



Belkis Elyigit

Fırat Academy, belkiselyigit@hotmail.com, Samsun-Türkiye

Cevdet Emin Ekinci

Fırat University, cee@firat.edu.tr, Elazığ-Turkiye

| | | |
|----------------------|---|---------------------|
| DOI | http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2026.21.1.2A0213 | |
| ORCID ID | 0000-0002-2556-1862 | 0000-0002-7114-4832 |
| Corresponding Author | Belkis Elyigit | |

POLİMER ESASLI KOMPOZİTLERİN İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE PERFORMANS, DAYANIKLILIK VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANALİZİ

ÖZ

Bu çalışma, polimer esaslı kompozit malzemelerin inşaat mühendisliğindeki kullanımını performans, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik boyutları çerçevesinde kapsamlı biçimde incelemektedir. Geleneksel yapı malzemelerinde görülen korozyon, yorulma ve çevresel etkiler kaynaklı bozulmalar, altyapı sistemlerinin güvenliği ve ekonomik sürdürülebilirliği açısından önemli sorunlar oluşturmaktadır. Bu doğrultuda, yüksek özgül mukavemet, düşük ağırlık, korozyon direnci ve tasarım esnekliği sağlayan fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitler yenilikçi bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Çalışmada, FRP sistemlerin mekanik özellikleri, çevresel koşullar altındaki uzun dönem davranışları ve servis ömrü performansları literatür verileri doğrultusunda analiz edilmiştir. Ayrıca yaşam döngüsü maliyeti ve çevresel sürdürülebilirlik kriterleri karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Bulgular, başlangıç maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen FRP kompozitlerin bakım ihtiyacını azaltarak uzun vadede ekonomik ve yapısal avantajlar sunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, yangın dayanımı ve uzun süreli performans belirsizliklerinin geliştirilmesi gereken temel araştırma alanları olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Polimer Kompozitler, FRP, Dayanıklılık, Sürdürülebilirlik, Yaşam Döngüsü Analizi

PERFORMANCE, DURABILITY, AND SUSTAINABILITY ANALYSIS OF POLYMER-BASED COMPOSITES IN CIVIL ENGINEERING

ABSTRACT

This study comprehensively examines the use of polymer-based composite materials in civil engineering within the framework of performance, durability, and sustainability. Corrosion, fatigue, and environmentally induced deterioration commonly observed in conventional construction materials constitute significant challenges for the safety and economic sustainability of infrastructure systems. In this context, fiber-reinforced polymer (FRP) composites, which provide high specific strength, low weight, superior corrosion resistance, and design flexibility, are considered an innovative alternative. The study analyzes the mechanical properties, long-term behavior under environmental conditions, and service-life performance of FRP systems based on findings reported in the literature. In addition, life-cycle cost and environmental sustainability criteria are comparatively evaluated. The findings indicate that although FRP composites involve relatively high initial costs, they offer substantial long-term economic and structural advantages by reducing maintenance requirements. However, limitations associated with fire resistance and uncertainties regarding long-term performance remain major research challenges that require further investigation.

Keywords: Polymer Composites, FRP, Durability, Sustainability, Life Cycle Assessment

How to Cite:

Elyigit, B. and Ekinci, C.E., (2026). Polimer esaslı kompozitlerin inşaat mühendisliğinde performans, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik analizi. Technological Applied Sciences, 21(1):1-16, DOI: 10.12739/NWSA.2026.21.1.2A0213.



1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde inşaat mühendisliği, yalnızca daha dayanıklı yapılar inşa etmekle kalmayıp, aynı zamanda sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak ve yaşam döngüsü maliyetlerini makul seviyelere çekmek gibi büyük bir zorunlulukla karşı karşıyadır [1]. Özellikle altyapı projelerinde sıkça karşımıza çıkan korozyon ve metal yorgunluğu gibi çevresel faktörler, bakım-onarım maliyetlerini ciddi şekilde artırmakta; bu durum geleneksel yapı malzemelerinin performans sınırlarını iyice zorlamaktadır [2 ve 3]. Mevcut altyapı stokumuzun büyük bir kısmının yaşlanmış olması, bu sorunu daha da kritik bir boyuta taşıyabilmektedir. Tam da bu noktada, daha dayanıklı, hafif ve uzun ömürlü alternatiflere duyulan ihtiyaç uygulayıcıları polimer esaslı kompozit malzemelere yöneltebilmektedir.

Polimer esaslı kompozitler, temel olarak bir polimer matris (epoksi, polyester veya vinil ester) ile yüksek mukavemetli takviye elemanlarının (karbon, cam veya aramid lifler) bir araya gelmesiyle oluşan çok fazlı sistemlerdir. Burada matris fazı yük transferini üstlenip malzemeyi dış etkilerden korurken, takviye fazı ise mekanik performansın asıl yükünü karşılar. Bu malzemeler, yüksek özgül mukavemetleri, korozyona karşı dirençleri ve sundukları tasarım esnekliğiyle inşaat sektöründe her geçen gün daha stratejik bir konuma yükselmektedir [2, 4 ve 5].

Fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitleri beton ve çelikten ayıran en önemli özellik, sundukları yüksek dayanım/ağırlık oranıdır. Özellikle karbon lif takviyeli polimerler (CFRP), hem yeni projelerde hem de mevcut binaların güçlendirilmesinde, düşük yoğunluklarına rağmen sergiledikleri yüksek çekme dayanımıyla oldukça etkili çözümler sunmaktadır. Deniz yapıları veya kimyasal tesisler gibi agresif çevresel koşulların hâkim olduğu alanlarda, korozyon direnci sayesinde bu malzemeler vazgeçilmez birer alternatif haline gelmiştir [6].

Polimerlerin katkısı yalnızca yapısal güçlendirmeyle sınırlı değil; polimer modifiyeli betonlar ve geri dönüştürülmüş polimer içeren sistemler sayesinde beton teknolojisinde sürdürülebilirlik açısından da önemli kapılar açılmaktadır. Elbette bu malzemelerin yangın dayanımı, uzun vadeli davranış modelleri ve ilk yatırım maliyetleri gibi literatürde tartışılan bazı kısıtları da mevcuttur [5 ve 7]. Ancak son yıllarda yapılan araştırmalar, FRP malzemelerin köprülerden altyapı sistemlerine kadar çok geniş bir alanda mühendislik performansını kanıtladığını açıkça ortaya koymaktadır [3 ve 4]. Ayrıca FRP kompozitlerin özgül dayanımı çeliğe oranla yaklaşık 5 ila 10 kat daha fazladır [8]. Örneğin, yapı çeliği için 50-250 kN·m/kg olan özgül dayanım değeri, CFRP için 500-1500 kN·m/kg aralığına kadar çıkabilmektedir [9]. Burada verimliliği belirleyen ana unsurlar: lif hacim oranı ve lif-matris arasındaki arayüzey kayma dayanımı (IFSS)'dir. Genellikle 20-80 MPa aralığında seyreden IFSS değerleri, özel yüzey işlemleriyle %30'a kadar iyileştirilebilmektedir [10 ve 11].

Polimer kompozitleri mühendislikte özel kılan temel nokta, lif yönelmesine bağlı olarak mekanik özelliklerin optimize edilebildiği "anizotropik" doğasıdır. Tasarımcıya yük doğrultusuna göre malzeme özelliklerini "ayarlamak" imkânı sunan bu yapı, malzeme verimliliğinde %30-50 oranında bir artış sağlar [1].

Bu çalışma, polimer esaslı kompozitlerin inşaat mühendisliğindeki yerini, mekanik performans, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik gibi farklı açılardan bütüncül bir bakış açısıyla ele almayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda çalışmanın temel odak noktaları şunlardır:

- Mekanik performansın sistematik bir değerlendirmesi,
- Farklı çevresel etkiler altında dayanıklılık ve uzun vadeli davranış analizi,

- Sürdürülebilirlik ve yaşam döngüsü perspektiflerinin incelenmesi,
- Mevcut literatürdeki boşlukların tespit edilerek gelecek çalışmalara ışık tutulmasıdır.

Sektörde yaygın olarak kullanılan polimerler, polimer kompozitler, malzeme örnekleri ve uygulama alanlarına dair görsel detaylar sırasıyla Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3'te sunulmuştur.



Polivinil Klorür
(PVC)



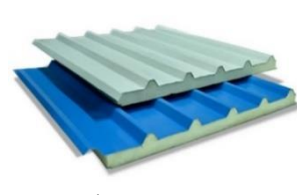
Poliyeten
(PE-HDPE/LDPE)



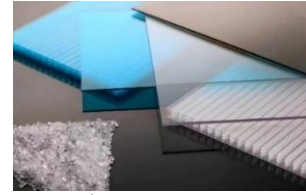
Polipropilen (PP)



Polistiren
(EPS/XPS-Köpük)



Poliüretan (PUR)



Polikarbonat (PC)



Akrilik (PMMA)



Epoksi



Silikon (S. Reçine)

Şekil 1. İnşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan polimer malzeme örnekleri

(Figure 1. Examples of polymer materials commonly used in the construction industry)



Karbon Fiber
Takviyeli (CFRP)

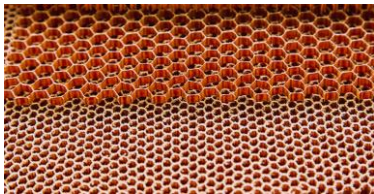


Cam Fiber Takviyeli
(GFRP)

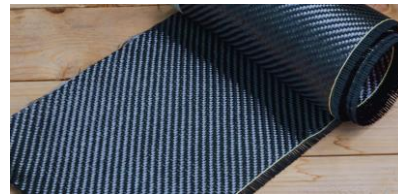


Aramid (Kevlar)
Takviyeli

Lif Takviyeli Polimer Kompozitler (FRP)



Parçacık Takviyeli Polimer
Kompozitler



Tabakalı (Lamine) Polimer
Kompozitler

Şekil 2. İnşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan polimer esaslı kompozit malzeme örnekleri

(Figure 2. Examples of polymer-based composite materials commonly used in the construction industry)



Şekil 3. Polimer esaslı kompozit malzemelerle ilgili bazı uygulama örnekleri

(Figure 3. Some application examples related to polymer-based composite materials)

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Bu çalışmayı benzerlerinden ayıran temel nokta, polimer esaslı kompozitleri sadece mekanik performans verilerine hapsetmeyip, bu verileri dayanıklılık ve sürdürülebilirlik boyutlarıyla harmanlayan bütüncül bir bakış açısı sunmasıdır. Mevcut literatür incelendiğinde, çalışmaların genellikle belirli ve tekil performans parametrelerine sıkıştığı görülmektedir. Oysa bu çalışma, mühendislik dünyası için asıl kritik olan "performans-dayanıklılık-yaşam döngüsü" üçgenini bir arada ele almaktadır. Bu yaklaşım, özellikle korozyon riskinin yüksek olduğu, uzun servis ömrü beklenen ve bakım maliyetlerinin minimuma indirilmesinin hedeflendiği altyapı projelerinde, çok daha gerçekçi ve uygulanabilir tasarım kararlarının alınmasına zemin hazırlamaktadır. Ayrıca, disiplinlerarası bir değerlendirme modelini benimsemesi sayesinde, hem akademik dünyaya teorik bir derinlik kazandırmayı hem de uygulama sahasındaki mühendislere pratik bir rehber sunmayı amaçlamaktadır.

Highlights (Öne Çıkanlar)

- **Bütüncül Yaklaşım:** Polimer esaslı kompozitler, performans, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik ekseninde, birbirini tamamlayan unsurlar olarak analiz edilmiştir.
- **Veriye Dayalı Kıyaslama:** FRP malzemelerin geleneksel yapı malzemeleri karşısındaki teknik ve ekonomik üstünlüğü, somut ve nicel verilerle ortaya konulmuştur.
- **Gelecek Vizyonu:** Mevcut literatürdeki eksiklikler net bir şekilde saptanarak, özellikle uzun vadeli malzeme davranışı ve sürdürülebilirlik odaklı yeni araştırma rotaları tanımlanmıştır.

3. LİTERATÜR İNCELEMESİ VE TEKNİK ALTYAPI

(LITERATURE REVIEW AND TECHNICAL INFRASTRUCTURE)

İnşaat sektörü, modern mühendisliğin getirdiği yüksek dayanıklılık gereksinimleri, küresel sürdürülebilirlik hedefleri ve yapıların yaşam döngüsü maliyetlerini minimize etme zorunluluğu nedeniyle FRP gibi ileri malzeme teknolojilerine her geçen gün daha fazla yönelmektedir. Özellikle korozyon, yorulma ve agresif çevresel etkilerle mücadele noktasında FRP kompozitler, çelik ve beton gibi geleneksel yapı malzemeleriyle kıyaslandığında, hem mekanik performans hem de çevresel dayanıklılık açısından çok daha üstün bir tablo çizmektedir. Mevcut literatür genel olarak incelendiğinde, polimer esaslı kompozitler üzerine yapılan çalışmaların büyük bir kısmının belirli performans parametreleri, özellikle de mekanik davranış modelleri üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu alandaki literatürün temel taşlarından biri kabul edilen Bakis ve ark. (2002) FRP kompozitlerin mekanik özelliklerini ve mühendislik uygulamalarını sistematik bir çerçevede analiz ederek alana çok önemli bir referans kazandırmıştır. Söz konusu çalışmada, FRP malzemelerin çekme dayanımının 1000-5000 MPa gibi geniş



ve etkileyici bir aralıkta değiştiği, bu değerlerin geleneksel yapı çeliğinin sunduğu kapasitenin oldukça üzerinde olduğu vurgulanmıştır [4].

Karbon lif takviyeli kompozitler (CFRP) özelinde bakıldığında ise, lif doğrultusundaki çekme dayanımının lif tipine bağlı olarak 3000-6000 MPa seviyelerine kadar ulaşabildiği literatürde net bir şekilde ortaya konulmuştur [12]. Güncel tasarım standartları ve kılavuzları (örneğin ACI 440, 2017), CFRP için karakteristik çekme dayanımını genellikle 2400-3800 MPa aralığında tanımlarken, tasarım aşamasında güvenlik katsayıları ile birlikte bu değerin 1400-2600 MPa seviyelerinde dikkate alınmasını önermektedir. Benzer bir yaklaşımla Bank (2006), kompozit malzemelerin yapısal tasarım prensiplerini hem teorik hem de pratik boyutuyla ele almış; FRP elemanların özgül mukavemetinin çeliğe göre yaklaşık 2 ile 5 kat daha yüksek olduğunu saptamıştır [5]. Ancak Ashby (2011) gibi daha güncel araştırmalar, ileri teknoloji CFRP sistemlerinde bu üstünlük oranının 5 ile 10 kat seviyelerine kadar tırmanabildiğini rapor etmektedir [9].

Bu malzemeler, yapısal olarak bir polimer matris fazı ile bu fazın mekanik özelliklerini yukarı taşıyan takviye elemanlarının birleşiminden doğan çok fazlı sistemlerdir. Kompozitlerin yapısal verimliliği, lif ile matris arasındaki "arayüzey kayma dayanımı" (Interfacial Shear Strength - IFSS) ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek standartlı üretim süreçlerinde bu IFSS değerinin matrisin akma dayanımının %80-90'ına kadar ulaşabildiği bilinmektedir [10]. Literatürde tipik IFSS değerlerinin 20-80 MPa aralığında olduğu, ancak çeşitli yüzey işlemleri ve modifikasyonlarla bu değerin %30 oranında artırılabilirdiği belirtilmektedir [11]. Burada matris fazı, yük transferini sağlama ve lifleri dış etkilerden koruma görevini üstlenirken, takviye fazı malzemenin asıl dayanım ve rijitlik karakterini belirler. Kompozitlerin mekanik başarısı büyük oranda lif hacim oranına bağlıdır. Bu oran genellikle %40-70 aralığında olsa da, araştırmalar optimum performansın çoğunlukla %55-65 bandında yakalandığını göstermektedir [3, 12 ve 13].

Hollaway (2010) FRP kompozitlerin köprü tabliyeleri, güçlendirme sistemleri ve kablo elemanları gibi kritik alanlardaki kullanımını mercek altına alarak, bu malzemelerin uzun vadeli dayanıklılık noktasında sunduğu avantajları ortaya koymuştur. Örneğin, ABD'deki saha uygulamaları incelendiğinde, FRP köprü tabliyelerinin geleneksel beton sistemlere kıyasla yapı ağırlılığında %50-60 oranında bir hafifleme sağladığı rapor edilmiştir. Yapısal yükteki bu radikal düşüş, temel ve altyapı maliyetlerinde doğrudan bir optimizasyon fırsatı yaratmaktadır. Öyle ki bu tür sistemlerde birim alan başına ölü yükün 3-5 kN/m² seviyelerine kadar çekilebildiği görölmektedir. Ayrıca, bu tabliyelerin kullanımıyla bakım periyotlarının seyrekleşmesi, yaşam döngüsü maliyetlerinde %20-30 oranında bir tasarruf sağlamaktadır (FHWA, 2019) [14]. Meier (1995) ile Teng ve ark. (2002) tarafından yapılan çalışmalar da bu verileri destekler niteliktedir. FRP ile güçlendirilen elemanların servis ömrünün %25-75 oranında uzadığı ve bakım maliyetlerinin neredeyse yarı yarıya azaldığı saptanmıştır [15 ve 16].

Zhang ve ark. (2023) tarafından yürütölen bibliyometrik analizler, FRP alanındaki akademik ilginin boyutlarını da gözler önüne sermektedir. Son 20 yılda yayın sayısının yıllık ortalama %8-12 artış göstererek 2023 itibarıyla yıllık 5000 sınırını aştığı görölmektedir [17]. Ancak ilginç bir detay olarak, araştırmaların %60-70 gibi büyük bir bölümünün hâlâ sadece mekanik performansa odaklandığı, dayanıklılık, çevresel etki ve ekonomik performansın bir bütün olarak ele alındığı çalışmaların ise hâlâ nispeten sınırlı kaldığı vurgulanmaktadır.

Son dönem araştırmaları, FRP malzemelerin sadece güçlendirme değil, yeni yapı elemanlarının geliştirilmesi ve karmaşık altyapı sistemlerinde de hızla yer bulduğunu göstermektedir [3 ve 4]. Teknik



kapasiteyi rakamlarla detaylandırmak gerekirse, karbon liflerin çekme dayanımı 3500-6000 MPa, cam liflerin 2000-3500 MPa ve aramid liflerin 2800-3600 MPa aralığında seyretmektedir [8]. Bu yüksek mukavemet değerlerine ek olarak, CFRP'nin yaklaşık 1.5-2.0 g/cm³ olan düşük yoğunluğu, çeliğe karşı muazzam bir ağırlık avantajı sunar [5]. Bu durum toplam yapı ağırlığında %60-80'e varan azalmalara imkân tanırken, lojistik, taşıma ve montaj maliyetlerinde %20-30 oranında bir ekonomik kazanç sağlar [18].

Korozyon direnci konusu, FRP'nin en güçlü yanlarından biridir. Klorür difüzyon katsayısının 10⁻¹²-10⁻¹⁴ m²/s gibi çok düşük seviyelerde olması, korozyonu tetikleyen mekanizmaları neredeyse tamamen devre dışı bırakmaktadır [19]. Bu özellik, FRP donatılarının korozyon riski taşıyan ortamlarda 50-100 yıl gibi oldukça uzun bir servis ömrü sunabilmesinin önünü açmaktadır [20]. Yapısal güçlendirme tarafında ise CFRP uygulamalarının kolonlarda kesme dayanımını %30-80, eksenel yük kapasitesini ise %40-150 oranında artırabildiği; ayrıca süneklik kapasitesinde 2 ila 4 kat artış sağladığı gözlemlenmiştir [16 ve 21].

Polimer esaslı kompozitlerin etkisi sadece yapısal elemanlarla da sınırlı değildir. Beton teknolojisinde polimer modifikasyonları sayesinde çekme dayanımında %30-50, eğilme dayanımında ise %40-80 oranında artışlar elde edilebilmekte; malzemenin su geçirimsizliği ve kimyasal direnci önemli ölçüde iyileşmektedir [22 ve 23]. Sürdürülebilirlik perspektifinde ise geri dönüştürülmüş polimerlerin kullanımı dikkat çekmektedir. Örneğin, plastik katkılı asfalt karışımlarının yorulma ömründe %20-40 artış, kalıcı deformasyonlarda ise %25-30 azalma sağlandığı rapor edilmiştir [24 ve 25].

Ancak tüm bu avantajların yanında, literatür bazı kritik kısıtlamalara da dikkat çekmektedir. Yangın dayanımı, polimer esaslı sistemlerin en zayıf halkası olarak görülmekte; 300°C üzerindeki sıcaklıklarda malzemenin dayanım kaybının %50'yi aşabildiği belirtilmektedir [6]. Bu nedenle son yıllardaki araştırmalar, nano-takviyeli (karbon nanotüp, grafen) ve akıllı kompozit sistemlere doğru evrilmektedir. Bu tür ileri takviyelerle mekanik özelliklerde %20-50 iyileşme sağlanabildiği gibi, sensör entegreli sistemlerle yapı sağlığının anlık takibi de mümkün hale gelmektedir [26 ve 27].

Sonuç olarak, polimer kompozitlerin nihai performansının sadece malzeme bileşenlerine değil, üretim kalitesine, kür koşullarına ve sahadaki uygulama hassasiyetine sıkı sıkıya bağlı olduğu unutulmamalıdır. Deneysel veriler, hatalı saha uygulamalarının %15-25 bandında bir performans kaybına neden olabileceğini göstermektedir. Bu da bizlere bu ileri teknoloji malzemelerin kullanımında kalite kontrol mekanizmalarının ne kadar hayati olduğunu bir kez daha hatırlatmaktadır.

4. POLİMER KOMPOZİT TÜRLERİ, ÖZELLİKLERİ VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ (TYPES, PROPERTIES, AND PRODUCTION METHODS OF POLYMER COMPOSITES)

İnşaat mühendisliğinde polimer esaslı kompozitler, sadece bir alternatif değil, artan performans talepleri ve uzun hizmet ömrü beklentileri için stratejik bir çözüm haline gelmiştir. Özellikle altyapı projelerinde kronikleşen korozyon, yorulma ve kimyasal bozulmalar, geleneksel malzemelerin sınırlarını her geçen gün daha fazla zorlamaktadır [3 ve 5]. Ekonomik boyuta bakıldığında, korozyon kaynaklı bakım maliyetlerinin toplam altyapı bütçesinin %20-30'una ulaştığı ve küresel GSYH'nin %3-4'ü düzeyinde devasa bir kayba yol açtığı gerçeği, bu arayışın temel motivasyonudur [28]. Yapılan deneysel çalışmalar da doğru bir lif yönlenmesiyle yük taşıma kapasitesinin %60'a kadar iyileştirilebildiğini kanıtlamaktadır [12]. Bu kompozit türlerinin performans özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

4.1. Materyal Sınıflandırması (Material Classification)

- **CFRP (Karbon Fiber):** 150-600 GPa gibi muazzam bir elastisite modülüyle sismik rehabilitasyon ve köprü güçlendirmelerinin lideridir. Özellikle prekast kirişlerde önerilmeli donatı olarak kullanıldığında, gevşeme (relaxation) kayıplarının çelikteki %8-10 seviyesinden %2-3'e düşmesi mühendislik açısından büyük bir avantajdır.
- **GFRP (Cam Fiber):** Ekonomikliği ve korozyon direnciyle öne çıkar. Çeliğe göre %70 daha hafif olan bu malzeme, 600-1500 MPa çekme dayanımıyla özellikle altyapı ve donatı uygulamalarında maliyet-etkin çözümler sunabilmektedir [5].
- **AFRP (Aramid Fiber):** 2000-3500 MPa çekme dayanımının yanı sıra, 80-150 kJ/kg gibi yüksek bir darbe yutma kapasitesine sahiptir. Bu enerji sönümlene yeteneği, aramid lifleri patlama dirençli (blast-resistant) yapılar ve sismik güçlendirmeler için rakipsiz kılmaktadır [12].
- **WPC (Ahşap-Polimer Kompozitler):** Düşük bakım ihtiyacı ve çevresel direnciyle daha çok mimari ve dekoratif uygulamalarda tercih edilmektedir.

Tablo 1. FRP performans ve kullanım karakteristikleri [1, 3 ve 4]
(Table 1. Performance and usage characteristics of FRP types)

| Tür | Mukavemet | Rijitlik | Dayanıklılık | Maliyet | Tipik Kullanım |
|------|------------|------------|--------------|---------|-----------------------------|
| CFRP | Çok yüksek | Çok yüksek | Çok yüksek | Yüksek | Yapı güçlendirme, köprüler |
| GFRP | Orta | Orta | Yüksek | Düşük | Donatı, altyapı |
| AFRP | Yüksek | Orta | Yüksek | Orta | Darbe ve sismik uygulamalar |
| WPC | Düşük | Düşük | Düşük | Orta | Cephe ve dış mekân |

4.2. Temel Özelliklerin Değerlendirilmesi (Assessment of Key Characteristics)

Kompozitlerin sunduğu avantajlar kadar, tasarım sürecinde dikkate alınması gereken sınırlamaları da mevcuttur. Ekinçi (2025) tarafından da vurgulandığı üzere, bu özelliklerin uygulama koşullarına göre optimize edilmesi şarttır.

Avantajlar:

- **Hafiflik ve Özgül Mukavemet:** Birim kütle başına taşıma kapasiteleri çeliğin çok üzerindedir; bu da lojistik ve montajda büyük kolaylık sağlar.
- **Korozyon ve Yorulma Direnci:** Deniz suyu veya kimyasal etkilere karşı doğal bir koruma kalkanına sahiptirler; tekrarlı yükler altında performanslarını korurlar.
- **Tasarım Esnekliği ve Yalıtım:** Karmaşık formlara girebilirler ve elektrikli ulaşım altyapıları için mükemmel birer yalıtıkandırlar [2].

Dezavantajlar:

- **Maliyet ve Kırılma:** Özellikle karbon bazlı sistemlerin ilk yatırım maliyeti yüksektir ve bu malzemeler plastik deformasyona uğramadan (aniden) kırılma eğilimindedir.
- **Sıcaklık ve UV Hassasiyeti:** 300°C üzerindeki sıcaklıklarda matris yapısı bozulabilir. Ayrıca UV ışınlarına karşı özel bir koruma gerektirebilirler.
- **Geri Dönüşüm:** Termoset matrisli yapıların yeniden kullanımı teknik olarak hâlâ zorlu bir süreçtir [2].

Bu özellikler birlikte değerlendirildiğinde, polimer kompozitlerin performansının uygulama koşullarına bağlı olarak optimize edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

4.3. Üretim Süreçlerinin Performansa Etkisi (The Impact of Production Processes on Performance)

Kompozit malzemelerin performansı üretim yöntemine doğrudan bağlıdır. Başlıca üretim teknikleri şunlardır:

- **Pultruzyon:** Yüksek lif hacim oranı (%50-70) ve hizalanma (>%90) sağlar.
- **Filament sarma:** Basınç dayanımını %30-70 artırabilir.
- **Reçine transfer kalıplama (RTM):** Düşük boşluk oranı (<%1) ile yüksek kalite
- **3B yazıcı teknolojileri:** Malzeme israfını %20-50 azaltır.
- **El yatırma yöntemi:** Ekonomik ancak kalite varyasyonu yüksektir.

Bu yöntemler, mekanik performans, maliyet ve üretim kalitesi açısından farklı avantajlar sunmaktadır.

Polimer esaslı kompozitlerin mekanik başarısı aslında üretim masasındaki hassasiyete bağlıdır. Pultruzyon yöntemi, %50-70 lif hacim oranı ve %90'ın üzerinde hizalanma ile maksimum performansı garanti ederken, filament sarma, lif açısının $\pm 55^\circ$ gibi optimize edilmesiyle basınç kapasitesini %70'e kadar artırabilmektedir [12]. Vakum Destekli Reçine İnfüzyon (VARI) yöntemi, deniz yapılarında hayati önem taşıyan boşluk (void) oranını %1-2 seviyelerine çekerek durabiliteyi %30 artırır. Yeni nesil 3D yazıcı teknolojilerinde ise sürekli lif besleme teknikleri sayesinde katmanlar arası yapışma zafiyeti %50 azaltılmış, malzeme israfı ise %60 oranında minimize edilerek sürdürülebilir üretime büyük katkı sağlanmıştır [17].

4.4. Yapısal Güçlendirme ve Altyapı Uygulamaları (Structural Strengthening and Infrastructure Applications)

Mevcut betonarme yapıların rehabilitasyonunda FRP sistemler, özellikle "sargılama" etkisiyle devrim yaratmıştır. Lam ve Teng (2003) bu yöntemin kolonların taşıma kapasitesinde %200'e varan artışlar sağladığını göstermiştir. Sismik bölgelerde hayati olan süneklik kapasitesinde ise 2-4 kat artışlar rapor edilmektedir. Bu başarı, betonun yanıl genleşmesini sınırlayan FRP sargısının beton çekirdeğinin basınç mukavemetini (f'_{cc}) ve deformasyon kapasitesini (ϵ_{cu}) artırmasından kaynaklanır [21]. Altyapı ve deniz yapılarında korozyon direnci malzeme seçimini doğrudan belirler. ACI Committee 440 raporlarına göre, FRP donatılı sistemler servis ömrünü 100 yıla kadar çıkarabilmektedir. FHWA verileri ise FRP köprü tabliyelerinin ağırlığı %60'a kadar hafiflettiğini, bakım aralıklarını ise 3 kata kadar uzattığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, FRP boruların iç yüzey pürüzsüzlüğü, çelik borulara kıyasla hidrolik kayıpları %20 oranında azaltarak operasyonel verimlilik sağlar [6 ve 14].

4.5. Genel Değerlendirme (Overall Assessment)

Polimer esaslı kompozitler, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, korozyon direnci ve uzun servis ömrü gibi avantajları sayesinde özellikle altyapı projelerinde güçlü bir alternatif oluşturmaktadır. Literatürde bu malzemelerin bakım maliyetlerini %30-70 oranında azalttığı ve servis ömrünü %25-100 artırdığı belirtilmektedir [5 ve 6].

Tablo 2. İnşaat mühendisliğinde kullanılan polimer türleri, özellikleri ve uygulamaları [1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 31]
(Table 2. Types of polymers used in civil engineering, their properties and applications)

| Polimer Türü | Alt Tür/Örnek | Temel Teknik Özellikler | Kullanım Amacı | Başlıca Avantajlar |
|-------------------------------|--------------------------------|---|---|--|
| FRP (Fiber Takviyeli Polimer) | CFRP | Çok yüksek çekme dayanımı, yüksek elastisite modülü, düşük yoğunluk | Yapı güçlendirme, köprü rehabilitasyonu | Yüksek mukavemet/ağırlık oranı, korozyon direnci |
| | GFRP | Orta düzey mukavemet, yüksek korozyon direnci | Donatı çubuğu, altyapı sistemleri | Ekonomik, paslanmaz, uzun ömürlü |
| | AFRP | Yüksek darbe dayanımı, enerji sönmeme kapasitesi | Sismik güçlendirme, özel yapılar | Darbe direnci, süneklik |
| Termoset Polimerler | Epoksi | Yüksek aderans, kimyasal dayanım, düşük büzülme | Yapıştırıcılar, kaplama, FRP matris | Güçlü bağlanma, dayanıklılık |
| | Polyester | Orta mukavemet, düşük maliyet | Kompozit üretimi, paneller | Ekonomik, kolay üretim |
| | Vinilester | Kimyasal ve korozyon direnci yüksek | Deniz yapıları, tanklar | Yüksek çevresel dayanım |
| Termoplastikler | PVC | Kimyasal direnç, düşük maliyet, hafiflik | Boru sistemleri, drenaj | Korozyon direnci, uzun ömür |
| | Poliyeten (PE) | Esneklik, darbe dayanımı | Su ve gaz boruları | Sızdırmazlık, esneklik |
| | Polipropilen (PP) | Düşük yoğunluk, kimyasal direnç | Geotekstil, membran | Hafiflik, ekonomik |
| Elastomerler | Poliüretan | Esneklik, aşınma direnci | Yalıtım, kaplama, dolgu | Su geçirmezlik, dayanıklılık |
| | Silikon | Yüksek sıcaklık dayanımı, elastikiyet | Derz dolgu, sızdırmazlık | UV ve sıcaklık dayanımı |
| Ahşap-Polimer Kompozitler | WPC | Düşük-orta mukavemet, çevresel dayanım | Cephe kaplama, deck | Estetik, bakım gerektirmez |
| Polimer Modifiye Malzemeler | PMB (Polimer modifiyeli bitüm) | Elastikiyet, yorulma direnci | Yol kaplamaları | Çatlak direnci, uzun servis ömrü |
| Ahşap-Polimer Kompozitler | WPC | Düşük-orta mukavemet, çevresel dayanım | Cephe kaplama, deck | Estetik, bakım gerektirmez |
| | Polymer Concrete | Yüksek dayanım, düşük geçirgenlik | Endüstriyel zeminler | Kimyasal dayanım, dayanıklılık |

Genel bir değerlendirme yapıldığında; kompozit malzemelerde üretim yöntemi ile nihai performans arasındaki ilişki doğrusal değildir. Boşluk oranının %2'nin üzerine çıkması gibi küçük bir üretim hatası bile, çekme dayanımında %20'ye varan kayıplara neden olabilir. Bu durum, ileri teknoloji malzemenin ancak titiz bir kalite kontrol süreciyle gerçek potansiyeline ulaşabileceğini göstermektedir.

5. LİTERATÜR BULGULARININ TARTIŞMASI VE ANALİZİ (DISCUSSION AND ANALYSIS OF LITERATURE FINDINGS)

Polimer esaslı kompozit malzemelerin mühendislik uygulamalarındaki gerçek etkinliği, yalnızca mekanik performans parametreleri üzerinden değil; aynı zamanda dayanıklılık, ekonomik sürdürülebilirlik ve çevresel etkiler bağlamında çok boyutlu bir süzgeçten geçirilmelidir. Literatür verileri genel olarak incelendiğinde, bu malzemelerin teknik açıdan üstün özellikler sunduğu su götürmez bir gerçektir; ancak performansın uygulama koşullarına ve tasarım yaklaşımlarına bağlı olarak ciddi değişkenlikler gösterebildiği de unutulmamalıdır. Bu nedenle

değerlendirme sürecini, klasik "performans-maliyet-dayanıklılık" üçlüsünün ötesine taşıyarak "yaşam döngüsü temelli mühendislik yaklaşımı" çerçevesinde ele almak çok daha rasyonel olacaktır [5].

5.1. Performans Üstünlükleri ve Mekanik Verimlilik (Performance Advantages and Mechanical Efficiency)

Betonarme yapılarda klor iyonu eşiğinin (%0.4-1.0) aşılmasıyla tetiklenen aktif korozyon, çelik donatıda yıllık %1-5 mertebesinde kesit kaybına yol açmaktadır [32 ve 33]. FRP'nin bu agresif süreçte tamamen inert (tepkisiz) davranması, yapısal bütünlüğün korunmasında çeliğe karşı mutlak bir üstünlük sağlar. Mukavemet/ağırlık oranı açısından CFRP sistemlerin çeliğe kıyasla 5-10 kat daha yüksek özgül mukavemet sunması [16], özellikle deprem etkisi altındaki yapılar için kritik bir avantajdır. Yapı kütleesindeki yaklaşık %50'lik bir azalma, atalet kuvvetlerini ($F=m \cdot a$) doğrudan etkileyerek sismik yüklerde %30-50 mertebesinde bir düşüše imkân tanımaktadır [1]. Ayrıca sargılama modellerinde (örneğin Mander Modeli), FRP'nin doğrusal elastik davranışı betonun daha yüksek enerji yutmasını mümkün kılmaktadır.

5.2. Ekonomik Sınırlamalar ve Yaşam Döngüsü Maliyeti (Economic Constraints and Life Cycle Cost (LCC))

CFRP sistemlerin başlangıç maliyetinin çeliğe kıyasla 3-10 kat yüksek olması, bu teknolojinin yaygınlaşmasının önündeki en büyük engel gibi görünmektedir [3]. Ancak toplam proje maliyetinin sadece %5-15'ini oluşturan bu fark, işletme dönemindeki maliyetlerle hızla amorti edilmektedir. 50 yıllık LCC analizleri, bakım ve onarım maliyetlerindeki %30-70'lik radikal azalma sayesinde, toplam maliyet farkının %0-20 seviyelerine kadar indiğini kanıtlamaktadır [5 ve 14]. İşçilik hızı, vinç maliyetlerinin düşmesi ve trafik kesintilerinin minimize edilmesi de FRP uygulamalarının beraberinde getirdiği "gizli" ekonomik artılardır.

5.3. Kritik Teknik Sınırlamalar: Yangın ve Sünme (Critical Technical Limitations: Fire and Creep)

Malzemenin mühendislik açısından en zayıf halkası, cam geçiş sıcaklığının (T_g) 60-120°C gibi oldukça düşük bir aralıkta kalmasıdır. Bu eşik aşıldığında elastisite modülünde %40-70, 300°C'nin üzerinde ise dayanımda %50-80 oranında ciddi kayıplar yaşanmaktadır [7]. Uzun süreli yüklem altında (sünme) tasarım dayanımının %30-60 seviyelerine düşebileceği gerçeği göz önüne alınarak, ACI 440 (2017) uyarınca tasarım gerilmeleri nihai dayanımın %20-40'ı ile sınırlandırılmalıdır. Karbon fiberler için sünme kopma limiti (C_E) nihai dayanımın %55'i iken, cam fiberler için bu limit %20'ye kadar gerilemektedir. Özellikle yüksek çekme yükü altındaki GFRP donatılar için "sünme kopması" (creep rupture) en riskli senaryo olarak kabul edilmektedir [6].

5.4. Mekanik Performans ve Yapısal Davranışın Karşılaştırmalı Analizi (Comparative Analysis of Mechanical Performance and Structural Behavior)

Literatürde CFRP malzemelerin çekme dayanımının 3000-6000 MPa aralığında olduğu ve bu değerın yapı çeliğine kıyasla 2-5 kat daha yüksek bir performans sunduğu belirtilmektedir [4 ve 12]. Ancak tasarım dayanımları, güvenlik katsayıları ve servisabilite kriterleri nedeniyle genellikle bu ham değerlerin %40-60'ı seviyesinde tutulmaktadır [6]. FRP malzemelerin lineer elastik davranış göstermesi ve sünklik eksikliği deprem mühendisliği için kritik bir tasarım parametresidir. Buna rağmen, FRP sargılama (confinement) uygulamaları sayesinde betonarme elemanların sünklik kapasitesinde 2-4 kat artış yakalanabilmektedir [16]. Ayrıca liflerin yük doğrultusunda hizalanması taşıma kapasitesinde %50'ye varan

artış sağlarken, ters yönlennmelerde bu kapasitenin ciddi şekilde düştüğü gözlemlenmektedir [1].

5.5. Dayanıklılık Performansı ve Çevresel Etkilere Karşı Davranış (Durability Performance and Behavior Towards Environmental Impacts)

FRP malzemeler, klorür difüzyon katsayılarının (10^{-12} - 10^{-14} m²/s) çok düşük olması sayesinde elektrokimyasal reaksiyonlara karşı inert bir tutum sergiler [32]. Bu sayede FRP donatıların 75-100 yıllık bir servis ömrüne ulaşabildiği rapor edilmektedir [20]. Uzun vadeli performansı etkileyen başlıca mekanizmalar şunlardır:

- **Sürünme:** Sürekli yük altında deformasyonun zamanla artması.
- **Yorulma:** Tekrarlı yüklemeler neticesinde yaşanan dayanım kaybı.
- **UV Bozunması:** Matris yapısında meydana gelen kimyasal değişimler.
- **Nem ve Sıcaklık Etkileri:** Lif-matris arayüzeyinde meydana gelen zayıflamalar.

5.6. Ekonomik Analiz ve Yaşam Döngüsü Maliyeti (Economic Analysis and Life Cycle Costing)

FHWA (2019) verilerine göre FRP kompozitlerin sağladığı ekonomik avantajlar şu şekilde özetlenmektedir:

- Bakım maliyetlerinde %30-70 azalma.
- Servis ömründe %25-75 artış.
- Toplam yaşam döngüsü maliyetinde %0-20 fark [14].

Bu veriler, özellikle köprüler ve deniz yapılarında FRP kullanımının uzun vadede ne kadar rasyonel olduğunu göstermektedir.

5.7. Yangın Dayanımı ve Termal Performansın Kritik Değerlendirmesi (Critical Assessment of Fire Resistance and Thermal Performance)

Polimer matrislerin cam geçiş sıcaklığının (T_g) 60-120°C aralığında olması, bu sıcaklıklar aşıldığında rijitlik kaybını kaçınılmaz kılar. 200°C'de belirgin bir rijitlik kaybı, 300°C'de ise %50-80 dayanım kaybı rapor edilmiştir [7]. Bu durum, FRP sistemlerin yangın güvenliği için yangın geciktirici kaplamalar veya özel izolasyon sistemleri gibi ek koruma katmanları ile tasarlanmasını zorunlu hale getirmektedir.

5.8. Sürdürülebilirlik ve Çevresel Etki Analizi (Sustainability and Environmental Impact Analysis)

Üretim süreçlerinin enerji yoğun olması ve özellikle karbon lif üretiminin yüksek karbon ayak izine sahip olması nedeniyle literatürde şu çevreci yaklaşımlar öne çıkmaktadır:

- Geri dönüştürülmüş polimer kullanımı (%15-35 emisyon azaltımı).
- Biyobazlı reçine sistemleri.
- Geri dönüştürülebilirlik avantajı sunan termoplastik kompozitler [24 ve 25].

5.9. Literatürdeki Boşluklar ve Eleştirel Değerlendirme (Gaps in the Literature and Critical Evaluation)

Mevcut çalışmaların büyük bir kısmı kısa vadeli laboratuvar deneylerine dayanmaktadır ve saha verileri hâlâ sınırlıdır. Bibliyometrik çalışmalar, yayınların %60-70'inin mekanik performansa odaklandığını, sürdürülebilirlik analizlerinin ise daha kısıtlı kaldığını göstermektedir [17]. Son yıllarda araştırmalar şu yeni alanlara evrilmektedir:

- **Nano-kompozitler:** Mekanik özelliklerde %20-50 iyileşme potansiyeli.
- **Akıllı sistemler:** ±1 µe hassasiyetle yapı sağlığı izleme imkânı [26 ve 27].

5.10. Beton Teknolojisi ile Entegrasyon (Integration with Concrete Technology)

Polimer katkılı betonlar (PCC), taze betonun işlenebilirliğini artırırken sertleşmiş yapının mekanik performansını da ciddi şekilde modifiye eder:

- **Çekme Dayanımı:** Geleneksel betona göre %30 ile %50 arasında artış.
- **Eğilme Dayanımı:** Polimer ağının sürekliliği sayesinde %40-80 iyileşme.
- **Aderans:** Donatı ve agrega ile olan kenetlenmeyi güçlendirir.
- **Kimyasal Direnç:** Polimer filmler gözenekleri tıkayarak yüksek geçirimsizlik sağlar; klor iyonu difüzyonu ve karbonatlaşma risklerini minimize eder [22].

5.11. Mühendislik Uygulamaları İçin Kritik Çıkarımlar (Critical Implications for Engineering Applications)

Analizler neticesinde elde edilen temel mühendislik çıkarımları şunlardır:

- **Korozyon Direnci:** FRP inert kalarak 75-100 yıl servis ömrü sunar [32].
- **Sismik Performans:** Düşük yoğunluk (1.5-2.0 g/cm³) sayesinde yapı ağırlığında %60-80, deprem yüklerinde ise %30-50 azalma sağlar [1].
- **Güçlendirme Kapasitesi:** Taşıma kapasitesinde %40-200 artış mümkündür.
- **Yaşam Döngüsü Maliyeti:** Başlangıçtaki maliyet farkı, uzun vadede %0-20 seviyesine kadar geriler [14].
- **Yangın ve Uzun Vadeli Davranış:** Tasarımda mutlaka dikkate alınması gereken en kritik sınırlamalar yangın dayanımı ve söndürme etkisidir [5 ve 7].

Sonuç olarak, literatür verileri ışığında FRP kompozitlerin korozyon direnci, yüksek dayanım/ağırlık oranı ve sismik avantajları, yüksek maliyet ve yangın kısıtlarına rağmen, doğru mühendislik stratejileriyle (yaşam döngüsü maliyeti, hibrit tasarım) birleştiğinde ortaya çok yüksek performanslı yapılar çıkarmaktadır.

Tablo 4. FRP kompozitlerin dayanağı temel prensipler
(Table 4. Fundamental principles underlying FRP composites)

| Kriter | Önerilen Strateji | Beklenen İyileşme |
|----------------|----------------------------|------------------------------------|
| Korozyon Riski | GFRP/CFRP donatı kullanımı | Bakım maliyetlerinde %30-70 azalma |
| Sismik Risk | FRP sarma (Confinement) | Taşıma kapasitesinde %40-200 artış |
| Servis Ömrü | Kompozit tabliyeler | Bakım aralıklarında 2-3 kat uzama |

Tablo 5. Geleneksel malzemeler ile FRP kompozitlerin karşılaştırılması
[3 ve 6]

(Table 5. Comparison of traditional materials and FRP composites)

| Özellik | Çelik | Beton | FRP Kompozit |
|-------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Yoğunluk | 7850 kg/m ³ | 2400 kg/m ³ | 1500-2000 kg/m ³ |
| Korozyon Direnci | Düşük | Orta | Çok yüksek |
| Mukavemet/Ağırlık | Orta | Düşük | 5-10 kat daha yüksek |
| Bakım İhtiyacı | Yüksek | Orta | %30-70 daha düşük |
| Yangın Dayanımı | Yüksek | Yüksek | Düşük (Tg: 60-120°C) |

Tablo 6. Polimer mühendisliğinde gelecek odaklı araştırma alanları
[1 ve 26]

(Table 6. Future-oriented research areas in polymer engineering)

| Alan | Açıklama | Beklenen Etki |
|-------------------|----------------------------------|------------------------|
| Nano-kompozitler | CNT ve grafen takviyesi | %25-100 dayanım artışı |
| Sürdürülebilirlik | Geri dönüştürülebilir malzemeler | %20-60 emisyon azalımı |
| Akıllı sistemler | Sensör entegrasyonu | ±1 µε hassasiyet |
| Yangın dayanımı | Yeni reçine sistemleri | 300°C'ye kadar dayanım |

FRP kompozitlerin mühendislik açısından değerlendirilmesinde yalnızca maksimum dayanım değerleri değil, servisabilite kriterleri, hasar toleransı ve güvenlik katsayıları da mutlaka dikkate alınmalıdır. Özellikle gevrek kırılma davranışı nedeniyle, tasarımda klasik süneklik yerine kapasite fazlalığı yaklaşımı benimsenmektedir. Bu durum, geleneksel çelik tasarımından farklı ve yeni bir mühendislik vizyonu gerektirmektedir.

6. SONUÇ VE GELECEK PERSPEKTİFİ (CONCLUSION AND FUTURE PERSPECTIVES)

Bu çalışmada, polimer esaslı kompozit malzemelerin inşaat mühendisliğindeki stratejik rolü, mekanik performans, dayanıklılık, sürdürülebilirlik ve uygulama sahasındaki verimlilik bağlamında çok boyutlu bir yaklaşımla kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Literatür bulgularının sistematik analizi, bu malzemelerin özellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranı, üstün korozyon direnci ve sunduğu tasarım esnekliği sayesinde geleneksel yapı malzemelerine karşı güçlü ve sürdürülebilir bir alternatif oluşturduğunu açıkça kanıtlamaktadır [4, 6]. Elde edilen veriler, FRP kompozitlerin çekme dayanımının 3000-6000 MPa gibi ekstrem seviyelere ulaştığını ve yaklaşık 1.5-2.0 g/cm³ olan düşük yoğunlukları sayesinde yapı ağırlığında %60-80'e varan radikal azalmalar sağlayabildiğini göstermektedir. Bu hafifleme, özellikle sismik etkilerin sönmülmesi ve yapısal verimliliğin maksimize edilmesi açısından hayati avantajlar sunar [5 ve 16]. Ancak, tasarım aşamasındaki güvenlik katsayıları ve servisabilite kriterleri devreye girdiğinde, bu teorik üstünlüklerin pratikte genellikle 2-4 kat düzeyinde etkili bir performans avantajına dönüştüğü gerçeği unutulmamalıdır. Bu saptama, literatürde sıklıkla göz ardı edilen "teorik performans ile tasarım performansı arasındaki fark" üzerine dikkat çekmesi bakımından çalışmanın özgün çıktıları arasındadır. Dayanıklılık perspektifinden bakıldığında, polimer kompozitlerin korozyon mekanizmalarına karşı sergilediği inert duruş, bu malzemeleri özellikle altyapı sistemleri için vazgeçilmez kılmaktadır. FRP kullanımı, bakım maliyetlerini %30-70 oranında aşağı çekmekte ve servis ömrünü 75-100 yıl bandına taşıyabilmektedir [6]. Bununla birlikte, sürünme, yorulma, UV radyasyonu ve nem gibi çevresel faktörlerin uzun vadeli malzeme davranışı üzerindeki etkileri, tasarımın emniyet sınırlarını belirleyen temel unsurlardır. Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde ise, yüksek başlangıç maliyetine rağmen, 50 yıllık yaşam döngüsü maliyeti (LCC) analizleri bu malzemelerin uzun vadede oldukça rekabetçi olduğunu doğrulamaktadır. Öte yandan, polimer esaslı kompozitlerin yaygınlaşmasını sınırlayan en kritik faktörler: düşük cam geçiş sıcaklığı (T_g: 60-120°C) nedeniyle yetersiz kalan yangın dayanımı ve uzun vadeli yüklemeye altındaki sürünme etkileridir. Özellikle 300 °C üzerindeki sıcaklıklarda dayanım kaybının %50-80 seviyelerine ulaşması, yangın güvenliği protokollerinin tasarıma titizlikle entegre edilmesini zorunlu kılmaktadır [7].

6.1. Geleceğe Yönelik Teknik ve Bilimsel Öneriler (Technical and Scientific Recommendations for the Future)

Polimer esaslı kompozitlerin mühendislikteki etkinliğini artırmak adına şu alanlar öncelikli araştırma konuları olarak belirlenmiştir:



- **Uzun Vadeli Performansın Geliştirilmesi:** Sürünme, yorulma ve çevresel etkiler altındaki davranışı simüle eden ≥ 30 yıl eşdeğer süreli deneysel çalışmaların artırılması ve çok ölçekli modelleme yaklaşımlarının literatüre kazandırılması.
- **Yangın Dayanımının İyileştirilmesi:** 200-300°C üzerindeki sıcaklıklarda performansını koruyabilen fenolik, seramik veya hibrit matrisli yeni nesil reçine sistemlerinin geliştirilmesi.
- **Standart ve Yönetmeliklerin Modernizasyonu:** Güvenlik katsayılarının standardize edilmesi; uzun vadeli davranış ve yangın etkilerini kapsayan bütünleşik tasarım yaklaşımlarının ulusal ve uluslararası yönetmeliklere tam entegrasyonu.

6.2. Sektörel ve Uygulama Odaklı Öneriler

(Sector-Specific and Application-Oriented Recommendations)

- **Yaşam Döngüsü Maliyeti Yaklaşımı:** Karar vericilerin ve yatırımcıların sadece başlangıç yatırım maliyetine değil, uzun vadeli bakım ve işletme tasarruflarına odaklanan LCC modellerini benimsemesi.
- **Eğitim ve Sertifikasyon:** Uygulama hatalarının performans üzerinde %20'ye varan kayıplara yol açtığı gerçeğinden hareketle, uzmanlaşmış eğitim programlarının ve zorunlu sertifikasyon sistemlerinin devreye alınması.
- **Yerel Üretim Teşviki:** Yerel üretim kapasitelerinin artırılmasıyla, kompozit malzeme maliyetlerinde öngörülen %10-25 oranındaki azalma potansiyelinin değerlendirilmesi.

6.3. Sürdürülebilirlik ve Gelecek Teknolojiler

(Sustainability and Future Technologies)

- **Çevre Dostu Kompozitler:** Karbon ayak izini azaltmak adına geri dönüştürülmüş polimer kullanımı (%15-35 emisyon azaltımı) ve geri dönüştürülebilir termoplastik kompozitlere geçişin hızlandırılması.
- **Nano-Kompozit Teknolojileri:** Karbon nanotüp (CNT) ve grafen katkılarıyla mekanik dayanımda %100'e varan iyileşme potansiyellerinin saha uygulamalarına taşınması.
- **Akıllı Kompozit Sistemler (SHM):** Sensör entegreli kompozitler sayesinde ± 1 μe hassasiyetle yapı sağlığı izleme süreçlerinin ve "Dijital İkiz" (Digital Twin) teknolojilerinin yapı yönetim sistemlerine dahil edilmesi.

Özetle, polimer esaslı kompozitler, doğru mühendislik yaklaşımları ve teknolojik entegrasyonla birleştiğinde, geleceğin yüksek performanslı ve sürdürülebilir inşaat sektörünün temel taşı olacaktır. Yangın dayanımı ve standartlaşma gibi mevcut engeller aşıldığında, bu malzemelerin kullanım alanı nano-teknoloji ve akıllı sistemlerin gücüyle çok daha geniş bir spektruma yayılacaktır. Bu hedefe ulaşmak için akademi ile sanayi arasındaki iş birliğinin güçlendirilmesi ve disiplinlerarası araştırmaların teşvik edilmesi elzemdir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Yazarlar, bu çalışma kapsamında herhangi bir kişi, kurum veya kuruluş ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmektedir.

FİNANSAL AÇIKLAMA (FINANCIAL DISCLOSURE)

Bu araştırmada finansal destek alınmamıştır.



ETİK STANDARTLAR BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Makalenin yazarları bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Gibson, R.F., (2007). Principles of composite material mechanics (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420014242>
- [2] Ekinici, C.E., (2025). Bordo Kitap: Mimar ve Mhendisin İnaaat El Kitabı. (14.Baskı) Data Yayınları, Ankara.
- [3] Hollaway, L.C., (2010). A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure. Construction and Building Materials, 24(12):2419-2445.
- [4] Bakis, C.E., Bank, L. ., Brown, V.L., et al., (2002). Fiber-reinforced polymer composites for construction–State-of-the-art review. Journal of Composites for Construction, 6(2):73-87.
- [5] Bank, L.C., (2006). Composites for construction: Structural design with FRP materials. John Wiley & Sons. DOI: 10.1002/9780470121429.ch2
- [6] ACI Committee 440, (2017). Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars (ACI 440.1R-15). American Concrete Institute.
- [7] Callister, W.D. and Rethwisch, D.G., (2020). Materials science and engineering: An introduction (10th ed.). Wiley.
- [8] ACI Committee 222, (2001). Protection of metals in concrete against corrosion (ACI 222R-01). American Concrete Institute.
- [9] Ashby, M.F., (2011). Materials selection in mechanical design (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- [10] Soutis, C., (2005). Fiber reinforced composites in aircraft construction. Progress in Aerospace Sciences, 41(2):143-151.
- [11] Kim, J.K. and Mai, Y.W., (1998). Engineered interfaces in fiber reinforced composites. Elsevier.
- [12] Mallick, P.K., (2007). Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design (3rd ed.). CRC Press.
- [13] Nanni, A., De Luca, A., and Zadeh, H.J., (2014). Reinforced concrete structures with FRP bars: Mechanics and design. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16669>
- [14] FHWA, (2019). Report on Techniques for Bridge Strengthening. Federal Highway Administration. FHWA-HIF-18-041. <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/pubs/hif18041.pdf>
- [15] Meier, U., (1995). Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites. Construction and Building Materials, 9(6), 341-351. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00071-2](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00071-2)
- [16] Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T., and Lam, L., (2002). FRP-strengthened RC structures. Wiley.
- [17] Zhang, Y., Zhu, X., Li, M. et al., (2025). 3D printing technology in concrete construction. Nat. Rev. Clean Technol. 1, 288-303. <https://doi.org/10.1038/s44359-025-00047-z>
<https://doi.org/10.1038/s44359-025-00047-z>
- [18] Hollaway, L.C. and Teng, J.G., (2008). Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites. Woodhead Publishing.
- [19] Saadatmanesh, H. and Ehsani, M.R., (1991). Fiber composite bars for reinforced concrete construction, Journal of Composite Materials, 25(2): 188-203, DOI: 10.1177/002199839102500204
- [20] Fergani, H., Guadagnini, M., Lynsdale, C., and Mias, C., (2015). Durability of gfrp bars in concrete beams. The 12th International Symposium on Fiber Reinforced Polymers for



- Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-12). Joint Conference, 14-16 December 2015, Nanjing, China
- [21] Lam, L. and Teng, J.G., (2003). Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. *Construction and Building Materials*, 17(6-7), 471-489. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(03\)00045-X](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(03)00045-X).
- [22] Ohama, Y., (1995). *Handbook of polymer-modified concrete and mortars: Properties and process technology*. Noyes Publications.
- [23] Fowler, D.W., (1999). Polymers in concrete: A vision for the 21st century. *Cement and Concrete Composites*, 21(5-6):449-452.
- [24] Vasudevan, R., Sekar, A.R.C., Sundarakannan, B., and Velkennedy, R., (2012). A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way: Application in construction of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 28(1):311-320.
- [25] İnkaya, N. and Saltan, M., (2020). Usage of Waste Plastics in Road Pavements. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(1):158-163. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.649471>.
- [26] Thostenson, E.T., Ren, Z., and Chou, T.W., (2001). Carbon nanotube composites. *Composites Science and Technology*, 61(13):1899-1912. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00094-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00094-X)
- [27] Lau, K.T., Yuan, L., Zhou, L.M., Wu, J., and Woo, C.H., (2001). Strain monitoring in FRP composites. *Composite Structures*, 51(1):9-20.
- [28] NACE, (2016). *International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study*. NACE International.
- [29] Brunoro, S., (Ed.). (2025). *Facade engineering: Concepts, materials, techniques and principles of construction*. IntechOpen.
- [30] Phiri, R. Mavinkere Rangappa, S. Siengchin, S. Oladijo, Oluseyi P., and Ozbakkaloglu, T., (2024). Advances in lightweight composite structures and manufacturing technologies: A comprehensive review. *Heliyon*, 10:21. Elsevier doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e39661](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39661)
- [31] Wang, G., Luo, T., Luo, H., et al., (2024). A comprehensive review of building lifecycle carbon emissions and reduction approaches. *City Built Enviro* 2(12). <https://doi.org/10.1007/s44213-024-00036-1>
- [32] ACI Committee 222, (2001). *Protection of Metals in Concrete Against Corrosion (ACI 222R-01)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- [33] Broomfield, J.P., (2007). *Corrosion of steel in concrete: Understanding, investigation and repair (2nd ed.)*. Taylor & Francis.