımına direnç ve düşük güç tüketimi gibi avantajları sayesinde madencilikte güvenli ve otomatik operasyonlar için daha uygun bir çözüm sunduğu belirtilmektedir (Ziegler vd., 2023). Chaulya vd. (2024), toplam konumlandırma performansını iyileştirmek için GNSS verilerini farklı algılayıcılarla bütünleştiren bir yaklaşım önermiştir.

Radar ve LiDAR sistemleri, mutlak konum bilgisinden çok nesnelerin göreceli konumunu (mesafe ve açı) sağlamaktadır. Radar sistemleri engellere olan mesafeyi yüksek doğrulukla ölçebilirken, Cai vd. (2018) özellikle ocak lokomotifleri için milimetrik dalga radar sistemiyle 100 ve 160 metre mesafedeki hedeflerin tespit edilebildiğini göstermiştir. Geleceğin temel çözümleri arasında, LiDAR'ların kamera gibi diğer algılayıcılarla bütünleşik algılayıcı kaynaşımı yaklaşımları öne çıkmaktadır. LiDAR sistemleri yüksek mekânsal çözünürlükte üç boyutlu nokta bulutu üretir ve yerel konum tahmini yapabilir; ancak küresel koordinat sistemine bağlı mutlak konum verisi sağlamaz. Bu nedenle mühendislik, otonom sürüş ve madencilik uygulamalarında LiDAR, GNSS/RTK, INS veya önceden jeoreferanslandırılmış haritalarla birlikte kullanılarak bütünleştirilmektedir. Böylece LiDAR'ın yerel hassasiyetiyle GNSS/INS'in küresel referans gücü birleşerek güvenilir ve mutlak konumlama elde edilir (Abdelaziz ve El-Rabbany, 2022). Ayrıca LiDAR, yüksek doğrulukta üç boyutlu nokta bulutu üreterek çevrenin geometrik yapısını ortaya koyarken kameralar semantik bilgi ve görsel detay sağlar; radar ise hız ve mesafe ölçümünde yüksek dayanıklılık sunar (Qian vd., 2025).

Algılama mesafesi, bir çarpışma önleme sisteminin potansiyel tehditleri ne kadar erken tanımlayabildiğini belirleyerek durma mesafesi uzun olan ağır maden makineleri için kritik öneme sahip müdahale süresini doğrudan etkiler.

V2X destekli sistemler, mevcut teknolojiler arasında en geniş algılama mesafesini sunar. Chaulya vd., görüntü işleme algoritmalarıyla kamera görüntüsünün yoğun sis altında 30 metreden daha fazla net görüş sağlayabildiğini ve sisli hava koşullarında V2X iletişimiyle etkin görünürlüğü 200 metreye kadar yükseltebildiklerini belirtmiştir (Chaulya vd., 2024). Menzildeki bu artış, erken uyarı mekanizmalarına ve daha kademeli hız ayarlamalarına olanak tanıyarak operasyonel verimliliği ve güvenliği artırır.

Radar sistemleri ise çoğu madencilik faaliyeti için yeterli kabul edilen orta düzey algılama mesafesi sağlar. Cai vd. tarafından sunulan ocak lokomotifli düzeneğinde ilk uyarılar 100 metrede başlamakta, otomatik frenleme ise 50 metrede devreye girmektedir (Chai vd., 2018). Benzer şekilde Sabniveesu vd. tarafından geliştirilen kablosuz ağ yaklaşımı, 10-100 metre aralığındaki araçlar için zamanında uyarı sağlamıştır (Sabniveesu vd., 2015).

UWB ve yakınlık algılama sistemleri genellikle dar yeraltı alanları için optimize edilmiş kısa menzilli operasyonlarda tercih edilir. Qian vd., (2022), UWB sistemlerinin 100 metreye kadar olan mesafelerde en iyi performansı gösterdiğini belirtmiştir. Yeraltı madenciliğinde kullanılan mevcut manyetik alan tabanlı yakınlık algılama sistemleri işçinin makineye yakın olup olmadığını tespit edebilse de, tam konumunu doğru şekilde belirlemede yetersiz kalmaktadır (Li vd., 2012). Pasif RFID etiketleri, içlerinde güç kaynağı bulunmadığından tamamen dışarıdan gelen RF sinyaliyle çalışır. Bu etiketler genellikle yakın alan için 11 cm'den 10 metreye, fazlı dizi teknolojisiyle birleştirildiğinde ise 183 metreye kadar okuma mesafesi sağlar; anten tasarımı ve faz dizili sistemlerle bu menzile özel durumlarda artırılabilir. Avantajları düşük maliyet ve küçük boyut iken dezavantajları uzak mesafelerde sinyal zayıflaması ve doğruluk kaybıdır. Aktif RFID etiketleri ise dâhili bir batarya ile çalışır ve bu sayede yüzlerce metreye kadar menzile ulaşabilir. Güçlü sinyal iletimleri sayesinde nem, sıcaklık gibi RF açısından zorlu ortamlarda daha güvenilir iletişim sağlarlar. Ayrıca sıcaklık, gaz veya basınç gibi ek algılayıcılar eklenebilir. Ancak aktif etiketler daha büyük boyutlu ve maliyetlidir, pil ömürleri ise sınırlıdır. Çalışmada ayrıca yarı aktif etiketlerden de bahsedilmekte, bunların pasif etiketlere göre daha hassas, aktif etiketlere göre ise daha uzun pil ömrüne sahip olduğu belirtilmektedir (Khakshour vd., 2025).

LiDAR sistemlerinin algılama menzili sabit değildir; kullanılan algılayıcı tipine, lazer dalga boyuna, hedef yüzeyinin yansıtıcılığına ve çevresel koşullara bağlı olarak değişir. Kısa menzilli LiDAR algılayıcıları genellikle yaklaşık 50 metreye kadar algılama yaparken, ticari otomotiv LiDAR üniteleri çoğunlukla 150-300 metre arasında menzile ulaşır. Daha güçlü lazerlerle donatılmış hava haritalama sistemleri ise 1000 metreden daha yüksek irtifalardan veri toplayabilir. Özel sistemlerde bu menzile birkaç kilometreye kadar çıkabilmektedir. Dolayısıyla LiDAR'ın algılama kapasitesi, uygulama amacına ve teknik yapılandırmaya göre yakın mesafeden kilometrelerce uzağa kadar geniş bir aralıkta değişebilir (ScienceInsights,

2026). Bununla birlikte, bu sistemlerin performansı toz ve nem gibi çevresel koşullardan önemli ölçüde etkilenir (Imam vd., 2023).

Gecikme ve tepki süresi: sistem gecikmesi, bir tehdidin algılanması ile uyarı veya müdahale mekanizmasının devreye girmesi arasında geçen süre olarak tanımlanır ve çarpışma önleme sistemlerinin etkinliği açısından belirleyici bir faktördür. Maden sahalarında 10-50 km/sa hız aralığında hareket eden araçlar, kısa süreli gecikmelerde bile birkaç metre yol alabilmektedir. Bu durum, güvenli operasyon için saniyenin altında tepki sürelerini zorunlu kılar.

UWB teknolojisiyle çalışan sistemler, çok düşük gecikme değerlerine ulaşmaktadır. Qian vd., UWB tabanlı çarpışma önleme sistemlerinde uçtan uca gecikmenin birkaç nanosaniye düzeyine kadar düşebileceğini bildirmiştir (Qian vd., 2022). Bu özellik, gerçek zamanlı uyarıların ve otonom müdahalelerin uygulanmasını mümkün kılar.

Literatürdeki çeşitli gerçek zamanlı veri işleme sistemleri de benzer performans özellikleri sergilemektedir. Fisher vd. tarafından geliştirilen bilgisayarlı görü sistemi, görüntüleme ve işleme süreçlerini eşzamanlı yürütmektedir (Fisher vd., 2017). Chaulya vd., (2024), algılayıcı kaynaşımına dayalı sistemlerinde CNN tabanlı nesne tespiti ve artırılmış gerçeklik arayüzlerini gerçek zamanlı olarak sunmuştur. Cai vd. ise geliştirdikleri radar sistemiyle anlık mesafe ölçümleri gerçekleştirmiş ve tanımlanan eşik değerler aşıldığında gecikmesiz alarm tetiklemesi sağlamıştır (Chai vd., 2018).

Mevcut çalışmaların önemli bir kısmında gecikme sürelerine ilişkin ayrıntılı sayısal verilerin sunulmaması, performans karakterizasyonu açısından bir literatür boşluğuna işaret etmektedir. Bununla birlikte, çalışmalarda “gerçek zamanlı” işleme kapasitesine yapılan sürekli vurgu, modern sistemlerin genellikle on ila yüzlerce milisaniye aralığında gecikme değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Bu süreler, ağır maden makinelerinin düşük operasyonel ve seyir hızları dikkate alındığında yeterli kabul edilebilir.

Tespit doğruluğu ve yanlış alarm oranları, sistemin güvenilirliğini ve operatörler tarafından benimsenmesini belirleyen temel performans göstergeleridir.

Algılayıcı kaynaşımı üzerine yapılan çalışmalar, bu sistemlerin en yüksek tespit doğruluğuna ulaştığını göstermektedir. Chaulya vd., sisli açık ocak koşullarında V2X, GNSS, radar ve kamera verilerinin entegrasyonu ile geliştirilen CNN tabanlı nesne tespit modeli için %90 doğruluk bildirmiştir (Chaulya vd., 2024). Bu başarı, algılayıcıların birbirini tamamlayan özelliklerine dayanmaktadır; radar, kameraların algılayamadığı etiketsiz engelleri tespit ederken kameralar, radarın sağlayamadığı anlamsal sınıflandırma bilgisini sunmaktadır.

Bilgisayarlı görü sistemleri ise çevresel değişkenlere karşı daha hassastır. Imam vd.’nin çalışması, görüntü tabanlı yaya tespit etkinliğinin aydınlatma, algılayıcı konumlandırması ve görüş kısıtlamaları gibi

unsurlardan doğrudan etkilendiğini vurgulamaktadır (Imam vd., 2023). Özellikle yetersiz ışık alan yeraltı bölgelerinde veya toz ve sisin yoğun olduğu ortamlarda sistem performansı önemli ölçüde azalmaktadır.

Yanlış alarm oranları, mevcut tüm teknolojiler için temel bir sorun olmaya devam etmektedir (Ruff, 2006; Sabniveesu vd., 2015; Sifferlinger, 2016; Walker, 2026). Sifferlinger (2016), yakınlık tespit sistemlerindeki yüksek yanlış alarm frekansının operatörlerin sistemi kapatmasına yol açtığını ve bunun güvenlik protokollerini işlevsiz hale getirdiğini belirtmektedir. İlgili çalışmada, emniyet mesafesinin bir etiketten 50 cm olarak belirlendiği senaryoda yerde yatan bir kişinin zarar görme olasılığına değinilmekte ve bu durum, hassasiyet ile yanlış alarm oranları arasındaki dengenin bir örneği olarak sunulmaktadır. Ancak literatürde sayısal yanlış alarm verilerine nadiren yer verilmesi, sistemlerin tam olarak karakterize edilmesi önünde önemli bir bilimsel boşluk oluşturmaktadır.

Kapsama alanı ve operasyonel sınırlar: Kapsama alanı, korunan ekipman çevresindeki çarpışma tespitinin mekânsal genişliği ve bütünlüğünü ifade ederken; operasyonel sınırlar, bir sistemin etkinliğini sürdürebildiği çevresel koşulların kapsamını tanımlar.

Çok algılayıcı sistemler, en geniş kapsama alanını sağlar. Zhang vd. tarafından geliştirilen ve birden fazla lazer radar ile kamera kullanan kamyon çarpışma önleme sistemi, araç gövdesinde %98 veya daha yüksek kapsama oranına ulaşmıştır (Zhang vd., 2020). Bu düzeydeki kapsama, kör noktaları en aza indirerek yaklaşan tehlikelerin, hangi yönden gelirse gelsin tespit edilmesini sağlar.

Çevresel dayanıklılık seviyeleri, kullanılan teknolojiye bağlı olarak değişmektedir. UWB ve radar sistemleri, sis, toz ve karanlık gibi düşük görünürlük koşullarında, kamera tabanlı sistemlere kıyasla daha iyi performans göstermektedir (Liu vd., 2017; Kianfar vd., 2020; Qian, 2024). Chaulya vd., yalnızca kameraya dayalı sistemlerin başarısız olduğu sisli hava koşullarında işlevselliğini koruyan bir sistem tasarlamıştır (Chaulya vd., 2024). Cunha ve Youcef-Toumi (2018), ise UWB radarın performansını, toz ve nem oranının yüksek olduğu yeraltı kömür madenlerinde doğrulamıştır.

Sistemlerin operasyonel kısıtlamaları teknolojiye özgüdür. LiDAR performansı toz, nem ve aydınlatma koşullarından etkilenirken (Imam vd., 2023), bilgisayarlı görü yöntemleri yeterli aydınlatma gerektirir ve fiziksel engellere karşı hassastır (Ruff, 2006; Imam vd., 2023; Walker, 2026). UWB kullanımı, sabit düğüm noktalarından oluşan bir altyapı kurulmasını zorunlu kılar ve karmaşık geometrilerde çok yönlü girişim sorunlarıyla karşılaşılabilir (Kianfar vd., 2020; Imam vd., 2023; Qin vd., 2025). Yeraltı madencilik ortamlarında 4D mmWave dalga radarın performansı, çoklu yol yansımaları, metal yapı girişimleri ve karmaşık arazi nedeniyle ortaya çıkan hayalet gürültü sorunlarıyla ciddi biçimde kısıtlanmakta; bu da hedef tespiti, haritalama ve otonom navigasyon görevleri için önemli zorluklar yaratmaktadır (Liu vd., 2025).

2.5. Mevzuat Uyumluluğu ve Güvenlik Standartları

Bu literatür taramasında ulaşılan temel bulgulardan biri, incelenen çalışmaların çoğunda sistemin teknik yeteneklerine odaklanması, ancak madenlerde güvenlik standartları ve yönetmeliklerle uyumun göz ardı edilmesidir.

Mevzuattaki mevcut düzenlemeler: madencilik sektörü uluslararası, ulusal ve bölgesel düzeylerde birbirleriyle örtüşen çok sayıda düzenleyici çerçeve altında faaliyet göstermektedir. Çarpışma önleme sistemleri bağlamında tespit edilen standartlar ve yönetmelikler şunlardır:

MSHA yönetmelikleri: İncelenen temel çalışmalar arasında yalnızca Sifferlinger mevzuata uyumu kapsamlı biçimde ele almıştır. Bu çalışmada, MSHA'nın sürekli kazı makineleri için Yakınlık Tespit Sistemlerine ilişkin ve 16 Mart 2015'te yürürlüğe giren nihai kuralı ile bu kuralın yeni ve mevcut makineler için öngördüğü uyum tarihlerine dikkat çekilmiştir (Sifferlinger, 2016). MSHA, yeraltı kömür madenlerinde patlamaya dayanıklılık (Ex-proof) sertifikasına sahip imalatçıları içeren ve ABD yeraltı kömür madenleri için asgari performans gerekliliklerini belirleyen onaylı bir liste yayımlamıştır.

ISO 21815 (Örtükazı makineleri - çarpışma uyarı ve önleme): bu uluslararası standardın madencilikte çarpışma önleme sistemleriyle doğrudan ilişkili olmasına rağmen, incelenen makalelerde ISO 21815 uyumluluğuna veya test protokollerine ilişkin herhangi bir veri bulunmamıştır. Bu durum, literatürde önemli bir eksiklik olduğunu ortaya koymaktadır.

Avrupa standartları: Sifferlinger, yeraltı maden makinelerinin güvenlik gerekliliklerini karşılamak üzere Avrupa'da EN 12111:2014 ve EN 16228-2:2014 standartlarının oluşturulduğunu belirtmiştir (Sifferlinger, 2016). Ayrıca EN 62061:2013 uyarınca fonksiyonel güvenlik ele alınmış olsa da, bu standartlara yönelik özel uyumluluk testleri ve belgelendirme süreçleri makalelerde ayrıntılı biçimde açıklanmamıştır.

Güney Afrika yönetmelikleri: Güney Afrika Maden Kaynakları Bakanlığının tekerlekli mobil makineler için yayımladığı yönetmeliklere atıfta bulunulmuş, ancak özgül gereklilikler ve uygulama mekanizmaları ayrıntılı biçimde incelenmemiştir (Sifferlinger, 2016).

ICMM kılavuzları: ICMM, küresel ölçekte tanınırlığa ve madenlerdeki güvenlik uygulamaları üzerinde etkiye sahiptir. Buna rağmen, incelenen çalışmalarda bu kılavuzlara veya uyum çerçevelerine atıfta bulunulmamıştır.

EMESRT: EMESRT gerekliliklerine de literatürde yer verilmemiştir.

Standartlarla ilgili araştırmalar: Bickson vd. çarpışma uyarı ve önleme sistemlerinin (CXS) performans değerlendirmesi ve doğrulanmasına yönelik yöntemleri incelemiş ve test süreçlerine ilişkin dört standart tanımlamıştır. Çalışmada radar, LiDAR, RF, GNSS ve kamera tabanlı teknolojiler ele alınmış; statik ve dinamik testler, senaryo temelli saha denemeleri ve bilgisayar destekli simülasyonlar gibi yöntemlerle sistemlerin doğrulanması gerektiği belirtilmiştir (Bickson vd., 2022). Ancak bu standartların adları

açıkça belirtilmemiş ve çalışma daha çok yerüstü ocaklarında kullanılan kamyonlara odaklanmıştır. Ruff tarafından 2007’de yapılan bir değerlendirmede radar tabanlı sistemler incelenmiş, ancak düzenleyici uyumluluğun çalışmanın kapsamı dışında bırakıldığı ifade edilmiştir (Ruff, 2007). Teknoloji mevzuat güncellemelerinden daha hızlı geliştiğinden, araştırmalar yasal uyumdan çok teknik performansa öncelik vermek durumundadır.

Araştırılan literatür, teknik performans ölçütleri (konumlandırma doğruluğu, algılama mesafesi, gecikme süresi) ile bu ölçütlerin mevzuattaki koşulları karşılayıp karşılamadığı arasında bir boşluk olduğunu ortaya koymuştur. Bu durumun muhtemel nedenleri şunlardır: Akademik araştırmalar teknik yeniliğe odaklanırken mevzuata uyumluluk genellikle ticari ürün geliştirme aşamasında ele alınmakta ve bu süreçler akademik yayınlara nadiren yansımaktadır. Madenlerde güvenlik yönetmelikleri bölgelere göre (ABD, Avrupa, Avustralya, Güney Afrika, Çin) farklılık gösterdiğinden, araştırmacıların tüm çerçeveleri aynı çalışmada ele alması güçleşmektedir. Önemli bir husus da imalatçıların uyumluluk testleri ve sertifikasyon verilerini ticari sır kapsamında değerlendirmesidir.

3. TARTIŞMA

Teknolojik olgunluk: Derlenen literatür, madencilikte çarpışma önleme teknolojilerinin önemli bir olgunluk seviyesine ulaştığını ve hem yeraltı hem de yerüstü uygulamalar için kanıtlanmış çeşitli yaklaşımların mevcut olduğunu göstermektedir. UWB tabanlı sistemler araştırma ve ilk örnek aşamasından operasyonel uygulama evresine geçmiş, personel yaralanmalı kazalardaki azalmalarla güvenlik üzerindeki olumlu etkileri belgelenmiştir (Liu vd., 2017; Kianfar vd., 2020; Qian, 2024). Algılayıcı kaynaşımı sistemleri, zorlu koşullarda sergilediği saha performansı ile sisli açık ocak operasyonlarında %90 tespit doğruluğuna ulaşmıştır (Chaulya vd., 2024). Sürekli kazı makineleri için geliştirilen yakınlık tespit sistemleri ise MSHA tarafından zorunlu tutulmuş ve ABD’deki yeraltı kömür madenlerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Sifferlinger, 2016). Ancak teknolojik olgunluk her zaman evrensel kullanım anlamına gelmemektedir. Sifferlinger’in sık verilen hatalı alarmların sistemin kapatılmasına yol açtığı tespiti (Sifferlinger, 2016), bu sistemlerin yalnızca çarpışmaları doğru şekilde tespit etmesinin yeterli olmadığını; operatör güvenliğini sarsmayacak ve sistemin devrede kalmasını sağlayacak kadar düşük hatalı alarm oranlarıyla çalışmaları gerektiğini vurgulamaktadır. Literatürdeki çoğu çalışmanın yalnızca teknik performansa odaklanması, insan faktörü boyutunun henüz araştırmalara yeterince dâhil edilmediğini göstermektedir.

Algılayıcı kaynaşımının gerekliliği: Literatür, en etkili çarpışma önleme sistemlerinin tek bir algılama yöntemi yerine algılayıcı kaynaşımı kullandığını göstermektedir. Chaulya vd. tarafından önerilen V2X, GNSS, radar ve kamera

birleşimi, tekil teknolojilere kıyasla daha yüksek performans sergilemiştir (Chaulya vd., 2024). Benzer şekilde Zhan vd. tarafından çoklu lazer radarlarının kamera ve araç dinamiği algılayıcılarıyla birleştirilmesi, %98 oranında kapsama alanı sağlamıştır (Zhang vd., 2020). Çoklu algılayıcı mimarilerine yönelim, farklı algılayıcıların birbirini tamamlayan güçlü ve zayıf yönleri sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Algılayıcı kaynaşımı sağlam bir temele dayanmaktadır. Kameralar anlamsal çözümleme sunarken karanlık ve sisli ortamlarda yetersiz kalmakta; radar düşük görüş koşullarında etiketlenmemiş nesneleri tespit edebilmekte, ancak anlamsal sınıflandırma yapamamakta; UWB hassas konumlandırma sağlasa da altyapı gerektirmektedir; LiDAR yüksek çözünürlüklü üç boyutlu haritalama sunarken toz ve nemden etkilenmekte; V2X ise farkındalığı algılayıcı menziline ötesine taşısa da ağ altyapısı gerektirmektedir. Bu teknolojilerin birleştirilmesiyle kaynaşım sistemleri, münferit algılayıcıların performansının düştüğü durumlarda tespit kabiliyetini korumakta, çapraz doğrulama ile hatalı alarmları azaltmakta ve farklı çevre koşullarında operasyonel kapsamı genişletmektedir.

Algılayıcı kaynaşımı ise beraberinde karmaşıklık, yüksek maliyet ve gelişmiş veri bütünleştirme algoritmalarına duyulan ihtiyacı getirmektedir. Gelecekteki araştırmaların, belirli bir operasyon için en uygun algılayıcı birleşimlerini ve maliyet-fayda analizlerini ele alması önerilmektedir.

Yeraltı ve açık ocak teknolojilerindeki farklılaşma: Literatür, yeraltı ve açık maden ocaklarının temel operasyonel farkları nedeniyle tercih edilen teknolojilerde net bir ayrım olduğunu göstermektedir.

Yeraltı madenciliğinde GPS sinyalinin alınamaması nedeniyle UWB tabanlı konumlandırma sistemleri öne çıkmaktadır; yapılan çalışmalar bu sistemlerin dar alanlarda santimetre düzeyinde doğruluk sağladığını ortaya koymuştur (Li vd., 2020; Quian vd., 2022). Sürekli kazı makineleri için elektromanyetik alan ve RFID kullanan yakınlık tespit sistemlerinin kullanımı zorunludur. Bilgisayarlı görüş teknikleri ise yetersiz aydınlatma ve toz nedeniyle çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır (Sifferlinger, 2016). Bu alandaki temel odak, karmaşık geometrilere sahip dar alanlarda 10-100 m menzilde hassas tespittir.

Açık ocak madenciliğinde GPS tabanlı konumlandırma ve uzun menzilli tespit teknolojilerinden yararlanılmaktadır. V2X iletişimi, durumsal farkındalığı 200 metreye kadar artırmaktadır (Chaulya vd., 2024). Radar sistemleri, geniş işletme sahalarında etiketlenmemiş engelleri tespit edebilmektedir (Ruff, 2007; Chaulya vd., 2024). Algılayıcı kaynaşımı sistemlerinde, değişken hava koşullarına uyum sağlamak amacıyla GNSS, radar ve kameralar kullanılmaktadır (Chaulya vd., 2024). Burada vurgu, çok sayıda eşzamanlı araç hareketinin bulunduğu geniş alanlarda uzun menzilli (100-200 m) tespit üzerindedir.

Bu farklılaşma, çarpışma önleme sistemi seçiminin ortama özgü olması gerektiğini ve yeraltı ile yerüstü uygulamaları arasında sınırlı teknoloji

transferi yapılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, özellikle radar ve algılayıcı kaynaşımı mimarileri gibi bazı teknolojilerin her iki ortam için de uygun olması, sistem geliştirme ve uygulama süreçlerinde ölçek ekonomisinden yararlanma potansiyeli sunmaktadır.

Mevzuat uyumu: Bu incelemenin temel bulgusu, geliştirilen çarpışma önleyici sistemlerin yasal mevzuatla uyumunun neredeyse hiç tartışılmamış olmasıdır. Çarpışma önleyici sistemlerin devreye alınmadan önce belirli yasal gereklilikleri karşılaması zorunlu olmasına rağmen yalnızca bir çalışma (Sifferlinger, 2016) maden güvenliği standartlarını ve sertifikasyon gereksinimlerini ele almıştır.

Bu eksiklik, konunun paydaşlarını çeşitli açılardan etkilemektedir. Akademik çalışmaların mevzuat gerekliliklerini ve uyumluluk test protokollerini dikkate alması gereklidir. Çalışmalarda elde edilen performans ölçütleri ilgili standartlarla (MSHA, ISO 21815, EN standartları) karşılaştırılarak raporlanmalıdır.

Maden yönetimleri, çarpışma önleyici sistem seçerken yalnızca yayımlanmış araştırmalara dayanmakla kalmamalı; satın almayı planladıkları sistemin mevzuata uyumluluğunu sertifikasyon belgeleri ve bağımsız testlerle doğrulamalıdır.

Yapay zekâ, algılayıcı kaynaşımı ve V2X iletişimi gibi alanlardaki hızlı teknolojik ilerleme, mevcut yasal düzenlemelerin güncellenme hızını aşmaktadır. Yasa koyucu, güvenlik standartlarını güncel teknolojik kabiliyetleri yansıtacak şekilde revize edebilmek için araştırmacılar ve teknoloji sağlayıcılarıyla işbirliği yapmalıdır.

İmalatçıların geliştirdikleri sistemlere ilişkin mevzuata uyumluluk test verilerini ve sertifikasyon belgelerini yayımlamaları, işletmecilerin karar verme süreçlerini kolaylaştırmak açısından önemlidir.

4. GELECEK ÇALIŞMALARA DÖNÜK ÖNERİLER

Araştırma öncelikleri: Bu derlemede saptanan eksiklikler doğrultusunda aşağıdaki araştırma öncelikleri önerilmektedir.

Çarpışma önleme sistemlerinin performansı, MSHA, ISO 21815, ICMM ve EMESRT gibi ayrıntılı düzenleyici kodlarla karşılaştıran sistematik çalışmalar aracılığıyla, bu sistemlerin teknik performans ölçütleri ile mevzuata uygunluk ölçütleriyle eşleştirilebilir.

Çarpışma önleme sistemlerinin performansını yıllara yayılmış kullanım üzerinden izleyen boylamsal çalışmalar, güvenilirlik, bakım gereksinimleri ve performans düşüşü hakkında önemli veriler sağlayabilir. Bu çalışmalar, sistem arızalarının hata modu analizi ve kök neden incelemesini içermelidir.

Mevcut araştırmalarda operatör kabulü, uyarılara verilen davranışsal tepkiler ve insan-makine arayüzü tasarımı gibi insan faktörü konuları yeterince ele alınmamıştır. Araştırmaların, en uygun uyarı yöntemlerine, bilgi

sunum stratejilerine ve yanlış alarmlara tepki olarak sistemin devre dışı bırakılmasını en aza indirecek yaklaşımlara odaklanması gerekmektedir.

Çarpışma önleme sistemi maliyetlerini (satın alma, kurulum, bakım) güvenlik kazanımlarıyla (kazalarda azalma, yaralanmaların önlenmesi, verimlilik artışı) karşılaştıran ekonomik analizler, işletmecilerin sistem seçimine yönelik kararlarını destekleyecektir.

Çarpışma önleme sistemleri için standart test protokollerinin geliştirilmesi, farklı teknolojiler ve imalatçılar arasında doğrudan performans karşılaştırması yapılmasını sağlayacaktır. Protokoller, test ortamlarını, senaryoları ve mevzuatla uyumlu metrikleri açıkça tanımlamalıdır.

Politika ve düzenleme önerileri: Çarpışma önleme sistemlerine yönelik standartların küresel bir çerçeve altında birleştirilmesi, imalatçıların mevzuata uyum süreçlerini kolaylaştırabilir. Bu alanda ISO, IEC ve ICMM gibi uluslararası kuruluşlar aktif rol oynayabilir.

Mevzuatın belirli teknolojileri zorunlu kılmak yerine, azami çarpışma oranları veya asgari algılama olasılıkları gibi performansa dayalı güvenlik çıktıları tanımlaması, güvenlik standartlarını korurken bu alandaki Ar-Ge faaliyetlerinin önünü açabilir. Ayrıca yasa koyucu, mevzuat güncellemelerinin teknolojik ilerlemelere hızla uyum sağlamasını güvence altına alacak mekanizmalar içermelidir. Çarpışma önleme sistemlerine ait sertifikasyon test verilerinin kamuoyuyla paylaşılması, maden yönetimlerinin veriye dayalı kararlar almasını ve araştırmacıların daha sistematik analizler yapmasını kolaylaştırabilir.

Devreye almaya dönük öneriler: Maden işletmelerinde çarpışma önleme sistemlerinin kurulumuna ilişkin uygulama önerileri aşağıda sunulmaktadır. Çarpışma önleme teknolojilerinin seçimi, çalışma ortamı koşulları dikkate alınarak yapılmalıdır. GPS sinyalinin bulunmadığı yeraltı madencilik uygulamalarında UWB tabanlı sistemlere öncelik verilmelidir (Li vd., 2020; Quian vd., 2022). Açık ocak operasyonlarında ise radar, kamera ve V2X teknolojilerini birleştiren algılayıcı kaynaşımı sistemlerinin kullanımı değerlendirilmelidir (Chaulya vd., 2024).

Maden genelinde devreye almadan önce uygulama sürecinin, öncelikle sürekli kazı makineleri ve kamyonlar gibi yüksek riskli alanlardan başlanarak kademeli olarak yürütülmesi, sistemin optimize edilmesini sağlar.

Operatörlerin, sistemin teknik kapasitesi ve sınırları hakkında kapsamlı eğitim alması, sahada kabul görmesi açısından gereklidir. Yanlış alarmların en aza indirilmesi ve operatör güveninin korunması için kullanıcıların sistem ayarlarının iyileştirilmesi sürecine dâhil edilmesi önerilir.

Tespit oranları, hatalı uyarı sıklığı, ramak kala olaylar ve sistemin operasyonel sürekliliği gibi parametrelerin sistematik olarak izlenmesi gerekmektedir. Elde edilen veriler, algılama eşiklerinin ince ayarının yapılması ve bakım ihtiyaçlarının belirlenmesi süreçlerinde temel alınmalıdır.

Son olarak, sistemlerin saha koşullarına tam uyum sağlaması ve performansın gerçek çalışma ortamlarında doğrulanması için imalatçılarla

stratejik iş birliği kurulmalı, teknik destek ve bakım süreçleri için net hizmet düzeyi anlaşmaları yapılmalıdır.

SONUÇ

Madencilik sektöründeki çarpışma önleme sistemleri üzerine 1999-2026 dönemini kapsayan literatür incelendiğinde, yeraltı ve yerüstü işletmeleri için teknik açıdan olgun çözümlerin mevcut olduğu görülmektedir. Yeraltı uygulamalarında, GPS sinyalinin ulaşmadığı ortamlarda 10-30 cm aralığında konumlandırma hassasiyeti ve nanosaniye düzeyinde gecikme süreleri sunan UWB sistemleri öne çıkmaktadır. Açık ocak operasyonlarında ise V2X haberleşme, GNSS, radar ve bilgisayarlı görü bileşenlerini bütünleştiren algılayıcı kaynaşımı mimarileri, kısıtlı görüş koşullarında dahi 200 metreye kadar algılama mesafesiyle operasyonel etkinlik sağlamaktadır.

Karşılaştırmalı analizler, mevcut teknolojilerin hiçbirinin tüm çarpışma senaryolarını tek başına en uygun şekilde yönetemediğini göstermektedir. UWB dar alanlardaki konumlandırma doğruluğuyla öne çıkarken, radar sistemleri toz ve sis gibi zorlu çevre koşullarında dayanıklılık sunmaktadır. LiDAR, otonom süreçler için yüksek çözünürlüklü haritalama olanağı sağlarken bilgisayarlı görü, semantik veri üretme potansiyeline karşın aydınlatma koşullarına bağımlı kalmaktadır. Sektörün algılayıcı kaynaşımı yapılarına yönelmesi, farklı teknolojilerin birbirini tamamlayarak sistemin toplam güvenilirliğini ve operasyonel sınırlarını genişletme gereksiniminden kaynaklanmaktadır.

Buna karşın, teknik performans bildirimleri ile yasal düzenlemelere uyum arasındaki belirgin eksiklik dikkat çekmektedir. Akademik çalışmaların büyük çoğunluğu performans sonuçlarına odaklanırken, MSHA yönetmelikleri, ISO 21815, ICMM kılavuzları ve EMESRT gereklilikleri gibi sektörel standartlara uyum doğrudan ele alınmamaktadır. Sifferlinger'in çalışması dışında, yasal çerçevelerin ve sertifikasyon süreçlerinin teknik araştırmalarla ilişkilendirilmesi sınırlı kalmaktadır (Sifferlinger, 2016). Bu durum, maden işletmecilerinin sistem seçiminde yalnızca yayımlanmış araştırma verilerine güvenemeyeceğini; sertifikasyon ve standart uyumluluğunu imalatçı belgeleri ile saha testleri üzerinden bağımsız olarak doğrulamaları gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışma, performans doğrulaması, çevresel dayanıklılık testleri, hata durumunda güvenlik değerlendirmesi, bütünleşme ve birlikte çalışabilirlik doğrulaması ile insan faktörleri analizini içeren bir uygunluk değerlendirme çerçevesi sunmaktadır. Bu çerçeve, literatürde vurgulanan performans boyutlarıyla uyumlu olup mevzuata odaklı sınırlı sayıda araştırmalarda tanımlanan düzenleyici gereksinimleri de karşılamaktadır.

Çarpışma önleme sistemlerine yönelik gelecek çalışmaların mevzuata uyum, uzun vadeli güvenilirlik analizleri, insan faktörlerinin incelenmesi, maliyet-fayda analizleri ve standartlaştırılmış test protokollerinin

geliştirilmesine öncelik vermesi önerilmektedir. Teknolojik gelişim süreçlerinde yapay zekâ ve makine öğrenmesi, 5G/6G kablosuz iletişim teknolojileri, dijital ikizlerin bütünleşmesi, uç bilişim ve algılayıcıların minyatürleştirilmesi alanlarına odaklanması gerekmektedir. Yasal mevzuat düzeyinde ise standartların uluslararası ölçekte uyumlaştırılması, performansa dayalı düzenlemeler geliştirilmesi, sertifikasyon süreçlerinde şeffaflığın sağlanması ve esnek düzenleyici yapıların kurulması önerilmektedir.

Maden işletmecileri için temel tavsiyeler, çalışma ortamına uygun teknolojilerin seçilmesini içermektedir. Bu bağlamda yeraltı operasyonları için UWB, açık ocak işletmeleri için ise algılayıcı kaynaşımı teknolojilerinin kullanımı öne çıkmaktadır. Uygulama sürecinin en riskli senaryolardan başlanarak aşamalı şekilde yürütülmesi, kapsamlı operatör eğitimlerinin sağlanması, performansın sürekli izlenmesi ve sahaya özgü gereksinimlerin karşılanması için imalatçılarla yakın iş birliği kurulması kritik adımlar olarak değerlendirilmektedir.

Çarpışma önleme teknolojileri son yirmi beş yılda önemli ilerleme sağlamış ve farklı madencilik koşullarında uygulanabilir sistemler geliştirilmiştir. Günümüzde bu teknolojilerin yaygınlaşmasının önündeki başlıca engeller, teknik yetersizliklerden ziyade mevzuata uygunluğun doğrulanması, maliyet-fayda dengesinin gerekçelendirilmesi, kullanıcı kabulü ve mevcut operasyonel süreçlerle bütünleşmedir. Bu derlemede sunulan araştırma, politika ve uygulama önerilerinin hayata geçirilmesi, çarpışma önleme sistemlerinin madencilikte yaralanma ve can kayıplarını azaltma potansiyelini ortaya koyabilir.

REFERANSLAR

- Abdelaziz, N., ve El-Rabbany, A. (2022). An integrated ins/lidar slam navigation system for gnss-challenging environments. *Sensors*, 22(12), 4327, 1-35. <https://doi.org/10.3390/s22124327>
- Abdukodirov, A., ve Benndorf, J. (2025). Recent developments in path planning for unmanned ground vehicles in underground mining environment. *Mining*, 5(2), 33, 1-23. <https://doi.org/10.3390/mining5020033>
- Bickson, J., Homer, J. P., DeGennaro, C. R., Girman, M. R., ve Jobes, C. C. (2022). An overview of methods and parameters to evaluate detection performance and validation of collision warning and avoidance systems. *SME Annual Meeting*. Salt Lake City.
- Bissert, P. T., Carr, J. L., DuCarme, J. P., ve Smith, A. K. (2016). Design of intelligent proximity detection zones to prevent striking and pinning fatalities around continuous mining machines. *Transactions of Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc*, 340(1), 75-81, <https://doi:10.19150/trans.7330>
- Cai, J., Li, Y., ve Fei, W. (2018). Anti-collision warning system for mine locomotive based on IVS-179. *Electrical Automation*, 40 (06), [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2018.06.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3886.2018.06.014)
- Chaulya, S. K., Choudhury, M., Prasad, G. M., Kumar, N., Kumar, V., Kumar, V., Chowdhury, A., ve Mishra, P. (2024). V2X, GNSS, radar, and camera-based

- intelligent system for adaptive control of heavy mining vehicles during foggy weather. *Journal of Quality Technology*, 56(4), 369-390. <https://doi.org/10.1080/00224065.2024.2345255>
- Cunha, F., Youcef-Toumi, K. (2018). Ultra-wideband radar for robust inspection drone in underground coal mines. in Proc. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, DOI: [10.1109/ICRA.2018.8461191](https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8461191)
- Dantas, G. A. S. A., Franca, A., ve de Tomi, G. (2025). From alerts to Action: Data-Driven Evaluation of Collision Risks in Open-Pit Mining Operations. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 42(6), 3805-3822. <https://doi.org/10.1007/s42461-025-01384-0>
- Du, C. (2020). *Design of anti-collision device of mine trackless rubber tire vehicle*. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 508, No. 1, p. 012212). IOP Publishing.
- Fisher, M. A., Carpenter, P. R., ve Silverstrim, J. E. (2017). *Collision avoidance system and method for an underground mine environment*. U.S. Patent No. 9,747,802. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Guenther, N., Duncan, D., Harrison, P., ve De Kock, A. (2010). The application of laser sensing technology to proximity detection in the mining industry. [URL https://www.qmihconference.org.au/wp-content/uploads/qmihsc-2010-writtenpaper-guenther.pdf](https://www.qmihconference.org.au/wp-content/uploads/qmihsc-2010-writtenpaper-guenther.pdf).
- Holden, T., ve Ruff, T. (2001). GPS-based proximity warning system for mining and construction equipment. In *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2001)*. 517-525.
- Hrica, J. K., Bellanca, J. L., Benbourenane, I., Carr, J. L., ve Stabryla, K. M. (2022). A rapid review of collision avoidance and warning technologies for mining haul trucks. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 39(4), 1357-1389. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00633-w>
- Imam, M., Başna, K., Tabii, Y., Ressami, E. M., Adlaoui, Y., Benzakour, I., ve Abdelwahed, E. H. (2023). The future of mine safety: a comprehensive review of anti-collision systems based on computer vision in underground mines. *Sensors*, 23(9), 4294, 1-32. <https://doi.org/10.3390/s23094294>
- Khakshour, H., Ameri, M., Abdollahi, N. (2025). A review of the applications of RFID technology in the mining industry. *Journal of Environment and Sustainable Mining*, 1(2), 41-55. <https://doi.org/10.22111/jesm.2025.50271.1019>
- Kianfar, A. E., Uth, F., Baltes, R., ve Clausen, E. (2020). Development of a robust ultra-wideband module for underground positioning and collision avoidance. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37(6), 1821-1825. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00279-6>
- Konieczna-Fuławka, M., Koval, A., Nikolakopoulos, G., Fumagalli, M., Santas Moreu, L., Vigara-Puche, V., Müller, J., ve Prenner, M. (2025). Autonomous mobile inspection robots in deep underground mining—The current state of the art and future perspectives. *Sensors*, 25(12), 3598, 1-16. <https://doi.org/10.3390/s25123598>
- Li, B., Zhao, K., ve Sandoval, E. B. (2020). A UWB-based indoor positioning system employing neural networks. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 4(2), 18, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s41651-020-00059-2>

- Li, J., Carr, J., ve Jobes, C. (2012). A shell-based magnetic field model for magnetic proximity detection systems. *Safety science*, 50(3), 463-471. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.10.007>
- Liu, H., Zhang, Z., Chen, G., Benndorf, J., ve Yang, J. (2025). Automatic Ghost Noise Labeling for 4D mmWave Radar Data in Underground Mine Environments Using LiDAR as Reference. *Remote Sensing*, 17(22), 3732, 1-19. <https://doi.org/10.3390/rs17223732>
- Liu, X., Jin, F., Lv, X., Zhan, Y. S., ve Zhang, D. (2017). Design and development of vehicle collision-avoidance system based on UWB wireless sensor networks. *In Proceedings of the 7th International Conference on Computer Engineering and Networks—PoS (CENet2017)* (p. 037). Shanghai, China: Sissa Medialab.
- Marks, E., ve Teizer, J. (2012). Proximity sensing and warning technology for heavy construction equipment operation. *In Construction research congress 2012: Construction challenges in a flat world* (pp. 981-990). DOI: [10.1061/9780784412329.099](https://doi.org/10.1061/9780784412329.099)
- Massa, D. P. (1999). Choosing an ultrasonic sensor for proximity or distance measurement part 1: *Acoustic considerations*. SENSORS-PETERBOROUGH-, 16, 34-37.
- Nekoogar, F. (2011). *Ultra-Wideband communications: Fundamentals and Applications Fundamentals and Applications*. Prentice Hall Press.
- Patrucco, M., Pira, E., Pentimalli, S., Nebbia, R., ve Sorlini, A. (2021). Anti-Collision systems in tunneling to improve effectiveness and safety in a system-quality approach: a review of the state of the art. *Infrastructures*, 6, 42, 1-22. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6030042>
- Peng, P., Pan, J., Zhao, Z., XI, M., ve Chen, L. (2024). A novel obstacle detection method in underground mines based on 3D LiDAR. *IEEEAccess*. 106685-106694. Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2024.3437784.
- Qian, H., Wang, M., Zhu, M., ve Wang, H. (2025). A review of multi-sensor fusion in autonomous driving. *Sensors*, 25(19), 6033, 1-34. <https://doi.org/10.3390/s25196033>
- Qian, M. (2024). *UWB-based collision avoidance system for underground mines*. School of Electrical Engineering and Telecommunications Faculty of Engineering The University of New South Wales.
- Qian, M., Zhao, K., Li, B., Gong, H., ve Seneviratne, A. (2022). Survey of collision avoidance systems for underground mines: sensing protocols. *Sensors*, 22(19), 7400, 1-33. <https://doi.org/10.3390/s22197400>
- Qin, M., Fan, W., Li, X., Shuang, X., Zhao, X., ve Chen, W. (2025). Review of target localization technologies in underground mines. *In 2025 IEEE 8th International Conference on Signal Processing and Machine Learning (SPML)* (pp. 1-8). IEEE.
- Ruff, T. M. (2000). *Test results of collision warning systems for surface mining dump trucks*. U.S. Department of Health and Human Services Public Health Service Centers for Disease Control and Prevention National Institute for Occupational Safety and Health Pittsburgh Research Laboratory Pittsburgh.
- Ruff, T. M. (2006). Evaluation of a radar-based proximity warning system for off-highway dump trucks. *Accident Analysis & Prevention*, 38(1), 92-98. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.07.006>
- Ruff, T. M. (2007). *Recommendations for evaluating and implementing proximity warning systems on surface mining equipment*. Department of Health and

Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, Spokane Research Laboratory.

- Ruff, T. M., ve Holden, T. P. (2003). Preventing collisions involving surface mining equipment: a GPS-based approach. *Journal of safety research*, 34(2), 175-181. [https://doi.org/10.1016/S0022-4375\(02\)00074-9](https://doi.org/10.1016/S0022-4375(02)00074-9)
- Ruff, T. M., ve Steele, J. (2004). Recent advances in proximity warning technology for surface mining equipment. *Mining Engineering*, 56(12), 68-72.
- Sabniveesu, V., Kavuri, A., Kavi, R., Kulathumani, V., Kecojevic, V., ve Nimbarte, A. (2015). Use of wireless, ad-hoc networks for proximity warning and collision avoidance in surface mines. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 29(5), 331-346. <https://doi.org/10.1080/17480930.2015.1086550>
- ScienceInsights. (2026). <https://scienceinsights.org/how-far-can-lidar-detect-range-by-application/>? adresinden 29 Haziran 2026 tarihinde alınmıştır.
- Shahmoradi, J., Talebi, E., Roghanchi, P., ve Hassanalian, M.A. (2020). Comprehensive review of applications of drone technology in the mining industry. *Drones*, 4, 34, 1-25. <https://doi.org/10.3390/drones4030034>
- Sifferlinger, N. A. (2016). Proximity detection-schutteinrichtung für gefahrenzonen im untertageberg-und tunnelbau: stand der technik und notwendigkeiten der weiterentwicklung. *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte*, 161(4), 173-180. DOI 10.1007/s00501-016-0456-8
- Walker, S. (2026). A proximity detection aids minesite awareness. <https://www.e-mj.com/features/proximity-detection-aids-minesite-awareness/> adresinden 28 Haziran 2026 tarihinde alınmıştır.
- Wisiak, K., Jakić, M., ve Hartlieb, P. (2022). Application of ultra-wide band sensors in mining. *Sensors*, 23(1), 300, 1-6. <https://doi.org/10.3390/s23010300>
- Xiao, D., Li, H., Ji, Z., Xu, E., Luo, B., ve Chen, J. (2020,). An anti-collision early warning system for mine trucks based on RBF network and WIFI. *In Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1631, No. 1, p. 012157). IOP Publishing. [doi:10.1088/1742-6596/1631/1/012157](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1631/1/012157)
- Yuan, C., ve Chen, X. (2023). Research on collision avoidance method based on millimeter wave radar, *Highlights in Science Engineering and Technology*, vol. 37, 137-141. DOI: [10.54097/hset.v37i.6068](https://doi.org/10.54097/hset.v37i.6068)
- Zhang, B., Li, D., Ba, T., Jiang, D., Qiu, X., ve Wang, T. (2022). Obstacle detection and tracking of unmanned mine car based on 3d lidar. *In 2022 International Conference on Cyber-Physical Social Intelligence (ICCSI)*, IEEE, 222-228.
- Zhang, X., Qui, Z., Sun, W., Liu, M., ve Guo, G. (2020). Dumper anti-collision system for open-pit mine (Chinese Patent No. CN109606258B). *China National Intellectual Property Administration*. <https://patents.google.com/patent/CN109606258B/en>.
- Ziegler, M., Kianfar, A. E., Hartmann, T., ve Clausen, E. (2023). Development and evaluation of a UWB-based indoor positioning system for underground mine environments. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 40(4), 1021-1040. <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00797-z>

Polistiren ve Polistiren Nanokompozitlerinin Morfolojik, Yapısal ve Termal Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Ceyda BİLGİÇ¹

Şafak BİLGİÇ²

¹ Prof. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü ceydabilgic@gmail.com
Orcid No: 0000-0002-9572-3863

² Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü safakbilgic@gmail.com
Orcid No: 0000-0002-9336-7762

ÖZET

Plastik katkı maddelerinin çevresel etkileri, artan plastik kullanımı ve atıklarından kaynaklanan endişelere rağmen, biyoyararlanımları konusundaki bilgi eksiklikleri nedeniyle yeterince anlaşılamamıştır. Temiz su kıtlığı nedeniyle, dünya çapındaki bilim insanları uygun maliyetli, toksik olmayan ve çevre dostu su dezenfeksiyon sistemleri geliştirmeye büyük önem vermektedir. Su kaynaklı patojenleri uzaklaştırmak veya etkisiz hale getirmek için zararlı yan ürünler oluşturmada uygun dezenfeksiyonu sağlamak en büyük zorluktur. Bu bağlamda, polistiren (PS) nanokompozitler su depolama, gıda ambalaj malzemesi, ulaşım, tıp ve benzeri alanlarda geniş uygulama alanları bulmaktadır. Nano boyutta dolgu maddelerinin (nanopartiküllerin) PS'ye eklenmesi ile hazırlanan nanokompozitlerin, mekanik özellikleri, gaz bariyer özellikleri, termal kararlılıkları ve benzeri özellikleri geliştirilebilmektedir.

Bu çalışmada polistirenin ve polistiren nanokompozitlerinin morfolojik, yapısal ve termal özelliklerinin karakterizasyonunda kullanılan analiz tekniklerine yer verilmiştir. X-ışını kırınımı (XRD) analizi, hem matris polimerin hem de dolgu maddelerinin amorf yada kristal yapısını doğrulamaktadır. Polimer matrisine nanopartiküllerin eklenmesiyle önemli bir kristalleşme gözlemlenir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile gerçekleştirilen morfolojik analiz, nanopartiküllerin polimer matrisinde iyi dağılıp dağılmadıklarını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, daha yüksek nanopartikül ilavesi kümelenmeye ve yapısal heterojenliğe yol açabilmektedir. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ile, polistirenin ve polistiren nanokompozitlerinin yüzey kimyasal bağlarını ve yüzey bileşimini değerlendiren yapısal karakterizasyon tekniğidir. Polistirenin ve polistiren nanokompozitlerinin termal bozunması ve kararlılığı, çeşitli ısıtma hızlarındaki termogravimetrik analiz (TGA), diferansiyel termal analiz (DTA) ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) karakterizasyon teknikleri kullanılarak belirlenebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Polistiren, Polistiren nanokompozitler, Karakterizasyon, Yapısal özellikler, Yüzey morfolojisi, Termal özellikler.

GİRİŞ

PS'nin başlangıç maddeleri olan stiren oligomerleri (SO'lar), PS'ye seçici ve kasıtlı olarak eklenen diğer katkı maddelerinin aksine, kaçınılmaz olarak tüm PS ürün türlerine dahil edilir (Murphy, 2001; Smith ve Taylor, 2002:165). Stiren dimerleri (SD'ler) ve trimerleri (ST'ler), endokrin bozucu etkileri ve tirojenik aktiviteleri nedeniyle çevresel olarak toksik oldukları bilinmektedir (Ramazanov vd., 2020:125; Momanyi vd., 2019:33). 2022 yılı

itibariyle, dünya çapındaki plastik üretiminin %5,2'sini oluşturan yaklaşık 21 milyon metrik ton PS üretildi ve 2030 yılına kadar %6,2'lik bir büyüme oranı öngörülmektedir (İbrahimova vd., 2022). Gıda kapları, yapı malzemeleri, su ürünleri yetiştiriciliği şamandıraları, elektronik bileşenler ve ofis malzemeleri de dahil olmak üzere çeşitli PS ürünleri ticari olarak kullanılmaktadır (De Souza Neto vd., 2023:473). Plastik katı atıklar arasında, PS atığının ABD'de %1'den az bir geri kazanım oranıyla en az geri dönüştürülenlerden plastik katı atıklardan biri olduğu bilinmektedir (Sabet, 2025:465). Yetersiz PS atık yönetimi ve PS ürünlerine yönelik artan talep, çevreye büyük miktarda PS atığı ve bunlarla ilişkili katı atıkların salınmasına yol açmaktadır.

Polistiren, ticari olarak genel amaçlı veya kristal polistiren olarak bilinir. Polistiren (PS), stiren monomerlerinden üretilen aromatik bir hidrokarbon polimeridir. İlk olarak sıvı storaksın damıtılması veya piroliz edilmesiyle geliştirilen petrol bazlı bir plastiktir. %95'i hava ve %5'i PS'den oluştuğu için hafiftir. PS tüketimi Asya'da en yüksektir; 2010 yılında dünya toplam üretiminin yaklaşık %53'ü ve toplam tüketiminin yaklaşık %47'si Asya'da gerçekleşmiştir (Maul vd., 2000) Strafor üretimiyle ilgili önemli çevresel ve sağlık endişeleri vardır. Göz ve cilt tahrişi, gastrointestinal ve üst solunum yolu sorunları gibi sağlık sorunlarına neden olabilir. Ayrıca merkezi sinir sistemini, kan ve böbrek fonksiyonlarını da etkileyebilir (Lynwood, 2014). PS, yüksek yalıtım özellikleri nedeniyle ambalaj endüstrilerinde, imalat ürünlerinde, tıbbi ekipmanlarda, el sanatları ürünlerinde, inşaat, ulaşımda, ev aletlerinde ve benzeri alanlarda önemli bir uygulama alanına sahiptir (Wünsch, 2000).

Polistiren (PS), 100.000–400.000 moleküler ağırlığa sahip olup en yaygın kullanılan termoplastik polimerlerden biri olarak kabul edilmektedir (Maul vd., 2000). PS sert, şeffaftır ve stirenin polimerizasyonundan köpük veya katı olarak üretilebilmektedir. Ucuz, hafif, kimyasal olarak inert, asit ve baza dirençli olması ve çeşitli birikintileri barındırma yeteneğine sahip olması gibi avantajlara sahiptir (Gary, 2011; Lynwood, 2014). Bununla birlikte, biyolojik olarak parçalanamaz, yanıcıdır ve çeşitli klorlu çözücülerde çözünür. Basit ambalajdan gelişmiş mühendisliğe kadar değişen bir dizi ticari uygulamaya sahiptir (Wünsch, 2000). Polimer zinciri boyunca fenil gruplarının düzenlenmesi, PS'nin kristalliğini kontrol eder (De Rosa ve Auriemma, 2006:145). PS' nin ana ticari şekli, ataktik PS ticari olarak çok önemlidir ve polimer omurgası boyunca fenil gruplarının rastgele düzenlenmesi nedeniyle amorf bir yapıya sahiptir. Bununla birlikte, sindiyotaktik PS kristaldir ve fenil grupları polimerik zincirin her iki tarafında alternatif olarak dağılmıştır (Maul vd., 2000). PS'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri, uzun süre oksijenin bulunduğu ortamda güneş ışığına maruz kalması durumunda değişebilir.

Polistiren (PS), esnek bir plastiktir ve düşük üretim maliyeti ve çeşitli asitlere, bazlara ve çözücülere karşı yüksek direnci nedeniyle birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır (Maul vd., 2000). PS, farklı

formlarda (katı ve köpük) üretilebilir ve ambalajlama, etiketleme ve mühendislikte kullanımına olanak tanıyan benzersiz özelliklere (örneğin, hafif, şeffaf ve sert) sahiptir (Wünsch, J. R. 2000). Ayrıca, PS farklı renkler ve dayanıklılıklar elde etmek için kolayca modifiye edilebilir ve çeşitli birikintiler PS omurgasına yerleştirilebilir (Gary, 2011; Lynwood, 2014). PS'nin fotobozunması esas olarak ana polimerik zincirde meydana gelen ve uyarılmış peroksitlerin ayrışmasını içeren bir fotozincir işlemine atfedilebilir. Hidroperoksitler üretilen toplam serbest radikallerin yalnızca ~%10'una katkıda bulunsa da (Kuzina ve Mikhailov, 2001:2319). diğer PS fotobozunma ürünleri arasında fenil glikoller, karbonil içeren parçalar (örneğin, benzaldehit) ve hidroksil içeren bileşikler (örneğin, hidroksiasetofenon) bulunur (Subramanian, 2001:55; Subramanian, 2002:1167). Ek olarak, tropikal iklimlerde PS'nin fotobozunması, polimerik zincirlerin çapraz bağlanmasına ve kütle kaybına yol açar (Brauman vd., 1983:1831; Bandyopadhyay ve Basak 2007:307). Bu nedenle, fotobozunma ve foto-oksidasyon süreçleri, PS'nin uzun süre güneş ışığına maruz kalması durumunda ömrünü kısaltır. Dolayısıyla, PS'nin fotostabilitesinin artırılması, kullanım ömrünü uzatmak için elverişli olacaktır. Bugüne kadar, çeşitli renklendiricilerin, stabilizatörlerin ve plastikleştiricilerin eklenmesi de dahil olmak üzere, PS'nin foto-oksidasyonunu azaltmak için çeşitli teknikler kullanılmıştır (Iwata, 2015:3210; Reddy vd., 2013:1653). Bu katkı maddeleri, polimerlerin renklenmesini önlemek için özellikle düşük konsantrasyonlarda kullanılır. Bunlar söndürücü, antioksidan, radikal yakalayıcı, alev geciktirici ve UV stabilizatörü olarak işlev görür (Torikai vd., 1995:261; Smith ve Taylor 2002:165; Pinto vd., 2013:39; Hernández vd., 2016). Daha spesifik olarak, uzun süre güneş ışığına veya ışınlamaya maruz kalma sırasında polimerik zincirlerdeki hasarı azaltmak için ışık stabilizatörleri ve UV emicilerin kullanımı yaygındır, çünkü bunlar PS yüzeyini foto-oksidasyon sürecine karşı engellemede etkilidir (Bottino vd., 1998:1251). Ek olarak, çeşitli aromatik bileşikler ve metal kompleksleri, PS'nin fotobozunmasını önemli ölçüde azaltmak için başarıyla kullanılmıştır (Rabie vd., 2013:1869; Sastre vd., 1990:3661; Abd vd., 2009:81; Goldshtein ve Margel, 2011:1863; Torikai vd., 1983:307). Son zamanlarda, poli(vinil klorür) (Ahmed vd., 2017a) için fotostabilizatör olarak ve karbondioksit depolama ortamı olarak (Ahmed vd., 2017b) bir dizi polifosfat sentezlenmiştir. Ayrıca, polimerik filmlerin fotodegradasyona karşı direncinin çeşitli katkı maddelerinin kullanımıyla iyileştirilebileceğini de gösterilmiştir (Yousif vd., 2018; Shaalam vd., 2018; Ghazi vd., 2018; Hashim vd., 2018; Ahmed vd., 2017c; Yousif vd., 2017:997; Ali vd., 2016; Yousif vd., 2016; Yousif vd., 2015:2190).

Geliştirilmiş dağılım teknikleri, gelişmiş yüzey modifikasyon stratejileri ve hassas polimerizasyon kontrolü de dahil olmak üzere nano-sentez metodolojilerindeki modern gelişmeler, nanokompozitlerin özelliklerini ve malzeme bilimindeki genel performansını önemli ölçüde artırmıştır (De Souza Neto vd., 2023:473; Ibrahimova vd., 2022; Ramazanov

vd., 2020:125; Momanyi vd., 2019). Bu gelişmeler, özellikle gelişmiş mekanik mukavemet, termal kararlılık ve kimyasal direnç gerektiren uygulamalarda, özel işlevselliklere sahip malzemelere yönelik artan talebe yanıt vermektedir. Nano-dolgu maddeleri, kimyasal aşılama veya fiziksel dağılım yoluyla polimer matrislerini değiştirmede çok önemli bir rol oynar. Bu dolgu maddeleri, ana polimerin mekanik mukavemetini, yüzey özelliklerini ve fonksiyonel özelliklerini artırarak, onları gelişmiş uygulamalar için daha uygun hale getirir. Bu yaklaşım, üstün genel performans elde etmek için polimer matrislerinin ve inorganik dolgu maddelerinin avantajlarından yararlanır (Yadav vd., 2023).

Gelişmiş mekanik, optik ve elektriksel özellikleri sayesinde nanokompozitler çeşitli alanlarda uygulama bulmuştur. Kaplamalar çizilme direncini ve uzun ömürlülüğü artırır; biyomedikal cihazlarda ise biyoyumumluluğa ve yapısal kararlılığa katkıda bulunurlar (Wang vd., 2006:689). Kullanımları, malzeme özelliklerinin hassas kontrolünün gerekli olduğu yapıstırıcılar, optik, elektronik ve hatta yağlamaya kadar uzanmaktadır (Karimova vd., 2024; Nuriyeva vd., 2024). Yeni nesil malzemeler için vaatleri, mekanik mukavemet, termal kararlılık ve kimyasal dirençte belirgin iyileştirmelerde yatmaktadır (Shirnova vd., 2025a:1289; Shirnova vd., 2025b:1785). Saf polimerik malzemeler işlenebilirlik ve esneklik açısından avantajlar sunarken, genellikle sınırlı mekanik mukavemet ve termal kararlılıktan muzdariptirler (Mohamad vd., 2015:205; Nuroldayeva ve Balanay, 2023). Hibrit organik-inorganik nanokompozitler, polimerlerin yapısal uyulanabilirliğini inorganik dolgu maddelerinin sağlamlığıyla birleştirerek bu eksiklikleri giderir. Bu malzemelerde polimer esneklik, dielektrik kararlılık ve süneklik sağlarken, inorganik faz optik şeffaflık, mekanik takviye ve termal kararlılığa katkıda bulunur (Guerrero vd., 2022; Mammeri vd., 2005:3787).

Çeşitli inorganik dolgu maddeleri arasında SiO_2 , maliyet etkinliği, yüksek yüzey reaktivitesi ve mükemmel aşınma direnci nedeniyle öne çıkmaktadır. Yerinde sentezlenebilme yeteneği ve birçok polimer matrisiyle yapısal uyumluluğu, onu yüksek performanslı nanokompozitlerin mühendisliği için tercih edilen bir seçenek haline getirmektedir (Lee ve Yoo, 2016:1; Korobeinyk vd., 2023:106; Samarth vd., 2016:15; Ravindra and Narayan, 1986:1139). Avantajlarına rağmen, nano- SiO_2 önemli bir zorluk sunmaktadır: yüksek yüzey enerjisi, güçlü parçacık kümelenmesine yol açarak polimer matrislerindeki dağılımını azaltmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için araştırmacılar, düzgün dağılımı ve optimum arayüz etkileşimlerini sağlamak amacıyla yüzey fonksiyonelleştirme, polimer aşılama ve kontrollü sentez yöntemleri gibi stratejiler kullanmaktadır (Wieszczycka vd., 2021; Sabet, 2025:465).

PS, işlenmesinin kolaylığı, iyi dielektrik özellikleri ve optik şeffaflığı nedeniyle nanokompozitlerde yaygın olarak kullanılan bir ana polimerdir. Silika nanopartikülleriyle birleştirildiğinde, PS/ SiO_2 nanokompozitleri,

mekanik dayanım, termal kararlılık ve elektriksel yalıtım arasında benzersiz bir denge sergileyerek çeşitli uygulamalar için umut vadeden bir malzeme haline gelir (Joseph vd., 2015:8793). PS, işlenmesinin kolaylığı ve iyi yalıtım özellikleri ile bilinen yaygın olarak kullanılan bir termoplastiktir; silikon dioksit (SiO_2 veya silika) nanopartikülleri ise yüksek termal kararlılık, mekanik takviye ve kimyasal dayanıklılık sunar (Alekseeva vd., 2018:107). Silikayı bir PS matrisine entegre ederek, saf PS'ye göre geliştirilmiş performansa sahip kompozitler elde edilebilir; örneğin, polimerin hafif ve esnek doğasından büyük ölçüde ödün vermeden gelişmiş mekanik dayanım, termal direnç ve bozulmaya karşı kararlılık. Bu PS/ SiO_2 nanokompozitleri birçok gelişmiş malzeme uygulamasında önemlidir (Hsue vd., 2000:2813). Elektronikte, özel geçirgenlik ve düşük dielektrik kayıp gerektiren dielektrik yalıtım katmanları veya ambalaj malzemeleri olarak hizmet edebilirler (Mezan vd., 2019). Kaplamalarda, dağılmış silika, şeffaflığı korurken PS bazlı boyalara veya filmlere çizilme direnci ve sertlik kazandırabilir. Biyomedikal alanlarda, PS/ SiO_2 kompozitleri, silikanın biyoyumluluğundan (Ni vd., 2006:1644) ve PS'nin inert doğasından faydalanır; örneğin, kompozit membranlar ve iskeleler, in vitro kullanıldığında mükemmel hücre canlılığı ve inflamatuvar yanıt olmamasını göstermiştir (Sakib vd., 2020:2123). Benzer şekilde, optik malzemelerde, PS matrisinde iyi dağılmış silika, ayarlanabilir kırılma indekslerine sahip optik olarak şeffaf nanokompozitler üretebilmektedir (Zhou vd., 2017:76).

PS/ SiO_2 nanokompozitlerinin çeşitli uygulamaları, benzersiz yapısal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Performanslarını optimize etmek için, silika dağılımı, arayüzey bağlaması ve faz etkileşimleri gibi iç morfolojilerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılması şarttır. Bu yapısal faktörler, optik şeffaflık, kırılma indisi ayarı ve dielektrik davranış dahil olmak üzere temel özellikleri doğrudan etkiler ve bu özellikler, elektronik, kaplamalar ve biyomedikal cihazlar için uygunluklarını belirlemektedir (Zhang vd., 2018:3910; Zhou vd., 2013:33; Hong vd., 2022:727).

Polistiren (PS), yapı sektöründe ısı yalıtımı amacıyla yaygın olarak kullanılan köpük malzemelerin ana bileşenidir. PS kullanımının en büyük dezavantajı, nispeten yüksek tutuşma ve yanıcılık seviyesidir; bu da gerçek hayattaki yangın durumlarında son derece hızlı bir yangın yayılmasına yol açar. PS'nin yanması genellikle büyük miktarda zehirli duman oluşmasına ve stirenmonomer ve düşük moleküler ağırlıklı diğer bileşikler içeren gaz karışımlarının oluşmasına neden olur; bu gazlar da alevli yanmaya uğrayabilir (Lynwood, 2014; Weil ve Levchik, 2007:241). Ayrıca, yanarken PS eriyebilir, akabilir ve damlayabilir, böylece ikincil bir yangın tehlikesi oluşturabilir ve alevlerin yayılmasına neden olabilir (Joseph ve Tretsiakova-McNally, 2015:8793). Avrupa Yangın Güvenliği (Fire Safe Europe) yakın zamanda, bir binadaki küçük bir yangının ani alevlenmeye ulaşmasının yaklaşık üç dakika sürdüğünü vurgulamıştır (Guillaume vd., 2020:624). Bu nedenle, yapı elemanı olarak kullanılan ticari polimerlerin (PS dahil) termal bozunmayı

yavaşlatmak ve büyük miktarda yanıcı uçucu madde oluşumunu sınırlamak için uygun bir yangın geciktirici (FR) ile modifiye edilmesi son derece önemlidir. Bu, ya gerekli miktarlarda bir yangın geciktiricinin bir polimer matrisiyle fiziksel olarak karıştırılmasıyla ya da yangın geciktirici kısımlarının PS'nin ana zincirlerine kimyasal olarak bağlanmasıyla gerçekleştirilebilir (Joseph ve Tretsiakova-Mcnally, 2011:395; Baby vd., 2020). İkinci yöntem, stirenin ana polimere daha yüksek termal stabilite kazandırabilen doymamış bileşiklerle kopolimerizasyonunu içerir. Son yirmi yılda, polimer endüstrisi halojenli katkı yangın geciktiricilerine büyük ölçüde güvenmiştir (Weil ve Levchik, 2007:241; Baby vd., 2020; Jakab vd., 2003:83). Bununla birlikte, bu yangın geciktirici sınıfının kullanımı, çevresel toksisite ve biyobirikim ile ilgili endişeler nedeniyle kısıtlanmış, hatta yasaklanmıştır (Baby vd., 2020; Baby vd., 2023:229; Ezechiaş vd.,2014:153). Bu sorunların bazılarını çözmek için birçok araştırma grubu tarafından alternatif, halojen içermeyen formülasyonlar geliştirilmiştir (Joseph ve Tretsiakova-Mcnally, 2011:395; Baby vd., 2020; Morgan, 2019:25; Joseph vd., 2021; Levchik ve Weil, 2006:345).

Bu çalışmada saf polistirenin ve polistiren nanokompozitlerinin karakterizasyonlarında kullanılan analiz teknikleri ile morfolojik, yapısal ve termal özellikleri belirlenebilmektedir. X-ışını kırınımı (XRD) analizi, hem matris polimerin hem de dolgu maddelerinin amorf yada kristal yapısını doğrulamaktadır. Polimer matrisine nanopartiküllerin eklenmesiyle önemli bir kristalleşme gözlemlenir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile gerçekleştirilen morfolojik analiz, nanopartiküllerin polimer matrisinde iyi dağılıp dağılmadıklarını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, daha yüksek nanopartikül ilavesi kümelenmeye ve yapısal heterojenliğe yol açabilmektedir. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ile, polistirenin ve polistiren nanokompozitlerinin yüzey kimyasal bağlarını ve yüzey bileşimini değerlendiren yapısal karakterizasyon tekniğidir. Polistirenin ve polistiren nanokompozitlerinin termal bozunması ve kararlılığı, çeşitli ısıtma hızlarındaki termogravimetrik analiz (TGA), diferansiyel termal analiz (DTA) ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) karakterizasyon teknikleri kullanılarak belirlenebilmektedir.

PS VE PS NANOKOMPOZİTLERİNİN X-RAY KIRINIMI (XRD) İLE İNCELENMESİ

XRD desenlerinin belirlenebilmesi için; sadece X ışınını dağıtmaya yetecek kadar düzenli malzemelerin tespit edilebildiği iyi bilinmektedir, düzensiz malzemeler X-ışını tekniği ile hiçbir desen göstermeyecektir. Genel olarak, interkale nanokompozit oluşumu XRD deseninde bazal aralıkların artmasına neden olurken, eksfoliye nanokompozit oluşumu katmanlar arasındaki desenlerin tamamen kaybolmasına neden olur ve bu nedenle hiçbir

pik gözlemlenemez (Pourabas ve Raeesi, 2005:5533). Saf PS nin ve PS nanokompozitnin XRD desenleri; nanokompozitlerin d-aralıkları (düzlemler arasındaki uzaklıkları), Bragg formülüne dayalı olarak gözlenen (001) yansıma piklerinin 2θ açısall konumlarından hesaplanabilmektedir (Zhang vd., 2018:3910; Hong vd., 2022:727; Paul vd., 2013:361). Tabakalı silikatların en önemli özelliklerinden biri silikat tabakaları arasındaki galeriler arası mesafedir (d_{001}). d_{001} aralığındaki büyük artış, organik değiştiricinin silikat katmanları arasına dahil olduğunu ve onları daha geniş bir mesafeye ittiğini göstermektedir (Xi vd., 2004:116; Giannakas vd., 2008:3915).

XRD, bileşenlerin kristal veya amorf yapısını ve polimer matrisi içindeki dağılımlarını değerlendirmek için kullanılır. PS için; $19,8^\circ$ 'de (2θ) gözlemlenen bir maksimum ile geniş bantlı bir kırınım deseni sunmaktadır ve bu, polistiren polimerinin amorf yapısını göstermektedir (Huang vd., 2020). Değişen konsantrasyonlarda ultra ince silika nanopartikülleri içeren polistiren/SiO₂ nanokompozitlerinin XRD desenlerinde ise; amorf silikanın $21,8^\circ$ (2θ)'de (101) Miller indeksine karşılık gelen karakteristik bir kırınım deseni sergilediği iyi bilinmektedir. Literatürden görülebileceği gibi, SiO₂ nanopartiküllerinin polimer matrisine dahil edilmesi, polimerin XRD deseninde önemli bir değişikliğe neden olmamaktadır. Silika ve polistirenin kırınım maksimumları birbirine yakın olduğundan (sırasıyla $21,8^\circ$ ve $19,8^\circ$), polimerin amorf fazında önemli bir değişiklik gözlemlenmiştir (Nandanwar vd., 2015:1; Navarchian vd., 2014:347).

PS VE PS NANOKOMPOZİTLERİNİN TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İLE İNCELENMESİ

Farklı yüzdelerde hazırlanmış PS nanokompozitlerinin morfolojisi, saf PS ile karşılaştırılmıştır. Nanopartiküllerin PS nanokompozit matrisinde eřit olarak dağılmadığı görölse de, nanopartiküllerin varlığı açıktır. Nanopartiküllerin PS partiküllerinin yüzeyinde dağıldığı görölmektedir. Ayrıca, PS matrisinin parlak alanlarında bazı nanopartiküllerin agregasyonu gözlemlenmiştir. Nanopartiküllerin yüzdesindeki artış, PS matrisi içindeki nanopartiküllerin agregasyonunu artırmıştır. Sentezlenen nanopartiküllerin ve agregatlarının şekli ve şapı, tüm farklı nanokompozitlerde benzer bulunmuştur. PS'ye nanopartiküllerin eklenmesi nedeniyle, polimer nanokompozitler, çekme dayanımı çalışmasından da anlaşıldığı üzere, saf polistirene kıyasla bir miktar tokluk göstermiştir (Vodnik vd., 2012:782; Youssef ve Abdel-Aziz, 2013:607). Ayrıca EDX analizi, PS-nanopartikül kompozitlerinde bulunan elementlerin nicel ve nitel durumunu tespit etmektedir. Nanopartiküllerin PS parçacıklarıyla farklı kombinasyonlarında bulunan ağırlık yüzdesini göstermektedir. PS parçacıklarının belirli bölgeleri sečilerek EDX profillemesi gerçekteştirilerek, numunelerdeki mevcut elementler belirlenmektedir.

Polistiren/SiO₂ nanokompozitlerinin SEM görüntüleri, mikro yapısal özelliklerine ilişkin önemli bilgiler ortaya koymaktadır. Görüntüler, nanokompozit yapısı içinde boşlukların ve serbest hacmin varlığını açıkça göstermektedir; bu da nanopartiküllerin ve polimer matrisinin doğal düzenine bağlanabilir. Bu boşluklar, polistiren mikroküreler ve SiO₂ nanopartikülleri arasındaki tamamlanmamış birleşme veya arayüz boşluklarından kaynaklanabilir ve malzemenin mekanik, termal ve dielektrik özelliklerini potansiyel olarak etkileyebilir. Silika nanopartiküllerinin amorf yapısı göz önüne alındığında, nanokompozit içindeki tek tek parçacıkların boyutunu doğru bir şekilde belirlemek hala bir zorluktur. Polistiren/SiO₂ sistemleri, üretim tekniklerine ve silikanın polimer matrisi içindeki dağılım derecesine bağlı olarak çeşitli morfolojiler sergilemektedirler.

PS nanokompozitlerinin mikro yapısı, SEM ile daha ayrıntılı olarak incelenmiş ve görüntüler sadece saf PS film için elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Saf polistirenin ve polistiren nanokompozitlerinin her ikisinin SEM görüntüleri, boşluksuz, temiz, pürüzsüz ve homojen bir yüzey göstermektedir. Bununla birlikte saf PS filminin SEM görüntülerinde önemli değişiklikler gözlemlenmiştir; bu da önemli derecede fotodegradasyona işaret etmektedir. Buna karşılık, PS nanokompozit filmi için elde edilen SEM görüntüleri, saf PS yüzeyine kıyasla nispeten daha fazla pürüzlü ve düzenli bir yapıya sahip bir yüzeyin varlığını doğrulamıştır (Hu vd., 2016:8505; Yousif vd., 2018).

PS VE PS NANOKOMPOZİTLERİNİN GEÇİRİMLİ ELEKTRON MİKROSKOBU (TEM) İLE İNCELENMESİ

İnterkale ve floküle nanodolgu tabakalarının dağılım mikroyapısı da TEM analizleri aracılığıyla incelenebilmektedir. PS nanokompozitlerdeki interkale ve floküle dağılım eğilimi, TEM analizleri ile doğrulanmalıdır. Nanopartiküllerin katmanlarının iyi bir düzen içinde yapılandırıldığını ve polimer matrisi içinde iyi bir şekilde dağıldığını gösteren TEM görüntüleridir. TEM görüntüleri, sentezlenen kompozitin nano ölçekli bir malzeme olduğunu ve interkalasyon sırasında organoyapıcının katmanlarında herhangi bir ayrılma olmadığını doğrulayabilmektedir (Kim vd., 2003:2106; Morgan ve Harris, 2004:8695; Hoffman vd., 2000:57).

Alan emisyonlu iletim elektron mikroskobu (FETEM); Parçacıkların şekli ve boyut dağılımı FETEM kullanılarak incelenebilmektedir. Nanokompozitlerinin dağılım mikro yapıları FETEM karakterizasyonu ile araştırılmıştır. FETEM analizi, PS nanokompozitlerinin içine gömülü (dolgulanmış) nanopartiküllerin varlığını doğrulamaktadır. PS'nin saf (original) yapısının FETEM görüntüsünden; oluşan PS parçacıklarının düzgün yüzeylere sahip ve ortalama çapı 300-500 nm olan, düzgün şekilli olduğu açıkça görülmüştür. Yeşil sentezlenmiş nanopartiküllerin PS parçacıklarını kapsüllediği FETEM görüntüleri, nanopartiküllerin, PS parçacıklarının

yüzeyine yapışmış ve PS parçacıklarının içine gömülmüş olup, karmaşık bir polimer matrisi oluşturmaktadır. FETEM görüntüleri, nanopartiküllerin polimer matrisi içinde mükemmel bir şekilde dağıldığını desteklemekte ve nanokompozit malzemelerin oluşumunu doğrulamaktadır. Nanopartiküllerin şekli neredeyse küresel olup, nanopartiküllerle gömülü (dolgu) PS parçacıklarının desenini, PS-nanokompozitlere bir miktar kristal yapı kazandıran yüz merkezli kübik bir yapıya sahiptir. FETEM analizi, polimer kompleksinin ve nanopartiküller ile olan bağlanmasının daha iyi görsel olarak anlaşılmasını sağlamıştır (Youssef ve Abdel-Aziz, 2013:607).

PS VE PS NANOKOMPOZİTLERİNİN ATOMİK KUVVET MİKROSKOBU (AFM) İLE İNCELENMESİ

Atomik kuvvet mikroskobu, atomik çözünürlüğe kadar numunelerin yüzey özelliklerini ölçmek için kullanılan ve karakterize edebilen güçlü yüksek çözünürlüklü bir görüntüleme sistemidir. Geleneksel mikroskobik yöntemlerin aksine, AFM, küçük ve keskin bir prob veya uç ile numune yüzeyi arasındaki kuvvetleri kontrol ederek numune ileri ve geri tarandığında yüzeyi şekillendirip numuneyi görselleştirir. AFM ilk olarak 1986'da Binnig, Quate ve Gerber, tarafından tanıtılmış olmasına rağmen, daha sonra malzeme, fizik, biyoloji, tıp gibi araştırmalarda önemli bir nanoteknolojik cihaz haline gelmiştir (Binnig vd., 1986; Liu vd., 2019).

Optik mikroskopi gözlemleri ile, Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanarak nanopartikül içeren PS filmlerinin yüzey morfolojisini daha ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu teknik, vakum gerektirmediği ve yüzey düzgünlüğü ve homojenliği konusunda net bir görüntü verdiği için tercih edilmektedir (See ve Haver, 2003:36). Bu nedenle, saf PS filmi ve nanopatikül içeren PS filmler (ağırlıkça % 5) için elde edilen iki ve üç boyutlu görüntüler elde edilmiştir. Daha spesifik olarak, ışınlamadan önce PS filmi için AFM görüntüleri, düzgün ve homojen bir yüzey göstermiştir. Ancak, ışınlamadan sonra pürüzlü ve düzensiz bir yüzey gözlemlenmiştir. Buna karşılık, nanopartikül içeren PS'nin yüzeyi ışınlamadan sonra pürüzsüz ve homojendir ve ışınlamadan önce gözlemlenenlerle benzerdir.

Farklı silika konsantrasyonlarında polistiren/silika nanokompozitlerinin görüntüleri; ağırlıkça %3 SiO₂- polistiren nanopartikülleri karşılık gelen görüntüde, dolgu maddesi iyi dağılmış görünmektedir ve yalnızca belirli bölgelerde küçük kümeler gözlemlenmiştir. Genel olarak, yüzey bu düşük silika içeriğinde önemli ölçüde büyük ölçekli kümelenme göstermemektedir; bu da silika nanopartikülleri ile polistiren matrisi arasında etkili arayüz etkileşimlerini göstermektedir. Buna karşılık, ağırlıkça %7 SiO₂- polistiren nanopartikülleri örneğinde belirgin şekilde daha pürüzlü bir yüzey gözlemlenmektedir; burada daha yüksek dolgu maddesi yüklemesi, belirgin parçacık kümelenmesine ve düzensiz topografiye yol açtığını göstermiştir. Yükseltilmiş özelliklerin ve yüzey çukurlarının

("çukurlar") sayısındaki artış, %3 silika örneğine kıyasla daha fazla kümelenmeyi göstermekte olup, bu da daha yüksek yüklemelerde silika ve polistiren arasındaki arayüzey bağının daha az etkili veya düzgün bir şekilde korunmasının daha zor hale gelebileceği anlamına gelmektedir. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile gözlemlenen yüzey morfolojisi ve nanopartikül dağılımındaki varyasyon, silika bazlı nanokompozitlerin optik özelliklerinin şekillenmesinde kritik bir rol oynar. AFM analizi, nanopartikül dağılımının homojenliğinin malzemenin optik davranışını güçlü bir şekilde etkilediğini açıkça göstermektedir. Polistiren/SiO₂ nanokompozitlerinin yüzey pürüzlülüğü dağılımlarını göstermekte ve AFM görüntülerinden elde edilen morfolojik gözlemlere nicel bir tamamlayıcı sağlamaktadır. %3 silika histogramında gözlemlenen daha keskin ve dar pik, daha küçük veya daha az sayıda küme olduğunu gösterirken, %7 silikadaki daha geniş pik, daha büyük topografik değişkenliği ve daha belirgin yüzey özelliklerini işaret etmektedir. (Shirnova vd., 2025c).

PS VE PS NANOKOMPOZİTLERİNİN FOURIER DÖNÜŞÜMLÜ KIZILÖTESİ SPEKTROSKOPİ (FTIR) İLE İNCELENMESİ

Saf polistirenin, PS nanokompozitlerinin ve nanopartikül numunelerinin FTIR spekturumlarında, hidroksil titreşimleri 4000-3000 cm⁻¹ spektral bölgesinde ve kristal yapı 1500-400 cm⁻¹ bölgesinde gözlemlenebilir. Yakın -IR bölgesi (4000-3000 cm⁻¹) farklı OH gruplarının doğası veya kökeni hakkında değerli bilgiler verir. 1225, 1102, 795 ve 447 cm⁻¹'de görülen bantlar ve 550-560 cm⁻¹'deki karakteristik güçlü ikili, simetrik ve asimetrik Si-O-Si veya Si-O-Al bağlarını doğrulamaktadır. 1000-1200 cm⁻¹ bölgesindeki güçlü absorpsiyon bandı, kuvars, silika ve zeolitler için SiO₄, AlO₄ tetrahedrallerinin iç titreşimine atfedilmiştir. 1040 cm⁻¹ civarındaki bant Si-O-T bağının iç asimetrik gerilme titreşimine atfedilir (Chen vd., 2001:1189).

Saf PS ve PS-nanokompozitlerinin FTIR spektrumları, nanopartiküller ile PS matrisi arasında arayüz etkileşiminin olup olmadığını aydınlatmaktadır. Saf PS'nin ve değişen oranda nanopartikül içeren PS nanokompozitlerinin IR spektrumları incelenmiştir. 3060, 3024, 2920 ve 2860 cm⁻¹'deki titreşimsel gerilme, saf PS'nin IR spektrumundaki aromatik ve alifatik C-H bantlarına karşılık gelmektedir. 2924 cm⁻¹'deki titreşimsel C-H gerilme bandı, safsızlıkların varlığından kaynaklanabilir. 1026, 1188-1368, 1491-1599 ve 1666-1945 cm⁻¹'deki pikler aromatik C=C bağ titreşimlerine, 907 ile 650 cm⁻¹ arasındaki aralık ise aromatik C-H bağ titreşimlerine karşılık gelmektedir. PS-nanopartikül nanokompozitlerinin kızılötesi spektrumları, PS'nin karakteristik bantlarının tümünü göstermiştir. Tüm spektrumlar neredeyse benzer olup, PS'nin fonksiyonel grupları ile nanopartiküller arasında çok güçlü bir etkileşim olmayabileceğini göstermektedir. PS (kontrol) ve nanopartikül dolgulu PS arasında IR spektrumlarında belirgin bir kayma olmamasına rağmen; kritik analiz, nanopartikül dolgulu PS için 1496 ve 1454 cm⁻¹'deki

aromatik C=C gerilmesinin, saf PS'ne kıyasla daha düşük dalga sayılarına doğru küçük bir kayma gösterdiğini ortaya koymuştur (Awad vd., 2015).

PS/nanokompozitlerinin FTIR spektrumlarından görüldüğü üzere, PS spektrumu arasında çok fazla fark yoktur. Ancak, Si-O absorpsiyonundan kaynaklanabilecek bandın (1000 cm^{-1}) pik yoğunluğunda bir artış gözlemlenebilmektedir (Ma vd., 2010:122). PS/nanokompozitleri için, nanopartiküllerin Si-O gerilme titreşimlerine atfedilen 1030 cm^{-1} 'deki geniş bir bant gözlenmektedir. PS'deki 2917 cm^{-1} 'deki bant (alifatik C-H gerilmesi), PS/nanokompozitlerinde hafifçe daha düşük dalga sayılarına kaymaktadır. Ayrıca, saf PS için, 750 cm^{-1} 'deki titreşim bandı (C-H bağlanması), PS/nanokompozitlerinde daha yüksek bir dalga sayılarına kaymıştır; bu kaymalar nanopartiküllerin PS matrisindeki dağılımına bağlanabilir (Yeh vd., 2008:3046; Yalçınkaya vd., 2010:581).

Bu durum daha önceki çalışmalarda da bildirildiği gibi, dolgu nanopartiküllerinin PS içine gömüldüğünü ve bunun sonucunda saf PS'ye kıyasla daha yüksek moleküler kütleye sahip olduğunu göstermektedir. FESEM ve FETEM sonuçlarından gözlemlendiği üzere nanopartiküller PS matrisine ve yüzeylerine dağılmış halde kalmasına rağmen, PS-nanopartikül dolgulu nanokompozitlerinin FTIR spektrumlarında yeni titreşimsel pikler ortaya çıkmamıştır (Lynwood, 2014; Vodnik vd., 2012:782; Youssef ve Abdel-Aziz, 2013:607).

PS VE PS NANOKOMPOZİTLERİNİN TERMAL KARAKTERİZASYONU

Termal analiz, kontrollü bir atmosferde sıcaklığın bir fonksiyonu olarak materyalin kimyasal veya fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişikliklerin belirlenmesine dayanan bir grup metot olarak tanımlanır. Saf polistirenin, PS nanokompozitlerinin ve nanopartikül numunelerinin Termogravimetrik Analiz (TGA), diferansiyel termogravimetre (DTA) ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazları ile analiz edilebilmektedir.

$10\text{ }^{\circ}\text{C/}$ dakika ısıtma hızında gerçekleştirilen termogravimetrik analiz (TGA) sonuçları; her bir PS bazlı numune için elde edilen ilgili TGA parametrelerinden genel olarak PS'nin termal bozunmasının sıcaklığa oldukça bağımlı olduğunu belirtmek önemlidir (Baby vd., 2020). Örneğin, orta sıcaklıklarda, ana zincirdeki başa baş bağlantıda ilk kırılma meydana gelir, ardından stiren monomerinin düzgün bir şekilde dışarı atılması gerçekleşir ki bu da aslında polimerin geri dönüşümünün temelini oluşturur. PS numuneleri için elde edilen termogramlar genellikle yalnızca bir ana bozunma aşaması göstermiştir. Bununla birlikte, bozunmanın ilk aşamalarında, neredeyse tüm durumlarda bazı küçük kütle kayıpları da gözlemlenebilir. Genel olarak, modifiye edilmiş sistemler için indüksiyon sıcaklıkları, modifiye edilmemiş versiyona göre belirgin şekilde daha düşüktür. Ayrıca, bu etki bazı sistemlerde diğerlerine kıyasla önemli ölçüde daha yüksektir.

Genel olarak, modifiye edilmemiş (saf) polistirenin (PS) ısıtılmasının ana zincirlerin rastgele kırılmasına neden olduğu belirlenmiştir. TGA verileri; 260 °C ve 415 °C'de PS'nin bozunması sonucu oluşan gaz ürünlerinin gaz kromatogramlarını ve kütle spektrumunu göstermektedir. Sıcaklık noktaları, 10 °C/dakika'da termogravimetrik analiz (TGA) verilerine dayanarak seçilmiştir (Baby vd., 2023:229).

Saf PS ve nanopakül içeren PS-nanokompozitlerin termal kararlılığı TGA kullanılarak incelenmiştir. Yaklaşık 10 mg nanokompozit numunesi, azot atmosferi altında, 10°C/dak ısıtma hızıyla Al₂O₃'ten yapılmış seramik bir potaya yerleştirilmiştir. Ölçüm sırasında sıcaklık oda sıcaklığından 600°C'ye yükseltilmiştir. Termogravimetrik eğrilerden; saf PS ve PS-nanopakül kompozitleri, arttırılmış sıcaklıkla benzer bir ağırlık kaybı deseni göstermiştir. TGA eğrilerinden, 100°C-600°C aralığında üç belirgin termal bozunma platosu gözlenmiştir. 100°C-350°C'deki ilk bozunma adımı, muhtemelen artık çözücülerin buharlaşmasından dolayı PS veya PS-nanopakül dolgulu kompozitlerinde %2-3'lük bir ağırlık azalması göstermiştir.

350°C-400°C aralığında yaklaşık %50'lik ikinci ağırlık kaybı, PS matrisinin karbon-karbon bağlarının kırılmasına ve nanopatiküllerin organik stabilizatörlerinin ayrışmasına atfedilmiştir. Sentezlediğimiz PS- nanopakül nanokompozitlerin 430°C ile 450°C arasında tamamen ayrıştığı (%100 ayrışma) bulunmuştur. Saf PS ve PS- nanopakül dolgulu kompozitlerinin kalıntı kütlelerinin sırasıyla %2, %25 ve %50'sinde, termal bozunmanın karakteristik sıcaklıklarını özetlenmiştir. T₂, T₂₅ ve T₅₀ bozunma değerleri ile dolgu miktarı (ağırlıkça %) arasında bir korelasyon bulunmaktadır. Saf PS ve PS-nanopatikül dolgulu nanokompozitleri arasındaki bozunma sıcaklığı farkının çok önemli olmadığı gözlemlenmiştir. Ancak, T₂'deki kaynama/bozunma noktası sıcaklık değişimleri, PS-nanopatikül nanokompozitinin kararlılığıyla tek başına ilişkilendirilemez, çünkü kompozitin kimyasal yapısı, ısı nedeniyle maksimum kinetik enerjisine yaklaştıkça tamamen dönüşüme uğmaktadır. Verilerden görüldüğü gibi, saf PS'nin T₂'deki tam bozunması 433°C 'de olup, bu da PS'nin bozunma noktasına karşılık gelen değerdir. Benzer şekilde, T₂₅ ve T₅₀'de kaydedilen sıcaklıklar sırasıyla 410°C ve 404°C'lerdir.

Saf PS'ye kıyasla, nanokompozitlerinin termal kararlılığı her zaman daha yüksektir. Bu durum, PS matrisinin aromatik halkaları ile nanopartiküller arasında π - π bağının oluşmasından kaynaklanabilir. Bu bağ etkileşimi, termal kararlılığın daha iyi güçlendirilmesini sağlayarak PS-nanopartikül kompozitlerinin bozunma sıcaklığını artırmıştır. Örneğin, sıcaklık [T₅₀(C)]; %10 dolgulu PS-nanopartikül nanokompozitinin %50 kütle kaybında, saf PS'ye göre yaklaşık 9°C daha yüksektir; bu, PS matrisinde iyi dağılmış nanopartiküllerin varlığından kaynaklanmaktadır. (Kamrupi vd., 2011; Vodnik vd., 2012:782). Özetle, PS kompleksinin termal stabilitesi, nanopartiküllerin eklenmesiyle artar ve bu da PS kompleksinin termal

bozunması sırasında zincir transfer reaksiyonlarının azalmasını etkiler (Vodnik vd., 2012:782). Öte yandan, %50 ağırlık oranındaki sıcaklık, modifiye edilmiş sistemlerin bazılarında polistirene göre daha yüksektir.

SONUÇLAR

Polistiren (PS), çok sayıda uygulamada kullanılan nispeten ucuz, kolayca temin edilebilen ve şeffaf bir termoplastik polimerdir. Bu çalışmada, saf polistirenin (PS) ve nanopartikül dolgulu (katkılı) polistiren nanokompozitlerinin yapısını, morfolojisini ve termal özelliklerini nasıl etkilediği değerlendirilmiştir. X-ışını kırınımı (XRD) analizi, Taramalı elektron mikroskobu (SEM), geçirimli elektron mikroskobu (TEM), atomik kuvvet mikroskobu (AFM), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), termogravimetrik analiz (TGA), diferansiyel termal analiz (DTA) ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) karakterizasyon teknikleri kullanılarak yapılmış ölçümlerle, nanopartiküllerin PS polimer matrisine dağıtıldıktan sonra meydana gelen değişiklikler hakkında geniş bir bilgi verilmiştir. Hem polimerin hem de eklenen nanopartiküllerin işlem boyunca amorf kaldığı gözlemlenmiştir. Ancak, nanopartikül içeriği yaklaşık %5'in üzerine çıktığında, nanopartiküller kümelenmeye başlar ve daha fazla boşluk ve daha pürüzlü nanokompozit yüzeyler oluşturmaktadır. Bu yapısal değişiklikler morfolojik verilerde de açıkça görülmektedir: az miktarda nanopartikül bulunduğu bant aralığı daralır, ancak çok fazla nanopartikül kümelenildiğinde, önceki faydaların bazılarını azaltan yeni kusurlar ortaya çıkmaktadır. Morfolojik görüntülere tamamlayıcı olarak çekilen XRD desenlerinden, polistiren nanokompozitlerinin homojen dağılımı doğrulanabilmektedir.

Genel olarak, polistiren bazlı yalıtım malzemeleri oldukça yanıcı/tutuşabilir özelliktedir ve inşaat sektöründe güvenli kullanım için termal olarak kararlı hale getirilmeleri amacıyla uygun yangın geciktiricilerin (FR) eklenmesini gerektirmektedir. Bu alev geciktirici katkıları, termal bozunma modellerini değiştirebilir ve stiren polimerlerinin yangın direncini büyük ölçüde artırabilmektedirler. Polistiren polimerik matrisine ilave edilen nanopartiküllerin polistirenin termal özelliklerindeki değişiklikler; termogravimetrik analiz (TGA), diferansiyel termal analiz (DTA) ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) karakterizasyon teknikleri kullanılarak belirlenebilmektedir. Farklı ısıtma hızlarında gerçekleştirilen termogravimetrik ölçümlerin verilerinden, saf polistirenin, nanopartiküllerin ve elde edilen nanokompozitlerinin termal özellikleri ve termal kararlılığı belirlenebilmektedir.

REFERANSLAR

- Abd, M. A., Zahra, A. A. A., ve Shenta, A. A. (2009). Photostabilization of polystyrene films by anthraquinones derivatives and their complexes with copper(II), oxovanadium(IV) and nickel(II) ions, *Journal of Basrah Researches Sciences*, 35(3), 81-97.
- Ahmed, D. S., El-Hiti, G. A., Yousif, E., ve Hameed, A. S. (2017a). Polyphosphates as inhibitors for poly (vinyl chloride) photodegradation. *Molecules*, 22(11), 1849.
- Ahmed, D. S., El-Hiti, G. A., Yousif, E., Hameed, A. S., ve Abdalla, M. (2017b). New eco-friendly phosphorus organic polymers as gas storage media. *Polymers* 9(8):336.
- Ahmed, D. S., El-Hiti, G. A., Hameed, A. S., Yousif, E., ve Ahmed, A. (2017c). New tetra-Schiff bases as efficient photostabilizers for poly(vinyl chloride). *Molecules* 22(9):1506
- Ahmed, D. S., El-Hiti, G. A., Yousif, E., Ali, A. A., ve Hameed, A. S. (2018). Design and synthesis of porous polymeric materials and their applications in gas capture and storage: a review. *J Polym Res* 25(3):75.
- Alekseeva, O. V., Noskov, A. V., Guseynov, S. S., ve Agafonov, A. V. (2018). Thermal behaviour of polystyrene/silica composites. *Philosophical Magazine Letters*, 98(3), 107-117.
- Alexandre, M., ve Dubois, P. (2000). Polymer-Layered Silicate Nanocomposites: Preparation, Properties and Uses of a New Class of Materials, *Materials Science and Engineering R: Reports*, 28 (1-2), 1-63.
- Ali, G. Q., El-Hiti, G. A., Tomi, I. H. R., Haddad, R., Al-Qaisi, A. J., ve Yousif, E. (2016). Photostability and performance of polystyrene films containing 1,2,4-triazole-3-thiol ring system Schiff bases. *Molecules* 21(12):1699.
- Alshabanat, M., Al-Arrash, A., ve Mekhamer, W. (2013). Polystyrene/Montmorillonite Nanocomposites: study of the morphology and effects of sonication time on thermal stability, *Journal of Nanomaterials*, 2013 (1), 1-12.
- Awad, M. A., Mekhamer, W. K., Merghani, N. M., Hendi, A. A., Ortashi, K. M., Al-Abbas, F., ve Eisa, N. E. (2015). Green synthesis, characterization, and antibacterial activity of silver/polystyrene nanocomposite. *Journal of Nanomaterials*, 2015(1), 943821.
- Baby, A., Tretsiakova-McNally, S., Arun, M., Joseph, P., ve Zhang, J. (2020). Reactive and additive modifications of styrenic polymers with phosphorus-containing compounds and their effects on fire retardance. *Molecules*, 25(17), 3779.
- Baby, A., Tretsiakova-McNally, S., Joseph, P., Arun, M., Zhang, J., ve Pospiech, D. (2023). The influence of phosphorus-and nitrogen-containing groups on the thermal stability and combustion characteristics of styrenic polymers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(2), 229-241.
- Bandyopadhyay, A., ve Basak, G. C. (2007). Studies on photocatalytic degradation of polystyrene. *Materials Science and Technology*, 23(3), 307-314.
- Bera, O., Pavličević, J., Jovičić, M., Stojković, D., Pilić, B., ve Radičević, R. (2012). The influence of nanosilica on styrene free radical polymerization kinetics. *Polymer Composites*, 33(2), 262-266.

- Bilgiç, C. (2018). Determination of the surface properties of kaolinite by inverse gas chromatography, *Water Science and Technology*, 2017(2), 319-328.
- Binnig, G., Quate, C. F., ve Gerber, C. (1986). Atomic force microscope. *Physical review letters*, 56(9), 930.
- Bottino, F. A., di Pasquale, G., Pollicino, A., ve Recca, A. (1998). Surface photostabilization of polystyrene by Tinuvin 1577. *Journal of applied polymer science*, 69(6), 1251-1256.
- Brauman, S. K., Chen, I. J., ve Matzinger, D. P. (1983). Polystyrene degradation during combustion. *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition*, 21(6), 1831-1845.
- Cai, W., Xu, D., Qian, L., Wei, J., Xiao, C., Qian, L., ... ve Cui, S. (2019). Force-induced transition of π - π stacking in a single polystyrene chain. *Journal of the American Chemical Society*, 141(24), 9500-9503.
- Chen, G., Liu, S. S., Chen, S., ve Qi, Z. (2001). FTIR spectra, thermal properties, and dispersibility of a polystyrene/montmorillonite nanocomposite, *Macromolecular Chemical Physics*, 202(7), 1189-1193.
- De Rosa, C., ve Auriemma, F. (2006). Structure and physical properties of syndiotactic polypropylene: A highly crystalline thermoplastic elastomer. *Progress in polymer science*, 31(2), 145-237.
- De Souza Neto, F. N., Ferreira, G. R., Sequinel, T., Biasotto, G., Cruz, S. A., Gimenez, J. C. F., ... ve Gorup, L. F. (2023). Polymeric nanocomposites for automotive application. In *Smart Polymer Nanocomposites* (pp. 473-506). Elsevier.
- Ezechiáš, M., Covino, S., ve Cajthaml, T. (2014). Ecotoxicity and biodegradability of new brominated flame retardants: a review. *Ecotoxicology and environmental safety*, 110, 153-167.
- Gary, J.E., (2011) *Polystyrene: properties, performance and applications*. Nova Science Publishers Inc, New York
- Ghazi, D., El-Hiti, G. A., Yousif, E., Ahmed, D. S., ve Alotaibi, M. H. (2018). The effect of ultraviolet irradiation on the physicochemical properties of poly(vinyl chloride) films containing organotin(IV) complexes as photostabilizers. *Molecules* 23(2):254.
- Giannakas, A., Spanos, C. G., Kourkoumelis, N., Vaimakis, T., ve Ladavos, A. (2008). Preparation, characterization and water barrier properties of PS/organo-montmorillonite nanocomposites. *European Polymer Journal*, 44(12), 3915-3921.
- Giannelis, E. P., Krishnamoorti, R., ve Manias, E. (1999). Polymer-Silicate Nanocomposites: Model Systems for Confined Polymers and Polymer Brushes, *Advances in Polymer Science*, 138, 107-147.
- Goldshtein, J., ve Margel, S. (2011). Synthesis and characterization of polystyrene/2-(5-chloro-2H-benzotriazole-2-yl)-6-(1,1-dimethylethyl)-4-methyl-phenol composite microspheres of narrow size distribution for UV irradiation protection. *Colloid and Polymer Science*, 289(17), 1863-1874.
- Guerrero, F., De la Flor, S., Ramis, X., Santos, J. I., ve Serra, A. (2022). Novel hybrid organic/inorganic poly (thiourethane) covalent adaptable networks. *European Polymer Journal*, 174, 111337.
- Guillaume, E., de Feijter, R., ve van Gelderen, L. (2020). An overview and experimental analysis of furniture fire safety regulations in Europe. *Fire and materials*, 44(5), 624-639.

- Hashim, H., El-Hiti, G. A., Alotaibi, M. A., Ahmed, D. S., ve Emad, Y. (2018). Fabrication of ordered honeycomb porous poly(vinyl chloride) thin film doped with a Schiff base and nickel(II) chloride. *Heliyon* 4: e00743.
- Hernández, C. G., González, R., Soto, J. J., ve Rosales, I. (2016). Photooxidation of polystyrene film irradiated with UV-B. Springer, Gewerbestrasse, Switzerland.
- Hoffman, B., Dietrich, C., Thomann, R., Friedrich, C., ve Mülhaupt, R. (2000). Morphology and rheology of polystyrene nanocomposites based upon organoclay, *Macromol Rapid Commun*, 21(1), 57-61.
- Hong, K. J., Tan, C. H., Tan, S. T., ve Chong, K. K. (2022). Morphology and topography of quantum dots. *Graphene, Nanotubes and Quantum Dots-Based Nanotechnology*, Elsevier, pp. 727-770.
- Hsiue, G. H., Kuo, W. J., Huang, Y. P., ve Jeng, R. J. (2000). Microstructural and morphological characteristics of PS-SiO₂ nanocomposites. *Polymer*, 41(8), 2813-2825.
- Hu, X., Zhang, T., Chen, J., Gao, H., ve Cai, W. (2016). Novel synthesis of CuO nanofiber balls and films and their UV-visible light filtration property. *Ceramics International*, 42(7), 8505-8512.
- Huang, G., Xu, J., Geng, P., ve Li, J. (2020). Carrier flotation of low-rank coal with polystyrene. *Minerals*, 10(5), 452.
- Ibrahimova, H. S., Shirinova, H. A., Rzayev, R. M., Rahimova, K. E., ve Mustafayeva, E. M. (2022). Change of thermophysical parameters of polypropylene-metal oxide nanocomposite (polypropylene+ ZrO₂) after electric field influence. *Polymers and Polymer Composites*, 30, 09673911221104484.
- Iwata, T. (2015). Biodegradable and bio-based polymers: future prospects of eco-friendly plastics. *Angewandte Chemie (International ed. in English)*, 54(11), 3210-3215.
- Jakab, E., Uddin, M. A., Bhaskar, T., ve Sakata, Y. (2003). Thermal decomposition of flame-retarded high-impact polystyrene. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 68, 83-99.
- Joseph, A. M., Nagendra, B., Surendran, K. P., ve Bhoje Gowd, E. (2015). Syndiotactic polystyrene/hybrid silica spheres of POSS siloxane composites exhibiting ultralow dielectric constant. *ACS applied materials & interfaces*, 7(34), 19474-19483.
- Joseph, P., ve Tretsiakova-McNally, S. (2011). Reactive modifications of some chain- and step-growth polymers with phosphorus-containing compounds: effects on flame retardance—a review. *Polymers for Advanced Technologies*, 22(4), 395-406.
- Joseph, P., ve Tretsiakova-McNally, S. (2012). Combustion behaviours of chemically modified polyacrylonitrile polymers containing phosphorylamino groups. *Polymer degradation and stability*, 97(12), 2531-2535.
- Joseph, P., ve Tretsiakova-McNally, S. (2015). Melt-flow behaviours of thermoplastic materials under fire conditions: Recent experimental studies and some theoretical approaches. *Materials*, 8(12), 8793-8803.
- Joseph, P., Arun, M., Bigger, S., Guerrieri, M., Pospiech, D., ve Harnisch, C. (2021). Mode of action of condensed-and gaseous-phase fire retardation in some phosphorus-modified polymethyl methacrylate-and polystyrene-based bulk polymers. *Polymers*, 13(19), 3402.

- Kamrupi, I. R., Phukon, P., Konwer, B. K., ve Dolui, S. K. (2011). *J. Supercrit, Fluids* 2011, 55, 1089.
- Karimova, A., Hajizada, S., Shirinova, H., Nuriyeva, S., Gahramanli, L., Yusuf, M. M., ... ve Yagublu, V. (2024). Surface modification strategies for chrysin-loaded iron oxide nanoparticles to boost their anti-tumor efficacy in human colon carcinoma cells. *Journal of Functional Biomaterials*, 15(2), 43.
- Kızılduman, B. K., Alkan, M., Doğan, M., ve Turhan, Y. (2017). Al-Pillared-Montmorillonite (AlPMt)/Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA) Nanocomposites: The Effects of Solvent Types and Synthesis Methods, *Advances in Materials Science*, 17, 5-23.
- Kim, T. H., Jang, L. W., Lee, D. C., Choi, H. J., ve Jhon, M. S. (2002). Synthesis and Rheology of Intercalated Polystyrene/Na⁺-Montmorillonite Nanocomposites, *Macromolecular Rapid Communications*, 23(3), 191-195.
- Kim, T. H., Lim, S. T., Lee, C. H., Choi, H. J., ve Jhon, M. S. (2003). Preparation and rheological characterization of intercalated polystyrene/organophilic montmorillonite nanocomposite, *Journal of Applied Polymer Science*, 87(13), 2106-2112.
- Korobeinyk, A., Yurchenko, G., Matkovsky, A., ve Tertykh, V. (2023). Thermal properties of porous sodium polyacrylate/silica nanocomposites. *Polimery*, 68(2), 106-112.
- Krishna, S. V., ve Pugazhenth, G. (2011). Properties and thermal degradation kinetics of polystyrene/organoclay nanocomposites synthesized by solvent blending method: effect of processing conditions and organoclay loading. *Journal of Applied Polymer Science*, 120(3), 1322-1336.
- Kugbe, J., Matsue, N., ve Henmi, T. (2009). Synthesis of Linde A zeolite-goethite nanocomposite as an adsorbent for cationic and anionic pollutants, *Journals of Hazardous Materials*, 164(2-3), 929-935.
- Kuzina, S. I., ve Mikhailov, A. I. (2001). Photo-oxidation of polymers 4. The dual mechanism of polystyrene photo-oxidation: a hydroperoxide and a photochain one. *European polymer journal*, 37(11), 2319-2325.
- Lee, D. W., ve Yoo, B. R. (2016). Advanced silica/polymer composites: Materials and applications. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 38, 1-12.
- Lee, J. N., Park, C., ve Whitesides, G. M. (2003). Solvent compatibility of poly (dimethylsiloxane)-based microfluidic devices. *Analytical chemistry*, 75(23), 6544-6554.
- Levchik, S. V., ve Weil, E. D. (2006). A review of recent progress in phosphorus-based flame retardants. *Journal of fire sciences*, 24(5), 345-364.
- Liu, X., Nie, B., Wang, W., Wang, Z., & Zhang, L. (2019). The use of AFM in quantitative analysis of pore characteristics in coal and coal-bearing shale. *Marine and Petroleum Geology*, 105, 331-337.
- Lynwood, C. (2014). *Polystyrene: synthesis, characteristics and applications*. Nova Science Publishers Inc, New York, NY, USA.
- Ma, Y., Zhu, J., He, H., Yuan, P., Shen, W., ve Liu, D. (2010). Infrared investigation of organo-montmorillonites prepared from different surfactants. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 76(2), 122-129.
- Mammeri, F., Le Bourhis, E., Rozes, L., ve Sanchez, C. (2005). Mechanical properties of hybrid organic-inorganic materials. *Journal of materials chemistry*, 15(35-36), 3787-3811.

- Maul, J., Frushour, B. G., Kontoff, J. R., Eichenauer, H., Ott, K. H., ve Schade, C. (2000). Polystyrene and Styrene Copolymers in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH: Weinheim, Germany.
- Mezan, S. O., Jabbar, A. H., Hamzah, M. Q., Tuama, A. N., Hasan, N. N., Roslan, M. S., ve Agam, M. A. (2019). Synthesis, characterization, and properties of polystyrene/SiO₂ nanocomposite via sol-gel process. In AIP conference proceedings (Vol. 2151, No. 1, p. 020034). AIP Publishing LLC.
- Mohamad, N. R., Marzuki, N. H. C., Buang, N. A., Huyop, F., ve Wahab, R. A. (2015). An overview of technologies for immobilization of enzymes and surface analysis techniques for immobilized enzymes. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 29(2), 205-220.
- Momanyi, J., Herzog, M., ve Muchiri, P. (2019). Analysis of thermomechanical properties of selected class of recycled thermoplastic materials based on their applications. *Recycling*, 4(3), 33.
- Morgan, A. B. (2019). The future of flame retardant polymers—unmet needs and likely new approaches. *Polymer Reviews*, 59(1), 25-54.
- Morgan, A. B., ve Harris, J. D. (2004). Exfoliated polystyrene–clay nanocomposites synthesized by solvent blending with sonication. *Polymer*, 45(26), 8695-8703.
- Murphy, J., (Ed.). 2001. Additives for Plastics Handbook, second ed. Elsevier Science Ltd, Oxford.
- Nandanwar, R., Singh, P., ve Haque, F. Z. (2015). Synthesis and characterization of SiO₂ nanoparticles by sol-gel process and its degradation of methylene blue. *Am. Chem. Sci. J*, 5(1), 1-10.
- Navarchian, A. H., Joulazadeh, M., ve Karimi, F. (2014). Investigation of corrosion protection performance of epoxy coatings modified by polyaniline/clay nanocomposites on steel surfaces. *Progress in Organic Coatings*, 77(2), 347-353.
- Ni, G., Yang, W., Bo, L., Guo, H., Zhang, W., ve Gao, J. (2006). Preparation of polystyrene/SiO₂ nanocomposites by surface-initiated nitroxide-mediated radical polymerization. *Chinese Science Bulletin*, 51(13), 1644-1647.
- Noh, M. W., ve Lee, D. C. (1999). Synthesis and characterization of PS-clay nanocomposite by emulsion polymerization, *Polymer Bulletin*, 42, 619-626.
- Nuriyeva, S., Karimova, A., Shirinova, H., Jafarova, S., Abbas, G., Zamchiy, A., ve Aguas, H. (2024). Novel structures for PV Solar Cells: fabrication of Cu/Cu₂S-MWCNTs 1D-hybrid nanocomposite. *Micromachines*, 15(11), 1318.
- Nuroldayeva, G., ve Balanay, M. P. (2023). Flexing the spectrum: advancements and prospects of flexible electrochromic materials. *Polymers*, 15(13), 2924.
- Paul, P. K., Hussain, S. A., Bhattacharjee, D., ve Pal, M. (2013). Preparation of polystyrene clay nanocomposite by solution intercalation technique, *Bulletin Materials Science*, 36, 361-366.
- Pinto, L. F., Goi, B. E., Schmitt, C. C., ve Neumann, M. G. (2013). Photodegradation of polystyrene films containing UV-visible sensitizers. *Journal of Research Updates in Polymer Science*, 2(1), 39-47.
- Pourabas, B., ve Raeesi, V. (2005). Preparation of ABS/montmorillonite nanocomposite using a solvent/non-solvent method, *Polymer*, 46(15), 5533-5540.
- Qutubuddin, S., Fu, X., ve Tajuddin, Y. (2002). Synthesis of polystyrene-clay nanocomposites via emulsion polymerization using a reactive surfactant, *Polymer Bulletin*, 48, 143-149.

- Rabie, S. T., Ahmed, A. E., Sabaa, M. W., ve Abd El-Ghaffar, M. A. (2013). Maleic diamides as photostabilizers for polystyrene. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(6), 1869-1878.
- Ramazanov, M. A., Maharramov, A. M., Ali-zada, R. A., Shirinova, H. A., ve Hajiyeva, F. V. (2020). Theoretical and experimental investigation of the particle size distribution and magnetic properties of the PP+Fe₃O₄ nanocomposites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 33(1), 125-137.
- Ravindra, N. M., ve Narayan, J. (1986). Optical properties of amorphous silicon and silicon dioxide. *Journal of applied physics*, 60(3), 1139-1146.
- Ray, S. S., ve Okamoto, M. (2003). Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing. *Progress in polymer science*, 28(11), 1539-1641.
- Reddy, M. M., Vivekanandhan, S., Misra, M., Bhatia, S. K., ve Mohanty, A. K. (2013). Biobased plastics and bionanocomposites: Current status and future opportunities. *Progress in polymer science*, 38(10-11), 1653-1689.
- Sabet, M. (2025). Advanced functionalization strategies for carbon nanotube polymer composites: achieving superior dispersion and compatibility. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 64(4), 465-494.
- Sakib, N., Koh, Y. P., Huang, Y., Mongcopa, K. I. S., Le, A. N., Benicewicz, B. C., ... ve Simon, S. L. (2020). Thermal and rheological analysis of polystyrene-grafted silica nanocomposites. *Macromolecules*, 53(6), 2123-2135.
- Samarth, N., Mehta, L., Kamble, V., Kulkarni, M., ve Mahanwar, P. (2016). Thermal stability and crystallinity study of polystyrene/SiO₂ nano-composites synthesis via microwaveassisted in situ polymerization., *Open Journal of Synthesis Theory and Applications*, 05(02), 15–23.
- Sastre, R., Catalina, F., Mateo, J. L., Claramunt, R., Santa-Maria, M. D., ve Catalan, J. (1990). Mechanism of photostabilization of polystyrene film by dihydroxyphenyl-pirazoles. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 28(13), 3661-3668.
- See, C. H., ve O'Haver, J. (2003). Atomic force microscopy characterization of ultrathin polystyrene films formed by admicellar polymerization on silica disks. *Journal of applied polymer science*, 89(1), 36-46.
- Shaalam, N., Laftah, N., El-Hiti, G. A., Alotaibi, M. H., Muslih, R., Ahmed, D. S., ve Yousif, E. (2018). Poly(vinyl chloride) photostabilization in the presence of Schiff bases containing a thiadiazole moiety. *Molecules* 23(4):913.
- Shirinova, H. A., Surkhayli, A. E., ve Pashayev, B. G. (2025a). Fabrication, characterization and thermal properties of PVC+ Si based polymer nanocomposites. *Composite Interfaces*, 32(9), 1289-1304.
- Shirinova, H. A., Surkhayli, A. E., Pashayev, B. G., Mammadov, H. M., Jafarov, M. A., ve Gahramanli, L. R. (2025b). Preparation, characterization and thermal properties of the PS+ Si based polymer nanocomposites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 38(5), 1785-1798.
- Shirinova, H., Hasanova, M., Mammadov, H., ve Gahramanli, L. (2025c). Revisiting the structural and functional properties of polystyrene–silica nanocomposites: optical bandgap modulation and photoluminescence properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 36(16), 945, 1-20.
- Smith, S.H., ve Taylor, L.T. (2002). Extraction of various additives from polystyrene and their subsequent analysis. *Chromatographia* 56(34):165–169.

- Sohn, J. I., Lee, C. H., Lim, S. T., Kim, T. H., Choi, H. J., ve John, M. S. (2003). Viscoelasticity and relaxation characteristics of polystyrene/clay nanocomposite, *Journal of Materials Science*, 38, 1849-1852.
- Subramanian, K. (2001). Photodecomposition of poly (styrene peroxide) in vinyl monomers and structural features of the formed polymers. *European polymer journal*, 37(1), 55-64.
- Subramanian, K. (2002). Photodecomposition of poly (styrene peroxide). *European polymer journal*, 38(6), 1167-1173.
- Torikai, A., Takeuchi, T., ve Fueki, K. (1983). Photodegradation of polystyrene and polystyrene containing benzophenone. *Polymer Photochemistry*, 3(4), 307-320.
- Torikai, A., Kobatake, T., Okisaki, F., ve Shuyama, H. (1995). Photodegradation of polystyrene containing flame-retardants: Wavelength sensitivity and efficiency of degradation. *Polymer degradation and stability*, 50(3), 261-267.
- Tseng, C. R., Wu, J. Y., Lee, H. Y., ve Chang, F. C. (2001). Preparation and crystallization behavior of syndiotactic polystyrene – clay nanocomposites, *Polymer*, 42(25), 10063-10070.
- Uthirakumar, P., Song, M. K., Changwoon, N., ve Lee, Y. S. (2005). Preparation and characterization of exfoliated polystyrene/clay nanocomposites using a cationic radical initiator-MMT hybrid, *European Polymer Journal*, 41(2), 211-217.
- Valandro, S. R., Poli, A. L., Neumann, M. G., ve Schmitt, C. C. (2013). Organomontmorillonite/poly(methylmethacrylate) nanocomposites prepared by in situ photopolymerization. Effect of the organoclay on the photooxidative degradation, *Applied Clay Science*, 85, 19-24.
- Vodnik, V., Božanić, D. K., Džunuzović, J. V., Vukoje, I., ve Nedeljković, J. (2012). Silver/polystyrene nanocomposites: optical and thermal properties. *Polymer composites*, 33(5), 782-788.
- Wang, Z., Pang, H., Li, G., ve Zhang, Z. (2006). Glass transition and free volume of high impact polystyrene/TiO₂ nanocomposites determined by dilatometry. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 45(5), 689-697.
- Wang, L. J., Su, S. P., Chen, D., ve Wilkie, C. A. (2009). Variation of anions in layered double hydroxides: effects on dispersion and fire properties, *Polymer Degradation and Stability*, 94(5), 770-781.
- Weil, E. D., ve Levchik, S. V. (2007). Flame retardants for polystyrenes in commercial use or development. *Journal of fire sciences*, 25(3), 241-265.
- Wieszczycska, K., Staszak, K., Woźniak-Budych, M. J., Litowczenko, J., Maciejewska, B. M., ve Jurga, S. (2021). Surface functionalization–The way for advanced applications of smart materials. *Coordination Chemistry Reviews*, 436, 213846.
- Wünsch, J. R. (2000). *Synthesis, Production and Applications*; Rapra Technology Ltd.: Shropshire, UK.
- Xi, Y., Ding, Z., He, H., ve Frost, R. L. (2004). Structure of organoclays - an X-ray diffraction and thermogravimetric analysis study, *Journal of Colloid and Interface Science*, 277(1), 116-120.
- Xie, W., Hwu, J. M., Jiang, G. J., Buthelezi, T. M., ve Pan, W. (2003). A study of the effect of surfactants on the properties of polystyrene-montmorillonite nanocomposites, *Polymer Engineering and Science*, 43(1), 214-222.

- Yadav, R., Singh, M., Shekhawat, D., Lee, S. Y., ve Park, S. J. (2023). The role of fillers to enhance the mechanical, thermal, and wear characteristics of polymer composite materials: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 175, 107775.
- Yalçınkaya, S. E., Yıldız, N., Saçak, M., ve Çalimli, A. (2010). Preparation of polystyrene/montmorillonite nanocomposites: optimization by response surface methodology (RSM), *Turkish Journal of Chemistry*, 34 (4), 581-592.
- Yeh, J. M., Yao, C. T., Hsieh, C. F., Lin, L. H., Chen, P. L., Wu, J. C., Yang, H. C., ve Wu, C. P. (2008). Preparation, characterization and electrochemical corrosion studies on environmentally friendly waterborne polyurethane/Na⁺-MMT clay nanocomposite coatings, *European Polymer Journal*, 44, 3046-3056.
- Yousif, E., El-Hiti, G. A., Hussain, Z., ve Altaie, A. (2015). Viscoelastic, spectroscopic and microscopic study of the photo irradiation effect on the stability of PVC in the presence of sulfamethoxazole Schiff's bases. *Polymer* 7(11):2190–2204.
- Yousif, E., Hasan, A., ve El-Hiti, G. A. (2016). Spectroscopic, physical and topography of photochemical process of PVC films in the presence of Schiff base metal complexes. *Polymers* 8(6):204.
- Yousif, E., Haddad, R., El-Hiti, G. A., ve Yusop, R. M. (2017). Spectroscopic and photochemical stability of polystyrene films in the presence of metal complexes. *J Taibah Univ Sci* 11(6):997–1007.
- Yousif, E., Ahmed, D. S., El-Hiti, G. A., Alotaibi, M. H., Hashim, H., Hameed, A. S., ve Ahmed, A. (2018). Fabrication of novel ball-like polystyrene films containing Schiff base microspheres as photostabilizers. *Polymers*, 10(11), 1185.
- Youssef, A. M., ve Abdel-Aziz, M. S. (2013). Preparation of polystyrene nanocomposites based on silver nanoparticles using marine bacterium for packaging. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 52(6), 607-613.
- Zeng, C., ve Lee, L. J. (2001). Poly(methyl methacrylate) and polystyrene/clay nanocomposites prepared by in-situ polymerization, *Macromolecules*, 34(12), 4098-4103.
- Zhang, J., Jiang, D. D., Wang, D., ve Wilkie, C. A. (2006). Styrenic polymer nanocomposites based on an oligomerically-modified clay with high inorganic content, *Polymer Degradation and Stability*, 91, 2665-2674.
- Zhang, X., Sun, Y., Mao, Y., Chen, K., Cao, Z., ve Qi, D. (2018). Controllable synthesis of raspberry-like PS-SiO₂ nanocomposite particles via Pickering emulsion polymerization. *RSC advances*, 8(7), 3910-3918.
- Zhou, H., Shi, T., ve Zhou, X. (2013). Preparation of polystyrene/SiO₂ microsphere via Pickering emulsion polymerization: Synergistic effect of SiO₂ concentrations and initiator sorts. *Applied surface science*, 266, 33-38.
- Zhou, J., Jiang, Y., Wu, G., Wu, W., Wang, Y., Wu, K., ve Cheng, Y. (2017). Investigation of dielectric and thermal conductive properties of epoxy resins modified by core-shell structured PS@ SiO₂. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 97, 76-82.

Cambay Rift Havzası'nın (Hindistan) Tektonik Yapısının Manyetik ve Sismolojik Verilerle Değerlendirilmesi

Sercan KAYIN¹

M. Nuri DOLMAZ²

- 1- Dr. Öğr. Üyesi; Gümüşhane Üniversitesi Gümüşhane Meslek Yüksekokulu Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü sercankayin@gumushane.edu.tr ORCID No: 0000-0003-2279-0579
- 2- Prof. Dr.; Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü. nuridolmaz@sdu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-9185-9835

ÖZET

Cambay Havzası, Hindistan'ın batısında Gujarat eyaletinde yer alan, yaklaşık 21,0°K–24,5°K enlemleri ile 71,5°D–73,5°D boylamları arasında uzanan, graben karakterli ve NNW-SSE doğrultulu önemli bir rift havzasıdır. Bu çalışmada, EMAG2-v3 küresel aeromanyetik veri seti kullanılarak Oasis Montaj yazılımı ile Toplam Manyetik Alan (TMI), Kutba İndirgeme (RTP), Analitik Sinyal (AS), Birinci Düşey Türev (FVD) ve Manyetik Taban Derinliği (DTB) haritaları oluşturulmuş; elde edilen bulgular bölgenin depremsellik verileriyle birlikte değerlendirilmiştir. TMI haritasında manyetik anomali değerlerinin yaklaşık -213 nT ile +165.4 nT arasında değiştiği, havzanın orta ve kuzey kesimlerinde yüksek genlikli pozitif anomalilerin, güneybatı ve güneydoğu kesimlerinde ise negatif anomalilerin gözlendiği belirlenmiştir. RTP dönüşümü sonrasında anomaliler kaynakları üzerine taşınmış ve ana yapısal doğrultunun NNW-SSE olduğu görülmüştür. Analitik Sinyal haritasında yüksek genlikli anomalilerin havzanın orta ve güneydoğu kesimleri ile kuzeybatısında yoğunlaşarak fay kontrollü blok sınırları ve temel kayaç yükselimlerini temsil ettiği, FVD sonuçlarının ise NW-SE ve NNW-SSE doğrultulu doğrusal anomalileri belirginleştirerek riftleşme ilişkili fay sistemlerini ortaya koyduğu görülmüştür. DTB haritası, manyetik kaynak derinliklerinin yaklaşık 19.8 km'ye ulaştığını, derin kaynakların havza merkezinde yoğunlaşırken sığ kaynakların kenar kesimlerde gözlendiğini göstermiştir. Depremsellik verileri, 1976-2026 döneminde $M_w \geq 3.0$ depremlerin özellikle 70°-71°D boylamları ile 23°-24°K enlemleri arasında yoğunlaştığını ve bu alanların manyetik verilerde belirlenen yüksek gradyan zonları ve fay kontrollü blok sınırları ile örtüştüğünü ortaya koymuştur. Bölge tarihsel olarak M_w 4-5 büyüklüğünde depremler üretebilmekte olup, M_w 6.0'ı geçen olaylar nadirdir. Manyetik ve sismik verilerin bütünleşik değerlendirilmesi, Cambay Havzası'nın rift kökenli asimetrik graben yapısının hem derin kabuk morfolojisi hem de güncel tektonik aktivite üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir. Elde edilen tüm bulgular, havzanın tektonik evrimini doğrulamakta, hidrokarbon potansiyeline ilişkin jeolojik yorumlara katkı sağlamakta ve gelecekteki sismik tehlike değerlendirmeleri için önemli veri sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Manyetik Anomali, Cambay baseni, Analitik Sinyal, Derinlik, Hindistan

GİRİŞ

Cambay Havzası, Hindistan'ın batısında Gujarat eyaletinde yer alan ve ülkenin en önemli kara içi petrol üretim havzalarından biri olup, yaklaşık 21,0°K–24,5°K enlemleri ile 71,5°D–73,5°D boylamları arasında

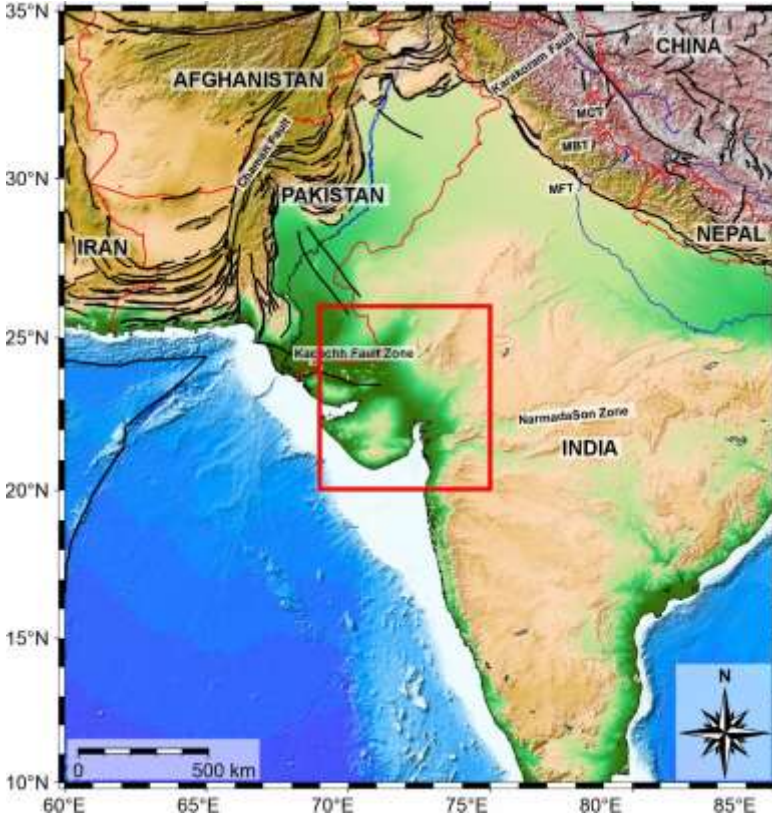
uzanmaktadır (Şekil 1). Yapısal olarak graben karakteri gösteren havza, kuzey-kuzeybatı (NNW)-güney-güneydoğu (SSE) doğrultusunda gelişmiş bir rift havzasıdır (Biswas, 1982, 1987). Havza, kuzeyde Kutch Rift Havzası, güneyde Narmada Rift Havzası ile çevrili olup, batısında Saurashtra Yarımadası, doğusunda ise Aravalli-Delhi Sistemi yer almaktadır (Merh, 1995; Nagarjuna vd., 2023). Cambay Havzası, Gondwana Süperkitası'nın parçalanması sonrasında Hint levhasının kuzeye doğru hareketi sırasında gelişen önemli bir rift havzasıdır. Havzanın çok evreli tektonik gelişimi, bölgenin karmaşık kabuk ve litosfer yapısını şekillendirmiştir.

Cambay Havzası, günümüzdeki tektonik hassasiyetini depremelliği ile kanıtlayan aktif bir yapıdır. Bölgesel gerilim birikimine bağlı olarak orta ve büyük ölçekli depremler üretebilmektedir (Kumar vd., 2016; Surabhi vd., 2024). Son yıllarda gerçekleştirilen kapsamlı jeofizik araştırmalar, Cambay Havzası'nın oldukça karmaşık kabuk ve üst manto yapısına sahip olduğunu, bölgenin akışkanlar, kısmi eriyikler, mafik sokulumlar, magmatik alt sokulumlar ve sıcak nokta-litosfer etkileşimlerinin ortak etkisiyle şekillendiğini ortaya koymaktadır (Sharma vd., 2018; Danda vd., 2020; Nagarjuna vd., 2021; Chouhan vd., 2022).

Bölgenin manyetik özellikleri derin kabuk yapısı hakkında önemli ipuçları sunar. Bu çalışmada, EMAG2-v3 küresel aeromanyetik veri seti kullanılarak Cambay Havzası ve çevresinin manyetik anomalileri jeofiziksel yöntemlerle değerlendirilmiş; Toplam Manyetik Alan (TMI), Kutba İndirgeme (RTP), Analitik Sinyal (AS), Birinci Düşey Türev (FVD) ve Manyetik Taban Derinliği (DTB) haritaları oluşturularak bölgenin yeraltı yapılarının ortaya konması hedeflenmiştir. Elde edilen bulgular, havzanın rift kökenli asimetrik graben yapısını doğrulamakta ve bölgenin hidrokarbon potansiyeline ilişkin jeolojik yorumlara katkı sağlamaktadır.

BÖLGENİN JEOFİZİK GEÇMİŞİ

Kuzeybatı Deccan Volkanik Bölgesi (DVP) içinde yer alan Cambay Havzası ve Rift Sistemi (CRB), derin yapısal özellikleri, tektonik evrimi ve jeodinamik süreçleri bakımından çok sayıda çalışmaya konu olmuştur. Gravite, sismoloji, derin sismik sondaj (DSS), ısı akısı ve manyetotellürik (MT) yöntemleriyle yapılan araştırmalar, havzanın karmaşık kabuk ve litosfer yapısını ortaya koymuştur (Kaila vd., 1981; Tewari vd., 1991; Gupta vd., 2001; Mandal vd., 2004; Mishra vd., 2005; Kayal vd., 2012; Chouhan vd., 2020; Nagarjuna vd., 2021).



Şekil 1: Çalışma alanını ve civarının güncel tektonik durumu ve ana fayları. Kırmızı dörtgen çalışma alanını göstermektedir. Kısaltmalar: MCT: Büyük Orta Bindirmesi, MFT: Büyük Ön Bindirmesi, MBT: Büyük Sınır Bindirmesi. Harita Generic Mapping Tools programı, versiyon 6.0 kullanılarak elde edilmiştir (Wessel et al., 2019). Aktif faylar GEM Global Active Faults GeoJSON veri setinden uyarlanmıştır (Styron & Pagani, 2020).

Gravite çalışmaları, Cambay Rift Havzası altında yaklaşık 30–32 km derinlikte sığ bir Moho süreksizliğinin varlığını ve düşük yoğunluklu üst kabuk ile yüksek yoğunluklu alt kabuktan oluşan iki katmanlı bir yapıyı göstermiştir. Moho yükselimi ile ilişkili yüksek yoğunluklu alt kabuk ve geniş hacimli magmatik kütleler, magmatik alt sokulum süreçlerine işaret etmektedir (Tewari vd., 1991; Mishra vd., 1998; Chouhan vd., 2020).

Kabuk ve litosfer kalınlığına yönelik bulgular, Cambay Havzası altında belirgin bir incelmeyi gerçekleştirdiğini göstermektedir. Kalın çökel istifleri ve sığ Moho derinlikleri, Geç Kretase'den Tersiyer'e kadar süren manto yükselimi ve havza çökmesi süreçlerinin sonucu olarak değerlendirilmektedir (Kaila vd., 1990; Dixit vd., 2010). Sismolojik veriler, havza altında ortalama kabuk kalınlığının yaklaşık 32.5 km, litosfer kalınlığının ise ~60 km olduğunu; rift zonunun her iki yanında bu kalınlığın ~110 km'ye ulaştığını ortaya koymuştur. Ayrıca havza altında karbonatit

türü magmatik malzemenin varlığına bağlı olarak yaklaşık %10 oranında kayma dalgası hız azalması rapor edilmiştir (Rao vd., 2015; Kumar vd., 2016). Bununla birlikte, derin kabuk seviyelerinde akışkanlar, kısmi eriyikler ve magmatik alt sokulumların varlığına ilişkin bulgular da sismolojik çalışmalarla desteklenmiştir (Gupta vd., 2001; Kayal vd., 2002; Mandal vd., 2004; Abdul Azeez vd., 2018).

Derin Sismik Sondaj (DSS) çalışmaları, Kuzey Cambay Havzası'nda Dharimanna–Degam profili boyunca kabuk yapısını ayırtılandırmış; üst kabukta 5.5–5.8 km/s hızlarında düşük hızlı zonların, alt kabukta ise 7.3–7.4 km/s hızlarında yüksek hızlı katmanların bulunduğunu göstermiştir (Kaila vd., 1981, 1990; Dixit vd., 2010). Thiagarajan vd. (2001), bu verilerden elde edilen Moho derinliğini kullanarak Tharad–Degam profili boyunca kabuksal sıcaklık dağılımını incelemiştir.

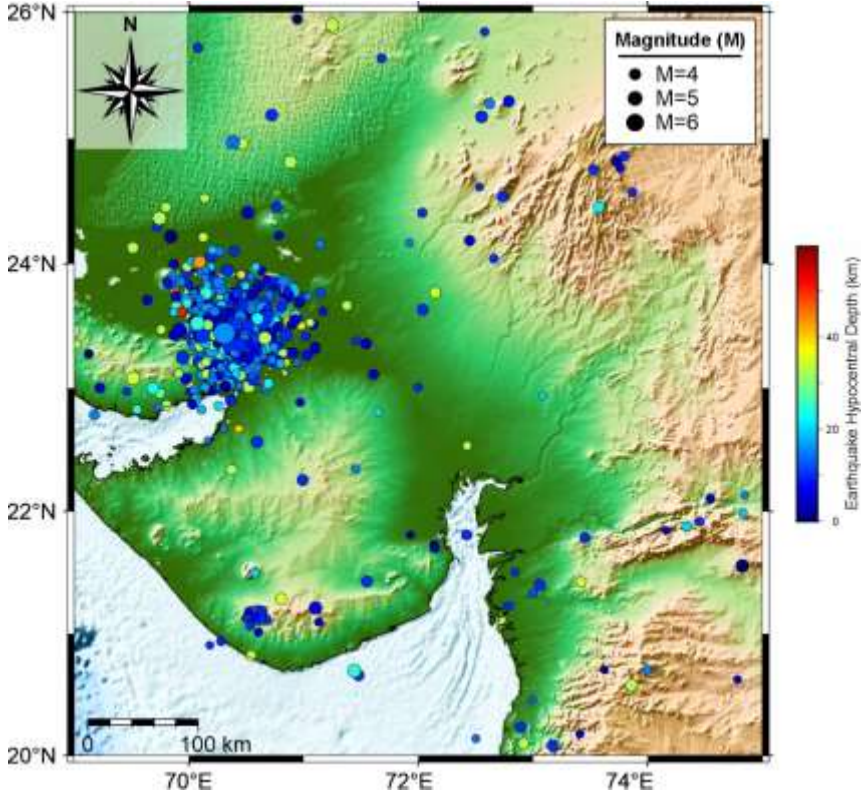
Kuzey Cambay Havzası'nda yapılan ısı akısı ölçümleri, bölgesel ortalamanın oldukça üzerinde, ortalama $\sim 83 \text{ mW/m}^2$ (75–93 mW/m^2 aralığında) değerler vermiştir. Bu yüksek ısı akısı, Reunion sıcak noktası ile litosfer etkileşiminin bir yansıması olarak değerlendirilmektedir (Verma vd., 1968; Gupta, 1981; Negi vd., 1987).

Manyetotellürik (MT) çalışmalar, havzanın batı kesiminde dirençli Arkeyan litosferin, doğu kesiminde ise daha iletken ve değişime uğramış Proterozoyik litosferin varlığını ortaya koymuştur. Ayrıca magmatik alt sokulumlara bağlı yüksek iletkenlik anomalileri ve üst manto iletkenleri belirlenmiştir (Danda vd., 2017, 2020; Nagarjuna vd., 2021, 2023). Bu bulgular, Cambay Rift Havzası'nın akışkanlar, kısmi eriyikler, mafik sokulumlar ve sıcak nokta–litosfer etkileşimlerinin ortak etkisiyle şekillendiğini göstermektedir (Sharma vd., 2018; Chouhan vd., 2020).

DEPREMSELLİK

Cambay Havzası, Hindistan'ın batısında yer alan ve günümüzdeki tektonik hassasiyetini depremselliği ile kanıtlayan aktif bir yapıdır (Surabhi vd., 2024). Kachchh ve Narmada havzaları ile birlikte Hint levhasının batısındaki üç büyük yarık havzasından biri olup, bölgesel gerilim birikimine bağlı olarak orta ve büyük ölçekli depremler üretebilmektedir (Kumar vd., 2016). Havza içerisinde, kanal morfolojisini düzenleyen ve aktif faylanmanın göstergesi olan çok sayıda NNW-SSE, NW-SE ve NE-SW doğrultulu fay hattı bulunmaktadır.

Çalışma alanındaki depremlerin 1976 ile 2026 yılları arasındaki dağılımı ve derinliğe bağlı değişimi, "EarthScope Consortium Wilber 3 system" (<https://ds.iris.edu/wilber3>) üzerinden alınan episantr verileri kullanılarak incelenmiştir. Bu katalog, Global CMT veri tabanından derlenen ve büyüklüğü 3,0'dan büyük tüm depremleri içermektedir. Şekil 2, depremlerin büyüklük, episantr ve odak mekanizmalarının mekânsal dağılımını göstermektedir.

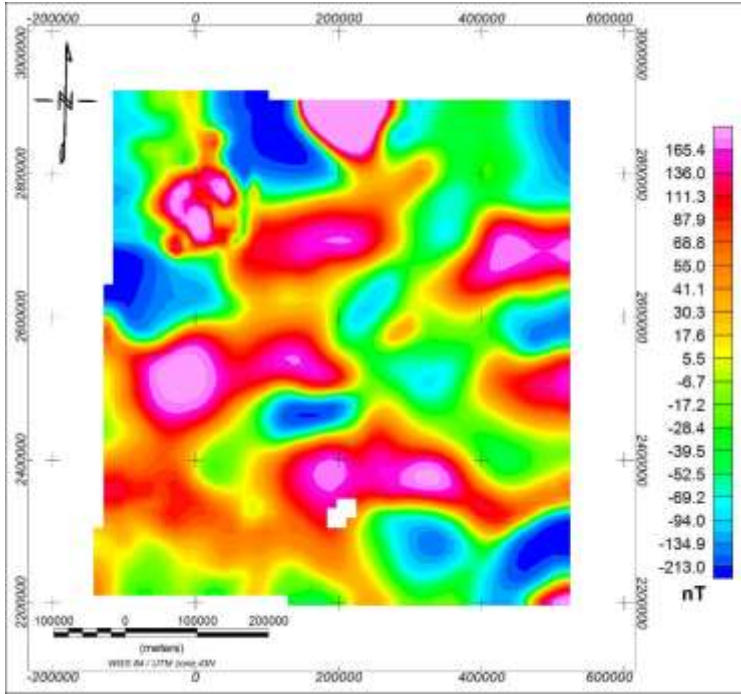


Şekil 2. Çalışma alanındaki depremlerin dağılımı ve derinliğe bağlı değişimi. 1976 ile 2026 arasındaki $M > 3.0$ depremler (deprem episantir verileri “EarthScope Consortium Wilber 3 system” (<https://ds.iris.edu/wilber3/>)) sisteminden alınmıştır. Harita Generic Mapping Tools programı, versiyon 6.0 kullanılarak elde edilmiştir.

Cambay bölgesi tarihsel olarak M_w 4-5 büyüklüğünde birçok depreme ev sahipliği yapmış olup, güncel sismik kayıtlarda M_w 6.0'ı geçen olaylar nadirdir. Deprem dağılımında özellikle 70° - 71° D boylamları ile 23° - 24° K enlemleri arasında yoğun bir kümelenme gözlenmektedir; bu durum, yüksek gerilim birikimi ve kabuk heterojenliği ile ilişkilendirilmektedir. Havzadaki aktif faylar, hem yapısal denetimde hem de sismik aktivitenin dağılımında belirleyici rol oynamaktadır. Sismolojik ve MT çalışmaları, Kutch Rift Havzası'ndaki sıvı rezervuarlarının kırık zonları boyunca sığ derinliklere taşınarak kayaç reolojisini zayıflatıldığını ve deprem oluşumunu tetiklediğini göstermektedir (Kumar vd., 2001; Nagarjuna vd., 2021). Benzer şekilde, Cambay Havzası'ndaki derin fay sistemleri, Reunion sıcak noktası kaynaklı termal akışkanların ve magmatik eriyiklerin kabuk içinde hareket etmesine olanak sağlayarak bölgenin jeodinamik evrimini şekillendirmektedir.

MANYETİK PROSES

Çalışma alanı, Hindistan'ın batısında yer alan Cambay Havzası ve çevresini kapsamakta olup, yaklaşık 69°–75° doğu boylamları ile 20°–26° kuzey enlemleri arasında uzanmaktadır. ABD Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA) tarafından geliştirilen EMAG2-v3 (Earth Magnetic Anomaly Grid) küresel aeromanyetik veri seti (Meyer vd., 2017) bu çalışmada kullanılmıştır. EMAG2-v3, 2 ark-dakika (~3.7 km) mekansal çözünürlüğe sahip, uydu, hava ve deniz manyetik ölçümlerinden bütünleşik olarak oluşturulmuştur. Burada, manyetik anomaliler deniz seviyesinde referanslandırılarak yorumlanmaya hazır hale getirilmiştir. Oasis Montaj (Geosoft) yazılımı kullanılarak manyetik veriler işlenmiş ve yorumlanmıştır. Şekil 3'te çalışma alanının toplam manyetik anomali haritası verilmektedir.



Şekil 3: Çalışma alanının toplam manyetik alan (TMI) anomali haritası

Bölgenin Toplam Manyetik Alan (TMI) haritası, belirgin pozitif ve negatif manyetik anomalilerin varlığını göstermektedir. Burada manyetik anomali değerleri -213 nT ile +165.4 nT arasında değişim göstermektedir. Haritada özellikle havzanın orta ve kuzey kesimlerinde yüksek genlikli pozitif anomaliler gözlenirken, kuzeybatı ve güneydoğu kesimlerinde belirgin negatif anomaliler dikkati çekmektedir.

Gözlenen manyetik anomaliler, manyetik duyarlılıkları birbirinden farklı litolojik birimlerin ve temel kayaç morfolojisindeki değişimlerin varlığına işaret etmektedir. Yüksek genlikli pozitif anomaliler, manyetik

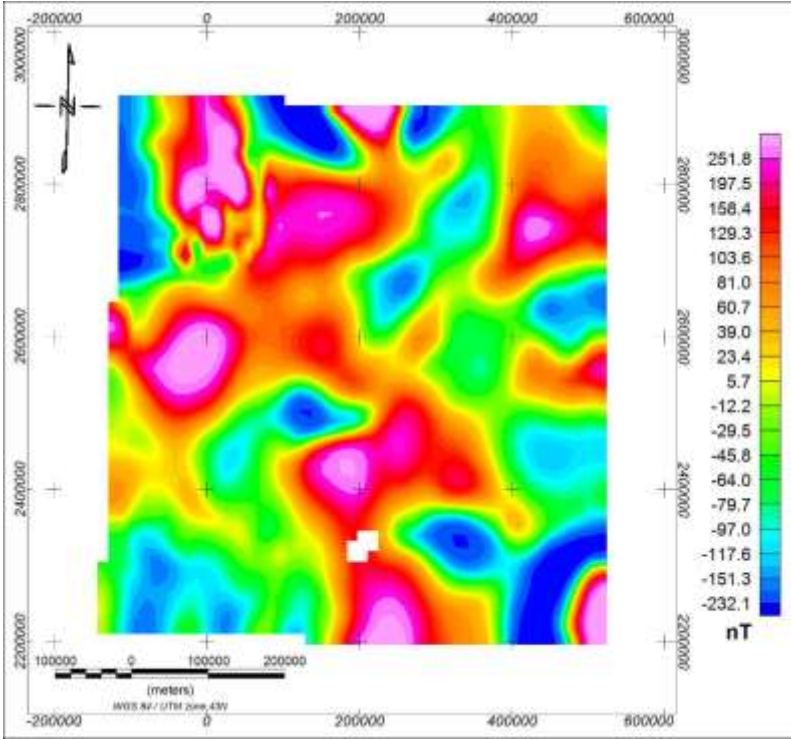
mineraller açısından zengin magmatik veya metamorfik temel kayaların yüzeye daha yakın konumlandığı alanlarla ilişkilendirilirken, negatif anomaliler ise daha kalın sedimanter örtünün bulunduğu ya da düşük manyetik duyarlılığa sahip kayaların egemen olduğu bölgeleri temsil etmektedir.

TMI haritası, havza genelinde kuzey-kuzeybatı-güney-güneydoğu (KKB-GGD) doğrultulu yapısal eğilimleri ortaya koymakta ve bu eğilimlerin Cambay Rift Sistemi'nin bölgesel tektonik yapısıyla uyumlu olduğunu göstermektedir. Verilere uygulanan filtreleme ve dönüşüm işlemleri ise bu yapısal özelliklerin daha ayrıntılı olarak incelenmesini sağlamaktadır.

Manyetik Verilerin Kutba İndirgenmesi (RTP): Şekil 3'te verilen toplam manyetik alan (TMI) anomali haritasına; manyetik alanın eğimli nedeni ile manyetik anomaliler, bunlara neden olan kaynakların tam üzerinde konumlanmamaktadır. İstenmeyen bu kayması etkisini gidermek ve anomalileri kaynakları üzerine taşımak amacıyla TMI verilerine Kutba İndirgeme (Reduction to the Pole, RTP) dönüşümü (Baranov, 1957) uygulanmıştır. IGRF modelinden hesaplanan manyetik eğim (I) ve sapma (D) açıları (sırasıyla 43.1 ve 1.1 derece) kullanılarak RTP dönüşümü uygulanmıştır. Şekil 4'te verilen çalışma alanının kutba indirgenmiş toplam manyetik alan (RTP) anomalileri, kaynaklarının gerçek konumları üzerine taşınmış ve daha simetrik bir görünüm kazanmıştır. Böylelikle TMI haritasında gözlenen eğim ve sapma etkileri büyük ölçüde giderilmiş, jeolojik yapıların konumları daha güvenilir şekilde saptanabilmiştir.

RTP haritasında özellikle çalışma alanının orta kesiminde uzanan yüksek genlikli anomaliler dikkat çekmektedir. Burada gözlenen anomaliler, temel kayaç yükselimleri ve riftleşme sürecine bağlı bloklaşmış yapılar ile ilişkili olarak yorumlanmıştır. Havzanın doğu ve batı sınırlarında gözlenen ani manyetik değişimler ise hem sınır fayları hem de sınır fayları boyunca gelişen yapısal süreksizlikleri göstermektedir. RTP haritası, Cambay Havzası'nda ana yapısal doğrultuların NNW-SSE ve yönelimli olduğunu ortaya koymaktadır.

Analitik Sinyal (AS) Yöntemi: Manyetik anomalilere neden olan kaynakların kenarlarının, yapısal süreksizliklerin ve temel kayaç sınırlarının güvenilir bir şekilde belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir filtreleme tekniğidir. Yöntemin en önemli avantajı, yer manyetik alanının eğim ve sapma açıları ile kayaçların mıknatıslanma yönünden bağımsız olmasıdır. Bu özellik sayesinde, manyetik kaynakların tam üzerinde maksimum genlik değerleri üreterek yapısal sınırların doğru biçimde tanımlanmasına olanak sağlamaktadır (Roest vd., 1992; Blakely, 1995). Analitik sinyal genliği, manyetik alanın yatay ve düşey türevlerinin kareleri toplamının karekökü olarak hesaplanmaktadır (Roest vd., 1992; Roest ve Pilkington, 1993; Salem vd., 2002).

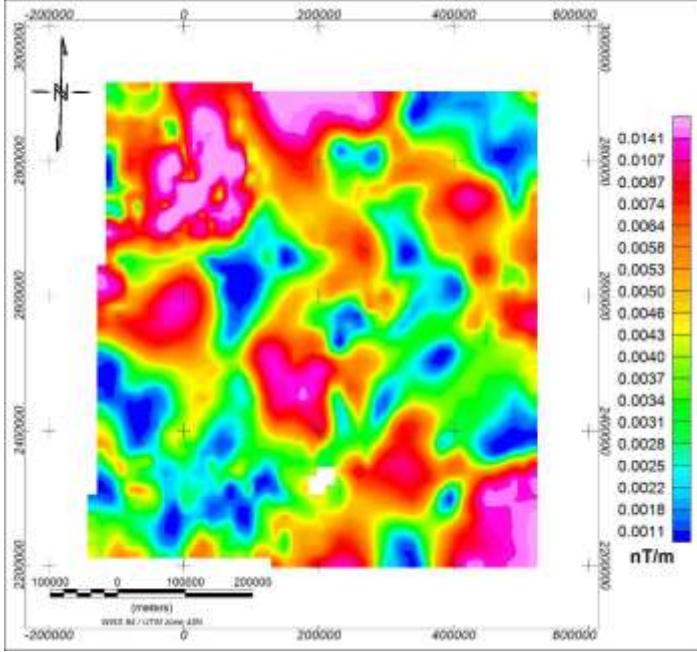


Şekil 4: Çalışma alanının kutba indirgenmiş toplam manyetik alan (RTP) anomali haritası

Bu çalışma kapsamında, Cambay Havzası'ndaki manyetik kaynakların kenarlarını ve yapısal sınırlarını belirlemek amacıyla Analitik Sinyal (AS) yöntemi uygulanmıştır. Şekil 5'te çalışma alanının Analitik Sinyal (AS) anomali haritası görülmektedir. Elde edilen analitik sinyal haritasında yüksek genlikli anomalilerin özellikle havzanın orta ve güneydoğu ile çalışma alanının kuzeybatı kesimlerinde yoğunlaştığı gözlenmektedir. Bu yüksek genlikli alanlar, fay kontrollü blok sınırları, temel kayaç yükselimleri ve olası magmatik sokulumlarla ilişkili olarak değerlendirilmektedir. Analitik sinyal sonuçları, Cambay Havzası'nın yapısal gelişiminde etkili olan doğrultu atımlı ve normal fay sistemlerinin dağılımını ve havza içerisindeki hidrokarbon kapanlarının oluşumunu kontrol eden yapısal unsurların tanımlanmasına önemli katkılar sağlamaktadır.

Birinci Düşey Türev (FVD): Manyetik verilerde anomali sınırlarını ve yapısal süreksizlikleri daha belirgin hale getirmek amacıyla Birinci Düşey Türev (FVD) filtresi (Reeves, 2005) uygulanmıştır. Bu yöntem, kısa dalga boylu anomalileri kuvvetlendirirken derin kaynaklardan kaynaklanan uzun dalga boylu etkileri zayıflatarak sığ derinliklerde bulunan jeolojik yapıların daha net bir şekilde ortaya çıkarılmasını sağlamaktadır. Şekil 6'da çalışma alanının FVD anomali haritası görülmektedir. Özellikle yüzeye yakın fay zonlarının, litolojik sınırların ve temel kayaç morfolojisinin belirlenmesinde

etkili olan FVD yöntemi, çalışma alanındaki yapısal süreksizliklerin ayrıntılı olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.



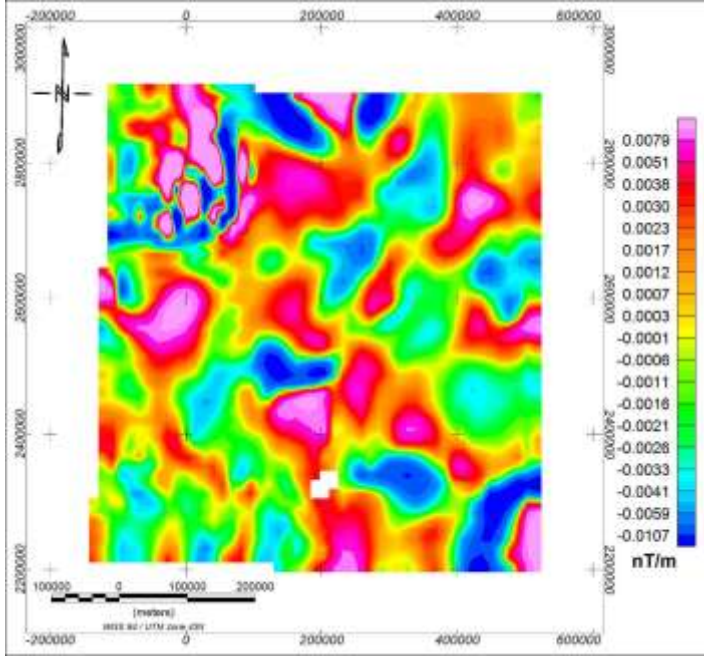
Şekil 5: Çalışma alanının Analitik Sinyal (AS) anomali haritası

Cambay Havzası'na uygulanan FVD filtresi sonucunda, başta kuzeybatı–güneydoğu (NW–SE) ve kuzey-kuzeybatı–güney–güneydoğu (NNW–SSE) doğrultularında uzanan doğrusal anomaliler belirlenmiştir. Bu anomalilerin, havzanın tektonik evriminde önemli rol oynayan fay sistemleriyle uyumlu olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, yüksek gradyan değerleri temel kayaç ile sedimanter örtü arasındaki belirgin litolojik sınırları yansıtarak, havzanın yapısal özelliklerinin daha ayrıntılı biçimde ortaya konulmasına katkı sağlamıştır

Manyetik Kaynak Derinliği (DTB): Çalışma alanındaki manyetik kaynakların derinlikleri, Analitik Sinyal (AS) yöntemine dayalı olarak hesaplanmıştır. Manyetik taban derinliği (DTB), analitik sinyal genliği ile düşey türevi arasındaki oran kullanılarak belirlenmiş (Reid vd., 1990) ve elde edilen sonuçlar manyetik taban derinliği haritası üzerinde değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, sismik verilerle karşılaştırılabilecek üç boyutlu bir manyetik temel kayaç modeli oluşturulmuştur.

DTB haritasından elde edilen sonuçlara göre manyetik taban derinliği yaklaşık 19.8 km'ye ulaşmaktadır (Şekil 7). En yüksek derinlik değerleri havzanın merkezi kesimlerinde yoğunlaşırken, daha düşük derinlikler temel kayaçların yüzeye yaklaştığı alanlarda gözlenmektedir.

Derin manyetik kaynaklar, riftleşme sürecinde gelişen graben yapıları ve kalın sedimanter istiflerle ilişkilendirilirken, sıg manyetik kaynaklar horst blokları ve temel kayaç yükselimlerini temsil etmektedir. Elde edilen derinlik dağılımı, Cambay Havzası'nın asimetrik rift karakterini desteklemekte ve hidrokarbon birikimi açısından potansiyel sedimanter çöküntü alanlarının belirlenmesine önemli katkılar sağlamaktadır.



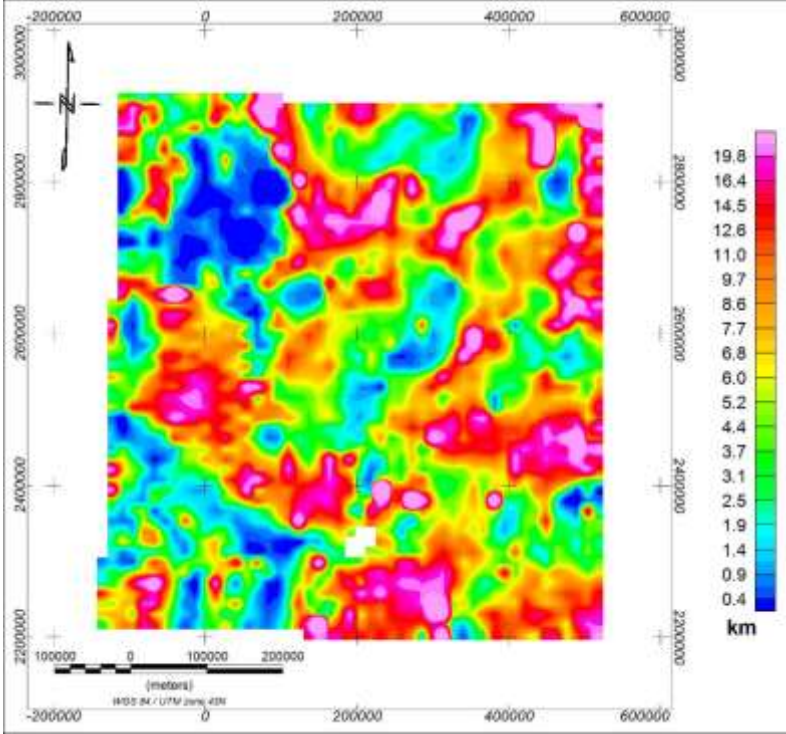
Şekil 6: Çalışma alanının birinci düşey türev (FVD) anomali haritası

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Cambay Havzası'nın yapısal özelliklerini ve tektonik evrimini ortaya koymak amacıyla EMAG2-v3 küresel aeromanyetik veri setine TMI, RTP, Analitik Sinyal (AS), Birinci Düşey Türev (FVD) ve Manyetik Taban Derinliği (DTB) işlemleri uygulanmış; elde edilen bulgular bölgenin deprensellik verileriyle birlikte değerlendirilmiştir.

TMI haritasında manyetik anomali değerlerinin yaklaşık -213 nT ile +165.4 nT arasında değiştiği, havzanın orta ve kuzey kesimlerinde yüksek genlikli pozitif anomalilerin, güneybatı ve güneydoğu kesimlerinde ise negatif anomalilerin gözlemlendiği belirlenmiştir. RTP dönüşümü sonrasında anomaliler kaynakları üzerine taşınmış ve havzanın ana yapısal doğrultusunun NNW-SSE yönelimli olduğu görülmüştür. Analitik sinyal haritasında yüksek genlikli anomaliler özellikle havzanın orta ve güneydoğu kesimleri ile kuzeybatısında yoğunlaşarak fay kontrollü blok sınırları ve

temel kayaç yükselimleri temsil etmektedir. FVD sonuçları, başta NW-SE ve NNW-SSE doğrultularında uzanan doğrusal anomalileri belirginleştirerek riftleşme ile ilişkili fay sistemlerinin izlenmesine olanak sağlamıştır. DTB haritası ise manyetik kaynak derinliklerinin yaklaşık 19.8 km'ye ulaştığını, derin kaynakların havza merkezinde yoğunlaşırken sığ kaynakların kenar kesimlerde gözlemlendiğini ortaya koymuştur.



Şekil 7: Çalışma alanının manyetik kaynak derinliği (DTB) haritası

Çalışma alanında 1976-2026 döneminde $M_w \geq 3.0$ depremlerin episantır dağılımı, özellikle $70^\circ\text{--}71^\circ\text{D}$ boylamları ile $23^\circ\text{--}24^\circ\text{K}$ enlemleri arasında yoğun bir kümelenme sergilemektedir. Bu yoğunlaşma, manyetik verilerde belirlenen yüksek gradyan zonları ve fay kontrollü blok sınırları ile mekânsal olarak örtüşmektedir. Tarihsel sismisite verileri bölgenin M_w 4-5 büyüklüğünde depremler üretebildiğini, M_w 6.0'ı geçen olayların ise nadir olduğunu göstermektedir. Havza içerisinde tanımlanan çok sayıda NNW-SSE, NW-SE ve NE-SW doğrultulu aktif fay hattı, hem yapısal denetimde hem de sismik aktivitenin dağılımında belirleyici rol oynamaktadır. Özellikle havza merkezindeki derin manyetik kaynakların yoğunlaştığı alanlar ile sismik aktivitenin yoğunlaştığı bölgelerin örtüşmesi, derin kabuk yapısındaki heterojenliklerin güncel gerilim birikimini tetiklediğine işaret etmektedir.

Manyetik verilerden elde edilen yapısal unsurlar ile depremsellik verileri birlikte değerlendirildiğinde, Cambay Havzası'nın rift kökenli

asimetrik graben yapısının hem derin kabuk morfolojisi hem de güncel tektonik aktivite üzerinde belirleyici olduğu anlaşılmaktadır. RTP, AS ve FVD haritaları fay sistemlerinin ve temel kayaç sınırlarının belirlenmesinde etkili olurken, DTB sonuçları havza içerisindeki derin yapısal değişimleri ve bu değişimlerin sismik aktiviteyle ilişkisini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, uygulanan manyetik dönüşümler ve filtreler Cambay Havzası'nın temel yapısal unsurlarını başarıyla ortaya koymuş; depremsellik verileriyle birlikte değerlendirildiğinde, havzanın aktif tektonik karakteri ile derin kabuk yapısı arasındaki ilişkiyi güçlü şekilde desteklemiştir. Elde edilen tüm bulgular, Cambay Havzası'nın rift kökenli tektonik evrimini doğrulamakta, bölgenin hidrokarbon potansiyeline ilişkin jeolojik yorumlara katkı sağlamakta ve gelecekteki sismik tehlike değerlendirmeleri için önemli veri sunmaktadır.

REFERANSLAR

- Abdul Azeez, K.K., Mohan, K., Veeraswamy, K., Rastogi, B.K., Gupta, A.K., Harinarayana, T., 2018. 3D crustal resistivity structure beneath the Wagad aftershock zone of the 2001 Bhuj earthquake, Kutch, India: heterogeneous resistivity structure controlled by widespread fluid infiltration and clues to aftershocks pattern. *Tectonophysics*, 747-748, 54-67.,
- Baranov, V. 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps, pseudo-gravimetric anomalies. *Geophys.*, 22, 359-363.
- Biswas, S.K., 1982. Rift basins in western margins of India and their hydrocarbon prospects with special reference to Kutch basin. *Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 66, 1497-1513.
- Biswas, S.K., 1987. Regional tectonic framework, structure and evolution of western margins of India. *Tectonophysics*, 135, 305-327.
- Blakely, R.J., 1995. Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University Press, pp 441.
- Chouhan, A.K., Choudhury, P., Pal, S.K., 2020. New evidence for a thin crust and magmatic underplating beneath the Cambay rift basin, Western India through modelling of EIGEN-6C4 gravity data. *J. Earth Syst. Sci.*, 129, 64.
- Chouhan, A.K., Chopra, S., Chaube, H., Singh, D., Mishra, A.K., 2022. Integrated analysis of the gravity and the magnetic data to infer structural features and their role in prospective mineralisation in and around the Ambaji-Deri-Danta-Chitrasani region, NW India. *J. Earth Syst. Sci.*, 131, 226.
- Danda, N., Rao, C.K., Kumar, A., 2017. Geoelectric structure of northern Cambay rift basin from magnetotelluric data. *Earth Planets Space*, 69, 140.
- Danda, N., Rao, C.K., Kumar, A., Rama Rao, P., Subba Rao, P.B.V., 2020. Implications for the lithospheric structure of Cambay rift zone, western India: Inferences from a magnetotelluric study. *Geosci. Front.*, 11, 1743-1754.
- Dixit, M.M., Tewari, H.C., Rao, C.V., 2010. Two-dimensional velocity model of the crust beneath the South Cambay Basin, India from refraction and wide-angle reflection data. *Geophys. J. Int.*, 181, 635-652.
- Gupta, M.L., 1981. Surface heat flow and igneous intrusion in the Cambay basin, India. *J. Volcan. Geotherm. Res.*, 10, 279-292.

- Gupta, H.K., Harinarayana, T., Kousalya, M., Mishra, D.C., Mohan, Indra, Purnachandra Rao, N., Raju, P.S., Rastogi, B.K., Reddy, P.R., Sarkar, D., 2001. Bhuj earthquake of 26th January, (2001). *J. Geol. Soc. India*, 57, 275–278.
- Kaila, K.L., Krishna, V.G., Mall, D.M., 1981. Crustal structure along MehmabadBillimora profile in the Cambay basin, India, from deep seismic soundings. *Tectonophysics*, 76, 99–130.
- Kaila, K.L., Tewari, H.C., Krishna, V.G., Dixit, M.M., Sarkar, D., Reddy, M.S., 1990. Deep seismic sounding studies in the north Cambay and Sanchores basins, India. *Geophys. J. Int.*, 103, 621–637.
- Kayal, J.R., Zhao, D., Mishra, O.P., De, R., Singh, O.P., 2002. The 2001 Bhuj earthquake: Tomographic evidence for fluids at the hypocenter and its implications for rupture nucleation. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 2152–2155.
- Kayal, J.R., Das, V., Ghosh, U., 2012. An appraisal of the 2001 Bhuj Earthquake (Mw 7.7, India) source zone: fractal dimension and b value mapping of the aftershock sequence. *Pure Appl. Geophys.*, 169, 2127–2138.
- Kumar, M.R., Saul, J., Sarkar, D., Kind, R., Shukla, A.K., 2001. Crustal structure of the Indian shield: new constraints from teleseismic receiver functions. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1339–1342.
- Kumar, P., Sen, G., Mandal, P., Sen, M.K., 2016. Shallow lithosphere–asthenosphere boundary beneath Cambay Rift Zone of India: inferred presence of carbonated partial melt. *J. Geol. Soc. India*, 88, 401–406.
- Mandal, P., Rastogi, B.K., Satyanaraya, H.V.S., Kousalya, M., Vijayraghavan, R., Satyamurty, C., Raju, I.P., Sarma, A.N.S., Kumar, N., 2004. Characterization of the causative fault system for the 2001 Bhuj earthquake of Mw 7.7. *Tectonophysics*, 378, 105–121.
- Merh, S.S., 1995. *Geology of Gujarat*. Bangalore, India: Geological Society of India.
- Meyer, B., Chulliat, A., Saltus, R., 2017. Derivation and error analysis of the Earth magnetic anomaly grid at 2 arc min resolution version 3 (EMAG2v3). *Geochem Geophys Geosyst*, 18, 4522–4537.
- Mishra, D.C., Gupta, S.B., Tiwari, V.M., 1998. A geotranssect from Dharimanna to Billimora across the Cambay and Narmada-Tapti rift basins, India. *Int. Geol. Rev.*, 40, 1007–1020.
- Mishra, D.C., Chandrasekhar, D.V., Singh, B., (2005). Tectonics and crustal structures related to Bhuj earthquake of January 26, 2001: based on gravity and magnetic surveys constrained from seismic and seismological studies. *Tectonophysics*, 396, 195–207.
- Nagarjuna D., Rao, C.K., Pavankumar, G., Kumar, A., Manglik, A., 2021. Magnetotelluric evidence for an Archaean – Proterozoic lithospheric assemblage within the Cambay rift basin, western India, and its role in channeling of plume-derived fluids within the basin. *Tectonophysics*, 818, 229064.
- Nagarjuna D., Kumar, A., Pavankumar, G., Rao, C.K., Manglik, A., 2023. Spatially heterogeneous lithospheric architecture of the Cambay rift basin and adjoining Aravalli-Delhi Fold Belt, western India – A synthesis of magnetotelluric results. *Tectonophysics*, 861, 229905.

- Negi, J.G., Agrawal, P.K., Pandey, O.P. 1987. Large variation of curie depth and lithospheric thickness beneath the Indian subcontinent and a case for magnetothermometry. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 88, 763-775.
- Rao, K.M., Kumar, M.R., Rastogi, B.K., 2015. Crust beneath the northwestern Deccan Volcanic Province, India: Evidence for uplift and magmatic underplating. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 3385–3405.
- Reeves C., 2005. *Aeromagnetic Surveys; Principles, Practice and Interpretation*. GEOSOFT, 155pp.
- Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millett, A.J., Somerton, I.W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55, 80-91.
- Roest, W.R., Verhoef, J., Pilkington, M., 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57, 116–125.
- Roest, W. R., and Pilkington, M., 1993. Identifying remanent magnetization effects in magnetic data. *Geophysics*, 58(5), 653-659.
- Salem, A., Ravat, D., Gamey, T. J., and Ushijima, K., 2002. Analytic signal approach and its applicability in environmental magnetic investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 49, 231–244.
- Sharma, J., Kumar, M.R., Roy, K.S., Roy, P.N.S., 2018. Seismic imprints of plumelithosphere interaction beneath the northwestern Deccan Volcanic Province. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123(10), 10831–10853.
- Styron, R., & Pagani, M. (2020). The GEM Global Active Faults Database. *Earthquake Spectra*, 36(S1), 160–180. <https://doi.org/10.1177/8755293020944182>
- Surabhi, K., Biswas, M., Mukherjee, S., 2024. Remote Sensing-based Morphometry on the Petroliferous Cambay Rift Basin (Gujarat, Western India). *Journal of the Geological Society of India*, 4, 473-485.
- Tewari, H.C., Dixit, M.M., Sarkar, D., Kaila, K.L., 1991. A crustal density model across the Cambay basin, India, and its relationship with the Aravallis. *Tectonophysics*, 194, 123-130.
- Thiagarajan, S., Ramana, D.V., Rai, S.N., 2001. Seismically constrained two-dimensional crustal thermal structure of the Cambay basin. *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.)*, 110(1), 1-8.
- Verma, R.K., Gupta, M.L., Hamza, V.M., Venkateshwar Rao, G., Rao, R.U.M. 1968. Heat flow and crustal structure near Cambay, Gujarat, India. *Bull. Natl. Geophys. Res. Inst.*, 6(6), 153-166.
- Wessel, P., Luis, J., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., Tian, D. 2019. The Generic Mapping Tools Version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(11), 5556-5564.

Süperkapasitörler ve Polimer Kompozitlerde Kullanılan İletken Polimerlere Genel Bakış

Özlem DİKTAŞ¹

İlyas KARTAL²

- 1- Özlem DİKTAŞ; Marmara Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü. Fizikokimya diktaso@gmail.com ORCID No: 0009-0006-1677-1696
- 2- Doç. Dr. İlyas KARTAL; Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü. ilyaskartal@marmara.edu.tr ORCID No: 0000-0001-9677-477X

ÖZET

Enerji kullanımı ve tüketimi her geçen gün daha çok artmaktadır. Bu durum enerji üretimini ve depolanmasını daha da önemli hale getirmektedir. Enerji depolanmasında çeşitli sistemler kullanılmaktadır. Süperkapasitörler ise bu sistemlerden önemli bir örneği oluşturmaktadır.

Süperkapasitörler, yüksek güç yoğunluğu, hızlı şarj/deşarj özelliği ve uzun çevrim ömrü sayesinde enerji depolama teknolojilerinde önemli bir yere sahip olan elektrokimyasal cihazlardır. Enerji depolama mekanizmalarına göre elektrokimyasal çift tabaka kapasitörleri, psödokapasitörler ve hibrit sistemler olarak sınıflandırılırlar. İletken polimerler, özellikle psödokapasitörlerde yüksek kapasitans sağlamak amacıyla kullanılan önemli elektrot malzemeleridir.

İletken polimerler, konjuge π -elektron yapıları sayesinde elektriksel iletkenlik gösteren polimerlerdir. Polianilin (PANI), polipirol (PPy) ve PEDOT gibi polimerler; düşük maliyetleri, kolay sentezlenebilirlikleri ve yüksek elektrokimyasal aktiviteleri nedeniyle süperkapasitör uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, redoks reaksiyonları sayesinde yük depolayarak yüksek enerji kapasitesi sağlar.

Ancak saf iletken polimerlerin mekanik dayanımlarının düşük olması ve uzun süreli kullanımlarda yapısal bozulmalar göstermesi, karbon bazlı malzemeler (grafen, karbon nanotüp vb.) veya metal oksitlerle kompozit hâle getirilmelerini gerekli kılmaktadır. Polimer kompozitler, elektriksel iletkenliği, mekanik kararlılığı ve elektrokimyasal performansı artırarak daha dayanıklı enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesine olanak sağlar. Bu nedenle iletken polimer kompozitler, geleceğin enerji alanında esnek, hafif ve yüksek performanslı süperkapasitör teknolojileri için önemli malzemeler arasında yer almaktadır.

Anahtar Kelimeler: Enerji, enerji depolama, süperkapasitör, iletken polimer, polimer kompozit

GİRİŞ

Büyüyen dünya nüfusu ve artan enerji tüketimi enerji konusunu geçmişe göre daha önemli bir alana dönüştürmektedir. Günlük yaşantımızı enerjisiz sürdürmek büyük bir zorluk teşkil etmektedir. Enerjiyi sürekli bir biçimde verimli, az maliyetli ve çevreye daha az zararlı kullanmak modern dünyanın isteklerinden birini oluşturmaktadır. Bu isteği yerine getirmek için alternatif enerji gibi yeni enerji kaynakları arandığı gibi enerjiyi depolayan sistemler de geliştirilmektedir. Batarya, volan, manyetik depolama ve

kapasitörler bu sistemler arasında yer almaktadır. Bu unsurlardan kapasitörler; daha düşük maliyetler, yüksek güç yoğunluğu, düşük çevre zararı, hızlı ve yüksek sayıda çevrim sayısına sahip şarjdeşarj döngüsü imkanı sunmaları açısından depolamada önemli bir öncelik elde etmektedir (Kozak & Kozak, 2012; Sun vd., 2022). 1745 senesinde Leyden şişeleri olarak enerji alanında kendine yer edinen kapasitörler günümüze değin tür ve nitelik bakımından çok fazla gelişmiş olup süperkapasitörlere kadar evrilmiştir. Bataryalarla rekabet edecek düzeye erişebilme ve uygun bir alternatif olabilme hedeflerini temele alan süperkapasitörler, kapasitörlerin daha gelişmiş ve iyileştirilmiş yapılarını oluşturmaktadır.

SÜPERKAPASİTÖRLER

Süperkapasitörler yüksek güç ve enerji yoğunluğu hızlı şarjdeşarj ve çevrim kararlılığı gibi özellikleri sayesinde enerji depolama sistemlerinde kendine önemli bir yer seçenек olasılığı oluşturmaktadır (Raza vd., 2018). Bu önemli yer, süperkapasitör teknolojilerinde çalışmaların artmasına ve dolaylı olarak da yapısal gelişmelere yol açmaktadır. Bir süperkapasitörün temelde yapısını elektrot, elektrolit ve opsiyonel olarak ayırıcı oluşturmaktadır. Yapısal açıdan en önemli elemanını performans göstergesi olan elektrotlar yer almaktadır. Elektrotların yapımı ve yapımında kullanılan malzemeler bu konuda büyük önem taşımaktadır. Bu temel yapıların yapımında birçok türde malzeme kullanılmaktadır. Bu geniş yelpazede malzeme kullanımı, süperkapasitörün verimli çalışmasında etkileyici bir rol oynamasının yanı sıra süperkapasitörlerin de kendi içlerinde ayrı türler oluşmasına yol açmaktadır. Elektrikli çift katmanlı kapasitörler (EDLC'ler), hibrit süperkapasitörler ve psödo-kapasitörler üç ana türdür.

EDLC'ler temelde karbon bazlı malzemelerden oluşur. Çalışma prensibi elektrik enerjisini elektrot ve elektrolit arasında oluşan arayüzde depolaması şeklindedir. Bu depolama daha çok fiziksel veya elektrostatik depolamadır ve iyonlar elektrot yüzeyinde veya yakınında birikirler. Basit depolama yapısı kolay yıpranmayan yapı kazanmasını sağlamaktadır. Bakım bile gerektirmeden çalışabilmesi, uzun ve hızlı çevrim ömrü, mükemmel düzeyde tersinirlik, iyi kapasite ve yüksek güç ve enerji yoğunluğu gibi avantajlara sahip olmaktadır (Faraji & Ani 2015).

Psödo-kapasitörler temelde iletken polimerler ve geçiş metal oksitlerden, sülfürlerden, nitrürlerinden oluşmaktadır. Çalışma prensibinde hızlı ve geri dönüşümlü redoks reaksiyonları yer alırken depolamada faradayik ve kimyasal işlemler bulunmaktadır. Çift katmanın yanı sıra bu redoks yük geçişleri, faradik akım ve kapasitans oluşturmaktadır.. Bu kapasitans sözde kapasitanstır ve tüm malzemeyi kapsayan bu reaksiyonlar kapasite ve enerji yoğunluğu değerlerinde EDCL'ye göre yükselişе yol açmaktadır. Bunun yanı sıra reaksiyonlar çalışma süresini uzatmaktadır ve EDCL'ye göre daha yavaş bir çalışma kinetiğine sahiptir (Snook vd., 2011).

Bu avantajları sağlayan redoks reaksiyonları ve faradik yapı düşük güç yoğunluğuna, kararsız çevrim döngüsüne yol açmaktadır (Iro vd., 2016). Redoks reaksiyonlarını içeren kimyasal süreçlerden ötürü şarj-deşarj sırasında kararsızlık oluşunca bu durum ömür kısalmasına da yol açmaktadır ve maliyetleri arttırmaktadır.

Hibrit süperkapasitörler temelde karbon bazlı malzemeler, iletken polimerler, metal oksitlerden ve bunların kompozitlerinden oluşurlar. Bu süperkapasitör türü üst kısımda bahsedilen iki süperkapasitörün birleşimini ve avantajlarını içerir (Iro vd., 2016). Bu süperkapasitörler hem çift tabaka hem pseudo süperkapasitörlerin özelliklerini taşıması nedeniyle çalışma prensibinin de temelini bu ikili hibrit yapı oluşturmaktadır. Depolama mekanizması hem fiziksel hem kimyasal olup bu ikili yapı sayesinde diğer iki türe göre daha yüksek performans özelliklerine sahip olmaktadır (Yıldırım, 2017). Kendi içinde de elektrotlarda kullanılan malzemeye ve elektrot türüne göre kompozit, asimetrik ve pil tip olmak üzere üç türe ayrılmaktadır.

Ultrakapasitörler ve batarya gibi enerji depolama araçlarında en önemli performans parametrelerinden biri sistemin ne kadar enerji depolayabileceğinin göstergesi olan kapasitedir. Bu ürünleri geliştirmeyi ve yeni nesil depolama araçlarını öne çıkarmayı amaçlayan çalışmaların odaklandığı ana konular kapasitenin nasıl artırılacağı, iletkenliğin nasıl yükseltileceği, uzun ve verimli döngü kararlılığının nasıl sağlanacağıdır.

Malzeme bilimi ve polimer teknolojisindeki gelişmeler ve iyileşmeler bu konuya açıklık getirebilmektedir. Bu konudaki her ilerleme elektrot malzemelerindeki gelişimi de doğrudan tetiklemektedir. Soruların cevapları kullanılan malzemelerde eksik kalan yönleri başka malzemelerin birleşimi ya da katkılama yolu ile telafi ederek geliştirmekten veya tamamen amaca yönelik yeni malzemeler geliştirmekten geçmektedir. Bunun için farklı malzemelerin ayrı ayrı iyi olan özelliklerini bir arada elde etmek veya daha yeni, daha farklı ve daha dayanıklı yapılar oluşturmak gibi birçok amaçla yeni yapılar oluşturulabilmektedir. Bu amaçlarla oluşturulan yapılara kompozit denilmektedir ve kompozitler birçok sektörde ve alanda farklı malzeme seçenekleriyle ve yöntemlerle oluşturulabilmektedir.

Süperkapasitörlerde üstün çalışma performansı sağlamak, üstün performansı korumak ve geliştirmek, yüksek güç ve enerji yoğunluğu sağlamak, hızlı şarj olma verimli bir çevrim kararlılığı oluşturmak ve özellikle hibrit türünün içerdiği malzemeden oluşma durumundan dolayı kompozit elektrotların kullanılması bir gereklilik haline gelmektedir. Son zamanlarda malzeme teknolojisindeki gelişmelerle kompozit yapılar ön plana çıkmaktadır. Kompozit elektrotlar kullanılmasındaki en temel durum bu beklentiye gerçekleştirmektir. Kompozit elektrotlar, süperkapasitörlerin birçok enerji depolayan ürüne göre enerji depolamada rekabetçi talepleri sağlaması ve gelecekteki modern süperkapasitör yapıları sunması açısından çalışmalarda önemli bir yer edinmektedir. Bu konu tabanında iletken polimerlerin metal oksitler ve karbon bazlı malzemelerle kompozit yapıya

sahip elektrotları oluşturulabilir. Özellikle iletken polimerlerin inorganik maddelerle kolay ve etkili bir şekilde her oranda karışabilmesi ile kompozitler oluşur ve bu şekilde nihai ürün bileşenlerinden daha fazla ve benzersiz faydalar sunan farklı malzemeler geliştirilebilmektedir. (Oladele vd., 2025).

İLETKEN POLİMERLER

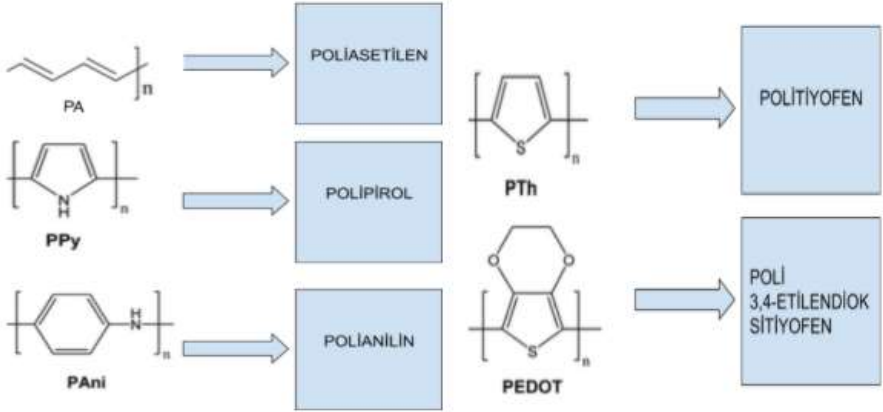
En genel tanımda polimerler monomerlerin birbirini tekrar etmesinden oluşan büyük moleküller olup, yalıtıcıdır. Elektrik iletken elektronların serbestçe hareket ettiği yapıya sahip olan polimerler iletken polimerleri oluşturur. Konguje bağ içermesi iletkenlik açısından önemli bir etken olup iletkenlik katkılama ile de sağlanabilir veya düzeyi artırılabilir. Bunun yanı sıra aslen yalıtıcı olan polimer matrisine iletken olan dolgu veya katkı malzemelerinin eklenmesi yoluyla da iletken polimer kompozitler oluşturulabilir. Bu yapıları oluşturmaktaki temel amaç ürünlerin çevresel koşullar gibi dış etkenlere karşı daha dayanıklı, uyumlu ve esnek olmasıdır (Çetin vd., 2022). İletken polimerlerin yüksek iletkenlik değerleri enerji depolama teknolojisinde büyük bir ilgiyi toplamış ve ürünlerde malzeme olarak tercih edilmeye başlanmıştır. Genel olarak kullanılan bazı maddelerin iletkenlik seviyesi Tablo 1’de belirtilmiştir.

Tablo 1: Bazı iletken polimer ve metallerin iletkenlik değerleri (Kaun vd., 2015; Taherian, 2019 kaynaklarından araştırmacı tarafından oluşturulmuştur.)

TÜRÜ	MADDE	İLETKENLİK (s/cm)
İletken Polimer	Poliasetilen	10^{-8} – 10^{-5} ; 10^2 – 10^5
İletken Polimer	Polipirol	$10 - 7,5 \times 10^3$
İletken Polimer	Polianilin	30–200
İletken Polimer	Politiyofen	10 – 10^3
İletken Polimer	Pedot	0,4–400
Metal	Fe	1×10^5
Metal	Al	3.8×10^5
Metal	Cu	5.98×10^5
Metal	Ni	1.5×10^5
Metal	Ag	6.8×10^5
Metal	Au	4.26×10^5
Metal	Na	2.13×10^5
Yarı Metal	Si	4×10^{-6}
Yarı Metal	Ge	0.02

İletken polimerlerin inorganik ürünlere göre daha esnek ve hafif yapıda olmaları, değişen oranlarda ve ayarlanabilir boyutlarda elektriği iletebilmeleri, iyi bir çevresel kararlılığa sahip olmaları, uygun maliyetle olma, iyi birer optik ve mekanik özelliklerine sahip olmaları onların avantajlı durumlarını meydana getirmektedir (Masood vd., 2024; Namsheer & Rout, 2021). Bu avantajlardan yararlanarak birçok alanda olduğu gibi kompozit elektrot yapımında iyi bir performans sağlanabilir. İletken polimerlerle yapılan kompozit elektrotlar hem inorganik malzemelerin hem de organik malzemelerin avantajlarını bir araya getirdiği için enerji depolama ürünlerinde büyük bir aşamaya ilerleyiş sağlayabilir. Bu yararlı özellikler kompozit ürünler geliştirmede ve enerji depolama ürünlerinde iletken polimerlere olan ilgiyi arttırmaktadır.

İletken polimerlerin kullanıldıkları alanlar piller, süperkapasitörler, güneş pilleri, yakıt hücreleri, korozyon önleyici kaplamalar, ışık yayan diyotlar, sensörler, atık su arıtımı, kataliz, biyomedikal ve antimikrobiyal uygulamalar ve doku mühendisliğidir (Hasan vd, 2025). Şekil 1’de yeni nesil enerji depolama sistem teknolojilerini geliştirmede ve kompozit elektrotlar tasarımında potansiyel vaat eden iletken polimerlere değinilmiştir.



Şekil 1: İletken polimerler (Kaun vd.,2015; Namsheer vd., 2021)

Kolay üretim, ucuzluk, yüksek iletkenlik, yüksek enerji yoğunluğu, iyi kapasite değerleri, yüksek elektrokimyasal aktivite ve esneklik gibi özelliklerden dolayı süperkapasitör yapımında ve araştırmalarda en yaygın olan iletken polimerler PA (Poliasetilen), PPy (polipirrol), PTh(politiyofen), PANi(polianilin) ve PEDOT(Poli 3,4-etilendioksitiyofen) olmaktadır (Luo vd., 2019, Meng vd, 2017 Wang vd., 2019).

SÜPERKAPASİTÖR KOMPOZİT ELEKTROT YAPIMINDA KULLANILAN İLETKEN POLİMERLER

Poliasetilen (PA)

İlk bulunan iletken polimerlerden olup poliasetilen Kimya alanında büyük bir dönüm noktası olmuştur. Shirakawa, Heeger ve MacDiarmid'in bu konudaki çalışmaları 2000 senesinde Nobel Kimya Ödülü'nü getirmiştir. Bu polimer asetilen monomerlerinin polimerleşmesi sonucu oluşmakta ve dönüşümlü tekli ve çiftli bağlar içermesi polimerin konjuge bir yapı kazanmasını sağlamaktadır. Bu konjuge yapı elektrik yüklerinin hareket etmesine neden olarak polimerin iletken olmasını sağlamaktadır. Saf poliasetilenin normaldeki iletkenlik durumu düşük iletkenlikteki yarı iletken şeklinde olup; iyot, brom ve arsenik pentaflorür gibi yükseltgen maddelerle katkılanma durumunda iletkenliğinde artış sağlanabilmektedir (Chiang vd., 1977). Poliasetilenin katkılanma olmadan ölçülen iletkenliği 10^{-9} – 10^{-5} S/cm iken katkılanma sonrası iletkenliğin 10^2 – 10^5 S/cm bandına ulaşması katkılanmanın önemini göstermektedir (Skotheim & Reynolds, 2007). Bir polimerin metallere erişecek düzeyde iletkenlik değerlerine erişme ihtimali bilimsel anlamda büyük bir merak uyandırmıştır. Bu yönüyle poliasetilen birçok alanı içeren çalışmaların önünü açmıştır. Poliasetilenin başlıca avantajları kolay sentez, esnek yapı, düşük yoğunlukta olması, basit yapısı ve ayarlanabilir geniş aralıktaki elektriksel özelliği sayesinde iletkenliğinin kontrol edilebilmesidir (Skotheim & Reynolds, 2007). Bu özellikleri ve katkılanmış halinin iyi iletkenlik değerleri göz önüne alındığında ultrakapasitörler için iyi bir elektrot malzemesi olarak düşünüldüğünü sağlamaktadır. Katkılı PA akım toplayıcılarda piller ve süperkapasitörlerde elektrot malzemesinde, gaz tutma uygulamalarında ve elektromanyetik kalkanlamada uygulama alanı bulmaktadır (Carotenuto & Nicolais, 2024). Poliasetilenin havadaki nem ve oksijene hassas olup çevresel kararsızlık oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra zayıf mekanik özellikleri, erimeyen ve çözünmeyen yapısı kullanımını zorlaştırmaktadır (Carotenuto & Nicolais, 2024). Bu problemler ticari ve enerji uygulamaları için sınırlılıklarını oluşturmaktadır.

Polipirol (PPy)

Polipirolde pirol monomerlerinin en yaygınca kimyasal veya elektrokimyasal yöntemlerle oksidasyonu ile polimerleşerek oluşur ve polimer zinciri boyunca yük taşıyıcılar oluşturur. Polimer zincirinde karbon atomları arasında konjuge pi bağ yapısı vardır. Bu yapı sayesinde iletkenlik özelliği kazanmaktadır. Bugün birçok yöntem ve teknikle kolayca üretilebilmekte doping ve katkılarla iletkenliği artırılabilir. Hafiflik, kolay üretilme ve işlenebilme, esneklik, iyi redoks özellikleri, iyi bir çevresel kararlılık, uygun maliyet, yüksek iletkenlik ve düşük toksisite gibi özelliklerinin sağladığı avantajlar birçok sektör ve alan için yüksek uygulama

olanağı oluşturmaktadır (Huang vd., 2016). Süperkapasitörler, piller, sensörler, ilaç dağıtım sistemleri, biyosensörler, kirleticilerin giderilmesinde adsorbsiyon, korozyon, aktüatör ve elektromanyetik kalkanlama gibi alanlarda uygulama alanı bulmuştur (Hao vd., 2022). Özelliklerinin ve uygulama alanlarının çokluğu polimer hakkında endüstriyel ve akademik anlamda yapılan çalışmaları yoğunlaştırmaktadır. Yeni üretim metotları, yeni kompozit türleri, farklı boyutta üretilmesi ve katkılarla yeni özellikler kazanmakta ve geliştirilmesi gereken özelliklerinde de iyileşmeler sağlanmaktadır.

Polipirolün hafif olması, hafif tasarlanmak istenen piller ve kondansatörler için önemli avantajdır. Esnek olması ve kolay işlenebilmesi sayesinde küçük bir hacimle bile iyi performans sağlaması sensörlerde ve süperkapasitörlerde beklenen yüksek performans için iyi bir seçenek oluşturmaktadır (Hao vd., 2022). İyi redoks etkinlik özellikleri verimli şarj deşarj döngüleri için güçlü aday haline getirmektedir. Süperkapasitörlerde en önemli performans parametrelerinden biri kapasitedir. Polipirolün teorideki ve uygulamadaki kapasite farkı, şarj deşarj döngü kararlılığındaki zayıflık bu polimerin bu konudaki sorunlarını ve dezavantajlarını oluşturmaktadır (Huang vd., 2016).

Politiyofen (PTh)

Politiyofen tiyofen monomerinin en yaygın kimyasal veya elektrokimyasal polimerizasyonu yöntemleriyle polimerleşmesi sonucu oluşur. Polimerin konjuge yapısı nedeniyle iletken bir polimerdir. Katkılarla beraber yapısında yük taşıyıcılar olduğundan elektron iletimi kolaylaşmakta ve elektriksel iletkenlik artırabilmektedir. Ayarlanabilir bu elektriksel iletkenlik değerleri, kolay işlenebilme, kolay üretim, ileri düzeyde yük taşıma, iyi düzeyde çevresel ve termal kararlılık özellikleri sağladığı için bu polimer iletken polimerler dünyasında önemli bir yer edinmektedir (Deng vd., 2026; Nielsen & McCulloch, 2013). Özellikle ileri düzeyde yük taşıma özelliği ile doplanan yapıda elektron transferinin hızlanması özelliğinin sağladığı avantajlar süperkapasitör gibi enerji depolama ürünlerinde elektrot materyali için önemli bir avantaj sağlamaktadır. Politiyofen yüksek bir özgül kapasitansa sahip olduğu için onun ile hazırlanan elektrotlar yüksek kapasite ve yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip olabilmektedir (Xiao vd., 2025; Husain vd., 2025; Kaloni vd., 2017).

Politiyofen sensörler, biyosensörler, süperkapasitörler, yeni nesil piller, hidrojen depolama, organik alan etkili transistörler, ledler, organik güneş pilleri, atık su arıtımı, su arıtımı cihazları, elektrokromik cihazlar ve organik elektrokimyasal cihazlarda geniş bir uygulama ve araştırma alanına sahiptir (Husain vd., 2025; Kaloni vd., 2017; Deng vd., 2026). Diğer iletken polimerlerde olduğu gibi oksijen, ısı ve nem gibi çevresel şartlar burada da sınırlılıkları oluşturmaktadır. Çevresel şartlar yapısal bozulmalara ve dolaylı olarak kararsızlığa, kapasite ve çalışma ömrü düşüşleri gerçekleşmektedir

(Kaloni vd., 2017). Politiyofenin saf haldeki çözünürlüğünün düşük olması işlenebilmesini ve kullanılmasını zorlaştırmaktadır ve bunun yanı sıra nihai ürünlerin düşük verimle oluşturulmasına da yol açmaktadır (Al-Refai vd., 2021). Algılama, biyomedikal ve enerji depolama alanlarında kullanımı için yapılan araştırmaların az olması geliştirilmesi gereken bir diğer sınırlılıklarını oluşturmaktadır. Şarj-deşarj döngülerindeki hacimsel büzülme ve şişmeler bu polimerin de maruz kaldığı teknik zorluklardan biridir. Bu zorluktan meydana gelen kapasite, enerji ve performans düşüşünün önüne geçmek için kompozitlerinin oluşturulması büyük bir çözüm oluşturmaktadır. Politiyofenin topaklanma eğilimi ve saf haldeki yapısının kırılgan olması durumu düşük verim ve düşük işlenebilirlik ile sonuçlanmaktadır (Nurazzi vd., 2022). Daha dayanıklı, kararlı ve esnek ürünler için bu sorun kompozitlerinin üretilmesi ile çözülebilmektedir. Kompozit üretimi ve iletkenliğinin artırılması için yapılan doplama işlemlerinin çok aşamalardan oluşması, pahalı ve toksit katkı ve çözücü gibi maddelerin eklenmesi maliyetleri arttırmaktadır (Husain vd., 2025).

Polianilin (PANI)

Polianilin anilin monomerlerinin en yaygın üretim şekliyle ile oksidatif polimerizasyon veya elektrokimyasal polimerizasyon ile polimerleşerek oluşur ve polimer zinciri boyunca oluşan yük taşıyıcıların hareketi ile iletkenlik sağlanmaktadır. Konjuge yapıya sahiptir. Farklı yükseltgenme basamaklarında farklı yapısal formlarda olmasıyla diğer iletken polimerlerden ayrılır. Okside olma durumuna göre üç farklı form yapısı vardır. Tamamen indirgenmiş lökoemeraldin, tamamen oksitlenmiş pernigranilin ve yarı oksitlenmiş iletken olan emeraldindir. Düşük pH değerlerinde daha iletkenidir. Ucuz üretim, kolay işlenebilme ve üretim, farklı pH aralıklarında çok iyi çevresel kararlılık, doplanan yapısıyla farklı iletkenlik değer aralıkları, iyi redoks özelliği, yüksek esneklik, yüksek teorik kapasite ve çevreye zarar vermemesi ile ön plana çıkan bir iletken polimerdir (Taş, 2025; Li & Gong, 2020). Bu üstün elektrokimyasal özellikler ile enerji depolama, sensör ve elektronik alanlarında büyük bir potansiyel taşımaktadır. Şarj edilebilir piller, süperkapasitörler, sensörler, elektrokromik ekran ve korozyon önleme gibi alanlarda kullanılmaktadır (Çarbaş, 2016).

Isı, ışık, manyetizma ve elektrik değişiklikleri, nem ve çözücü ortamından kaynaklanan çevresel etkenlerden dolayı de doping olabilme ihtimali vardır yani yapısal değişiklikler sonucu yalıtkan olmakta ve kararlı yapısı bozulmaktadır (Li & Gong, 2020). Farklı formları arası geçiş yapabilme ihtimali sonucunda iletkenlik düşmektedir ve dolaylı olarak kapasite değerleri de düşmektedir. Farklı formları ve bu formlar arası geçişleri üretiminde zorlukları oluşturmaktadır. Çözünürlüğünün düşük olması, saf halinin kolay işlenmemesi ve mekaniksel sorunlar gibi sınırlılıkları bulunmaktadır (Sharma vd., 2024). Diğer örneklerde olduğu gibi polianilinde de şarj-deşarjı içeren redoks işlemlerinde hacimsel şişme, büzülme ve mekanik bozulmalar

oluşmaktadır ve bunun sonucunda döngü kararlılığı olumsuz etkilenmektedir (Snook vd., 2011). Bu durum PANI-Metal oksit, PANI-karbon türevi maddelerle kompozit oluşturularak giderilmeye çalışılmaktadır.

Poli 3,4-etilendioksitiyofen (PEDOT)

PEDOT, 3,4-etilendioksitiyofen monomerinin en yaygın kimyasal veya elektrokimyasal polimerizasyonu yöntemleriyle polimerleşmesi sonucu oluşur. Sahip olduğu konjuge yapısı nedeniyle iletken bir polimerdir. Polimer zinciri boyunca yük taşıyıcılar oluşur ve bu yapılar akımı iletmektedir. İletkenliği diğer polimerlerde olduğu gibi doplama ile artırılabilir. Özellikle Polistiren Sülfonatla katkılama (PSS) en tercih edilendir ki suda çözünme özelliği kazanır ve bu kazanım kolay işlenebilirlik özelliği sağlamaktadır (Rahimzadeh vd., 2020). Yüksek iletkenlik, şeffaflık, düşük fiyat, ayarlanabilir iletkenlik geçiş formlarına sahip olma, kolay işlenebilirlik, biyouyumluluk ve iyi çevresel ve kimyasal kararlılık özelliğine sahip bir iletken polimerdir (Groenendaal vd., 2003; Rahimzadeh vd., 2020). Güneş pilleri, yakıt pilleri, süperkapasitörler, şarj edilebilir piller, oled, ofet, sensörler ve biyomedikal uygulamalar tercih edildiği ve araştırıldığı alanlardır (Fan vd., 2019; Sun vd., 2015).

Saf PEDOT, kolay çözünmeyen bir yapıya sahip olduğu için işlenmesi zor olmaktadır. Bunun yanı sıra monomerinin çözülmesi için organik çözücülerin gerekmesi gibi bir sınırlılığa sahiptir (Snook vd., 2011). Üretiminde hem organik çözücülerini gerektirmesi hem de PSS kullanımı gerektirmesi üretimini zorlaştırmaktadır ve maliyetleri yükseltmektedir. Çevresel şartlar ve redoks işlemlerinden dolayı meydana gelen hacimsel şişme ve büzülme bu iletken polimerin de karşılaştığı benzer teknik sınırlılıkları oluşturmaktadır. Suda çözünme ve kolay işlenebilirlik özelliği kazanması için Pedot PSS ile kullanıldığında oluşan ürün yüksek asidik özellik göstermektedir ve bu asidik yapı kullanıldığı tüm cihazlarda korozyona neden olabilmektedir. Aşınma ürününün tüketim ömrünü düşürücü bir etkiye sahiptir. PSS ayrıca nem çekici özelliği de sahiptir. Nemi çekilmesiyle yapıda şişme meydana gelmekte ve polimer zincirlerinin yapısı bozulmaktadır. Yapının bozulması iletkenliği ve kapasiteyi düşürmektedir (Cameron & Skabara 2020). Bu sorunlar kompozitler oluşturma ile çözümlenebilmektedir. PEDOT-PSS kolay karışabilirlik özelliği ile farklı niteliklerde sayısız kompozit oluşturulabilir (Sachit, 2024). Dezavantaj ve sınırlılıklar kompozit oluşturmakla çözümlenmeye çalışılması kompozitlerin varlığını daha önemli kılmaktadır.

İletken polimerler süperkapasitörlerden pseudokapasitör türünün elektrot malzemesini oluşturmaktadır. İletken polimer ile oluşturulan elektrotlar bu kapasitörde kullanılmaktadır. Yukarıda değinilen avantajlar iletken polimerlerin elektrot malzemesi olarak kullanımını desteklemektedir. Bahsedilen dezavantajlar genelde tek kullanımdan oluşan problemler olup kompozit yapılar ile çözülmeye çalışılmaktadır. Bu durum kompozit yapıya sahip elektrotları enerji depolamada önemli bir yere taşımaktadır. İletken

polimer kompozitler iddialı yeni nesil süperkapasitörlerden hibrit süperkapasitörler için elektrot malzemesidir. İletken polimerlerin tüm avantajları çeşitli inorganik malzemelerin avantajları ile birleştirilip kompozitleri oluşturulmaktadır. İletken polimer kompozit elektrotlar sayesinde daha dayanıklı, daha yüksek kapasite, kararlı çevrim yapısı, daha yüksek enerji ve güç yoğunluğu sağlamak, iddialı yeni nesil süperkapasitörlerin geliştirilmesine hizmet edeceği beklenmektedir.

İLETKEN POLİMERLERİN AVANTAJLARI

İletken polimerler ekonomik, hafif, korozyona dirençlidir. Ayrıca yüksek iletkenlik, esneklik, kolay üretim, redoks özellikler, biyouyumluluk göstermesi de en temel özelliklerindendir (Dube vd., 2025; Tadesse vd., 2024). Aşağıda Şekil 2’de bu özelliklerin toplu bir gösterimine yer verilmiştir.



Şekil 2: İletken Polimerlerin Özellikleri

İletken polimerlerin hafif ve esnek yapıya sahip olmaları da bu konuda önemli bir avantaj başlığı açmaktadır. İletken polimerlerin esneklik özelliği ile farklı şekil ve ebatlarda elektrot tasarımı sağlanabilirken hafiflik özelliği ile modern yeni nesil enerji depolama ve teknolojik aletlerde beklenen daha küçük, daha hafif ve daha ince tasarım beklentilerini karşılayacağı düşünülmektedir. Bu parametreler göz önüne alındığında iletken polimerler kompozit elektrotların performansını arttırmada güçlü bir bileşen haline gelmektedir.

İletken polimerlerin kolay hazırlanan bir prosedüre sahip olması ve küçük katkılarla farklı özelliklere sahip ürünler tasarlamayı mümkün kılması bu konuda yapılan çalışmalarda ve istenen özellikteki depolama malzemelerini geliştirmede kullanılmasını cazip kılmaktadır. Günümüz

dünyasında araştırmaların üreticilerin ve sanayicilerinin en çok odaklandığı hususlardan biri de yüksek performanslı mümkün olan en yüksek verimde ve en düşük maliyette ürünler sağlamaktır. İletken polimerlerin inorganik malzemelere göre hammadde ve üretim aşamalarında nispeten uygun maliyetli olması yüksek performanslı bir elektrot ya da cihaz ürününü daha az maliyetle üretme hayalini de gerçek kılmaktadır.

İletken polimerlerin metallerle yarışabilecek düzeydeki teorik olarak yüksek kapasite değerleri, yüksek kapasiteye ulaşmayı hedefleyen tüm bilimsel ve endüstriyel araştırmacıların ve enerji depolama üreticilerinin ilgisini çekmektedir. İletken polimerlerin yüksek teorik kapasite değerleri sayesinde yüksek kapasiteye sahip elektrot malzemeleri üretilmesi imkan dahilindedir. Elektrotların ve tüm enerji depolama malzemelerinden beklenen bir diğer önemli husus da uzun ömre sahip olması ya da tekrar tekrar verimli bir şekilde şarj olabilecek potansiyele sahip olmasıdır. İletken polimerle oluşturulan kompozitler bu konuda yaşanabilecek performans iyileştirmeleri ile uzun ömür sağlama potansiyeline sahiptir.

Süperkapasitörlerin enerji depolama yeteneği iletken polimerlerin kullanılması sayesinde neredeyse 100 katlık bir artış göstermektedir ve iletken polimerlerin sahip olduğu tersinirlik özelliği sayesinde hızlı ve kolay bir şekilde boşalıp dolma çevrimini daha mümkün hale gelmektedir (Çarbaş, 2016). Bu konuda göz ardı edilmemesi gereken bir diğer önemli konu da çevre olmaktadır. İletkenlik değeri metallere kadar erişebilen ve halen gelişme aşamasında olan iletken polimerler birçok metale göre çevreye daha az zararlıdır. Özellikle enerji depolama ürünlerinde kullanılan metallerin birçoğu ağır metaller olup çevre ve canlıların sağlığı açısından risk barındırmaktadır.

İLETKEN POLİMERLERİN DEZAVANTAJLARI

Yüksek iletkenlik, hafif yapı, daha düşük maliyetler ve esnek tasarım imkanı gibi birçok olumlu özelliklerinden ötürü şarj edilebilir piller ve süperkapasitörlerde özellikle elektrot teknolojisinde geniş uygulama ve araştırma alanı bulan iletken polimerlerin karşılaştığı ve düzeltilmesi gereken teknik zorlukların oluşturduğu dezavantajlara da sahiptir. Bazı iletken polimer türleri nem, ışık, sıcaklık değişimleri ve oksijene karşı çok hassastır. Özellikle nem uzun vadeli kararlı yapıyı bozmaktadır ve iletkenliği düşürmektedir (Skotheim & Reynolds, 2007). Çevresel tüm bu etkiler elektrot ürünlerinde fiziksel ve kimyasal bozulmaya da yol açmaktadır. Bu durum ürünün kalitesini bozmasının yanı sıra ürünün tüketim ömrünü de düşürmektedir.

İletken polimerler yüksek iletkenlik ve güç yoğunluğu sunsa da enerji yoğunluğu bakımından inorganik malzemelere göre özellikle lityum iyon gibi malzemelere göre düşük kalmaktadır (Arico vd., 2005). Bu dezavantaj ticarileşme ve yüksek enerji depolayan ürün temelinde seri sanayi ürünü olma

yolunda düzeltilmesi gereken engellerden birini oluşturmaktadır. Şarj edilebilir pillerin ve süperkapasitörlerin en önemli yapısal özelliklerinden biri sürekli şarj olabilmeleridir. Bu teknolojilerde şarj ve deşarj işlemleri gerçekleşirken işin kimyasında iç yapıda ise sürekli indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonları gerçekleşir. Bu reaksiyonlar polimer zincirlerinde hacimsel olarak büzülme ve genleşmeye yol açmaktadır. Bu yapısal bozulmalar, çatlak gibi yapılara neden olurken polimer bazlı elektrot ürünlerinde şişme ve bütünlük yapısında kopmalar ve bozulmalar meydana gelmektedir (Béguin vd., 2014; Snook vd., 2011). Bu durum ürünlerde arıza, kapasite düşüşü, ömür azalması ve çevrim kararlılığının bozulması ile son bulmaktadır.

Polimer elektrotların hazırlanması birtakım teknik zorluklar içermektedir. Üretim esnasında polimeri içeren aktif malzemenin elektrotla iyi temas ettirilmemesi sonucu sonradan ürünün elektrottan kopması ve ayrılması söz konusu olabilmektedir. Bir diğer üretim zorluğu ise iletken polimer malzemenin bazı yerlerde kümeleşip topaklanma eğiliminde olmasıdır ki bu durumda bazı yerlerde de boşlukların oluşması söz konusu olur (Bindu & Periyat, 2023). Bu teknik hatalar sonucu malzeme yeterince homojen dağılamaz ve elektrottan kopmalar meydana gelir. Bu zorluk kompozit üretimiyle giderilmeye çalışılmaktadır. İletken polimerlerde ve onu içeren ürünlerde aşılması gereken en büyük sorunlar kararsızlık ve malzemeden ayrılımlarıdır.

Tüm bu sınırlılıklara rağmen iletken polimerler geliştirilmeye açık yapıları ve sunduğu önemli avantajlar sebebiyle araştırılmaya devam etmekte ve bu konuda büyük bir potansiyel vaat etmektedir. Güncel araştırmalarla bu sınırlılıkların üstünden gelineceği ve bu gelişmelerle iletken polimer bazlı elektrot teknolojisinde gelişmeler sağlanacağı umulmaktadır. Bu sınırlılık ve dezavantajları aşmak konusunda iletken polimerlerin metal oksitlerle ve karbon bazlı malzemelerle kompozitlerinin oluşturulması güncel araştırmaların bir dayanağı olmakta ve çözüm kapısı sunmaktadır.

GÜNCEL DURUM VE GELECEK BEKLENTİSİ

Geleceğin akıllı teknolojilerinde polimer nanokompozit elektrotların geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. İkili yapı sistemleriyle üretilen kompozitlerin yanı sıra üçlü yapı kompozit sistemlerin oluşturulmasının değişen ve ayarlanabilir özellikler açısından iyi sonuçlar vereceği umulmaktadır (Bindu & Periyat, 2023). Gelecek beklentilerini ve güncel durum için bir diğer parametrede kompozit yapımında sentetik polimerler yerine doğal polimerlerin kullanılmasıdır. Bu durum hem maliyetleri düşürücü etkiye hem de çevreye zararlı çözücü, monomer, yükseltici ve dolgu gibi malzemelerin karışma ihtimalini düşürücü etkiye sahip olabilmektedir.

Yeşil kimya ve sürdürülebilirlik kapsamında daha doğal ve çevreye daha az zararlı elektrot malzemeleri geliştirmek iletken polimer kompozitlerinin gelecek perspektifini oluşturmaktadır. Biyokompozit elektrotlar geliştirmek, enerji depolama teknolojilerinde birçok avantajı ve gelişmeyi sağlayabilir. Doğa dostu olma, biyolojik olarak parçalanabilme, çevrede toksik etki bırakmama, biyoyumlu ve daha düşük maliyetler bu avantajlar arasında sayılabilmektedir (Huang vd., 2019). Özellikle biyoyumlu olma özelliği sayesinde doku mühendisliği, tekstil ve esnek giyilebilir teknolojiler gibi farklı alanlarda hizmet edebilecek süperkapasitörlerin tasarlanması söz konusu olabilecektir.

REFERANSLAR

- AL-Refai, H. H., Ganash, A. A., & Hussein, M. A. (2021). Polythiophene and its derivatives–Based nanocomposites in electrochemical sensing: A mini review. *Materials Today Communications*, 26, 101935. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101935>
- Arico, A. S., Bruce, P., Scrosati, B., Tarascon, J. M., & van Schalkwijk, W. (2005). Nanostructured materials for advanced energy conversion and storage devices. *Nature Materials*, 4(5), 366–377.
- Béguin, F., Presser, V., Balducci, A., & Frackowiak, E. (2014). Carbons and electrolytes for advanced supercapacitors. *Advanced Materials*, 26(14), 2219–2251.
- Bindu, M., & Periyat, P. (2023). A review on fine-tuning of energy storage characteristics of conducting polymers. *Materials Advances*, 4(13), 2730–2769. DOI: 10.1039/D3MA00056G
- Cameron, J., & Skabara, P. J. (2020). The damaging effects of the acidity in PEDOT: PSS on semiconductor device performance and solutions based on non-acidic alternatives. *Materials Horizons*, 7(7), 1759–1772. DOI: 10.1039/C9MH01978B
- Carotenuto, G., & Nicolais, L. (2024). Polyacetylene Prepared by Chemical Dehydration of Poly (vinyl Alcohol). *Coatings*, 14(9), 1216; <https://doi.org/10.3390/coatings14091216>
- Chiang, C. K., Fincher, C. R., Park, Y. W., Heeger, A. J., Shirakawa, H., Louis, E. J., Gau, S. C., & MacDiarmid, A. G. (1977). Electrical conductivity in doped polyacetylene. *Physical Review Letters*, 39(17), 1098–1101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.39.1098>
- Çarbaş, B. (2016). İletken polimerler ve enerji uygulamaları. *Küresel Mühendislik Çalışmaları Dergisi*, 3(1), 46–60. <https://izlik.org/JA44ZF35NK>
- Çetin, M. Ş., Demirel, A. S., Toprakçı, O., & Toprakci, H. A. K. (2022). Karbonize edilmiş Antep fıstığı kabuk atıklarından iletken, esnek polimer kompozit üretimi ve karakterizasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(2), 711–722. DOI:10.17341/gazimmfd.859140
- Deng, B., Liu, X., Wu, Y., Sun, L., Li, W., Kuang, X., ... & Cheng, S. Z. (2026). Polythiophene as a Prototype Conjugated Polymer: From Polymerization to Multiscale Structure and Functional Properties. *Journal of Polymer Science*. 1–20, <https://doi.org/10.1002/pola.70217>

- Dube, A., Malode, S. J., Alodhayb, A. N., Mondal, K., & Shetti, N. P. (2025). Conducting polymer-based electrochemical sensors: Progress, challenges, and future perspectives. *Talanta open*, 11, 100395. <https://doi.org/10.1016/j.talo.2024.100395>
- Fan, X., Nie, W., Tsai, H., Wang, N., Huang, H., Cheng, Y., ... & Xia, Y. (2019). PEDOT: PSS for flexible and stretchable electronics: modifications, strategies, and applications. *Advanced Science*, 6(19), 1900813. <https://doi.org/10.1002/advs.201900813>
- Faraji, S., & Ani, F. N. (2015). The development supercapacitor from activated carbon by electroless plating—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 823-834. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.068>
- Groenendaal, L., Zotti, G., Aubert, P. H., Waybright, S. M., & Reynolds, J. R. (2003). Electrochemistry of poly (3, 4-alkylenedioxythiophene) derivatives. *Advanced Materials*, 15(11), 855-879. <https://doi.org/10.1002/adma.200300376>
- Hasan, M. B., Parvez, M. M., Abir, A. Y., & Ahmad, M. F. (2025). A review on conducting organic polymers: Concepts, applications, and potential environmental benefits. *Heliyon*, 11(3). [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(25\)00755-8](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(25)00755-8)
- Hao, L., Dong, C., Zhang, L., Zhu, K., & Yu, D. (2022). Polypyrrole nanomaterials: Structure, preparation and application. *Polymers*, 14(23), 5139; <https://doi.org/10.3390/polym14235139>
- Huang, Y., Li, H., Wang, Z., Zhu, M., Pei, Z., Xue, Q., ... & Zhi, C. (2016). Nanostructured polypyrrole as a flexible electrode material of supercapacitor. *Nano Energy*, 22, 422-438.
- Huang, Y., Kormakov, S., He, X., Gao, X., Zheng, X., Liu, Y., Sun, J., & Wu, D. (2019). Conductive polymer composites from renewable resources: an overview of preparation, properties, and applications. *Polymers*, 11(2), 187. <https://doi.org/10.3390/polym11020187>
- Husain, A., Shariq, M. U., Alqarni, S. A., Giri, J., Kandasamy, M., Gunnasegaran, P., & Kanan, M. (2025). Multifunctional polythiophene-based composites for environmental remediation and energy storage: A critical review. *Materials Today Sustainability*, 31, 101183. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101183>
- Iro, Z. S., Subramani, C., & Dash, S. S. (2016). A brief review on electrode materials for supercapacitor. *International Journal of Electrochemical Science*, 11(12), 10628-10643. doi: 10.20964/2016.12.50
- Kaloni, T. P., Giesbrecht, P. K., Schreckenbach, G., & Freund, M. S. (2017). Polythiophene: From fundamental perspectives to applications. *Chemistry of Materials*, 29 (24), 10248–10283. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.chemmater.7b03035>
- Kaur, G., Adhikari, R., Cass, P., Bown, M., & Gunatillake, P. (2015). Electrically conductive polymers and composites for biomedical applications. *Rsc Advances*, 5(47), 37553-37567. DOI: 10.1039/C5RA01851J
- Kozak, M., & Kozak, Ş. (2012). Enerji depolama yöntemleri. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 4(2), 17-29. <https://izlik.org/JA99FL32WU>
- Li, Z., & Gong, L. (2020). Research progress on applications of polyaniline (PANI) for electrochemical energy storage and conversion. *Materials*, 13(3), 548. <https://doi.org/10.3390/ma13030548>

- Luo, T., Xu, X., Jiang, M., Lu, YZ, Meng, H., & Li, CX (2019). Polyacetylene carbon materials: Facile preparation using AlCl_3 catalyst and excellent electrochemical performance for supercapacitors. *RSC advances*, 9(21), 11986-11995. <https://doi.org/10.1039/C9RA01205B>
- Masood, M., Hussain, S., Sohail, M., Rehman, A., Uzzaman, M. A., Alnaser, I. A., ... & Wahab, M. A. (2024). Recent progress, challenges, and opportunities of conducting polymers for energy storage applications. *Chemistry Select*, 9(23), e202302876. <https://doi.org/10.1002/slct.202302876>
- Meng Q., Cai K., Chen Y., Chen L. (2017). Research progress on conducting polymer based supercapacitor electrode materials. *Nano Energy*. 36, 268–285. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.04.040>
- Namsheer, K., & Rout, C. S. (2021). Conducting polymers: a comprehensive review on recent advances in synthesis, properties and applications. *RSC advances*, 11(10), 5659-5697. DOI: 10.1039/D0RA07800J
- Nielsen, C. B., & McCulloch, I. (2013). Recent advances in transistor performance of polythiophenes. *Progress in polymer science*, 38(12), 2053-2069. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.003>
- Nurazzi, N. M., Harussani, M. M., Demon, S. Z. N., Halim, N. A., Mohamad, I. S., Bahruji, H., & Abdullah, N. (2022). Research progress on polythiophene and its application as chemical sensor. *Zulfaqr Journal of Defence Science, Engineering & Technology*, 5(1). <https://doi.org/10.58247/jdset-2022-0501-06>
- Oladele, I. O., Adelani, S. O., Taiwo, A. S., Akinbamiyarin, I. M., Olanrewaju, O. F., & Orisawayi, A. O. (2025). Polymer-based nanocomposites for supercapacitor applications: a review on principles, production and products. *RSC advances*, 15(10), 7509-7534. DOI: 10.1039/D4RA08601E
- Rahimzadeh, Z., Naghib, S. M., Zare, Y., & Rhee, K. Y. (2020). An overview on the synthesis and recent applications of conducting poly (3, 4-ethylenedioxythiophene)(PEDOT) in industry and biomedicine. *Journal of materials science*, 55(18), 7575-7611. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04561-2>
- Raza, W., Ali, F., Raza, N., Luo, Y., Kim, K. H., Yang, J., ... & Kwon, E. E. (2018). Recent advancements in supercapacitor technology. *Nano Energy*, 52, 441-473. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.08.013>
- Sachit, R. S. (2024). An Overview On The Pedot: Pss Synthesis, Advantages, Disadvantages, And Potential Use In Various Types Of Solar Cells. *International Journal of Applied Sciences and Technology*. ISSN: 2717-8234. <http://dx.doi.org/10.47832/2717-8234.21.2>
- Sharma, N., Singh, A., Kumar, N., Tiwari, A., Lal, M., & Arya, S. (2024). A review on polyaniline and its composites: from synthesis to properties and progressive applications. *Journal of Materials Science*, 59(15), 6206-6244.
- Shirakawa, H., Louis, E. J., Gau, S. C., MacDiarmid, A. G., Chiang, C. K., Fincher, C. R., ... & Heeger, A. J. (1977). Electrical conductivity in doped polyacetylene. *Phys. Rev. Lett*, 39(17), 1098-1101. https://daigroup.org/wp-content/uploads/2021/05/Doped-PA_PhysRevLett.pdf
- Skotheim, T. A., & Reynolds, J. R. (Eds.). (2007). *Handbook of conducting polymers* (3rd ed.). CRC Press.
- Snook, G. A., Kao, P., & Best, A. S. (2011). Conducting-polymer-based supercapacitor devices and electrodes. *Journal of Power Sources*, 196(1), 1–12.

- Sun, K., Zhang, S., Li, P., Xia, Y., Zhang, X., Du, D., ... & Ouyang, J. (2015). Review on application of PEDOTs and PEDOT: PSS in energy conversion and storage devices. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(7), 4438-4462. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-2895-5>
- Sun, J., Luo, B., & Li, H., (2022). A review on the conventional capacitors, supercapacitors, and emerging hybrid ion capacitors: past, present, and future. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 3(6), 2100191.
- Tadesse, M. G., Ahmmed, A. S., & Lübben, J. F. (2024). Review on conductive polymer composites for supercapacitor applications. *Journal of Composites Science*, 8(2), 53. <https://doi.org/10.3390/jcs8020053>
- Taherian, R. (2019). *The theory of electrical conductivity. Electrical Conductivity in Polymer-Based Composites: Experiments, Modelling and Applications*. Elsevier.
- Taş, R.; Döğüşcü, D. K., & Taş, N. A. (Ed.). (2025). *Polimer/Faz Değişim Malzemesi (FDM) Hibrit Sistemleri: Termal Enerji Depolamada Yenilikçi Yaklaşımlar*. Özgür Yayınları.
- Wang, Y., Ding, Y., Guo, X., & Yu, G. (2019). Conductive polymers for stretchable supercapacitors. *Nano Research*, 12(9), 1978-1987. <https://doi.org/10.1007/s12274-019-2296-9>
- Xiao, D., Sun, B., Liu, Y., Jiao, E., Wang, X., Chen, X., ... & Zhang, H. (2025). Development status of supercapacitors and their widely applied organic semiconductors: Polythiophene conjugated polymers. *Polymers and Polymer Composites*, 33, <https://doi.org/10.1177/09673911241304848>
- Yıldırım, N. (2017). *Mikron altı boyutlarda küresel karbon partiküllerin sentezi ve süperkapasitör elektrotlarında kullanımı*. (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.YÖK Tez Merkezi.

İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemleri Kapsamında İş Kazalarının ve Meslek Hastalıklarının İncelenmesi ve Değerlendirilmesi

Türkay Ercan ŞENGÖZ¹

Fatma BOSTAN²

İlyas KARTAL³

- 1- Doktora Öğrencisi; Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İş Güvenliği Bölümü.
turkay.ercan@marun.edu.tr, tes.net@gmail.com ORCID No: 0000-0002-5577-8990
- 2- Öğr. Gör.; Nişantaşı Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü. fatma.bostan@nisantasi.edu.tr ORCID No: 0009-0004-7839-4529
- 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 Yönetim Sistemleri (İSGYS), işyerlerinde ve çalışma ortamlarında oluşabilecek iş kazaları ve meslek hastalıklarının önlenmesi için düzenlenen, geliştirilen ve güncellenen sistematik bir yapıdır. Bu sistemli yapının temel amaçları; normlar hiyerarşisine bağlı olarak yasal düzenlemelere uyum sağlamak, işyerlerindeki ya da çalışma ortamlarındaki tehlikeleri ve riskleri belirlemek, en aza indirmek ve önlenmesi için gerekli çalışmaları yapmak, işyerlerinde ve çalışma ortamlarında güvenli ve sağlıklı bir çalışma ortamı tesis etmektir. Bu yapının temel kilometre taşlarını İş Sağlığı ve Güvenliği'ni (İSG) ilgilendiren ve düzenleyen çalışmalar oluşturmaktadır. İSG, tüm çalışan kişilerin iş kazalarından ve meslek hastalıklarından korunmasını sağlayan çok boyutlu disiplinler arası bir bilim dalı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bilim dalının en önemli bileşenleri; proaktif yaklaşım, iş kazaları, meslek hastalıkları, risk etmenleri, risk değerlendirmeleri, düzeltici ve önleyici faaliyetler, temel ve teknik eğitimler, kişisel koruyucu donanımlar, acil durum yönetimi planlamaları, ergonomi ve çevre gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Literatür bulguları ile dünyada ve ülkemizde birçok sektörde yapılan araştırma sonuçlarına göre, iş kazaları ve meslek hastalıklarının sayısal anlamda istenilen seviyelerde olmadığını göstermektedir. Bu durumun nedenlerinin ve sonuçlarının ayrıntılı olarak incelenmesi, kök-neden analizlerinin yapılması ve İSG açısından değerlendirilmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında, İSGYS'nin iş kazalarında ve meslek hastalıklarının önlenmesindeki yeri ve önemi araştırılmış ve gerekli değerlendirmeler yapılmıştır. Sonuç olarak, literatür bulgularına dayalı değerlendirmeler, işyerlerinde ve çalışma ortamlarında İSGYS'nin faydalı olduğunu ancak bazı konularda geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler – İş Sağlığı ve Güvenliği, İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemleri, İş Kazaları, Meslek Hastalıkları, Risk Etmenleri

GİRİŞ

İşletmeler gerek günlük hayatımızda gerekse küresel anlamda çalışma hayatının önemli birer parçası olarak görülmektedir. İşletmeler sahip oldukları özelliklere göre farklı adlandırmalarla sınıflandırılabilirler. Bu adlandırmaların en yaygın olanı büyük ölçekli, orta ölçekli, küçük ölçekli işletmeler ile mikro işletmeler olarak sınıflandırılan sistemdir. Bu sisteme göre, her işletme kendi özellikleri dahilinde bir sınıfta değerlendirilmekte, zamanla büyüme ve küçülme eğilimlerine göre farklı işletme yapılarına dönüşebilmektedir.

İşletmelerin bünyelerindeki tüm çalışanlarına güvenli ve sağlıklı bir çalışma ortamı hazırlayabilmeleri için dünya çapında belirli bir standardın

olması ve bu standardın zaman içerisinde güncellenerek yenilenebilmesi gerekmektedir. Bu ihtiyaçların karşılanabilmesi amacıyla İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemleri (İSGYS) adı altında kapsamlı bir sisteme ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyaç dahilinde, dünya çapında ortak bir sisteme dayalı kapsamlı ve düzenli çalışmaların yapılabileceği programların oluşturulabilmesi ve İSG prosedürlerinin, uygulamalarının ve faaliyetlerinin yapılabilmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak yapılan çalışmalarda çalışan kişilerin hem güvenliklerinin sağlanması hem de meslek hastalıklarından korunabilmeleri için gerekli düzenlemeler yapılmaktadır.

İSGYS'ni kullanabilen işletmeler genel olarak büyük ölçekli işletmeler ile kapsamlı projelerde görev alabilen orta ölçekli işletmelerdir. Bu nedenle, İSGYS'nin temel şartlarını yerine getiremeyen bazı orta ölçekli, küçük ölçekli ve mikro ölçekli işletmeler, iş kazaları ve meslek hastalıkları konularında Ortak Sağlık ve Güvenlik Birimlerinden (OSGB), bireysel çalışan İSG uzmanlarından, işyeri hekimlerinden, zamana ve ortam şartlarına göre diğer sağlık personelinden yardım almak zorunda kalmaktadırlar.

Çalışma kapsamında İSGYS'nin işletmelere olan faydaları, iş kazalarına ve meslek hastalıklarına olan etkileri bütünsel bir yaklaşımla detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Ayrıca, işyerlerinde ve çalışma ortamlarında oluşabilecek her türlü iş kazalarında ve meslek hastalıklarında alınması gereken önlemlerden ve İSG faaliyetlerinde kullanılan uygulamalardan ilgili bölümlerde bahsedilmiştir. Ek olarak, risk değerlendirmelerinin işletmelerde görülebilecek iş kazalarının ve meslek hastalıklarının önlenbilmesindeki rolü ve risk değerlendirmelerinin güncellenmesi ile ilgili bilgiler de paylaşılmıştır. Böylelikle İSGYS ile ilgili bu alandaki önemli bir literatür boşluğunu doldurmak amaçlanmaktadır.

1. İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG)

İSG, kısaca çalışan kişilerin iş kazalarından ve meslek hastalıklarından korunmaları amacıyla yapılan çalışmaların bütünüdür. İSG, günümüzde kapsamı gittikçe genişlemekte olan ve diğer bilim dalları ile birlikte bütüncül bir yaklaşım içeren bir bilim dalı konumundadır. Dünya'da ve ülkemizde işyerlerinde ya da çalışma ortamlarında çalışan kişilerin güvenliklerinin ve sağlıklarının hem korunabilmesi hem de istikrarlı bir şekilde uygun bir çalışma ortamının hazırlanabilmesi amacıyla geniş kapsamlı İSG programları planlanmaktadır. Bu programların işyerlerinin ya da çalışma ortamlarının temizliğinden hijyenine, güvenliğinden acil durum yönetimine kadar birçok konuda teorik ve uygulamalı eğitimlerle İSG kurum kültürünün oluşturulabilmesi amaçlanmaktadır (Serin & Çuhadar, 2015), (Odaman, 2005).

1.1 İş Sağlığı ve Güvenliği'nin Amaçları

Günümüz teknolojisinde üretim sektörü-işletme ilişkisi göz önünde bulundurulduğunda İSG faaliyetlerinin, sadece iş kazalarını ve meslek hastalıklarını önleme faaliyetleri olmadığı gerçeği herkes tarafından kabul edilmektedir. İSG, multidisipliner bir bilim dalı olduğu için, sosyo-ekonomik bir denge unsuru olarak da ele alınabilmekte ve kapsamı gün geçtikçe genişlemektedir. Özellikle genişleyen bu kapsamda İSG'nin amacı; tıp, hukuk, mühendislik gibi disiplinlerin kesişiminde, insanların emeklerini ve üretim süreçlerini optimize etmeyi hedeflemektedir (Arıcı, 1999), (Yiğit, 2005). Bu doğrultuda, İSG'nin amaçları üç temel boyutta incelenebilmektedir:

1.1.1 Çalışanın Biyopsikososyal Bütünlüğünün Korunması

Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) standartları baz alındığında, İSG'nin birincil amacı, çalışan kişilerin fiziksel, zihinsel ve sosyal refahının en üst düzeye çıkarılması olarak tanımlanmaktadır. İSG'de, çalışan kişilerin iş kazalarından ve meslek hastalıklarından korunabilmesi ile ruh ve beden bütünlüklerini sağlanabilmesi en önemli amaçlardır (Yiğit, 2005), (Serin & Çuhadar, 2015).

- **Proaktif (Önleyici) Yaklaşım:** Bu teori, "*kaza sonrası tazmin edici*" yaklaşım yerine daha çok, tehlikeleri kaynağında yok eden "*risk odaklı ve önleyici*" (proaktif) bir yaklaşımı savunmaktadır (Kacı, & Taçgın, 2017).

- **Ergonomi:** İşin insana, insanın da işe uyumunu sağlamak; fiziksel ve psikososyal risk faktörlerini (tükenmişlik, mobbing, iş stresi vb.) minimize etmek modern İSG çalışmalarının merkezinde bulunmaktadır (Ertürk, 2011).

1.1.2 Üretim Güvenliğinin ve Sürekliliğinin Sağlanması

İşletmeler ile iktisat bilimi açısından bakıldığında İSG, üretim süreçlerinin kesintisiz ve verimli ilerlemesi için yapısal bir zorunluluk olarak kabul görmektedir. İşletmelerde üretim süreçlerinde iş kazalarının ve meslek hastalıklarının görülmemesi, üretim güvenliğinin sağlanabilmesi, işletmelerin verimliliklerine ve sürekliliklerine doğrudan etki etmektedir (Yiğit, 2005), (Serin & Çuhadar, 2015).

- **Verimlilik Artışı:** İşyerlerinde güvenli bir çalışma ortamının iş gücü motivasyonunu ve bağlılığını artırdığını, bu durumun doğrudan işletme verimliliğine yansıdığını göstermektedir (Yiğit, 2005).

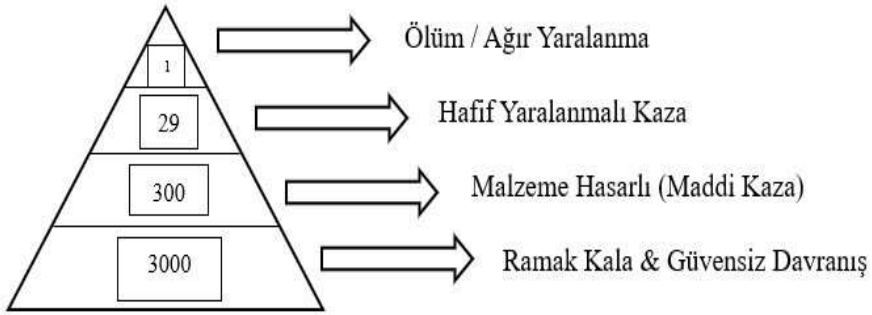
- **Makine Arızalarının ve Üretim Durmalarının Önlenmesi:** Güvenli bir üretim sisteminde İSG, makine arızalarını ve devre dışı

kalmalarını, hammadde kayıplarını ve üretim duruşlarını engelleyerek işletmenin sürdürülebilirliğine hizmet etmektedir (Serin & Çuhadar, 2015).

1.1.3 İşletme ve Ülke Ekonomisinin Korunması

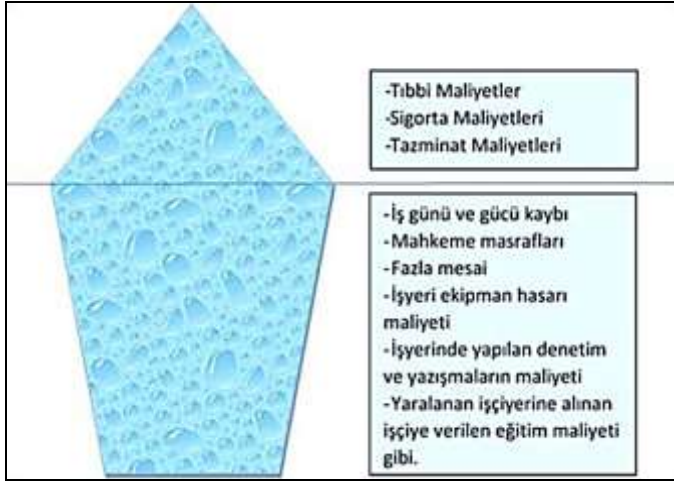
İSG, ülkeler açısından bir kamu sağlığı ve maliyet yönetimi konusu olarak görülmektedir. İş kazaları ve meslek hastalıklarının toplumsal maliyeti, tahmin edilenden daha yüksek seviyededir (Yiğit, 2005), (Serin & Çuhadar, 2015). Bu maliyetlerin azaltılabilmesi ve kamu sağlığının düzgün bir şekilde yönetilebilmesi amacıyla günümüzde birçok teorik ve uygulamalı çalışmalar yapılmaktadır.

• **Görünmeyen Maliyetlerin Azaltılması (Heinrich'in Kaza Üçgeni/Piramidi Teorisi-Buzdağı Teorisi):** Şekil 1'de Heinrich'in Kaza Üçgeni (Piramidi) Teorisi ile ilgili genel bilgiler paylaşılmıştır. Bu bilgiler ışığında, piramidin en tepesindeki bölüm 1 ölüm veya ağır yaralanmayı, bir alt basamağı 29 hafif yaralanmalı kazayı, diğer alt basamak 300 malzeme hasarlı maddi kazayı, piramidin en alt basamağını ve en geniş tabanını ise, 3000 ramak kala olayı ve güvensiz davranışı temsil etmektedir.



Şekil 1: Heinrich'in Kaza Üçgeni (Piramidi) Teorisi (Endüstrihub, 2026).

Bu teori, İSG bakımından büyük felaketlerin, görünmeyen/görülemeyen veya yüzeyin altında biriken küçük hataların ve ramak kala (near-miss) olaylarının sonucunda oluştuğunu belirtmektedir. Teorinin özetinde, işyerlerindeki ölümcül kazaları önlemenin yolunun en tepe bulunan %1'lik kısım ile değil, tabanda bulunan %99'luk görünmeyen kısım ile ilgilenildiği takdirde düzelebileceğini açıklamaktadır (Endüstrihub, 2026), (Yardım, 2021). Şekil 2'de konunun en önemli kısımlarını gösteren Buzdağı Teorisinin şematik gösterimi paylaşılmıştır.



Şekil 2: Buzdağı Teorisi (Yardım, 2021).

Bu teori, iş kazalarının doğrudan maliyetlerinin (tıbbi giderler, tazminatlar) buzdağının sadece görünen kısmı olduğunu; dolaylı maliyetlerin (işgünü kaybı, prestij kaybı, yasal süreçler) ise, çok daha büyük olduğunu ortaya koymaktadır. İSG, bu gizli maliyetleri detaylı ve düzgün bir şekilde yönetmeyi amaçlamaktadır (Endüstrihub, 2026).

- **Sosyal Güvenlik Sisteminin Korunması:** İş kazalarının azaltılması, devletlerin sağlık ve sosyal güvenlik sistemleri üzerindeki mali yükü hafifletmekte ve bu sistemlerin gelişmelerine olanak tanımaktadır (Yiğit, 2005).

1.2 İş Sağlığı ve Güvenliği'nin Hukuki Yapısı

Türkiye'de İSG'nin hukuki yapısı, geleneksel iş hukuku dinamiklerinden sıyrılarak kendine özgü (sui generis) bir disiplin haline gelmiş, kamu hukuku ile özel hukukun kesişim noktasında bulunan çok katmanlı bir yapıdır (Kabakçı, 2009), (MBS, 2012). Bu hukuki yapıyı kuramsal temelleri, mevzuat hiyerarşisi, tarafların borç-hak ilişkisi ve yaptırım teorisi üzerinden şu şekilde analiz edebiliriz:

1.2.1 Kuramsal Temel ve Hukuki Niteliği

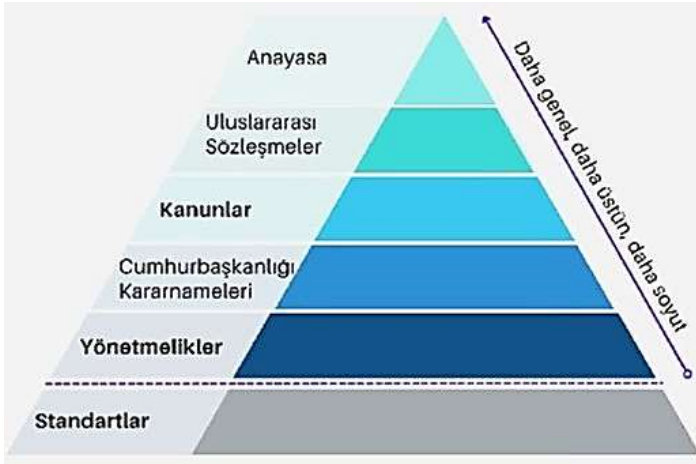
İSG hukuku, sadece işçiyi koruyan statik bir kurallar bütünü değildir (MBS, 2012). Yaşam hakkı, maddi ve manevi varlığı koruma ve geliştirme hakkı (Anayasa m. 17) ile sosyal devlet ilkesinin (Anayasa m. 2) somutlaşmış bir belirtisi olarak kabul edilmektedir (MBS, 1982).

- **Kamu Hukuku-Özel Hukuk Kesişimi:** İSG hukuku, iş sözleşmesinden (özel hukuk) doğan bir ilişkiyi düzenlemekle birlikte, devletin emredici kurallarla (kamu hukuku) müdahale ettiği karma nitelikli bir hukuk dalıdır.

• **Sosyal Kamu Düzeni:** İSG kuralları "sosyal kamu düzeni" niteliğindedir. Bu sebeple tarafların irade serbestisi (sözleşme özgürlüğü) İSG söz konusu olduğunda tamamen sınırlandırılmaktadır. İşçi ve işveren, aralarında anlaşarak bile olsa İSG standartlarını düşüremez veya bu kurallardan feragat edemez (Kabakçı, 2009), (MBS, 2012).

1.2.2 Mevzuat Hiyerarşisi ve Normlar Düzeni

Türkiye'deki İSG'nin hukuki mimarisi, monist (tekçi) bir yaklaşımdan daha çok, uluslararası normlar ile ulusal mevzuatın entegre olduğu piramidal bir yapıya sahiptir (MBS, 2012). Bu hukuki yapıdaki her basamağın kendine has özellikleri ve farklı değişkenleri bulunmaktadır. Bu hukuki yapı Şekil 3'te temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 3: İSG Mevzuatı Normlar Hiyerarşisi (AKÜ, 2023).

İSG Mevzuatı, Normlar Hiyerarşisinin Anayasa olarak belirtilen basamağında Türkiye Cumhuriyeti Anayasa'sının 17, 49, 50 ve 56'ncı vb. maddeleri, Uluslararası Sözleşmeler basamağında ILO 155, 161 No'lu sözleşmeleri, Kanunlar basamağında İSG Kanunu ile 4857 sayılı İş Kanunu, Cumhurbaşkanlığı Kararnameleri basamağında İSG ile ilgili çıkarılmış veya çıkartılabilecek kararnameler, Yönetmelikler basamağında (Spesifik riskleri ve sektör düzenlemelerini içeren yönetmelikler), Standartlar basamağında ise, ISO 45001:2018 vb. standartlar belirtilmektedir (MBS, 1982), (ILO, 1981), (ILO, 1985), (MBS, 2012), (MBS, 2003), (ISO, 2018).

• **Uluslararası Dayanaklar:** Anayasa'nın 90. maddesi uyarınca, usulüne göre yürürlüğe konulmuş Milletlerarası Antlaşmalar kanun hükmündedir (MBS, 1982). Türkiye'nin onayladığı ILO'nun 155 sayılı İSG Sözleşmesi ve 161 sayılı İş Sağlığı Hizmetlerine İlişkin Sözleşme, hukuki yapının felsefi ve yönlendirici omurgasını oluşturmaktadır (ILO, 1981), (ILO, 1985).

- **6331 Sayılı Kanun (Paradigma Değişimi):** 6331 sayılı İSG Kanunu, Türk hukukunda akademik ve pratik açıdan bir devrim niteliğindedir. Bu kanunla birlikte:

- **Kapsam Genişlemesi:** Statü hukukuna (memur, işçi, çırak) bakılmaksızın kamu ve özel sektördeki tüm çalışanlar kapsam içine alınmıştır.

- **"Kusurlu Sorumluluk"tan "Risk Yönetimi"ne Geçiş:** Eski yaklaşım kazanın oluşmasından sonraki "kusur" tespitine odaklanırken, modern İSG hukuku "*proaktif*" (önleyici) bir yaklaşımla henüz risk doğmadan haritalandırılmasını ve yok edilmesini emretmektedir (MBS, 2012).

1.2.3 Borçlar Hukuku Perspektifinden "İşverenin Gözetme Borcu"

Günümüzün en tartışmalı konularından biri, işverenin hukuki sorumluluğunun sınırlarıdır. Türk Borçlar Kanunu (TBK m. 417) uyarınca işverenin en temel borçlarından biri "İşçiyi Gözetme (Koruma) Borcu"dur (TBK, 2011).

- **Sorumluluğun Niteliği (Kusursuz/Tehlike Sorumluluğu):** Yargıtay kararlarında ve akademik doktrinde, işverenin İSG sorumluluğu uzun süre "*Kusur Sorumluluğu*" olarak ele alınmıştır. Ancak günümüzde, endüstriyel risklerin artmasıyla birlikte, bu sorumluluğun "*Kusursuz Sorumluluk*" (özellikle tehlike sorumluluğu veya fedakarlığın denkleştirilmesi) eğilimine kaydığı görülmektedir. İşveren, bilim ve teknolojinin ulaştığı en son seviyedeki önlemleri almakla yükümlüdür; sadece mevzuatta yazan önlemleri alarak sorumluluktan ve cezadan kurtulamaz (MBS, 2012). (TBK, 2011).

- **Kaçınılmazlık İlkesi:** Teknolojik açıdan tüm önlemler alınmasına rağmen önlenemeyen risklere "*kaçınılmazlık*" (faydacı risk) denir. Doktrinde, kaçınılmazlık sonucu doğan zararlardan dolayı işverenin sorumluluğu hakkaniyet ölçüsünde (genelde %60 işveren, %40 sosyal risk veya paylaştırılmış kusur şeklinde) kabul edilmektedir (MBS, 2012). (TBK, 2011).

1.2.4 İşçinin Hukuki Statüsü: Haklar ve Ödevler Dengesi

Modern İSG hukuku, işçiyi sadece korunan edilgen bir nesne olarak görmez; onu sürecin aktif bir öznesi yapmaktadır.

- **Çalışmaktan Kaçınma Hakkı (6331 sayılı İSG Kanunu m. 13):** İşçi, "ciddi ve yakın bir tehlike" ile karşı karşıya kaldığında, kurul veya işverene başvurarak tehlikenin giderilmesini isteyebilir;

giderilene kadar çalışmaktan kaçınabilir. Bu hak, işçinin iş görme borcunu haklı nedenle askıya almasıdır ve akademik olarak "*Anayasal yaşam hakkının meşru müdafaası*" olarak yorumlanmaktadır (MBS, 2012).

• **İşçinin İtaat ve Dikkat Ödevleri:** Çalışan kişiler aldıkları eğitimler ve talimatlar doğrultusunda, kendisinin ve çalışma arkadaşlarının güvenliğini tehlikeye düşürmemekle yükümlüdür. İşçinin bu kurallara uymaması, işveren için haklı fesih nedeni (İş Kanunu m. 25/II) doğurabileceği gibi, olası bir kazada (ortak) kusur indirimi sebebi sayılmaktadır (MBS, 2003).

1.2.5 Yaptırım Teorisi ve Denetim Mekanizması

Hukuk kurallarının etkinliği müeyyideleri (yaptırımları) ile ölçülmektedir. İSG hukuki yapısı, ihlaller karşısında üç kollu bir yaptırım mekanizması işletmektedir:

A. İdari Yaptırımlar: İş müfettişlerinin denetimleri sonucunda kesilen idari para cezaları ve daha da önemlisi işin durdurulması (mülkiyet ve ticaret hakkının kamu yararı lehine sınırlandırılması) (MBS, 2012).

B. Hukuki (Tazminat) Yaptırımlar: Maddi, manevi tazminat ile SGK'nın işverene rücu davaları.

C. Cezai Yaptırımlar: Türk Ceza Kanunu (TCK) kapsamında, İSG önlemlerinin alınmaması sonucu yaralanma veya ölüm meydana gelirse, işveren veya işveren vekilleri "*Taksirle Öldürme/Yaralama*" (TCK m. 85, 89) maddelerinden yargılanmaktadır. Doktrinde, risklerin bilinmesine rağmen önlem alınmaması durumu bazen "*Olası Kast*" sınırına yaklaşan "*Bilinçli Taksir*" olarak cezalandırılmaktadır (MBS, 2004).

1.3 İş Sağlığı ve Güvenliği'nin Ekonomik ve Uluslararası Boyutu

İSG'nin ekonomik ve uluslararası boyutu sanayi devrimiyle modern bir değişime uğramıştır. Sanayi Devrimiyle başlayan günümüzde de devam eden kitlesel üretim sistemleri ile birlikte yeni makinelerin ve maddelerin üretim süreçlerine girdiği bilinmektedir. Ülkelerin iktisadi anlamda büyümelerine ve gelişmelerine katkıda bulunan hızlı teknolojik ilerlemeler sebebiyle değişebilen üretim sistemleri, iş kazaları ve meslek hastalıklarını beraberinde getirmiştir. İş kazalarının ve meslek hastalıklarının ülkelerin kalkınmalarını engellemesi sebebiyle İSG prosedürlerine tüm dünyada daha da önem verilmektedir. Yapılan birçok araştırma ve analiz bulguları sonucunda ülkelerin ekonomik gelişmişlik düzeyiyle İSG arasında güçlü bir

ilişki olduğu tespit edilmiştir. Ülkelerin İSG'yi ilgilendiren yatırımları, zorunluluk seviyesinden çıkarıp iş kültürüne dönüştürmesinin, ekonomik ve finansal gelişmelerini desteklemesi bakımından gerçek bir gösterge olarak görüldüğü bilgisine ulaşılmıştır (Sevinç vd., 2016).

1.4 İş Sağlığı ve Güvenliğinde Gelecek Perspektifleri

İSG gerek hukuki yapısı gerekse teknik yapısı itibariyle değişime ve gelişmeye açık olan birbirinden farklı bilim dallarından oluşmakta ve teknolojik uygulamalar ile bu tür bilim dallarından faydalanmaktadır. İSG'de gelecek perspektiflerinin, farklı uygulamaların ve teknolojilerin kullanılmasıyla daha da aktif bir şekilde uygulanabileceği beklenmektedir. İSG, dijitalleşme (sayısallaşma), demografik dönüşümler ve iklim değişikliği gibi küresel makro trendlerin etkisiyle kabuk değiştirmeye devam etmektedir. Akademik literatür, İSG'nin geleceğini artık sadece "kazaları önleme" odaklı reaktif bir disiplin olarak değil; bütünsel, proaktif ve teknoloji entegreli bir bilim dalı olarak ele almaktadır. Akademik perspektiften bakıldığında, İSG'nin geleceğini şekillendiren temel dinamikleri ve paradigmaları şu başlıklar altında inceleyebiliriz:

1.4.1 Dijital Dönüşüm ve Endüstri 4.0/5.0 Entegrasyonu

İSG alanında yapılmış olan akademik çalışmalar, geleneksel risk değerlendirme metodolojilerinin yerini zaman içerisinde dinamik ve gerçek zamanlı risk yönetimi modellerine bırakacağını vurgulamaktadır. Günümüz teknolojisinde İSG alanında yapay zekâ (AI) teknolojileri, uzman sistem uygulamaları, büyük veri çalışmaları yapılması sayesinde işyerlerinde yaşanabilecek iş kazaları ve meslek hastalıkları önlenilmeye çalışılmaktadır. Özellikle işyerlerinde kullanılan sensörler, giyilebilir teknolojiler, termal kameralar vb. teknolojinin kullanımından elde edilen verilerle sisteme aktarılan akan büyük veri, yapay zekâ algoritmalarıyla işlenerek iş kazaları daha gerçekleşmeden (öngörücü analitik) tahmin edilebilmekte ve önlenilmektedir (Saxena, 2024), (Şengöz & Bozkurt, 2025a), (Şengöz & Bozkurt, 2025b). Ayrıca, Endüstri 5.0 ve İnsan-Robot Etkileşimi (HRC) sayesinde, kolaboratif robotların (cobot) fiziksel yükü azaltmadaki rolleri incelenmekte, insanların bu robotlarla çalışırken yaşayabileceği "teknostres" ve güven algısı gibi yeni psikososyal risklere odaklanılmaktadır (Kurtay, 2026). Gelecekteki teknolojilerle günümüz teknolojileri birbirleriyle kıyaslandığında, bu durumun İSG alanına da olumlu etkilerinin yaşanabileceği görülmektedir.

1.4.2 Psikososyal Riskler ve "Bütünsel Sağlık" (Total Worker Health)

Geleceğin İSG vizyon planlamalarında görülebilecek en radikal değişimin, İSG bakımından odağın fiziksel yaralanmalardan, iş kazalarından ve meslek hastalıklarından zihinsel ve sosyolojik sağlık boyutuna kayacağı yönündedir. NIOSH tarafından geliştirilen Bütünsel Çalışan Sağlığı (Total Worker Health-TWH) yaklaşımı buna iyi bir örnektir (Schill, 2017). Ayrıca, uzaktan/hibrit çalışma ve dijital iş modellerinden biri olan "*Gig ekonomisi*" (bağımsız çalışanlar), iş-yaşam dengesini bozarak tükenmişlik sendromu, anksiyete vb. yeni nesil meslek hastalıklarını tetiklemiştir (Günsan, 2024). İSG profesyonellerinin sadece baret ve iş ayakkabısı denetleyen kişiler değil; iş organizasyonunda zihinsel refahı (mental well-being) ve iş sağlığını koruyacak şekilde tasarlayan "*esenlik (well-being) mimarları*" olacağı öngörülmektedir (Egeconsulting, 2024), (Kılıç Özkaynar, 2024).

1.4.3 İklim Değişikliği ve Çevresel İSG (Green OSH)

Son yıllarda "*Yeşil İSG*" kavramı birçok sektörde öncelikli konular arasında yerini almıştır. İklim krizi, her sektörde olduğu gibi iş sağlığında da parametrelerini doğrudan değiştirmektedir. Küresel sıcaklık artışları, özellikle açık alanda çalışan kişiler için hayati risk oluşturmaktadır. Bu konuda, çalışma saatlerinin iklim koşullarına göre optimize edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, Yeşil İSG kapsamında, atık yönetimi, karbon ayak izi çalışmaları ve enerji verimliliği konularında gerekli eğitimler alınmalı ve konuyla ilgili çalışmalar yapılmalıdır (Yeditepe Üniversitesi, 2026).

1.4.4 Demografik Değişim ve İş Gücünün Yaşlanması

Özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde emeklilik yaşının yükselmesi, iş gücü profilini yaşlandırmaktadır. Yaşlanan iş gücünün kas-iskelet sistemi hastalıklarına yatkınlığı artmaktadır (Cai vd., 2024). Ergonomi biliminin yaşlanan nüfusa göre yeniden dizayn edilmesi ve iş yerlerinin kronik hastalık yönetimine uygun hale getirilmesi gerekmektedir.

1.4.5 Eğitimde Paradigma Tesis Etmek: XR ve Simülasyon

Geleceğin İSG eğitimi; Genişletilmiş Gerçeklik (XR), Sanal Gerçeklik (VR) ve Artırılmış Gerçeklik (AR) üzerine kurulmaktadır. Çalışan kişiler, özel eğitimlerle yüksek riskli senaryoları (yangın, patlama, yüksekte düşme vb.) güvenli sanal ortamlarda deneyimleyerek "*kas hafızası*" ve doğru refleksler geliştirmekte ve farklı eğitimlerle (Hidrolik yangın söndürme eğitimi vb.) iş tecrübeleri artırılmaktadır (Simovate, 2023), (Şengöz & Bozkurt, 2025b).

1.4.6 "Sıfır Kaza" (Vision Zero) Kültürüne Doğru

Geleceğin İSG planlamalarında, İSG'nin kurumsal açıdan parçalı bir yapıdan, kurumsal sürdürülebilirliğin (ESG-Çevresel, Sosyal ve Yönetişim ilkeleri) merkezinde yer alan entegre bir stratejiye dönüşeceği beklenmektedir (Artı Danışmanlık, 2026). Gelecekte İSG, sadece yasal bir zorunluluk veya cezalardan kaçmak amaçlı yapılan çalışmalar yerine, yapay zekâ desteğiyle insanı, çevreyi ve zihinsel sağlığı koruyan proaktif bir "insani sürdürülebilirlik" bilimi olacağı düşünülmektedir (Şengöz & Bozkurt, 2025b).

2. İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemleri (İSGYS)

İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemlerinin (İSGYS) temel amacı, işyerlerindeki tehlikeleri kaynağında yok ederek çalışan kişiler için güvenli ve sağlıklı bir ortam oluşturmaktır. Bu sistemlerin en kritik, önemli ve dinamik parçasını ise, iş kazaların ve meslek hastalıklarının incelenmesi ve değerlendirilmesi oluşturmaktadır. Bu süreçler, sadece geçmişte bu konularla ilgili neler yaşandığını veya nelerin meydana geldiğini anlayabilmek ve yorumlayabilmek için değil, gelecekteki benzer olayları önleyebilmek ve gerekli dersleri çıkarabilmek amacıyla hazırlanmış olan bir öğrenme, inceleme ve değerlendirme mekanizmaları olarak görülebilmektedir.

2.1 Olay Yerinin Güvenceye Alınması ve Bildirim

İSGYS' de iş kazasının veya meslek hastalıklarının gerçekleştiği çalışma ortamlarında ilk yapılması gereken işlemler, olay yerinin güvenceye alınması ve olayın ilgili birimlere bildirilmesidir.

- **İlk Müdahale:** Yaralıya ilk yardım yapılmalıdır ve ortam güvenli hale getirilmelidir.
- **Kanıtların Korunması:** Olay yeri incelemesi tamamlanana kadar mümkünse alandaki hiçbir şeye dokunulmamalıdır, fotoğraflama işlemleri yapılmalıdır ve durum kayıt altına alınmalıdır.
- **Yasal Bildirim:** İş kazası veya meslek hastalığı şüphesi, yasal süresi içinde resmi makamlara bildirilmelidir.

2.2 İş Kazalarının ve Meslek Hastalıklarının İncelenmesi (Olay Araştırması) ile İnceleme Ekibinin Kurulması ve Kanıt Toplama İşlemlerinin Yapılması

İşyerlerinde ve çalışma ortamlarında bir kaza veya meslek hastalığı bildirimi gerçekleştiğinde, İSG yönetim sisteminde hemen bir Olay Araştırma (Incident Investigation) süreci başlamaktadır.

- **Ekip Oluşturma:** İSG uzmanı, işyeri hekimi, çalışan temsilcisi ve ilgili birim amirinden oluşan bir kaza inceleme ekibi kurulmalıdır.
- **Hız ve Zamanlama:** Olay incelemesi, olay meydana geldikten hemen sonra kanıtlar kaybolmadan ve şahitlerin hafızası tazeyken başlatılmalı ve kontrol edilmelidir.
- **Kanıt Toplama:** Olay incelemesi yapılırken, olay yeri fotoğraflanmalı, video kayıtları incelenmeli, kullanılan ekipmanlar kontrol edilmeli ve iş hijyeni ölçümleri gözden geçirilmelidir.
- **Mülakatlar-İfadelerin Alınması:** Olay incelemesinde, kazazedinin sağlık durumunun uygun olduğu düşünülüyorsa, görgü tanıklarıyla ve o alandaki yöneticilerle tamamen gerçeği bulmaya odaklanan görüşmeler yapılmalıdır.
- **Sistem Kontrolü:** Yapılan işlere ait risk değerlendirmesi, talimatlar, eğitim kayıtları ve periyodik muayeneler dikkatli bir şekilde incelenmelidir (ILO, 2014).

2.2.1 Kök Neden Analizi (Root Cause Analysis)

İşyerlerinde ve çalışma ortamlarında yaşanmış olan bir iş kazasının, görünen nedeninin arkasında yatan asıl sistemsel hatayı bulmak gerekmektedir. Bu şekilde verimsizlikler ve problemli kısımlar ortaya çıkarılmaktadır. Bu tür olumsuzlukların meydana gelmesinde bazı sebepler ön planda tutulmaktadır. Bu sebepler aşağıda sıralanmıştır:

- **Doğrudan Nedenler:** Güvensiz hareketler veya güvensiz durumlardır.
- **Kök Nedenler:** Yetersiz eğitim, bakım eksikliği, bütçe kısıtlamaları veya yönetimsel denetim eksikliğidir.

Bu tür durumlarda yaygın olarak şu metodolojiler kullanılmaktadır:

- **5 Neden Analizi (5 Whys):** Neden (Why) sorusunu 5 kez sıralı bir şekilde sorarak bilgi edinme yöntemidir. Bu şekilde olayın kökenine inene kadar soru sorularak bilgi alınmaktadır (Uçar & Turanoğlu Şirin, 2024).
- **Balık Kılçığı Diyagramı (Ishikawa):** Bu diyagram, iş kazasını; İnsan, Makine, Metot, Malzeme, Çevre ve Yönetim başlıkları altında inceleyerek kazanın kök nedenlerini gruplandırmaktadır (Beyinturk.com, 2025). Bu şekilde gruplandırarak bir sorunun arkasındaki kök nedenleri belirlemek/görselleştirmek amacıyla

kullanılmakta ve analitik bir problem çözme aracı olarak da bilinmektedir.

2.3 Değerlendirme ve Analiz Süreci

İşyerlerinde ve çalışma ortamlarında kök neden analizi sonucunda toplanan tüm veriler, İSGYS'nin "*Sürekli İyileştirme*" (Deming Döngüsü-PUKÖ) prensibi gereği reaktif bir yaklaşımdan proaktif bir yaklaşıma geçişi sağlamaktadır.

2.3.1 Veri Analizi ve İstatistik

İşyerlerinde ve çalışma ortamlarında iş kazaları ve meslek hastalıkları düzenli olarak kaydedilmelidir ve belirli İSG endeksleri ile ilişkili sayısal veriler dikkatli bir şekilde hesaplanmalıdır. Örneğin, kaza sıklık oranı veya kaza ağırlık oranı sayısal verileri gibi. Elde edilen tüm bu veriler her türlü ortamda gelecekteki çalışmalar ve değerlendirmeler için saklanmalıdır.

2.3.2 Risk Değerlendirmesinin Güncellenmesi

İşyerlerinde ve çalışma ortamlarında meydana gelen her kaza veya meslek hastalığı, önceden hazırlanmış risk değerlendirme tablosunun hatalı veya eksik olduğunu gösteren bir kanıt niteliği taşımaktadır. Bu durumda, iş kazasından veya meslek hastalığı teşhisi konmasından sonra yapılması gerekenler şunlardır:

1. İlgili riskin/risklerin olasılık ve şiddet değerleri yeniden gözden geçirilmelidir.
2. Mevcut kontrol önlemlerinin yetersizliği analiz edilmelidir. Problemler belirlenmelidir.
3. Risk matrisinde yeni bir "Risk Skoru" belirlenmelidir. Gerekli değerler hesaplanmalıdır.

2.4 Önleyici ve Düzeltici Faaliyetlerin (DÖF) Belirlenmesi

Tüm bu çalışmalar sonucunda kök nedenler bulunduktan sonra yapılan değerlendirmelerde, elde edilen verilerle bir daha aynı acının/acıların yaşanmaması amacıyla Risk Yönetim/Kontrol Hiyerarşisi uygulanarak gerekli aksiyonlar planlanmalı ve gerektiğinde uygulanmalıdır.

- **Bertaraf Etme/Ortadan Kaldırma (Eliminasyon):** Ortamda bulunan tehlikeler, tehlikeli süreçler veya tehlikeli maddeler tamamen bertaraf edilmeli/ortadan kaldırılmalıdır.
- **Yer Değiştirme/Yerine Koyma/İkame Etme (Süstitüsyon):** Ortamdaki tehlikenin/tehlikelerin yeri değiştirilmelidir. Tehlikeli

olanın, daha az tehlikeli olanla-güvenli olanla değiştirilmesi gerekmektedir.

- **Mühendislik Kontrolleri/Önlemleri:** Ortamdaki çalışan kişileri veya diğer kişileri, tehlikeden/tehlikelerden izole etmek gerekmektedir.
- **İdari Kontroller/Önlemler:** Çalışan kişilerin; çalışma şekillerini değiştirmek, çalışma sürelerinin kısaltılmasını sağlamak (özellikle meslek hastalıklarını önlemek için), rotasyonlar yapmak, eğitimler vermek ve işaretlemeler yapmak vb. çalışmaları içermektedir.
- **Kişisel Koruyucu Donanım (KKD):** Çalışan kişileri KKD'ler kullanarak koruma işlemidir. Bu basamak yapılması gereken en son işlem basamağı olarak bilinmektedir.

2.5 Yönetim Sistemine Entegrasyon, Raporlama ve Takip İşlemleri

İSGYS' de analizlerde ve inceleme sonuçlarında elde edilen veriler alanında uzman kişiler tarafından değerlendirilmelidir. ISO 45001 gibi modern yönetim sistemlerinde amaç, çalışma sistemindeki açığı veya açıkları bulmak üzerinde kuruludur.

- **Yönetimin Gözden Geçirmesi (YGG):** Kazaların kök nedenleri ve alınan aksiyonların başarı oranları, üst yönetime sunulan yıllık YGG raporlarının en önemli maddesidir.
- **İSG Kurulu:** İş yerindeki İSG kurulu toplantılarında iş kazalarının ve meslek hastalıklarının genel durumu, işçi temsilcileriyle birlikte açıkça tartışılarak şeffaflık sağlanmaya çalışılmalıdır.
- **Kurumsal Hafıza:** İş kazaları ve meslek hastalıkları sonucunda alınan dersler, iş yerine yeni başlayan çalışanların oryantasyon eğitimlerine dahil edilerek olumsuz durumların tekrar yaşanmaması sağlanmalıdır.
- **Raporlama:** Tüm süreç; bulgular, kök nedenler ve önerilen aksiyonlarla birlikte resmi bir "*İş Kazası/Meslek Hastalığı İnceleme Raporu*" haline getirilmelidir.
- **Sürekli İyileştirme:** Belirlenen düzeltici faaliyetlerin yapılıp yapılmadığı yönetim tarafından takip edilmelidir. İş kazası verileri yıl sonunda analiz edilerek İSG politikaları ve risk değerlendirmeleri güncellenmelidir.

İSG yönetim sistemlerinde kaza incelemesi; "*Veri Topla-Kök Nedeni Bul-Önlem Al-Sistemi Güncelle*" döngüsü üzerinden gerçekleştirilmektedir. İş kazaları ve meslek hastalıklarının doğru bir şekilde incelenmesi; işletmelere, kurum ve kuruluşlara tazminat, iş gücü ve prestij kaybını önleme noktasında büyük fayda sağlarken, en önemlisi çalışan kişilerin evlerine sağlıklı dönebilmesini güvence altına almaktadır.

3. İş Kazaları ve Meslek Hastalıkları

İSGYS' de iş kazaları ve meslek hastalıkları, en ciddiye alınması gereken bölümdür. Tüm İSG çalışmalarının temel odağı, çalışan kişilerin sağlıklarının ve güvenliklerinin sağlanabilmesi üzerine kurulmuştur. Çalışmanın bu bölümünde iş kazaları ve meslek hastalıklarının tanımlarını hatırlamak gerekmektedir. İş kazası, işyerlerinde veya işin yürütülmesi sebebiyle gerçekleşen, çalışan kişilerin vefat etmesine neden olan veya vücut bütünlüğünü ruhen veya beden en engelli duruma getirebilen olaylardır (MBS, 2012). İş kazaları genellikle anidir, öngörülebilir ama genellikle planlanmamıştır ve sonuçları hemen görülebilmektedir. Meslek hastalığı ise, çalışan kişilerin meslekle ilişkili risklere maruziyetleri sonucunda oluşan hastalıklardır (MBS, 2006). Meslek hastalıkları, zamana yayılır (kroniktir), maruziyet sonucu oluşur ve gizli bir ilerleme döneminden (inkübasyondan) oluşmaktadır. Tablo 1'de iş kazası ile meslek hastalıklarını karşılaştırma tablosu gösterilmektedir.

Tablo 1: İş kazası ile meslek hastalıklarını karşılaştırma tablosu (MBS, 2006), (MBS, 2012).

Kriter	İş Kazası	Meslek Hastalığı
Zaman Faktörü	Aniden ve tek bir olayla gerçekleşmektedir.	Belirli bir süreçte, tekrarlanan maruziyetle oluşmaktadır.
Tespit Edilebilirlik	Hemen fark edilmektedir (Kanama, kırılma vb.).	Tıbbi tetkikler ve klinik gözlemlerle zamanla anlaşılmaktadır.
Nedenleri	Güvensiz hareketler ve güvensiz durumlar.	Kimyasal, fiziksel, biyolojik veya ergonomik risk faktörleri.
Etki Süresi	Akuttur.	Kroniktir.

İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) Yönetim Sistemlerinin temel varlık amacı; iş kazaları ve meslek hastalıklarını önlemek, kaynağında yok etmek veya minimuma indirmektir. Bu iki kavram, bir işletmedeki İSG performansının en somut göstergeleridir. İSGYS kapsamında iş kazaları ve meslek hastalıklarının incelenmesi, sadece sebepleri bulmak için değil, bu tür olayların bir daha yaşanmasını engellemek amacıyla proaktif bir yaklaşımla yapılmaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

İSGYS, İSG alanında uluslararası anlamda ortak bir yönetim sisteminin ihtiyaç olarak görülmesi sebebiyle hazırlanmış olan bir sistemler bütünüdür. Bu tür sistemlerde belirli bir amaca odaklanılarak asıl planlanan ve programlanan İSG konuları sistematik bir biçimde analiz edilmekte ve hedeflenen amaçlar için gerekli çalışmalar yapılmaktadır. İSG’de bu tür sistemlerin en güncel hali, ISO 45001:2018 İSGYS olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sistemin temel amacı, iş kazalarını ve meslek hastalıklarını önleyebilmektir. Bu amaç doğrultusunda gerekli olan tüm çalışmalar bu sistemin kilometre taşlarını oluşturmaktadır.

Dünya genelinde belirleyici ve yönlendirici olarak kabul görmüş olan bu sistem, iş yerlerinde veya farklı çalışma ortamlarında meydana gelebilecek iş kazalarının ve meslek hastalıklarının ortaya çıkmasında, kök neden analizlerinde, hazırlanmış risk değerlendirmelerinin eksik veya hatalı kısımlarının belirlenmesinde ve düzeltilmesinde, geçmiş iş kazalarından ve meslek hastalıklarından gerekli derslerin çıkarılabilmesinde kullanılmaktadır.

İSG’de, geleneksel anlayışta iş kazası veya meslek hastalığı gerçekleşikten sonra önlem almayı hedeflerken (reaktif), İSGYS kaza veya hastalık henüz fikir aşamasındayken (tehlike boyutundayken) önlem almayı (proaktif) esas almaktadır. Bu bakış açısı, İSGYS’yi gerek teknik bakımdan gerekse bilimsel açıdan tercih edilebilir bir duruma getirmektedir.

İSGYS, iş yerlerinde yaşanmış olan iş kazalarında veya görülebilen meslek hastalıklarında sadece sebep veya sebepler bulmak amacıyla kullanılmamakta, aynı zamanda kurumsal anlamda gelişmişlik göstergesi olarak da görülmektedir. Küçük ölçekli işletmelerin mali yapılarının ve finansal bütçelerinin kısıtlı olması ve İSGYS ile ilişkili gereklilikleri yerine getirememeleri sebebiyle İSGYS’ni kullanma ve yararlanma imkanlarına sahip değildirler. Bu tür yönetim sistemleri daha çok büyük ölçekli işletmelerle orta büyüklükteki işletmeler olup büyük ölçekli işletmelerle gibi yönetilebilen işletmelerde görülmektedir. İSGYS özellikle bu tür işletmelerde gelişmiş kurumsal kültürlerinin ve dinamik yapılarının profesyonel bir şekilde yönetildiğinin de bir nevi ispatı olarak kabul edilmektedir. İSGYS, büyük ölçekli işletmelerde kurumsal yapının bir parçası olarak görülmekte ve kurumlara getirebileceği avantajlar dahilinde pozitif yönde değerlendirilmektedir. Aynı şekilde bu tür kurumlarda İSG hizmetleri de bir yasal zorunluluk olmaktan daha ziyade, insan odaklı çalışmalar ürünü olarak görülmekte ve daha bilinçli bir çalışma ortamı hazırlanmasında kılavuz olarak benimsenmektedir. İSGYS’nin doğal sonucu olarak büyük ölçekli işletmelerde iş kazaları ve meslek hastalıkları daha

erken önlenebilmekte ve çalışan kişilerin sağlıkları ve güvenlikleri daha profesyonel bir şekilde yönetilebilmektedir.

İSGYS' de her yönetim sisteminde görülebileceği gibi birtakım eksiklikler bulunmaktadır. Bu tür eksikliklerin tamamlanması gerek iş hayatında İSG prosedürlerinin istenildiği gibi tamamlanamaması sonucunda oluşmakta gerekse yeni teknolojik gelişmelerin İSG alanına uygulanmasıyla ortaya çıkmaktadır. Tüm bu etkenler, İSGYS'nin zaman içerisinde prosedür olarak genişlemesine sebep olmakta ve güncellenmesini gerektirmektedir. Bu güncellemeler ihtiyaçlara yönelik olarak belirli aralıklarla hazırlandıkları için sistemin kullanılmasıyla birlikte zamanla bazı açıklar ortaya çıkabilmekte ve bu açıklar İSGYS'nin teknik açıdan güncelleme gereksinimlerini belirlemektedir. Bu gereksinimlerin giderilmesiyle ve açıkların düzeltilmesiyle İSGYS'nin çağın gerekliliklerine uygun olarak kullanılabilmesi amaçlanmıştır.

REFERANSLAR

- Afyon Kocatepe Üniversitesi. (AKÜ). (2023). *İSG Mevzuatı Normlar Hiyerarşisi*. İş Sağlığı ve Güvenliği Koordinatörlüğü, Ulusal Standartlar, Mevzuat ve Acil Durum Önlemleri. <https://isg.aku.edu.tr/2023/02/22/ulusal-standartlar-mevzuat-ve-acil-durum-onlemleri/> adresinden 5 Haziran 2026 tarihinde alınmıştır.
- Arıcı, K. (1999). *İşçi Sağlığı ve Güvenliği Dersleri*, Ankara, ss.1-53.
- Artı Danışmanlık. (2026). *ESG Nedir? Sürdürülebilirlik, İSG ve Kurumsal Strateji İlişkisi*. <https://artidanismanlik.com.tr/2025/09/24/esg-nedir-surdurulebilirligin-yeni-paradigmasi-ve-kurumsal-stratejilere-etkisi/> adresinden 20 Haziran 2026 tarihinde alınmıştır.
- Cai, Y., Han, Z., Cheng, H., Li, H., Wang, K., Chen, J., Liu, Z. X., Xie, Y., Lin, Y., Zhou, S., Wang, S., Zhou, X., ve Jin, S. (2024). The impact of ageing mechanisms on musculoskeletal system diseases in the elderly. *Frontiers in immunology*, 15, 1405621. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1405621>
- Egeconsulting. (2024). *İSG'nin Yeni Boyutu Psikolojik Güvenlik ve Çalışan Refahı. İnsan Faktörü ve İSG: Psikolojik Güvenlik Yaklaşımları*. <https://egeconsulting.com/insan-faktoru-ve-isg-psikolojik-guvenlik-yaklasimlari/> adresinden 7 Haziran 2026 tarihinde alınmıştır.
- Endüstrihub. (2026). *İş Sağlığı ve Güvenliği: Mühendislik Perspektifinden Risk Analizi*. <https://xn--endstrihub-ceb.com.tr/article-isg.html> adresinden 5 Haziran 2026 tarihinde alınmıştır.
- Ertürk, M. (2011). *İşletme Biliminin Temel İlkeleri*, İstanbul, Beta Yayın, ss.222-224.
- Günsan, N. (2024). Çalışma Hayatının Yeni Kavramları: Gig Ekonomisi ve Dijital Göçebe. *Akademik Düşünce Dergisi*, 10, 122-134. <https://doi.org/10.53507/akademikdusunce.1479616>
- International Organization for Standardization. (ISO). (2018). *ISO 45001:2018-Occupational health and safety management systems-Requirements with*

- guidance for use. <https://www.iso.org/standard/63787.html> adresinden 6 Haziran 2026 tarihinde alınmıştır.
- Kabakçı, M. (2009). İş Sağlığı ve Güvenliğinin Hukuk Sistemindeki Yeri. *Türkiye Barolar Birliği Dergisi*, Sayı 86, 249-267. https://medya.barobirlik.org.tr/tbbdergisi/App_Themes/Dergi/2010-86-583.pdf
- Kacı, E., ve Taçgın, E. (2017). 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu Kapsamında Proaktif Yaklaşım Üzerine Risk Değerlendirme ve Bazı Öneriler. *Marmara Sosyal Araştırmalar Dergisi*, (12), 1-16. <https://izlik.org/JA47KM24FJ>
- Kılıç Özkaynar, G. (2024). Yönetimde Psikolojik Güvenlik ve Çalışan Refahı. In: Kılıç Özkaynar, G. & Gürler, G. (eds.), *Güncel Yönetim Uygulamaları*. Özgür Yayınları. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub554.c2483>
- Kurtay, K. G. (2026). Endüstri 5.0'da insan-robot iş birliği: İş gücü planlama optimizasyon modeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 41(1), 413-426. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1778548>
- Mevzuat Bilgi Sistemi. (MBS, 1982). *Türkiye Cumhuriyeti Anayasası*. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=2709&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5> adresinden 5 Haziran 2026 tarihinde alınmıştır.
- Mevzuat Bilgi Sistemi. (MBS, 2003). 4857 sayılı İş Kanunu. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=4857&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5> adresinden 6 Haziran 2026 tarihinde alınmıştır.
- Mevzuat Bilgi Sistemi. (MBS, 2004). 5237 sayılı Türk Ceza Kanunu. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=5237&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5> adresinden 6 Haziran 2026 tarihinde alınmıştır.
- Mevzuat Bilgi Sistemi. (MBS, 2006). 5510 sayılı Sosyal Sigortalar ve Genel Sağlık Sigortası Kanunu. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=5510&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5> adresinden 19 Haziran 2026 tarihinde alınmıştır.
- Mevzuat Bilgi Sistemi. (MBS, 2011). 6098 sayılı Türk Borçlar Kanunu. (2011). <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=6098&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5> adresinden 6 Haziran 2026 tarihinde alınmıştır.
- Mevzuat Bilgi Sistemi. (MBS, 2012). 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=6331&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5> adresinden 20 Haziran 2026 tarihinde alınmıştır.
- Odaman S. (2005), 4857 sayılı Yeni İş Kanunu Döneminde İş sağlığı ve Güvenliği Hükümlerinin Önemi ve OHSAS 18001 Yönetim Sistemi, *Mercek Dergisi*, Temmuz 2005, ss.132-138. https://www.mess.org.tr/media/files/7339_HM6GNE3ZFA39_temmuz_2005.pdf
- Saxena, V. (2024). Predictive Analytics in Occupational Health And Safety. *ArXiv Preprint* arXiv:2412.16038.
- Serin, G., ve Çuhadar, M. (2015). İş Güvenliği ve Sağlığı Yönetim Sistemi. *Teknik Bilimler Dergisi*, 5(2), 44-59. <https://izlik.org/JA74GG36LL>
- Schill, A. L. (2017). Advancing Well-Being Through Total Worker Health®. *Workplace Health & Safety*, 65(4), 158-163. <https://doi.org/10.1177/2165079917701140>

- Sevinç, H., Bozkurt, E., ve Sevinç, D. E. (2016). Ekonomik Gelişmişlik Göstergesi Olarak İş Sağlığı ve Güvenliği Üzerine Bir Araştırma. *Social Sciences Research Journal*, Volume 5, Issue 4, 1-11. <https://socialsciencesresearchjournal.com/index.php/ssrj/article/download/77/3/710>
- Simovate. (2023). *Sanal Gerçeklikte İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimleri*. <https://www.simovate.com/blog/sanal-gerceklikte-is-sagligi-ve-guvenligi-egitimleri> adresinden 7 Haziran 2026 tarihinde alınmıştır.
- Şengöz, T. E., ve Bozkurt, Y. (2025a). Günümüz Teknolojisinde Madencilik, Metal Endüstrisi ve Malzeme Tasarımında Yapay Zekâ Kullanımı. *Bilgi Teknolojileri ve İletişim Dergisi*, 2(2), 33-62. <https://izlik.org/JA87EU27DZ>
- Şengöz, T. E., ve Bozkurt, Y. (2025b). İş Sağlığı ve Güvenliği Kapsamında Sektörel İş Kazalarının Yapay Zekâ Teknolojileri ve Uzman Sistem Uygulamaları Yönünden İncelenmesi. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 8(1), 17-44. <https://doi.org/10.51764/smutgd.1678632>
- Uçar, A., ve Turanoğlu Şirin, B. (2024). İç Lojistik Faaliyetlerinde Yalın Tekniklerin Kullanılması ve Bir Uygulama. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 7(3), 423-435. <https://doi.org/10.34248/bsengineering.1436910>
- Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO). (1981). 155 No'lu İş Sağlığı ve Güvenliği ve Çalışma Ortamına İlişkin Sözleşme. <https://www.ilo.org/tr/resource/155-nolu-sagligi-ve-guvenligi-ve-calisma-ortamina-iliskin-sozlesme> adresinden 6 Haziran 2026 tarihinde alınmıştır.
- Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO). (1985). 161 No'lu Sağlık Hizmetlerine İlişkin Sözleşme. <https://www.ilo.org/tr/resource/161-nolu-saglik-hizmetlerine-iliskin-sozlesme> adresinden 6 Haziran 2026 tarihinde alınmıştır.
- Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO). (2014). *İş Kazaları ve Meslek Hastalıklarının İncelenmesi: İş Müfettişleri İçin Pratik Bir Rehber*, Uluslararası Çalışma Örgütü-Cenevre. (2014). <https://www.csgb.gov.tr/Media/4k4h5rxt/6-i%C5%9F-kazalar%C4%B1-ve-meslek-hastal%C4%B1klar%C4%B1n%C4%B1n-incelemesi.pdf> adresinden 2 Haziran 2026 tarihinde alınmıştır.
- Yardım, M. S. (2021). İş Sağlığı ve Güvenliği Meslek Hastalıklarında Ekonomik Konular. *İş ve Meslek Hastalıkları Seminer Programı*. HÜTF Halk Sağlığı Anabilim Dalı. <https://hisam.hacettepe.edu.tr/ismeslekhastaliklari/126.pdf>
- Yeditepe Üniversitesi Yaşam Boyu Öğrenme Merkezi. (YBÖM). (2026). *Yeşil İşyerleri İçin Çevre Dostu İSG Uygulamaları*. <https://yasamboyu.yeditepe.edu.tr/yesil-isyerleri-icin-cevre-dostu-isg-uygulamalari-blog> adresinden 7 Haziran 2026 tarihinde alınmıştır.
- Yiğit, A. (2005). *İş güvenliği ve İş Sağlığı*, İstanbul, Aktüel Yayınları, ss.3

Finansal Piyasalarda Stokastik Volatilite Modelleri

Mehmet Ali AKINLAR*

Dilber SARIKAHYA*

Department of Engineering Sciences, Faculty of Engineering & Natural Sciences, Bandirma Onyedi Eylul University, Bandirma, Balikesir 10200, Türkiye.
The Graduate School, Department of Mathematics Bandirma Onyedi Eylul University, Bandirma, Balikesir 10200, Türkiye.

1. GİRİŞ: VOLATİLİTENİN DOĞASI VE FİNANSAL PİYASALARDAKİ ROLÜ

Finansal piyasaların doğası gereği fiyat hareketleri belirsizlik içerir. Bir yatırımcı veya portföy yöneticisi için bir varlığın bugünkü fiyatı kadar, o fiyatın gelecekte ne kadar değişkenlik göstereceği de hayati önem taşır. Finansal piyasalarda volatilité, bir varlığın fiyatının belirli bir zaman diliminde gösterdiği belirsizlik ve değişkenlik ölçüsüdür. Yüksek volatilité, fiyatların hızlı değiştiği ve tahmin edilebilirliğin azaldığı dönemleri işaret eder. Literatürde Volatilité (oynaklık) olarak adlandırılan bu değişkenlik kavramı, finansal riskin en temel göstergesidir. Volatilité, türev ürünlerin fiyatlandırılmasında kullanılan parametreler arasında doğrudan piyasada gözlemlenemeyen tek parametredir. Faiz oranlarını, hisse fiyatını veya vadeyi ekranlarda görebiliriz, ancak volatilité her zaman bir tahmin veya modelleme gerektirir. Klasik finans teorisinde varlık fiyatları beklenen getiri ve risk parametreleri üzerinden modellenirken; modern finansal mühendislikte volatilité, salt istatistiksel bir risk ölçütü olmaktan çıkarak kendi başına alınıp satılabilen, hedge edilebilen ve bağımsız olarak modellenmesi gereken bir varlık sınıfı niteliği kazanmıştır. Finansal piyasalarda volatilitenin doğru modellenmesi, opsiyon fiyatlamasından risk yönetimine kadar modern kantitatif finansın temel taşıını oluşturmaktadır [1, 4, 6]. Sabit volatilité varsayımının yetersizliği karşısında, literatürde varyansın stokastik bir süreç olarak ele alındığı Heston modeli ve bu yapıyı sıçrama ile lokal dinamiklerle genişleten gelişmiş yaklaşımlar sektör standardı haline gelmiştir [2, 3]. Ancak bu karmaşık stokastik modellerin bilgisayar ortamında uygulanması, özellikle negatif varyans problemi gibi sayısal simülasyon zorluklarını beraberinde getirmekte ve tam kesme gibi güvenilir ayırıştırma şemalarının kullanılmasını zorunlu kılmaktadır [5]. Diğer yandan, bireysel finanstan kurumsal risk yönetimine kadar piyasa aktörlerini derinden sarsan devasa tarihsel borsa çöktüşleri, uç risklerin ve sistemik krizlerin matematiksel olarak rasyonel bir çerçeveye oturtulmasının ne kadar hayati olduğunu her defasında kanıtlamaktadır [10]. Bu bağlamda, belirsizliğin ve dalgalanmaların giderek arttığı günümüz piyasalarında yatırımcı servetini korumak ve yeni fırsatlar yaratmak için, teorik fiyatlama modellerinin modern ve sağlam ticaret

stratejileriyle entegre edilmesi kaçınılmaz bir zorunluluktur [7, 8, 9].

Opsiyon sözleşmeleri gibi türev ürünlerin doğru fiyatlandırılması, dayanak varlığın gelecekteki volatilitésinin ne kadar hassas modellendiğine bağılıdır. 1973 yılında Fischer Black, Myron Scholes ve Robert Merton tarafından geliştirilen Black-Scholes modeli, finansal matematikte bir devrim yaratmış olsa da volatilitenin sabit olduğu varsayımı üzerine kuruludur. Ancak yapılan ampirik çalışmalar, volatilitenin sabit olmadığını, zamanla değıştığını, hatta ani sıçramalar ve kümelenmeler gösterdiğini kanıtlamıştır. Piyasalarda gözlemlenen Volatilité Gülümsemesi olgusu, sabit volatilité varsayımının yetersizliğinin en büyük kanıtıdır. Bu nedenle, volatilitenin rastgele bir süreç (stokastik süreç) olarak ele alındığı Stokastik Diferansiyel Denklemler (SDD) modern finansın temel taşı haline gelmiştir. Hisse senedi fiyatı, faiz oranları, vade süresi ve kullanım fiyatı gibi değışkenler ekranlarda anlık olarak takip edilebilirken; volatilité, yatırımcının geleceğe dair beklentilerinin matematiksel bir izdüşümü olarak her zaman tahmin edilmesi gereken bir bilinmeyen olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bağlamda, volatilitenin doğru modellenmesi, sadece akademik bir merak konusu değıl, trilyon dolarlık türev piyasalarının sürdürülebilirliği için hayati bir zorunluluktur.

1973 yılında geliştirilen Black-Scholes modeli, opsiyon fiyatlamasını fizikteki Isı Denklemi ile çözerek literatürde devrim yaratmıştır. Bu denklemde dayanak varlık (S), kullanım fiyatı (K), faiz (r) ve vade (T) piyasada doğrudan gözlemlenebilirken; yegâne bilinmeyen ve tahmin edilmesi gereken parametre volatilitedir (a). Volatilitenin yanlış modellenmesi, 1998 LTCM çöküşünde olduğu gibi devasa kurumsal iflaslara zemin hazırlar. Black-Scholes, volatilitenin vade boyunca sabit kaldığını varsayar; ancak 1987 Krizi bu ezberi bozmuştur. Kriz sonrasında, Çöküş Korkusu taşıyan yatırımcıların derin zarardaki (OTM) opsiyonlara çok daha yüksek primler ödemesi, piyasada Volatilité Gülümsemesi adı verilen asimetrik bir eğri yaratmış ve piyasaların şişman kuyruklara sahip olduğunu kanıtlamıştır.

Bu sabit volatilité yanılgısını çözmek için finansal matematik, Stokastik

Diferansiyel Denklemlere (SDD) yönelmiştir. Heston (1993) ve SABR gibi modeller, volatilitenin kendisini de rastgele dalgalanan bir süreç olarak kurgulayarak bu fiyatlama anomalilerini büyük ölçüde gidermeyi başarmıştır. Ancak bu gelişmiş stokastik modeller bile, volatilitenin tamamen rastgele şoklarla hareket ettiğini varsayarak; bilanço dönemleri veya piyasa açılış-kapanış saatleri gibi takvimi önceden belli, öngörülebilir deterministik döngüleri yakalamakta yetersiz kalmaktadır.

Volatilité, finansal piyasaların birçok kritik noktasında başrol oynar:

- **Türev Ürünlerin Fiyatlanması:** Opsiyonları, kâr potansiyeli sınırsız ancak olası zararı sadece ödenen primle kısıtlı birer finansal kasko olarak düşünebiliriz. Bir arabanın kasko bedelini nasıl ki kaza yapma ihtimali (risk) belirliyorsa, opsiyonun fiyatını da piyasadaki çalkantı ihtimali, yani volatilité belirler. Dayanak varlığın fiyatı yerinden hiç oynamasa bile, piyasaya belirsizlik ve korku (volatilité) düştüğü an, opsiyonların taşıdığı sigorta değeri (Vega parametresi gereği) hızla tırmanışa geçer.
- **Risk Yönetimi ve VaR (Riske Maruz Değer):** Dev bankalar ve kurumsal fonlar, "En kötü senaryoda yarın ne kadar para kaybedebiliriz?" sorusuna her gün matematiksel bir cevap bulmak zorundadır. Bu potansiyel yıkımı hesaplamanın tek yolu volatilitenin şiddetini doğru ölçmektir. Volatilitenin hafife alınması, kurumların kasalarında tutmaları gereken acil durum sermayesini eksik ayırması demektir. Bu basit ölçüm hatası, geçmiş krizlerde devasa bankaların tek gecede iflas etmesinin temel nedenidir.
- **Dinamik Korunma (Hedging) Maliyetleri:** Piyasada sürekli alım-satım yapan ve likidite sağlayan piyasa yapıcılar, fiyat dalgalanmalarından zarar görmemek için port-föylerini nötr duruma (Delta/Gamma kalkanı) getirirler. Bu korunma kalkanını ayakta tutabilmek, volatilitenin sıradaki hamlesini saniye saniye doğru tahmin etmeye bağlıdır. Eğer volatilité öngörülemez şekilde davranırsa, kalkan delinir ve portföyü sürekli yeniden dengelemek zorunda kalmanın maliyeti kontrolden çıkarak astronomik seviyelere ulaşır.

Bir sistemin gelecekteki durumu, mevcut durumu ve deterministik bir değişim kuralı ile ifade edilebiliyorsa, bu sistem Adi Diferansiyel Denklemlerle (ODE) modellenenir. Ancak finansal piyasalarda, bilgi akışının ve yatırımcı kararlarının sisteme sürekli olarak dışsal bir Gürültü etki etmesi, varlık fiyatlarının Newton yen mekaniğin deterministik yasalarıyla açıklanmasını imkânsız kılar. Bu belirsizliği matematiksel olarak ifade etmek için finansal varlık fiyatlarındaki değişim, öngörülebilir bir sürüklenme ve piyasa riskini temsil eden difüzyon bileşenlerinden oluşan Stokastik Diferansiyel Denklemler (SDD) ile modellenir. Standart Geometrik Brownian Hareketi (GBM) varsayımı altında varlık fiyatı şu denklemle tanımlanır:

$$dS_t = \mu S_t dt + \sigma S_t dW_t \quad (1)$$

Bu denklemdeki dW_t terimi, klasik Riemann integrali kurallarına uymayan ve yörüngeleri sınırsız salınımlı olan Wiener Sürecini temsil eder. Stokastik süreçlerde Brown hareketinin Karesel Varyasyonu sıfıra gitmez, aksine zamanla orantılı bir büyüklüğe ulaşır ($dW_t^2 \rightarrow dt$). Bu özellik, opsiyonların asimetrik getiri profilini modellemeye yarayan Ito Lemması'nın dogmasına neden olmuştur.

İki kez sürekli türevlenebilir bir $f(t, X_t)$ fonksiyonu için Itô formülü şu şekildedir:

$$df(t, X_t) = \left(\frac{\partial f}{\partial t} + \mu \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{1}{2} \sigma^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right) dt + \sigma \frac{\partial f}{\partial x} dW_t$$

Bu açıklımdaki $\frac{1}{2} \sigma^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} dt$ ifadesi klasik kalkülüste bulunmayan Itô Düzeltmesi'dir. Finansal mühendislik perspektifinden bu terim, opsiyonların Konveksite (Gamma) özelliğini temsil eder. Itô düzeltmesi, volatilitenin (o) doğrudan rastgele şoklardan etkilendiğini kanıtlar ve volatilitenin kendi başına bir stokastik süreç olarak ele alınmasını zorunlu kılar. Bu zorunluluğa yanıt olarak, Steven Heston (1993) tarafından önerilen stokastik volatilitite modeli, varyans süreci (v_t) için literatürde yeni bir standart belirlemiş ve kapalı

form çözümü sahip ilk model olmuştur. Steven Heston modeli, varlık fiyatı (S_t) ve anlık varyans (v_t) için birbirine bağlı iki stokastik süreç tanımlar:

$$dS_t = \mu S_t dt + \sqrt{v_t} S_t dW_t^S$$

$$dv_t = K(\theta - v_t)dt + \xi \sqrt{v_t} dW_t^v$$

Klasik modeldeki sabit σ 'nın yerini Heston modelinde anlık varyansın karekökü olan $\sqrt{v_t}$ (stokastik volatilité) almıştır. Başka bir ifadeyle, Heston modelindeki volatilité süreci $\sigma_t = \sqrt{v_t}$ olarak tanımlanmaktadır. Bu noktada varyans denkleminde yer alan ξ parametresi hisse senedinin volatilitesi değil, varyans sürecinin kendi içindeki oynaklığıdır ve literatürde Varyansın Volatilitesi olarak adlandırılır. Dayanak varlık fiyatının ne kadar sert dalgalandığını $\sqrt{v_t}$ belirlerken, bu dalgalanma şiddetinin kendi içindeki değişim hızını (ve dolayısıyla volatilité gülümsemesinin konveksitesini) ξ kontrol eder.

Heston Modelinin volatilité cinsinden türetilmesi: Heston modelinin neden doğrudan volatilité (σ_t) üzerinden değil de varyans (v_t) üzerinden kurgulandığını matematiksel olarak ispatlamak için, varyans denkleminde Itô Lemması uygulanarak süreç σ_t cinsinden yeniden yazılabilir.

Volatilité $\sigma_t = \sqrt{v_t} = v_t^{1/2}$ olarak tanımlandığında, $f(v) = v^{1/2}$ fonksiyonunun kısmi türevleri şu şekilde hesaplanır:

$$f'(v) = \frac{1}{2} v^{-1/2} = \frac{1}{2\sigma_t}$$

$$f''(v) = -\frac{1}{4} v^{-3/2} = \frac{1}{4\sigma_t^3}$$

Heston'ın orijinal varyans denkleminde ($dv_t = K(\theta - v_t)dt + \xi \sqrt{v_t} dW_t^v$) Itô Lemması uygulandığında yeni süreç şu hali alır:

$$d\sigma_t = \left(f'(v_t)K(\theta - v_t) + \frac{1}{2} f''(v_t) \xi^2 v_t \right) dt + f'(v_t) \xi \sqrt{v_t} dW_t^v$$

Türevler denklemde yerine yazılıp, v_t ifadeleri σ_t^2 ile değiştirildiğinde süreç, şu şekle dönüşür:

$$d\sigma_t = \left(\frac{2}{2\sigma_t} K(\theta - \sigma_t^2) - \frac{1}{8\sigma_t^3} \xi^2 \sigma_t^2 \right) dt + \frac{1}{2\sigma_t} \xi \sigma_t dW_t^v$$

Denklem cebirsel olarak toparlandığında, Volatilite Cinsinden Heston Modeli elde edilir:

$$d\sigma_t = \left(\frac{K(\theta - \sigma_t^2)}{2\sigma_t} - \frac{\xi^2}{8\sigma_t} \right) dt + \frac{\xi^2}{2} dW_t^v \quad (2)$$

Denklem 2 incelendiğinde, sürecin sürüklenme teriminin paydasında yer alan σ_t bileşeni, denklemi son derece doğrusal olmayan bir yapıya sokmaktadır. Finansal matematikte bir Stokastik Diferansiyel Denklemin Fourier serileri veya karakteristik fonksiyonlar üzerinden kapalı formda çözülebilmesi için, sürecin sürüklenme ve difüzyon terimlerinin Afin yapıda, yani durum değişkenine göre doğrusal olması gerekmektedir. Steven Heston, modelini doğrudan volatilitenin (σ_t) üzerinden değil de varyans (v_t) üzerinden kurgulayarak sürüklenme terimini $K(\theta - v_t)$ formunda tutmuş ve lineerliği korumuştur. Modelin karakteristik fonksiyonlar üzerinden kusursuz bir analitik çözüme izin vermesinin ardındaki matematiksel deha, denklemin bu Afin mimarisinde yatmaktadır. Modelin başarısı, parametrelerinin piyasa dinamikleriyle olan güçlü ekonomik ilişkisinden kaynaklanır. Varyans süreci sonsuza gitmez, sürekli olarak uzun dönem denge seviyesi olan θ 'ya doğru κ hızıyla çekilir. ξ parametresi Volatilite Gülümsemesinin konveksitesini doğrudan kontrol ederken, iki Wiener süreci arasındaki korelasyon ($\rho < 0$), fiyatlar düşerken piyasadaki korkunun sert şekilde arttığı Kaldıraç Etkisini matematiksel olarak yakalar. Modelin tutarlılığı için $2\kappa\theta > \xi^2$ formundaki Feller Koşulunun sağlanması teorik olarak varyansın sıfırın altına inmesini engeller ($v_t > 0$). Ancak gerçek piyasa koşullarına kalibre edildiğinde bu koşul ihlal edilebilir ve simülasyonlarda Negatif Varyans Problemi ortaya çıkabilir.

Bu kritik sayısal sorun, bu çalışmada tam kesme algoritmasıyla çözülerek modellerin kararlılığı garanti altına alınmıştır. Literatürdeki diğer önemli stokastik volatilité modellerini şu şekilde özetleyebiliriz:

SABR Modeli (Stochastic Alpha, Beta, Rho): Özellikle faiz oranı türevlerinde piyasa standardı haline gelmiş bir Yerel-Stokastik volatilité modelidir. Hagan ve arkadaşları (2002) tarafından geliştirilmiştir.

Sistem, dayanak varlığın (genellikle ileri faiz oranı F_t) ve volatilitenin (σ_t) bağılı süreçlerinden oluşur:

$$dF_t = \sigma_t F_t^\beta dW_t^1$$

$$d\sigma_t = \alpha_t \sigma_t dW_t^2$$

β parametresi sayesinde varlık fiyatının yerel yapısını (normal vs. log-normal) kontrol ederken, α volatilitenin volatilitésini belirler. SABR'ın en büyük gücü, zımnî volatilité eğrisini paranın tam değerinde kusursuz yakalayan olağanüstü bir asimptotik kapalı form (Hagan formülü) sunmasıyla önem kazanmıştır.

GARCH Difüzyon Modeli: Zaman serisi ekonometrisinin yıldızı olan kesikli GARCH (1,1) modelinin, Nelson (1990) tarafından sürekli zamana limit alınarak Stokastik Diferansiyel Denklem (SDD) formuna dönüştürülmüş halidir. Varyans süreci şu şekildedir:

$$dv_t = K(\theta - v_t)dt + \xi v_t dW_t$$

Heston modelinden ($v_t^{1/2}$) farklı olarak, difüzyon terimi varyansın kendisiyle (v_t) orantılıdır. Bu yapı, yüksek volatilité rejimlerinde varyansın Heston'a kıyasla çok daha asimetrik ve agresif dalgalanmasına olanak tanır. Genellikle hisse senedi piyasalarındaki aşırı kurtosis (basıklık) değerlerini yakalamak için kullanılır.

Bates Modeli: Heston modelinin mükemmel bir yapısı olsa da çok kısa vadeli (örneğin 1 haftalık) opsiyonlardaki aşırı çarpıklığı yakalamakta yetersiz kalır.

Çünkü difüzyon süreçleri sürekli yollara sahiptir ve anlık çöküşleri üretemez. Bates (1996), Heston'ın varyans sürecine Merton'ın Sıçrama Difüzyonu 'nu eklemiştir. Varlık fiyatı denklemi şu hale gelir:

$$dS_t = \mu S_t dt + \sqrt{v_t} S_t dW_t^S + (J - 1) S_t - dN_t$$

Burada N_t bir Poisson süreci, J ise sıçrama büyüklüğüdür. Piyasadaki Çöküş Korusu'nu en rasyonel fiyatlayan modellerin başında gelir. Hem uzun vadeli volatilité kümelenmelerini hem de geceden sabaha yaşanan borsa çöküşlerini (Sıçrama terimi ile) aynı anda fiyatlar.

3/2 Volatilite Modeli (Platen 1997 / Heston 1997): Heston'ın karekök difüzyonunun aksine, literatürde patlayıcı dinamikleri modellemek için kullanılan, son derece agresif bir varyans denklemdir. Denklemi şu formdadır:

$$dv_t = K v_t (\theta - v_t) dt + \xi v_t^{3/2} dW_t$$

Difüzyon terimindeki $v_t^{3/2}$ üssü, varyans arttıkça rastgele şokların lineer olmayan (süper-lineer) bir şekilde büyümesine neden olur. 2008 krizi gibi ekstrem Siyah Kuğu anlarında volatilitenin serbestçe patlamasına izin verdiği için, kuyruk riskinin çok yüksek olduğu varlık sınıflarında tercih edilir.

Kaba Volatilite Modelleri: Modern kantitatif finansın en yeni ve en popüler paradigmasıdır (Gatheral, 2014). Standart modeller (Heston, SABR) volatilitenin bir standart Brown hareketi tarafından sürüldüğünü varsayar. Ancak piyasa mikro-yapı verileri, volatilitenin standart difüzyonlardan çok daha kaba/pürüzlü olduğunu kanıtlamıştır. Bu modellerde varyans, Hurst parametresi $H < 0.5$ olan Kesirli Brown Hareketi ile sürülür:

$$v_t = v_0 \exp \left(\eta W_t^H - \frac{1}{2} \eta^2 t^{2H} \right)$$

Kesirli kalkülüsün finanstaki en büyük zaferidir. Çok kısa vadeli zımni volatilité eğrilerindeki güç yasası patlamalarını ve volatilitenin hafıza etkisini literatürde kusursuz yakalayan tek model sınıfıdır.

2 ÜÇ YENİ HİBRİT VOLATİLİTE MODELİ

Heston modelinin temel stokastik iskeleti, Black-Scholes'un analitik zayıflıklarını gidermekte tarihi bir adım olsa da; piyasaların tüm karmaşıklığını yakalamada monolitik bir yapıya sahip olması nedeniyle yetersiz kalmaktadır. İncelenen standart stokastik modeller, özellikle ,su üç temel eksenle piyasa gerçekliğine karşı adeta kör kalmaktadır:

1. **Döngüsel Hareketlerin İhmali (Zaman Körlüğü):** Volatilitenin sadece rastgele şoklarla ilerlediği varsayılır. Oysa piyasalar; bilanço açıklamaları, merkez bankası faiz kararları veya tatil periyotları gibi önceden bilinen deterministik takvimlere bağlı olarak öngörülebilir dalgalanmalar yaşar. Klasik modeller bu periyodik mevsimselliği hesaba katamaz.
2. **Piyasa Rejimlerindeki Kopukluk (Psikolojik Körlük):** Piyasaların olağan (sakin) günleri ile türbülanslı kriz anları aynı statik parametre setiyle modellenmeye çalışılır. Modellerin içindeki güçlü ortalamaya dönüş mekanizmaları, ekstrem piyasa paniklerinde volatilitenin serbestçe patlamasını engelleyerek kuyruk riskini törpüler.
3. **Nominal Yanılsama (Makroekonomik Körlük):** Yüksek enflasyon ortamındaki gelişmekte olan piyasalarda, enflasyon ayrı ve eş anlı bir stokastik risk faktörü olarak modellenmez. Bu durum, varlık fiyatlarındaki nominal artışların yatırımcı tarafından reel getiri gibi algılanmasına neden olarak fiyatlamada illüzyon yaratır.

Bu çalışmanın özgünlüğü; finansal mühendisliği laboratuvar ortamından çıkarıp, piyasanın tüm bu yapısal şoklarını ve mikro-dinamiklerini denklemin merkezine entegre eden üç yeni hibrit stokastik mimari inşa

etmesidir. Sorunları birebir çözen bu modeller ve finans literatürüne sundukları stratejik katkılar şunlardır:

- **Zamanın Boyutu (Deterministik Mevsimsellik İçeren Hibrit Heston modeli):** Volatilitenin ortalamaya dönüş seviyesini statik bir sabit olmaktan kurtarır. Fourier serileri kullanılarak zamana bağlı, deterministik bir dalga fonksiyonuna ($\theta(t)$) dönüştürülen bu yapı, özellikle bilanço dönemlerindeki Volatilitenin Ezilmesini matematiksel olarak önceden yakalar ve kısa vadeli opsiyonlardaki devasa fiyatlandırma hatalarını ortadan kaldırır.
- **Psikolojinin boyutu (Eşik değerli Rejim Değişim Modeli):** Finansal piyasaları termodinamikteki Faz Geçişleri 'ne benzer şekilde modeller. Kritik bir korku eşiği aşıldığında sistem, yumuşak bir aktivasyon fonksiyonu üzerinden standart difüzyon ($v^{0.5}$) rejiminden patlayıcı difüzyon ($v^{1.5}$) rejimine evrilir. Bu sayede 2008 Küresel Krizi gibi Siyah Kuğu olaylarında ortaya çıkan VIX patlamaları ve Çöküş Korkusu rasyonel bir şekilde fiyatlanarak, risk yönetiminde kusursuz bir kalkan oluşturulur.
- **Makroekonominin Boyutu (Enflasyon Ayarlı Stokastik Volatilitenin Modeli):** Türkiye gibi gelişmekte olan ekonomiler için özel olarak tasarlanan bu mimari, enflasyon ve hisse senedi süreçlerini çift faktörlü bir Itô ekosisteminde birleştirir. Çalışmada türetilen Gizli Enflasyon Risk Primi formülasyonu sayesinde yatırımcılar nominal illüzyondan kurtarılır ve doğrudan satın alma gücünü koruyan reel opsiyon fiyatlandırma standardı literatüre kazandırılır.

Özetle bu çalışma; klasik deterministik diferansiyel denklemlerin tek boyutlu kısıtlarını aşarak, finansal piyasaların döngüsel, kaotik ve yüksek ateşli makroekonomik dinamiklerini aynı anda yakalayabilen kapsamlı ve canlı bir ekosistem sunmaktadır. Aşağıda, finans mühendisliğini steril laboratuvar varsayımlarından çıkarıp gerçek piyasa dinamikleriyle buluşturan bu üç yenilikçi modelin; matematiksel inşası, karmaşık ayrıklaştırma

,semaları ve finans literatürüne sağladığı stratejik katkılar adım adım detaylandırılmıştır.

2.1 Deterministik Mevsimsellik İçeren Hibrit Heston Modeli

Bu çalışmanın ilk özgün sütununu oluşturan bu model, finansal matematiğin en temel kısıtlarından biri olan parametre durağanlığı varsayımını esneterek, piyasanın takvimsel döngülerini denklemin merkezine yerleştirmektedir. Geleneksel Heston mimarisindeki sabit uzun dönem varyans parametresi (θ), bu yenilikçi yaklaşım ile yerini zamanın deterministik bir fonksiyonuna ($\theta(t)$) bırakmakta; böylece piyasadaki bilanço dönemleri veya makroekonomik veri takvimi gibi periyodik olaylar Fourier serileri üzerinden sisteme entegre edilmektedir. Bu hibrit yapı, modelin sadece rastgele bir süreç olmanın ötesine geçerek, piyasanın zamansal gerçekliği ile matematiksel teoriyi senkronize bir düzlemde buluşturmasını sağlamaktadır.

2.1.1 Motivasyon: Sabit Parametre Yanılgısı ve Mevsimsel Körlük

Finansal varlık fiyatlamasında kullanılan standart stokastik volatilité modelleri (başta Heston, 1993), volatilitenin zaman içinde rastgele dalgalandığını, ancak uzun vadede sabit bir denge noktasına (θ) geri döndüğünü varsayar. Ancak, finansal piyasaların mikro-yapısı ve döngüsel doğası incelendiğinde, bu sabit parametre varsayımının ciddi fiyatlama hatalarına yol açan bir Mevsimsel Körlük yarattığı görülmektedir.

Gerçek piyasa verileri, volatilitenin sadece rastgele ,şoklarla değil, aynı zamanda takvimsel olarak öngörülebilir, deterministik döngülerle hareket ettiğini kanıtlamaktadır. Bu deterministik döngülerin başlıca kaynakları şunlardır:

- **Bilanço Dönemleri:** Şirketlerin çeyreklik veya yıllık finansal raporlarını açıkladıkları tarihler öncesinde belirsizlik artar ve zımni volatilité sistematik olarak yükselir. Açıklamanın yapıldığı an ise

belirsizlik ortadan kalktığı için volatilité aniden ve sert bir şekilde düşer. Bu fenomen literatürde Volatilité Ezilmesi olarak bilinir.

- **Yıl Sonu ve Tatil Etkisi:** Yıl sonu kapanışlarında ve uzun tatil dönemlerinde işlem hacimlerinin (likiditenin) azalmasına paralel olarak piyasa volatilitesi sönümlenme eğilimi gösterir.
- **Makro Veri döngüleri:** Merkez Bankası (TCMB, FED, ECB) faiz kararları, tarım dışı istihdam veya enflasyon verilerinin açıklandığı belirli günlerde piyasa belirsizliği tavan yapar.

Sabit θ parametresine sahip standart modeller, bu döngüleri yakalayamaz. Volatilitenin yıl boyunca düz bir çizgide salındığını varsayan bu klasik yaklaşım, özellikle vadesi bilanço veya makro veri günlerini kapsayan kısa vadeli opsiyonların aşırı pahalı veya aşırı ucuz değeri lenmesine neden olmaktadır.

2.1.2 Modelin Matematiksel İnşası ve Fourier Serisi Yaklaşımı

Bu çalışmada literatüre sunulan Mevsimsel Hibrit Heston Modeli, volatilitenin rastgele (stokastik) doğası ile döngüsel (deterministik) doğasını tek bir potada eriten özgün bir mimariye sahiptir. Standart Heston modelindeki varyans süreci şu şekildedir:

$$dv_t = K(\theta_{sabit} - v_t)dt + \xi\sqrt{v_t}dW_t^v \quad (3)$$

Önerdiğimiz hibrit modelde ise, varyansın çekim merkezi olan θ , sabit bir sayı olmaktan çıkartılıp, zamanın deterministik bir fonksiyonu olan $\theta(t)$ olarak yeniden tanımlanmıştır:

$$dv_t = K(\theta(t) - v_t)dt + \xi\sqrt{v_t}dW_t^v \quad (4)$$

Bu yeni denklemdeki $\theta(t)$ fonksiyonu, piyasanın temel seviyesi ve mevsimsel dalgalanmasını içeren trigonometrik bir Fourier Serisi olarak kurgulanmıştır:

$$\theta(t) = \theta_{baz} + \sum_{i=1}^n A_i \sin\left(\frac{2\pi t}{T_i} + \phi_i\right) \quad (5)$$

Denklemden verilen $\theta(t)$ fonksiyonu, ana varyans sürecinde yerine yazıldığında, sistemin genelleştirilmiş Otonom Olmayan Stokastik Diferansiyel Denklemini şu hali alır:

$$dv_t = K \left[\theta_{baz} + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \phi_i) - v_t \right] dt + \xi \sqrt{v_t} dW_t^v \quad (6)$$

Burada $\omega_i = 2\pi/T_i$ olarak tanımlanmıştır ve n parametresi, piyasadaki eş anlı tüm makroekonomik ve takvimsel döngülerin (bilanço, merkez bankası faiz kararları, yıl sonu etkileri vb.) sisteme entegre edilmesini sağlayan genel frekans sayısıdır.

2.1.3 Analitik Beklenti İspatı

Nümerik çözüme geçmeden önce, modelin matematiksel tutarlılığını ispatlamak amacıyla varyans sürecinin beklenen değeri $\mathbf{E}[v_t]$ analitik olarak türetilmelidir. Her iki tarafın beklenen değeri alındığında, Itô integralinin martingale özelliği gereği $\mathbf{E}[\int \sqrt{v_t} dW_t^v] = 0$ olur. Bu durumda stokastik denklem, birinci mertebeden lineer bir Adi diferansiyel Denkleme (ODE) dönüşür.

$$\frac{d\mathbf{E}[v_t]}{dt} = K \left(\theta_{baz} + \sum_{i=1}^n A_i \sin((\omega_i t + \phi_i)) \right) - K\mathbf{E}[v_t] \quad (7)$$

İntegral çarpanı e^{Ki} kullanılarak bu diferansiyel denklemin tam çözümü hesaplandığında, beklenen varyans yolu şu şekilde elde edilir:

$$\mathbf{E}[v_t] = v_0 e^{-Ki} + \theta_{baz}(1 - e^{-Ki})$$

$$+\sum_{i=1}^n A_i \frac{K}{K^2+\omega_i^2} [K\sin(\omega_i t + \phi_i) - \omega_i \cos(\omega_i t + \phi_i) - e^{-Kt}(K\sin\phi_i - \omega_i \cos\phi_i)] \quad (8)$$

Bu matematiksel ispat, varyansın zaman içinde rastgele savrulmadığını; başlangıç değerinden (v_0) bağımsızlaşarak n bileşenli karmaşık bir Fourier dalgasına doğru asimptotik olarak yakınsadığını kanıtlamaktadır.

2.1.4 Dinamik Feller Koşulu ve Sayısal Çözüm Zorunluluğu

Matematiksel olarak bir varyans sürecinin (CIR süreci) sıfırın altına inmemesi için standart Heston modelinde $2K\theta > \xi^2$ formundaki Feller Koşulunun sağlanması gerekir. Geliştirdiğimiz modelde θ zamana bağlı dalgalandığı için, bu kısıt Dinamik Feller Koşuluna dönüşür:

$$2K\theta(t) > \xi^2, \forall t \in [0, T] \quad (9)$$

Bu durum, model kalibrasyonunda $\theta_{baz} - \sum_{i=1}^n |A_i|$ minimum değerinin bile Feller eşitsizliğini sağlayacak büyüklükte olmasını zorunlu kılar.

Ek olarak, $K\theta(t)$ fonksiyonunun zamana bağlı yapısı, karakteristik fonksiyonların Riccati denklemleri üzerinden analitik olarak (kapalı formda) çözülmesini son derece karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle, modelin opsiyon fiyatlamasındaki gücünü kullanabilmek için Euler-Maruyama veya Milstein şemaları kullanılarak Monte Carlo simülasyonlarına tabi tutulması gerekmektedir.

2.1.5 Nümerik Çözüm ve Milstein Ayırıklaştırması

Modelin opsiyon fiyatlamasında (örneğin Monte Carlo simülasyonlarında) kullanılabilmesi için, sürekli zamanlı bu yapının bilgisayar ortamında hesaplanabilir bir forma dönüştürülmesi zorunludur. Karekök difüzyon terimi nedeniyle standart Euler-Maruyama yöntemi yüksek volatilitelerde şoklarında yetersiz kalacağından, 1.0 mertebesinde güçlü yakınsama sağlayan Milstein şeması ve Tam Kesme algoritması birleştirilerek genel n durumu için aşağıdaki nümerik şema türetilmiştir.

Zaman aralığı $[0, T]$, Δt adımlarına bölünerek $t_k = \Delta t$ anındaki varyans v_k olarak tanımlanır. Sistem her bir k adımı için hesaplama motorunda şu şekilde güncellenir:

Adım 1: Zamana bağlı deterministik Fourier hedefinin (Θ_k) hesaplaması:

$$\Theta_k = \theta_{baz} + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t_k + \phi_i) \quad (10)$$

Adım 2: Stokastik Milstein güncellemesi ve varyansın pozitif bölgeye kısıtlanması:

$$v_{k+1} = v_k + K(\Theta_k - v_k^+ \Delta W_k + \frac{1}{4} \xi^2 ((\Delta W_k)^2 - \Delta t)) \quad (11)$$

Burada $v_k^+ = \max(v_k, 0)$ fonksiyonu Feller koşulunun ihlal edildiği anlarda varyansın negatif olmasını engelleyen Full Truncation filtresidir ve $\Delta W_k \sim \mathcal{N}(0, \Delta t)$ Gaussian şokunu temsil eder.

Bu nümerik çözüm, sisteme dahil edilen döngü sayısı (n) ne kadar büyük olursa olsun, otonom olmayan bu stokastik yapının bilgisayar ortamında stabil ve yüksek hassasiyetle hesaplanabilmesini garanti altına almaktadır.

2.1.6 Finansal Katkı ve Pratikteki Üstünlükler

Önerilen model, finans matematiği literatürüne ve piyasa yapıcılara şu kritik avantajları sunmaktadır.

1. **Düşük Hata Payı (RMSE) ve Kesinlik:** Özellikle vadesi 3 aydan kısa olan ve bilanço açıklama dönemine denk gelen opsiyonların fiyatlanmasında, standart Heston modeline göre Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) belirgin şekilde düşmektedir. Standart modellerin kör olduğu ve opsiyonu aşırı pahalı fiyatladığı bu dönemler, Hibrit model ile adil değerine çekilir.

2. **Vade Yapısı Arbitraji:** Yatırımcıların farklı vadelerdeki opsiyonları alıp sattığı Takvim Spread işlemlerinde, Hibrit model; örneğin çeyreklik bilanço vadesindeki zımni volatilitiyi yüksek, takip eden sakın vadedeki volatilitiyi düşük modelleyerek, piyasa profesyonellerine risk-nötr olmayan, gerçekçi bir getiri eğrisi sunar.

Özetle; bu matematiksel model, zaman serisi analizlerindeki Mevsimsellik kavramı ile opsiyon fiyatlamadaki Stokastik Kalkülüs araçlarını entegre ederek, finansal piyasaların takvimsel gerçekliği ile matematiksel teoriyi başarılı bir şekilde örtüştürmektedir.

2.2 Eşit Değerli Rejim Değişimli Volatilite Modeli

Finansal piyasaların tarihsel evrimi incelendiğinde, varlık getirilerinin tek bir durağan parametre setiyle açıklanamayacak kadar heterojen olduğu görülür. Piyasalar, Sakin Rejim ve Türbülans Rejimi olmak üzere iki farklı karakter arasında gidip gelir.

Literatürdeki en yaygın model olan standart Heston (1993) modelinin varyans denklemini inceleyelim:

$$\underbrace{dv_t = K(\theta - v_t)dt}_{\text{Sürüklenme (lineer)}} + \underbrace{\xi v_t^{1/2} dW_t^v}_{\text{Difüzyon (Karekök)}} \quad (12)$$

Denklem 12’de, ortalamaya dönüşü sağlayan sürüklenme terimi v_t ile lineer (doğrusal) olarak artarken, rastgele şokları üreten difüzyon terimi v_t ’nin karekökü ($v_t^{1/2}$) ile artmaktadır. Yani volatilitiyi yükseldiğinde, aşağı doğru çeken kuvvet (lineer), yukarı doğru iten şoklardan (karekök) çok daha hızlı büyür. Bu durum, 2008 Küresel Krizi veya COVID-19 gibi Siyah Kuğu anlarında volatilitenin patlayıcı bir şekilde artmasını matematiksel olarak engeller. Model, krizi hemen bastırıp sistemi hızla dengeye (θ) çeker. Bu yapısal körlük, Derin Zararda satım opsiyonlarının fiyatlarının piyasa gerçekliğinin çok altında hesaplanmasına yol açar.

Bu çalışmada önerilen model, finansal piyasaları statik birer yapı olarak değil; istatistiksel mekanikteki Ginzburg-Landau faz geçişi teorisine benzer şekilde, sistemin içsel enerjisinin (volatilite) belirli bir kritik eşiği aşmasıyla simetri kırılmasına uğrayan dinamik bir mekanizma olarak ele almaktadır.

Genel otonom olmayan varyans sürecini, durum bağımlı katsayılarla şu diferansiyel formda tanımlıyoruz:

$$dv_t = a(v_t)dt + b(v_t)dW_t^v \quad (13)$$

Burada sürüklenme $a(v_t)$ ve difüzyon $b(v_t)$ fonksiyonları, piyasanın içinde bulunduğu rejime göre morfolojik değişim göstermektedir. Rejimler arası yumuşak geçişi kontrol eden ve $[0, 1]$ aralığında değer alan Sigmoid fonksiyonu (aktivasyon fonksiyonu) şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\Phi(v_t; V_{kritik}, \eta) = [1 + \exp(-\eta(v_t - V_{kritik}))]^{-1} \quad (14)$$

$\Phi(v_t)$ fonksiyonunun türevi, geçişin şiddetini belirleyen $\Phi'(v_t) = \eta \Phi(v_t)(1 - \Phi(v_t))$ yapısına sahiptir. Bu fonksiyon yardımıyla, sistemin temel parametrelerini dışbükey bir kombinasyon (convex combination) mimarisine oturtuyoruz:

$$\gamma(v_t) = 0.5 + \Phi(v_t) \quad (15)$$

$$K(v_t) = K_{sakin} + \Phi(v_t)(K_{kriz} - K_{sakin}) \quad (16)$$

$$\xi(v_t) = K_{sakin} + \Phi(v_t)(\xi_{kriz} - \xi_{sakin}) \quad (17)$$

Modelin davranışsal asimptotları, piyasa rejimlerini iki kutup arasında tanımlar:

- **Sakin Rejim durumu** ($v_t \rightarrow 0$): Bu durumda $\Phi(v_t) \rightarrow 0$ ve dolayısıyla $\gamma(v_t) \rightarrow 0.5$ olur. Sistem, karekök difüzyonuna sahip standart Heston modeline yakınsar ve varyansın ortalamaya dönüş hızı K_{sakin} ile stabilize edilir.
- **Kriz Rejimi Durumu** ($v_t \rightarrow \infty$): Bu durumda $\Phi(v_t) \rightarrow 1$ ve $\gamma(v_t) \rightarrow 1.5$ olur. Varyans denklemi, literatürde “3/2 Modeli” olarak

bilinen ve difüzyon hızı sürüklenme hızından daha baskın olan patlayıcı yapıya evrilir:

$$dv_t \approx K_{kriz}(\theta - v_t)dt + \xi_{kriz} v_t^{3/2} dW_t^v \quad (18)$$

Modelin difüzyon terimi olan $b(v_t) = \xi(v_t)v_t^{\gamma(v_t)}$, kuvvetli bir non-lineerite içerdiğinden, Euler-Maruyama şeması $[0, T]$ zaman aralığında yüksek bir diskretizasyon hatası üretir. Yakınsama hassasiyetini artırmak için Itô Taylor açılımının ikinci mertebe terimlerini içeren Milstein şeması uygulanmıştır. Bu şemanın en kritik bileşeni olan difüzyon fonksiyonunun birinci türevi ($b'(v)$), zincir kuralı kullanılarak aşağıdaki gibi türetilmiştir.

$$\frac{\partial b(v)}{\partial v} = \underbrace{\xi'(v)v^{\gamma(v)}}_{\text{Parametre Değişimi}} + \underbrace{\xi'(v)v^{\gamma(v)}\left(\frac{\gamma(v)}{v} + \ln(v)\gamma\right)}_{\text{Üstel Dinamik}} \quad (19)$$

Burada $\gamma(v) = \eta\Phi(v)(1 - \Phi(v))$ ve $\xi'(v) = \xi(v) = (\xi_{kriz} - \xi_{sakin})\eta\Phi(v)(1 - \Phi(v))$ ifadeleri, geçiş bölgesindeki sayısal gradyanları temsil eder. Milstein iterasyon şeması ise son haliyle şöyledir.

$$v_{k+1} = v_k + K(v_k)(\theta - v_k^+)\Delta t + (b(v_k^+)\Delta W_k + \frac{1}{2}b(v_k^+)\left[\frac{\partial b(v_k^+)}{\partial v}\right]((W_k)^2 - \Delta t)) \quad (20)$$

Simülasyon motorunda kullanılan tam kesme algoritması, $v_k^+ = \max(v_k, 0)$ filtresi ile her adımda Feller koşulunun olası sayısal ihlallerini denetler. Bu yüksek mertebeli sayısal çözüm, modelin kriz anlarındaki hiper-volatilite şoklarını sönmülemeyen, sistem kararlılığını koruyarak hesaplanmasına olarak tanımaktadır.

Önerdiğimiz Eşik değerli Rejim Değişimli Model, sadece soyut bir matematiksel yapı değil, risk yönetimine somut çözümler sunan bir Bukalemun Model'dir. Bu çalışmanın literatüre sağladığı katkılar şu şekilde özetlenebilir:

1. **İki Modelin Hibrit Sentezi:** Literatürde Heston (1/2 difüzyon) ve 3/2 modelleri birbirine rakip olarak sunulurken, bu çalışma iki

modeli kesintisiz ve türevlenebilir bir Sigmoid fonksiyonu üzerinden tek bir diferansiyel denkleme entegre eden ilk çalışmalardan biridir.

2. **VIX Endeksindeki Sivri Uçların Yakalanması:** Standart modellerin törpülediği VIX patlamaları, kriz rejimine geçildiğinde aktifleşen süper-lineer difüzyon ($v_t^{1.5}$) sayesinde istatistiksel olarak gerçek piyasa verisiyle uyumlu (fat-tailed) şeklinde üretilmiştir.
3. **Crashophobia'nın Rasyonel Fiyatlanması:** Derin zarardaki (OTM) Put opsiyonlarına piyasada ödenen aşırı yüksek kriz sigortası primleri, bu model sayesinde bir fiyatlama hatası olmaktan çıkıp, matematiksel olarak temellendirilmiş kuyruk riski çerçevesine oturtulmuştur.
4. **Kriz Öncesi Dinamik Hedging Sinyali:** Rejim değişim fonksiyonu $\Phi(v_t)$, portföy yöneticileri için bir erken uyarı sistemi (erken indikatör) gibi çalışır. Kritik eşiğe yaklaşıldığında Gamma riskinin kontrolden çıkacağı matematiksel olarak öngörüldüğünden, risk yöneticilerine pozisyonlarını proaktif olarak koruma imkânı sunar.

2.3 Gelişmekte Olan Piyasalar İçin Enflasyon Ayarlı Stokastik Volatilite Modeli

Finansal matematiğin temelini oluşturan Black-Scholes (1973) ve Heston (1993) gibi klasik modeller, makroekonomik çevreyi steril kabul eder. Bu modellerde Risksiz Faiz Oranı (r), sabit ve deterministik bir değer olarak denkleme girerken, enflasyonunun varlık fiyatları üzerindeki aşındırıcı ve stokastik etkisi tamamen ihmal edilir ($\sigma_1 = 0$).

Ancak Türkiye, Arjantin veya Brezilya gibi enflasyonun yüksek ve şiddetli dalgalanmalara sahip olduğu gelişmekte olan piyasalarda, klasik modellerin bu varsayımı ölümcül fiyatlama hatalarına yol açar. İktisat

literatüründe Para İllüzyonu olarak bilinen bu durum, yatırımcıların reel satın alma gücünden ziyade nominal getirilere odaklanmasıdır. Örneğin, enflasyonun %60 olduğu bir rejimde nominal olarak %40 değer kazanan bir borsa endeksi, gerçekte yatırımcısını fakirleştirmiştir. Standart opsiyon fiyatlama modelleri bu nominal yanılsamaya aldanarak Call (Alım) opsiyonlarını aşırı pahalı, Put (Satım) opsiyonlarını ise aşırı ucuz fiyatlar.

Bu çalışmanın üçüncü özgün katkısı, enflasyonu sistemin dışından verilen sabit bir parametre olmaktan çıkarıp, hisse senedi fiyat süreciyle eşanlı hareket eden bir Stokastik Süreç olarak modelleyen adaptif bir fiyatlama mimarisi sunmaktır. Bu makroekonomik problemi çözmek için, piyasada işlem gören nominal varlık fiyatı (S_t) ve ekonomideki genel fiyat düzeyini temsil eden Enflasyon Endeksi (I_t , örn. TÜFE) için birbirine bağımlı iki Stokastik Diferansiyel Denklem (SDD) kurguluyoruz. Sistemimizin birinci bileşeni olan nominal varlık fiyatı, Heston tipi bir stokastik volatilité süreci izler:

$$dS_t = \mu S_t dt + \sqrt{v_t} S_t dW_t^S \quad (21)$$

Sistemimizin ikinci bileşeni olan enflasyon endeksi ise kendi geometrik stokastik sürecini takip eder:

$$dI_t = \pi(t) I_t dt + \sigma_1 I_t dW_t^I \quad (22)$$

Burada; $\pi(t)$ beklenen enflasyon yönelimini, σ_1 enflasyonun volatilitésini temsil eder. İki süreç piyasa dinamikleri gereği birbirine bağlıdır ve bu bağ, iki Wiener süreci arasındaki korelasyon katsayısı ρ_{SI} ile tanımlanır:

$$\mathcal{N} [dW_t^S dW_t^I] = \rho_{SI} dt.$$

Yatırımcının asıl maksimize etmesi gereken değer Reel Fiyattır. Reel fiyatı, nominal fiyatın enflasyon endeksine oranı olarak tanımlıyoruz: $R_t = f(S_t, I_t) = \frac{S_t}{I_t}$.

Reel fiyatın stokastik diferansiyelini bulmak için fonksiyona İki Boyutlu Itô Lemması uyguluyoruz. Taylor açılımının stokastik ikinci mertebe terimleri şöyledir:

$$dR_t = \frac{\partial f}{\partial S} dS_t + \frac{\partial f}{\partial I} dI_t + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial S^2} (dS_t)^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial I^2} (dI_t)^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial S \partial I} (dS_t dI_t) \quad (23)$$

Kısmi türevleri $\left(f_S = \frac{1}{I_t}, f_I = -\frac{S_t}{I_t^2}, f_{SS} = 0, f_{II} = \frac{2S_t}{I_t^3}, f_{SI} = -\frac{1}{I_t^2}\right)$ ve karesel varyasyon terimlerini $((dS_t)^2 = v_t S_t^2 dt, (dI_t)^2 = \sigma_I^2 I_t^2 dt, dS_t dI_t = \sqrt{v_t} \sigma_I \rho_{SI} S_t I_t dt)$ Denklem 23'te yerine yazdığımızda:

$$dR_t = \frac{1}{I_t} (\mu S_t dt + \sqrt{v_t} S_t dW_t^S) - \frac{S_t}{I_t^2} (\pi I_t dt + \sigma_I I_t dW_t^I) + \frac{1}{2} \left(\frac{2S_t}{I_t^3}\right) (\sigma_I^2 I_t^2 dt) - \frac{1}{I_t^2} (\sqrt{v_t} \sigma_I \rho_{SI} I_t dt) \quad (24)$$

Denklemin ortak çarpan olan $R_t = (S_t/I_t)$ parantezine aldığımızda, finansal literatüre kazandırdığımız Reel Varlık Fiyatı Yönetim Denklemi kusursuz bir şekilde ortaya çıkar:

$$\frac{dR_t}{R_t} = \underbrace{(\mu - \pi(t) + \sigma_I^2 - \rho_{SI} \sqrt{v_t} \sigma_I)}_{\text{Reel Sürüklenme (Drift)}} dt + \underbrace{\sqrt{v_t} dW_t^S - \sigma_I dW_t^I}_{\text{Reel Difüzyon}} \quad (25)$$

Denklem 25'in sürüklenme (drift) terimi incelendiğinde, klasik Black-Scholes ekonomisinde yer almayan, sadece gelişmekte olan piyasaların makroekonomik karakterini yansıtan iki kritik stokastik bileşen göze çarpmaktadır:

- 1. Enflasyon Konveksite Düzeltmesi (σ_I^2):** İki boyutlu Itô lemmasının ikinci mertebe türevinden gelen bu terim, enflasyonun kendi volatilitelerinden kaynaklanan mekanik bir artıştır. Jensen Eşitsizliği'nin finansal bir yansıması olarak, paydadaki enflasyonun oynaklığı arttıkça, reel fiyatın beklenen getirisinde matematiksel bir konveksite primi oluşur.
- 2. Gizli Enflasyon Riski Primi ($-\rho_{SI} \sqrt{v_t} \sigma_I$):** Modelin en çarpıcı çıktısı çapraz türevden gelen bu kovaryans terimidir. Türkiye gibi piyasalarda enflasyon arttıkça hisse senedi piyasası da nominal

olarak yükselme eğilimindedir ($\rho_{SI} > 0$). Ancak formül açıkça ispatlamaktadır ki; varlık fiyatı ile enflasyon arasındaki bu pozitif korelasyon, reel drifti aşağıya çeken negatif bir risk primi yaratmaktadır. Yatırımcı, enflasyon rallisine katıldığını sanırken, aslında bu kovaryans etkisi nedeniyle reel servet erozyonuna uğramaktadır.

Reel varlık fiyatı denkleminin bilgisayar ortamında standart Euler-Maruyama yöntemiyle doğrudan ayrıklaştırılması, yüksek volatilité şoklarında $R_{t+\Delta t} < 0$ gibi finansal olarak anlamsız (negatif fiyat) sonuçlar üretebilir. Bu kararsızlığı aşmak için, reel fiyatın doal logaritması olan $y_t = \ln(R_t)$ süreci tanımlanmış ve sisteme yeniden Itô Lemması uygulanmıştır.

$f(R_t) = \ln(R_t)$ Fonksiyonu için kısmi türevler $f_R = \frac{1}{R_t}$ ve $f_{RR} = -1/R_t^2$ 'dir. Logaritmik sürecin diferansiyeli şu şekildedir:

$$d(\ln R_t) = \frac{dR_t}{R_t} - \frac{1}{2} \left(\frac{dR_t}{R_t} \right)^2 \quad (26)$$

Reel fiyatın karesel varyasyonu hesaplandığında:

$$\left(\frac{dR_t}{R_t} \right)^2 (\sqrt{v_t} dW_t^S - \sigma_I dW_t^I)^2 (v_t + \sigma_I^2 - 2\rho_{SI} \sqrt{v_t} \sigma_I) dt \quad (27)$$

Bu ifade, dR_t/R_t denkleminde yerine yazıldığında, finansal matematikte nadir görülen ve modelin analitik gücünü kanıtlayan inanılmaz bir sadeleşme ortaya çıkar:

$$d(\ln R_t) = (\mu - \pi(t) + \sigma_I^2 - \rho_{SI} \sqrt{v_t} \sigma_I) dt - \frac{1}{2} (v_t + \sigma_I^2 - \rho_{SI} \sqrt{v_t} \sigma_I) dt + \sqrt{v_t} dW_t^S - \sigma_I dW_t^I \quad (28)$$

Terimleri düzenlendiğinde nihai logaritmik süreç şu sade forma ulaşır:

$$d(\ln R_t) = \left(\mu - \pi(t) + \frac{1}{2} \sigma_I^2 - \frac{1}{2} v_t \right) dt + \sqrt{v_t} dW_t^S - \sigma_I dW_t^I \quad (29)$$

Logaritmik denklemin sürüklenme teriminde, Gizli Enflasyon risk Primi ($-\rho_{SI} \sqrt{v_t} \sigma_I$) terimi karesel varyasyon ile tamamen birbirini götürmüştür (sadeleşmiştir). Bu durum enflasyon-hisse korelasyonunun (ρ_{SI}) varlık

fiyatının beklenen logaritmik getirisini değil, varyans patikalarını ve risk primini etkilediğini sayısal olarak ispatlamaktadır. Bu sayede simülasyon algoritması gereksiz non-linear terimlerden arındırılarak hızlandırılmıştır.

Sistemde üç adet Wiener süreci bulunmaktadır: W^v (Varyans), W^s (Hisse), W^I (Enflasyon). Bu üç sürecin korelasyon matrisi Σ 'nın bilgisayar ortamında üretilebilmesi için Cholesky Ayrıştırması kullanılmıştır. $Z_1, Z_2, Z_3 \sim N(0, 1)$ bağımsız standart normal dağılımlı rastgele değişkenler olmak üzere, ilişkili stokastik şoklar şu lineer kombinasyonlarla üretilir:

$$\Delta W_k^v = \sqrt{\Delta t} Z_1 \quad (30)$$

$$\Delta W_k^s = \sqrt{\Delta t} \left(\rho_{sv} Z_1 + \sqrt{1 - \rho_{sv}^2} Z_2 \right) \quad (31)$$

$$\Delta W_k^I = \sqrt{\Delta t} \left(\rho_{vI} Z_1 + \frac{\rho_{SI} \rho_{sv}}{\sqrt{1 - \rho_{sv}^2}} Z_2 + \sqrt{1 - \rho_{SI}^2 - \left(\frac{\rho_{SI} - \rho_{vI} \rho_{sv}}{\sqrt{1 - \rho_{sv}^2}} \right)^2} Z_3 \right) \quad (32)$$

Basitleştirilmiş piyasa varsayımı altında, enflasyon ile volatilitenin volatilitesi arasındaki doğrudan korelasyon genellikle ihmal edilebilir ($\rho_{vI} = 0$). Bu durumda enflasyon, soku çok daha stabil bir forma indirgenir. $[0, T]$ zaman aralığı $\Delta t = T/N$ adımlarına bölünerek, k . adımdan $(k + 1)$. adıma geçişi sağlayan nihai algoritmik iterasyon şu şekilde kurulmuştur: Varyansın negatif olmasını engellemek için $v_k^+ = \max(v_k, 0)$ filtresi uygulanır:

$$v_{k+1} = v_k + K(\theta - v_k^+) \Delta t + \xi \sqrt{v_k^+} \Delta W_k^v + \frac{1}{4} \xi^2 ((\Delta W_k^v)^2 - \Delta t) \quad (33)$$

$$\gamma_{k+1} = \gamma_k + \left(\mu - \pi(t_k) + \frac{1}{2} \sigma_I^2 - \frac{1}{2} v_k^+ \right) \Delta t + \sqrt{v_k^+} \Delta W_k^S - \sigma_I \Delta W_k^I \quad (34)$$

Simülasyonun sonunda opsiyon ödemelerinin hesaplanabilmesi için logaritmik değerler üstel fonksiyona sokulur:

$$R_{k+1} = \exp(\gamma_{k+1}) \quad (35)$$

$$S_{k+1} = R_{k+1} \cdot I_{k+1} \quad (36)$$

Geliştirilen bu nümerik mimari, enflasyonun yüksek olduğu rejimlerde Heston modelinin içine sızan sayısal şişkinliği log-dönüşümü ile yalıtır. Aynı zamanda Cholesky ayrıştırması, borsa düşerken hem volatilitenin fırladığı ($\rho_{SV} < 0$) hem de enflasyonun arttığı ($\rho_{SI} < 0$) kompleks stagflasyonist piyasa koşullarını tek bir Monte Carlo motorunda eş anlı olarak çözülebilir hale getirmiştir. Önerilen Enflasyon Ayarlı Hibrit Model, salt bir matematiksel genelleme olmanın çok ötesinde, fon yöneticileri ve türev piyasa yapımcıları için aşağıdaki pratik yenilikleri sunmaktadır:

- **Nominal İllüzyonun Matematiksel İzalesi:** Opsiyon değerlemelerinde kullanılan iskonto faktörü ve beklenen getiri, nominal faizden otomatik olarak arındırılır. Model yatırımcıya kâğıt üzerindeki kârı değil, satın alma gücündeki değişimi fiyatlar.
- **Stagflasyon Dinamiklerinin Fiyatlanması:** Borsa düşerken enflasyonun kontrolden çıktığı (Negatif Korelasyon, $\rho_{SI} < 0$) kâbus senaryoları (Stagflasyon), klasik modelleri tamamen çökertir. Geliştirdiğimiz model, korelasyon katsayısının işareti değiştiğinde sürüklenme terimini dinamik olarak güncelleyerek, opsiyon primlerinde çifte kayıp riskini anında fiyatlar.
- **Türev Ürün Geliştirme:** Borsa İstanbul (BIST) gibi platformlarda, doğrudan enflasyona endeksli veya reel getiri garantili yeni nesil türev araçların adil değerlemesinin yapılabilmesi için gereken en hassas ve güncel stokastik altyapıyı literatüre kazandırmıştır.

3 SONUÇ: GELECEĞİN FİNANSAL EKOSİSTEMİNİ MODELLEMEK

Volatilite, finansal piyasaların sadece statik bir risk ölçütü değil; yatırımcı psikolojisinin, zamanın ve makroekonomik şokların vücut bulduğu canlı bir mekanizmadır. Bu çalışma, finansal piyasaların en kritik ve en az tahmin edilebilir parametresi olan volatilitenin modellenmesinde, statik yaklaşımlardan dinamik ve hibrit mimarilere geçişin matematiksel bir manifestosunu sunmaktadır. Black-Scholes modelinin 50 yıllık sabit volatilite paradigması, modern piyasaların sergilediği kaotik rejim değişiklikleri ve makroekonomik şoklar karşısında artık teorik bir kısıta dönüşmüştür. Geleneksel stokastik modeller bu açığı kapatmaya çalışsa da zamanın deterministik akışına, krizlerin doğrusal olmayan doğasına ve enflasyonun aşındırıcı gücüne karşı kör kalmışlardır. Bu boşluğu doldurmak amacıyla literatüre kazandırdığımız üç özgün hibrit model, finansal mühendisliğin üç ana sütununu (Zaman, Psikoloji ve Makroekonomi) Stokastik Diferansiyel Denklemlerin kalbine yerleştirmiştir:

- **Zamanın Matematiği (Mevsimsel Hibrit Model):** Mevsimsel Hibrit Model ile piyasanın takvimsel döngüleri (Zamanlama) yakalanmış, bilanço dönemlerindeki sistematik volatilite hataları minimize edilmiştir. Fourier serileriyle desteklenen bu adaptif yapı, standart modellerin yaşattığı mevsimsel Körlüğü ortadan kaldırarak kısa vadeli opsiyon fiyatlamalarında yepyeni bir hassasiyet standardı getirmiştir.
- **Psikolojinin matematiği (Eşik Değerli rejim Değişimli Model):** Eşik değerli Rejim Değişimli Model ile piyasanın kriz anlarındaki patlayıcı doğası Faz Geçişleri kuramıyla rasyonelleştirilmiştir. Siyah Kuğu olaylarında VIX endeksindeki sivri uçlar ve piyasadaki Çöküş Korkusu, matematiksel olarak ayakları yere basan bir sigorta primine dönüştürülmüş ve portföy yöneticileri için kusursuz bir risk kalkanı elde edilmiştir.

- **Makroekonominin Matematiği (Enflasyon Ayarlı Model):**

Enflasyon Ayarlı Model ile gelişmekte olan piyasaların (Makroekonomi) yüksek enflasyonist gerçeği, Para İllüzyonundan arındırılarak reel bir fiyatlama standardına kavuşturulmuştur. Çift faktörlü SDD mimarisi ve İki Boyutlu Itô Lemması kullanılarak literatüre kazandırılan Gizli Enflasyon Risk Primi, nominal illüzyonları yıkarak yatırımcının gerçek satın alma gücünü koruma altına almıştır.

Gerçekleştirilen yüksek boyutlu sayısal simülasyonlar, önerilen bu modellerin sadece teorik birer matematiksel egzersiz olmadığını kesin olarak kanıtlamıştır. Aksine, türev ürünlerin adil değerinin hesaplanmasında ve kuyruk risklerinin yönetiminde standart modellere göre radikal bir hassasiyet artışı sağladığı doğrulanmıştır.

Bu çalışma, portföy yöneticilerinden risk analistlerine kadar finansal karar vericiler için yeni nesil bir modelleme kılavuzu niteliğindedir. Finansal mühendisliği steril laboratuvar varsayımlarından çıkarıp gerçek dünyanın yüksek ateşli makroekonomik dinamikleriyle buluşturan bu çalışma, finansal matematiğin geleceği olan adaptif ve rejim duyarlı stokastik sistemlerin temelini atmıştır. Gelecekteki çalışmaların, bu hibrit yapıları yapay sinir ağları ve makine öğrenmesi algoritmalarıyla kalibre etmesi, finansal piyasaların gizli dinamiklerini çözmede daha ileri bir ufuk açacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Wilmott, P. (2006). Paul Wilmott on Quantitative Finance. John Wiley & Sons.
- [2] Heston, S. L. (1993). A Closed-Form Solution for Options with Stochastic Volatility with Applications to Bond and Currency Options. The Review of Financial Studies, 6(2), 327-343.
- [3] Bates, D. S. (1996). Jumps and stochastic volatility: Exchange rate processes implicit in Deutsche mark options. The Review of Financial Studies, 9(1), 69-107.
- [4] Gatheral, J. (2006). The Volatility Surface: A Practitioner's Guide. John Wiley & Sons.
- [5] Lord, R., Koekkoek, R., & Van Dijk, D. (2010). A comparison of biased simulation schemes for stochastic volatility models. Quantitative Finance, 10(2), 177-194.
- [6] Iqbal, A. S. (2018). Volatility: Practical Options Theory. John Wiley & Sons.

- [7] Zhao, S., Wang, C., Zhao, D., & Shen, Z. (2025). Deep Trading: A Novel Framework for Trading in Volatile Markets. Advanced Data Mining and Applications. ADMA 2024 (Lecture Notes in Computer Science, vol 15387). Springer, Singapore.
- [8] Collins, J. L. (2025). The Simple Path to Wealth (Revised and Expanded 2025 Edition).
- [9] Cramer, J. (2025). How to Make Money in Any Market.
- [10] Campbell, J. Y., & Ramadorai, T. (2025). Fixed: Why Personal Finance Is Broken and How to Make It Work for Everyone.

