



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**POLİÜREA KAPLI CAM FİBER TAKVİYELİ POLİMER
KOMPOZİTLERİN DARBE SONRASI EĞİLME
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

İlhan GÜLER

**Ağustos-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**POLİÜREA KAPLI CAM FİBER TAKVİYELİ POLİMER
KOMPOZİTLERİN DARBE SONRASI EĞİLME
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

İlhan GÜLER

**Danışman
Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK**

Diğer Jüri Yeleri

Doç. Dr. Hasan BALLIKAYA

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin DEMİR

**Ağustos-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

İlhan GÜLER tarafından hazırlanan “Poliürea Kaplı Cam Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Darbe Sonrası Eğilme Davranışlarının İncelenmesi” adlı tez çalışması 26/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Hasan BALLIKAYA

Danışman

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin DEMİR

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

İlhan Güler
Tarih: 26.08.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

POLİÜREA KAPLI CAM FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLERİN DARBE SONRASI EĞİLME DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

İlhan GÜLER

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

2025, 57 Sayfa

Cam fiber takviyeli polimer (CFTP) kompozit malzemeler; üstün mekanik özellikleri, düşük yoğunlukları ve korozyona karşı yüksek dirençleri sayesinde özellikle havacılık ve savunma sanayi başta olmak üzere birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu malzemeler, darbe etkisi altında gözle görülmeyen, ancak yapısal bütünlüğü olumsuz etkileyebilecek iç hasarlara maruz kalabilmektedir. Bu yüksek lisans tezinde, CFTP kompozitlerin darbe dayanımını artırmak ve çevresel etkilere karşı koruma sağlamak amacıyla, el yatırma yöntemiyle 0°, 15°, 30° ve 45° fiber yerleşim açılarında üretilen kompozit levhaların bir kısmına, yüksek darbe direnci ve enerji sönmüleme kapasitesiyle bilinen poliürea kaplama uygulanmıştır. Kaplamalar, tek taraflı ve çift taraflı olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Numunelere sabit 60 J enerji altında düşük hızlı darbe testi uygulanmış, ardından üç nokta eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, hasar toleransı, enerji absorpsiyonu ve artık eğilme dayanımı açısından analiz edilmiş ve kaplamasız numunelerle karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda, poliürea kaplamanın CFTP kompozitlerin darbe sonrası yapısal dayanımını olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Özellikle çift taraflı kaplamanın, darbe sonrası kompozitlerin taşıma kapasitesini artırarak yapısal bütünlüğün korunmasına önemli ölçüde katkı sağladığı tespit edilmiştir. Eğilme testleri, darbe öncesi tüm numunelerin yüksek mekanik performansla sahip olduğunu ortaya koyarken; darbe sonrası yaşanan performans kaybının kaplama türüne bağlı olarak farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Kaplamasız numunelerde eğilme dayanımında belirgin bir azalma meydana gelirken, çift taraflı kaplı numunelerde bu azalma daha az meydana gelmiştir. Ayrıca fiber yöneliminin, hasarın oluşumu ve yayılım karakteristiği üzerinde belirleyici bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kompozit Malzemeler, Cam Fiber Takviyeli Polimer (CFTP), Poliürea Kaplama, Düşük Hızlı Darbe, Darbe Sonrası Eğilme.

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF POST-IMPACT FLEXURAL BEHAVIORS OF POLYUREA-COATED GLASS FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITES

İlhan GÜLER

Batman University Graduate Education Institute

Department of Mechanical Engineering

Advisor: Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

2025, 57 Pages

Glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials are widely used in many engineering applications, particularly in the aerospace and defense industries, due to their superior mechanical properties, low density, and high resistance to corrosion. However, these materials can suffer internal damage under impact effect, which is not visible to the naked eye but can adversely affect structural integrity. In this master's thesis, to increase the impact resistance of GFRP composites and provide protection against environmental influences, a polyurea coating, known for its high impact resistance and energy absorption capacity, was applied to some composite plates produced by the hand-layup method with fiber orientation angles of 0°, 15°, 30°, and 45°. The coatings were applied in two different ways: single-sided and double-sided. Samples were subjected to low velocity impact tests at a constant energy of 60 J, followed by three-point flexural tests. Obtained data were analyzed in terms of damage tolerance, energy absorption, and residual flexural strength, and compared with uncoated samples. The analysis showed that polyurea coating positively affected the post-impact structural strength of GFRP composites. In particular, double-sided coating significantly contributed to preserving structural integrity by increasing the load-bearing capacity of the composites after impact. Flexural tests revealed that all samples exhibited high mechanical performance before impact, while the loss of performance after impact varied depending on the coating type. While a significant decrease in flexural strength occurred in uncoated samples, this decrease was less pronounced in double-coated samples. It was also concluded that fiber orientation is a determining parameter in the formation and propagation characteristics of damage.

Keywords: Composite Materials, Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP), Polyurea Coating, Low Velocity Impact, Post-Impact Flexural Behavior.

ÖN SÖZ

Günümüzün hızla gelişen savunma ve havacılık teknolojileri, daha hafif, daha dayanıklı ve çevresel etkilere karşı daha dirençli malzemelerin kullanımını her zamankinden daha gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda, kompozit malzemeler; yüksek mekanik performansları, düşük yoğunlukları ve uzun ömürlü yapılarıyla mühendislik alanında önemli bir yer edinmiştir. Ancak bu tür malzemelerin darbe sonrası davranışlarını iyileştirmek, yapısal bütünlüğün korunması ve güvenliğin artırılması açısından kritik bir mühendislik problemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu doğrultuda hazırlanan “Poliürea Kaplı Cam Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Darbe Sonrası Eğilme Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu tez çalışması, savunma ve havacılık uygulamaları başta olmak üzere birçok alanda karşılaşılan darbe dayanımı problemlerine çözüm sunmayı amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, farklı oryantasyon açılara sahip cam fiber takviyeli polimer (CFTP) kompozitlerin üretimi gerçekleştirilmiş, bu kompozitlerin bir kısmına yüksek darbe direnci ve enerji sönmülme kapasitesiyle bilinen poliürea kaplama uygulanmıştır. Elde edilen numunelere sabit enerjili düşük hızlı darbe testleri uygulanmış, ardından üç nokta eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular; kaplama türünün ve fiber yöneliminin, darbe sonrası eğilme dayanımı üzerindeki etkisini ortaya koymak üzere analiz edilmiş, kaplamasız numunelerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan benzer çalışmalarla karşılaştırılmış ve bu alandaki araştırmalara ışık tutacak değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışma sonucunda, ileride gerçekleştirilecek daha kapsamlı bilimsel araştırmalara katkı sunacak çeşitli önerilere de yer verilmiştir.

Bu araştırma sürecinde bilgi birikimi, tecrübesi ve rehberliğiyle her zaman yanımda olan, çalışmamın her aşamasında değerli katkılar sunan danışman hocam Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK’e en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez sürecinde bilimsel katkılarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI’ya ve Arş. Gör. Dr. İbrahim BİLİZ’e teşekkür ederim. Hayatım boyunca attığım her adımda maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan, beni bugünlere getiren değerli aileme; tezimin her aşamasında gösterdiği sabır, anlayış ve sevgisiyle daima yanımda olan sevgili eşime; bu süreçte motivasyon kaynağı olan kıymetli arkadaşlarıma da şükranlarımı sunarım.

İlhan GÜLER
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Önemi	3
1.2. Kompozit Malzemeler ve Özellikleri	4
1.3. Cam Fiber Takviyeli Polimer (CFTP) Kompozitler	7
1.4. Poliürea Kaplama Teknolojisi	9
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	13
2.1. CFTP Kompozitlerin Mekanik Özellikleri Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	13
2.2. CFTP Kompozitlerde Lif Oryantasyonu ve İstifleme Dizilimi	14
2.3. CFTP Kompozitlerde Darbe Dayanımı ve Hasar Gelişimi	15
2.4. CFTP Kompozitlerin Darbe Sonrası Mekanik Performansı	18
2.5. Poliürea Kaplama Teknolojisinin Kompozitlerdeki Etkileri	18
3. METERYAL VE YÖNTEM.....	20
3.1. Cam Fiber Takviyeli Polimer (CFTP) Kompozitlerin Üretimi	20
3.2. Poliürea Maddesinin Temini ve Kaplama Uygulaması	22
3.3. Darbe Deney Prosedürü	24
3.4. Eğilme Test Prosedürü.....	26
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	27
4.1. Darbe Deneyi Bulguları	27
4.1.1. Kuvvet-zaman eğrileri	27
4.1.2. Enerji-zaman eğrileri	31
4.1.3. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	35
4.1.4. Darbe deneyi sonuçlarının karşılaştırmalı analizi.....	39
4.2. Darbe Öncesi ve Sonrası Eğilme Testi Bulguları	43
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	51
5.1. Sonuçlar	51
5.2. Öneriler	52
KAYNAKLAR	53

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. CFTP kompozit üretim teknolojilerinin kıyaslamalı özeti	9
Tablo 1.2. Boyuna ve enine yönlerde sürekli ve hizalanmış CFTP kompozitin özellikleri	9
Tablo 1.3. Poliürea kaplamanın başlıca kullanım alanları ve sağladığı avantajlar	11
Tablo 1.4. Poliürea kaplamaların mühendislik uygulamalarındaki avantajları.....	11
Tablo 1.5. Poliürea kaplamaların mühendislik uygulamalarındaki dezavantajları	12
Tablo 2.1. Poliürea kaplamanın kompozit sistemlerdeki etkilerine yönelik literatür özeti	19
Tablo 4.1. Düşük hızlı darbe deneyi sonuçları.....	39
Tablo 4.2. Darbeden öncesi ve sonrası eğilme testinden elde edilen sayısal veriler	49

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Kompoziti oluşturan fazların gerinim-gerilim ilişkisi.....	4
Şekil 1.2. Kompozitlerde dağınık faz parçacıklarının şematik gösterimleri	5
Şekil 3.1. Kompozit üretiminde kullanılan a) dokuma cam fiber(takviye) ve b) epoksi set (matris) malzemeleri.....	20
Şekil 3.2. Farklı açılarda kesilmiş dokuma cam fiberler	21
Şekil 3.3. Epoksi reçine ve sertleştiricinin tartılma ve karıştırılma aşaması	21
Şekil 3.4. Üretim sonrası CFTP kompozit numuneleri	22
Şekil 3.5. Şekil 3.5. CFTP kompozitler üzerine poliürea uygulanmasında kullanılan a) basınçlı ısıtma ekipmanları ve b) Poliürea bileşimi spreycaplama sistemi	23
Şekil 3.6. Poliürea kaplama öncesinde zımparalanan CFTP kompozit numuneler.....	23
Şekil 3.7. Şekil 3.7. Poliürea kaplama işlemi uygulanmış a) ön yüzey, b) arka yüzey ve kaplanmış ve kaplanmamış yüzey (oryantasyon açısı 30°) CFTP kompozitler	24
Şekil 3.8. Ağırlık düşürme deney düzeneği.....	25
Şekil 3.9. Şekil 3.9. CFTP kompozitlerin a) kaplamasız, b) tek taraflı kaplamalı ve c) çift taraflı kaplamalı darbe sonrası görüntüleri	26
Şekil 3.10. Darbe sonrası kaplamasız numunenin eğilme sonrası görüntüsü.....	26
Şekil 4.1. 0° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait kuvvet-zaman eğrileri.....	28
Şekil 4.2. 15° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait kuvvet-zaman eğrileri.....	29
Şekil 4.3. 30° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait kuvvet-zaman eğrileri.....	29
Şekil 4.4. 45° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait kuvvet-zaman eğrileri.....	30
Şekil 4.5. 0° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait enerji-zaman eğrileri.....	32
Şekil 4.6. 15° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait enerji-zaman eğrileri.....	33
Şekil 4.7. 30° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait enerji-zaman eğrileri.....	34
Şekil 4.8. 45° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait enerji-zaman eğrileri.....	35
Şekil 4.9. 0° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	37

Şekil 4.10. 15° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	37
Şekil 4.11. 30° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	38
Şekil 4.12. 45° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	38
Şekil 4.13. CFTP kompozitlerin oryantasyon açısına bağlı maksimum darbe kuvveti tepkileri	40
Şekil 4.14. Oryantasyon açısına göre CFTP kompozitlerde absorbe edilen darbe enerjisi.....	40
Şekil 4.15. CFTP kompozitlerde oryantasyon açısına bağlı maksimum yer değiştirme	41
Şekil 4.16. Darbe testi sonrasında CFTP numunelerden Kaplamasız 0° a) ön yüz, b) arka yüz, Kaplamasız, 15° c) ön yüz, d) arka yüz, Kaplamasız, 30° e) ön yüz, f) arka yüz, Kaplamasız, 45° g) ön yüz, h) arka yüz, Tek tarafı kaplı, 45° i) ön yüz, j) arka yüz, Çift tarafı kaplı, 30° k) ön yüz, l) arka yüz bölgelerinde oluşan hasar görüntüleri	42
Şekil 4.17. 0° oryantasyonlu numunelerin darbe öncesi eğilme testine ait kuvvet-deplasman değişim eğrileri	43
Şekil 4.18. 0° oryantasyonlu numunelerin darbe sonrası eğilme testine ait kuvvet-deplasman değişim eğrileri	44
Şekil 4.19. 15° oryantasyonlu numunelerin darbe öncesi eğilme testine ait kuvvet-deplasman değişim eğrileri	45
Şekil 4.20. 15° oryantasyonlu numunelerin darbe sonrası eğilme testine ait kuvvet-deplasman değişim eğrileri	45
Şekil 4.21. 30° oryantasyonlu numunelerin darbe öncesi eğilme testine ait kuvvet-deplasman değişim eğrileri	46
Şekil 4.22. 30° oryantasyonlu numunelerin darbe sonrası eğilme testine ait kuvvet-deplasman değişim eğrileri	47
Şekil 4.23. 45° oryantasyonlu numunelerin darbe öncesi eğilme testine ait kuvvet-deplasman değişim eğrileri	48
Şekil 4.24. 45° oryantasyonlu numunelerin darbe sonrası eğilme testine ait kuvvet-deplasman değişim eğrileri	48
Şekil 4.25. Tüm numunelerin darbe öncesi ve sonrası eğilme kuvveti değişimi	50
Şekil 4.26. Tüm numunelerin darbe öncesi ve sonrası eğilme deplasman değişimi	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C	: Çift Taraflı Kaplı Numune
E_A	: Emilen Enerji (J)
$F_{d_{mak}}$	: Maksimum Darbe Kuvveti (N)
$F_{e_{mak}}$	: Maksimum Eğilme Kuvveti (N)
K	: Kaplamasız Numune
T	: Tek Taraflı Kaplı Numune
Y_{mak}	: Maksimum Yer Değiştirme (mm)

Kısaltmalar

ASTM	: American Society for Testing and Materials
CFTP	: Cam Fiber Takviyeli Polimer
GFRP	: Glass Fiber Reinforced Polymer
RTM	: Reçine Transfer Kalıplama

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojik ilerlemeler ve toplumsal gereksinimlerin çeşitlenmesi, yüksek performanslı ve çok işlevli yeni malzeme türlerine olan ihtiyacı artırmıştır. Bu doğrultuda, birden fazla malzemenin karakteristik özelliklerini bir araya getirerek hem mekanik hem de fiziksel açıdan üstün performans sunabilen kompozit malzemeler, mühendislik ve malzeme bilimi alanında yoğun ilgi görmektedir (Çakır ve Berberoğlu, 2018). Bu malzemelerin temel yapısını ve kullanım alanlarını anlamak, avantajlarını daha iyi değerlendirebilmek açısından önemlidir.

Bir kompozit malzeme, makroskobik ölçekte bir araya gelmiş ve birbirleriyle çözünmeyen iki ya da daha fazla bileşenden oluşur. Bu bileşenlerden biri veya birkaçı takviye malzemesi olarak adlandırılırken, diğer bileşen ise matris görevini üstlenir ve takviye malzemesini çevreler (Demir ve ark., 2019). Kompozit malzemelerin, içerdiği bileşenlerin özelliklerini bir araya getirmesi, onları birçok endüstride tercih edilen yapılar haline getirmiştir. Bu kapsamda, sahip oldukları matris ve takviye bileşenlerinin özelliklerine bağlı olarak kompozit malzemeler; havacılık, savunma, denizcilik, inşaat mühendisliği ve otomotiv gibi pek çok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ribeiro Junior ve Gomes, 2024).

Kompozit malzemeler arasında, özellikle polimer matrisli kompozitler, üstün mekanik özellikleri ve üretim kolaylıkları nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Bu kompozitler, epoksi, polyester ve vinilester gibi polimer bazlı reçinelerin matris fazı; cam, aramid veya karbon fiberlerin ise takviye fazı olarak kullanılmasıyla elde edilmektedir. Yüksek özgül mukavemetleri, korozyon dirençleri ve hafif yapıları sayesinde pek çok mühendislik uygulamasında yaygın olarak tercih edilmektedirler (Topkaya ve ark., 2020). Özellikle cam fiberlerin diğer sentetik fiber takviye malzemelerine kıyasla daha ekonomik olması nedeniyle, cam fiber takviyeli polimer (CFTP) kompozitler araştırmalarda öncelikli bir yer tutmaktadır. Bu kompozitlerin üretiminde, üretim kolaylığı ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle termoset reçinelerden epoksi, polyester ve vinilester yaygın olarak kullanılmaktadır (Sathishkumar ve ark., 2014). Termoset polimerler, termoplastiklere kıyasla daha düşük sürtünme katsayısı ve termal genleşme değerlerine sahip olmanın yanı sıra, daha yüksek yük taşıma kapasitesi sunmaktadır

(Ogbonna ve ark., 2022; Çakır ve Berberoğlu, 2018). Ancak darbe ve yorulma kaynaklı hasarlara karşı görece hassas olmaları, hasar sonrası onarım süreçlerini zorlaştırmakta ve özellikle yapısal bütünlüğün kritik olduğu uygulamalarda önemli dezavantajlar ortaya çıkarmaktadır (Firoozi ve Firoozi, 2024). Bu bağlamda, literatürde CFTP kompozitler üzerine çok sayıda çalışma yürütülmüş; katkı maddeleri veya farklı elyaflar ilave edilerek mekanik özelliklerdeki değişimler incelenmiş (Sharath Chandra ve ark., 2023; Ng ve ark., 2023; Chaudhary ve Singh, 2024; Doğan ve ark., 2024) ve farklı işleme parametrelerinin malzemenin mekanik performansına etkileri analiz edilmiştir (Kılıçkap ve ark., 2017; Yalçın ve ark., 2024).

Tüm bu çalışmalar, CFTP kompozitlerin mekanik dayanımının artırılmasına yönelik çabaların önemini ortaya koymaktadır. Bu çabaların bir uzantısı olarak, CFTP kompozitlerin darbe yükleri altındaki davranışları da son yıllarda araştırmaların odak noktalarından biri hâline gelmiştir. CFTP kompozitlerin rekreasyonel spor faaliyetlerinde de geniş bir kullanım yelpazesine sahip olması, bu malzemelerin darbe dayanımı üzerindeki etkilerini ön plana çıkarmaktadır (Atakok ve Mertgenç Yoldaş, 2024). Bu nedenle, bu kompozit malzemelerin darbe ve yorulma kaynaklı hasarlara karşı direncini arttırmak gerekmektedir.

Malzemelerin yüzey dayanımını artırmak ve darbe hasarlarına karşı korumak amacıyla poliürea kaplama teknolojisi üzerinde araştırmalar yapılmaktadır. Poliürea, oldukça karmaşık iç yapısı sayesinde statik ve dinamik yüklemeler altında geniş bir mekanik tepki yelpazesi sergiler. Bu mekanik tepkilerin temel özellikleri; yüksek basınç, yüksek gerinim oranı ve yüksek gerilim/gerinim oranıdır. Bu tepkiler, poliürea kaplanan malzemelerin aşınma direncini, darbe dayanımını ve korozyona karşı direncini artırır. Poliürea, mikroyapısı sayesinde yüksek elastikiyet, enerji Emilimi, çizilme direnci, yüksek malzeme esnekliği ve her türlü yüzeye güçlü yapışma gibi olağanüstü kaplama özelliklerine ek olarak mükemmel balistik darbe hasarı azaltma performansı da gösterir (Jabbar ve ark., 2023). Bu üstün özellikler, poliüreayı farklı malzemelerde etkili bir kaplama malzemesi olarak öne çıkarmıştır (LeBlanc ve Shukla, 2015; Iqbal ve ark., 2016; Temizkan ve ark., 2021).

Yapılan araştırmalar, poliüreanın hızlı kürlenme süresi, yüksek esneklik ve mükemmel kimyasal direnci sayesinde farklı malzemelerde koruyucu bir tabaka olarak tercih edildiği ve bu kaplamaların darbe dayanımını artırdığını göstermektedir. Özellikle CFTP kompozitlerin yaygın kullanımına rağmen, bu malzemelerin darbe ve yorulma etkilerine karşı hassasiyetleri, uygulama alanlarını sınırlandırmaktadır. Poliüreanın CFTP

kompozitler üzerindeki kaplama olarak kullanılabilirliği ile darbe dayanımı ve darbe sonrası eğilme dayanımı üzerindeki etkileri ise henüz yeterince araştırılmamıştır. Bu nedenle, CFTP kompozitlerde poliürea kaplamanın etkilerinin incelenmesi hem malzeme performansını artırmak hem de yeni uygulama fırsatları yaratmak açısından önemlidir.

1.1. Çalışmanın Amacı ve Önemi

Cam fiber takviyeli polimer (CFTP) kompozitlerin yapısal uygulamalarda kullanımı, yalnızca hafiflik ve mekanik dayanım gibi temel özelliklerle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda malzemenin darbe ve yorulma etkilerine karşı gösterdiği dirençle doğrudan ilişkilidir. Özellikle rekreasyonel spor ekipmanları ve otomotiv gibi dinamik ve zorlu çalışma koşullarına maruz kalan uygulamalarda, CFTP kompozitlerin darbe sonrası mekanik performansının korunması kritik bir önem taşımaktadır. Bu bağlamda, sadece başlangıçtaki mekanik dayanımın değil, aynı zamanda çevresel ve mekanik yüklemeler altındaki dayanıklılığın da kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir.

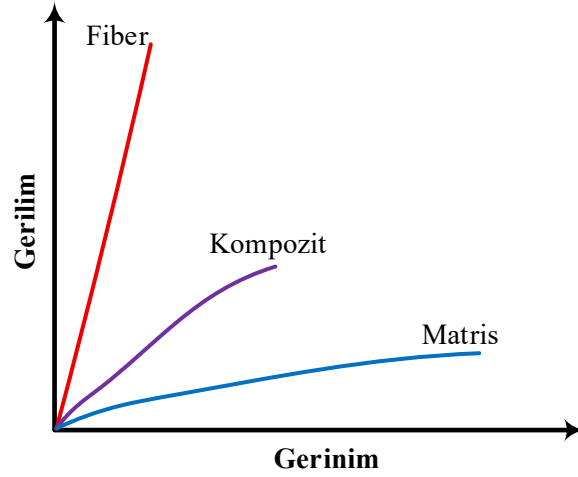
Bu yüksek lisans tezi, farklı oryantasyon açılarına sahip CFTP kompozitlerin mekanik performansını artırmak amacıyla poliürea kaplama teknolojisinin etkinliğini araştırmayı hedefleyen özgün bir çalışmadır. Çalışmanın temel amacı, poliüreanın CFTP kompozitler üzerindeki darbe dayanımı ve darbe sonrası eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini incelemektir.

Poliüreanın yüksek elastikiyet ve üstün kimyasal direnci gibi benzersiz özellikleri, CFTP kompozitlerin darbe ve yorulma gibi mekanik hasarlara karşı direncini önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir. Bu doğrultuda, araştırmada poliürea kaplamanın CFTP kompozitlerde uygulanabilirliği incelenmiş; malzeme ömrünün uzatılması ve kullanım alanlarının genişletilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, el yatırma yöntemiyle 0°, 15°, 30° ve 45° fiber yerleşim açılarında üretilen kompozitlerin yüzeylerine tek ve çift taraflı poliürea kaplaması uygulanmıştır. Numunelere 60 J enerji altında düşük hızlı darbe testi uygulanmış ve ardından üç nokta eğilme testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, hasar toleransı, enerji absorpsiyonu ve artık eğilme dayanımı açılarından analiz edilerek kaplamasız numunelerle karşılaştırılmıştır.

Literatürde bu alanda henüz yeterli sayıda çalışma bulunmaması, araştırmanın hem akademik özgünlüğünü hem de uygulamadaki önemini artırmaktadır. Bu kapsamda, çalışma sonuçlarının hem akademik literatüre değerli katkılar sağlaması hem de mevcut malzeme performanslarının iyileştirilmesine olanak tanınması hedeflenmektedir.

1.2. Kompozit Malzemeler ve Özellikleri

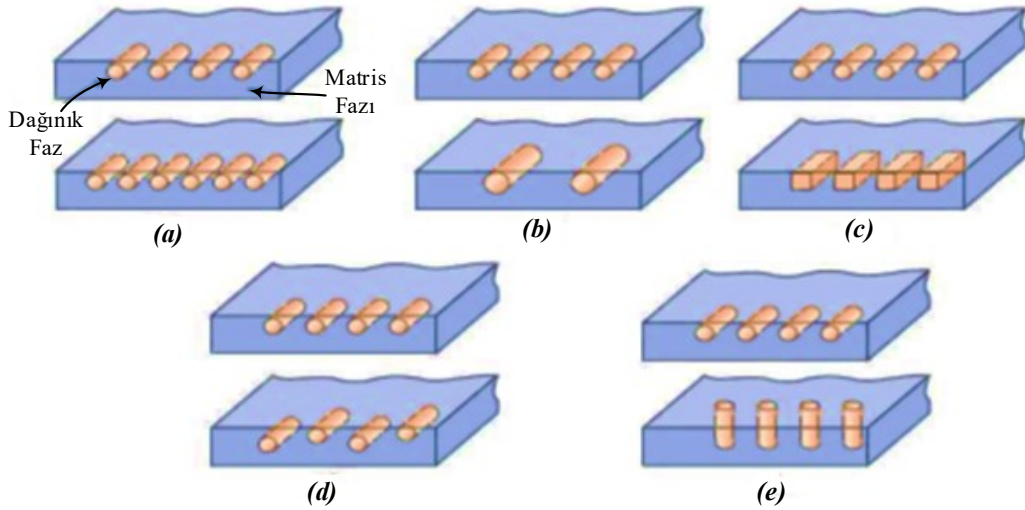
Kompozit malzemeler, farklı fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip en az iki ya da daha fazla bileşenin belirli bir mühendislik amacı doğrultusunda bir araya getirilmesiyle oluşturulan çok fazlı sistemlerdir. Geleneksel metal alaşımları, seramikler ve polimerlerin tek başına sağlayamadığı özellik kombinasyonlarını sunabilmeleri sayesinde, kompozitler bileşenlerinin özelliklerini birlikte sergileyen yapılar olarak öne çıkar. Bu durum Şekil 1.1’de de görselleştirilmektedir. Kompozitlerdeki fazlar arasında yapısal, kimyasal ve mekanik anlamda belirgin farklar bulunur. Bu fazlar, arayüz bölgeleriyle birbirinden ayrılır ve performansları büyük ölçüde içerdikleri fazların yapısal özelliklerine bağlıdır (Campbell, 2010).



Şekil 1.1. Kompoziti oluşturan fazların gerinim-gerilim ilişkisi (Nijssen, 2015)

Birçok kompozit malzeme, temel olarak iki ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar, sürekli bir ortam sağlayan matris fazı ve bu matris içinde dağıtılmış halde bulunan dağınık (takviye) fazıdır. Matris fazı, genellikle kompozit yapının şekillendirilmesi, yük transferi ve çevresel etkilere karşı koruma sağlama işlevlerini üstlenirken; dağınık faz, çoğunlukla malzemenin mekanik dayanımını ve sertliğini artırmak amacıyla kullanılan fiberler, parçacıklar veya pullar gibi farklı formlarda olabilir. Kompozitin nihai mekanik ve fiziksel özellikleri yalnızca bu fazların bireysel özelliklerine değil, aynı zamanda fiziksel oranlarına, aralarındaki arayüzey etkileşimlerine, takviye fazın geometrik şekline ve matris içerisindeki mekânsal dağılımına da bağlıdır. Özellikle dağınık fazın parçacık boyutu, şekli, yerleşim düzeni ve yönelimi gibi geometrik ve konumsal karakteristikleri;

malzemenin dayanım, rijitlik, tokluk, darbe absorpsiyonu ve hatta termal genleşme davranışları üzerinde önemli rol oynamaktadır. Bu ilişkiler, Şekil 1.2’de şematik olarak verilmiştir (Egbo, 2021).



Şekil 1.2. Kompozitlerde dağıntık faz parçacıklarının şematik gösterimleri
a) Yoğunluk, b) boyut, c) şekil, d) dağılım ve e) oryantasyon (Callister ve Rethwisch, 2018)

Matris fazı, polimer, metal veya seramik gibi farklı malzeme türlerinden oluşabilir. Polimer matrisler, genellikle düşük mukavemet ve sertlik değerlerine sahipken, metaller orta seviyede mukavemet ve sertlik ile yüksek süneklik özellikleri sergiler. Seramikler ise kırılgan olmalarına rağmen yüksek mukavemet ve sertlik sunar. Matris fazının temel işlevi, takviye liflerini uygun aralıklar ve oryantasyonlarda tutarak yapısal bütünlüğü sağlamaktır. Ayrıca, lifleri aşınma, kimyasal etkiler ve çevresel koşullara karşı koruyarak kompozitin dayanıklılığını artırır. Polimer ve metal matrisli kompozitlerde, matris fazı arayüzeydeki kesme yükleme yoluyla yükleri liflere iletirken, seramik matrisli kompozitlerde matrisin öncelikli amacı mukavemet ve sertlikten çok tokluğu artırmaktır. Bu nedenle, seramik matrisli kompozitlerde arayüzey mukavemetinin düşük olması tercih edilmektedir (Egbo, 2021).

Matris fazının bu işlevsel katkıları, kompozit malzemelerin istenilen mekanik, termal ve kimyasal performansı göstermesi için önemlidir. Bu çok yönlü yapısal ve fonksiyonel avantajlar, kompozit malzemeleri geleneksel mühendislik malzemelerine kıyasla daha üstün kılmaktadır. Kompozit malzemelerin başlıca avantajları arasında;

1. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı sayesinde hafiflik sağlaması,
2. Malzeme tasarımı ve üretim süreçlerinde geniş bir esneklik sunması,

3. Kolay renklendirilebilme özelliği sayesinde estetik çeşitliliğe olanak tanınması,
4. Yarı saydamlık gibi optik özellikler kazandırılabilmesi,
5. Sertlik, mukavemet, ısı ve elektriksel iletkenlik gibi özellikler ihtiyaca göre optimize edilebilmesi,
6. Düşük bakım gereksinimi ile uzun ömürlü kullanım sağlaması,
7. Suya, neme ve çeşitli kimyasallara karşı yüksek direnç göstermesi,
8. Farklı özelliklerdeki malzeme fazlarının birlikte kullanılmasına olanak tanınması,
9. Otomatik üretim tekniklerine uygunluğu sayesinde seri üretime elverişli olması yer alır (Nijssen, 2015).

Bu avantajlar sayesinde, kompozit malzemeler özellikle hafiflik ve yüksek mukavemet gerektiren alanlarda enerji verimliliği, uzun ömür ve geniş tasarım esnekliği gibi kritik kazanımlar sağlamaktadır. Sağlanan bu hafiflik, yakıt tüketimini azaltmakla kalmayıp; savunma sanayinde hareket kabiliyetinin artırılması, manevra yeteneğinin iyileştirilmesi ve taşıma kapasitesinin optimize edilmesi gibi performans kriterlerine doğrudan katkı sağlamaktadır. Bu nedenlerle, kompozit malzeme teknolojileri savunma ve havacılık gibi stratejik alanlarda öncelikli tercih olarak öne çıkmaktadır. Ancak, tüm bu üstün özelliklerine rağmen kompozit malzemelerin her uygulama alanının gereksinimlerine eksiksiz biçimde yanıt verdiği söylenemez. Bunun başlıca nedeni kompozitlerin sahip olduğu bazı dezavantajlardır. Kompozit malzemelerin dezavantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Mekanik ve yapısal davranışlarının modellenmesi karmaşık analiz yöntemleri gerektirebilir.
2. Hammaddelerin ve üretim süreçlerinin maliyeti, konvansiyonel malzemelere göre daha yüksek olabilir.
3. Renk ve yüzey parlaklığı gibi görsel özellikler zaman içinde öngörülemeyen değişiklikler gösterebilir.
4. Yapısal bağlantı elemanları ve montaj yöntemleri konusunda literatürde yeterli düzeyde standart bilgi bulunmayabilir.
5. Son yüzey işleme teknikleri henüz tam olarak gelişmemiştir.
6. Ultraviyole ışığa karşı hassastır.
7. Geri dönüşüm süreçleri henüz yeterince gelişmemiştir.
8. Üretim, yüksek sermaye yatırımı gerektirebilir (Nijssen, 2015).

Polimer matrisli kompozit malzemeler, metal matrisli ve seramik matrisli kompozitlere kıyasla düşük yoğunluk, işleme kolaylığı, korozyon direnci ve maliyet etkinliği gibi önemli avantajları bir arada sunmaları sayesinde birçok sektörde ön plana çıkmaktadır. Bu sistemler içinde cam fiber takviyeli polimer (CFTP) kompozitler; uygun maliyetleri, düşük özgül ağırlıkları, yüksek çekme ve eğilme dayanımları ile yeterli mekanik kararlılıkları sayesinde başta havacılık, otomotiv ve inşaat mühendisliği olmak üzere pek çok ileri mühendislik alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Beura ve ark., 2023; Nguyen ve ark., 2024; Sulistyo ve Wirawan, 2024; Hamzat ve ark., 2025). Bu nedenle, CFTP kompozitlerin yapısal özellikleri ve uygulama alanları sonraki bölümde detaylı olarak ele alınmıştır.

1.3. Cam Fiber Takviyeli Polimer (CFTP) Kompozitler

Cam elyaf takviyeli polimer (CFTP) kompozitler, polimer esaslı bir matris fazı içerisine entegre edilen sürekli veya kesikli cam fiberlerle oluşturulan çok fazlı malzemelerdir. Endüstride büyük hacimlerde üretilebilen bu kompozit sistemler, yapısal ve işlevsel özellikleri açısından pek çok avantaj sunmakta olup, geniş bir uygulama yelpazesinde tercih edilmektedir (Işık, 2023).

Cam fiberlerin üretiminde en yaygın kullanılan tür, E-camı olarak adlandırılan ve elektriksel yalıtkanlık özelliği ile bilinen cam kompozisyonudur. Bu fiberlerin çapları genellikle 3–20 mikrometre arasındadır. Cam fiberlerin kompozit teknolojisinde yaygın olarak tercih edilmesinin temel nedenleri; eriyik halden kolaylıkla yüksek dayanımlı fiber formlarına dönüştürülebilmeleri, düşük maliyetle temin edilebilmeleri, çeşitli üretim yöntemleriyle ekonomik biçimde üretilebilmeleri, özgül mukavemetlerinin yüksek oluşu ve pek çok polimer matrisle uyumlu kimyasal yapıları sayesinde korozif ortamlarda dahi dayanım göstermeleridir (Sheikh-Ahmad, 2009).

Kompozit malzemelerde cam fiberin yüzey özellikleri, özellikle matrisle kurduğu arayüzey bağ üzerinden, mekanik performans üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Mikroskobik düzeyde dahi oluşabilecek yüzey hataları, özellikle çekme dayanımı üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir. Yüzeydeki bu kusurlar, genellikle sert bir malzeme ile fiziksel temas veya aşındırıcı işlemler sonucu meydana gelir. Ayrıca, kısa süreli atmosferik etkileşim bile cam fiber yüzeyinde zayıf bir tabaka oluşturarak, matris-fiber arasındaki adezyonu olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, yeni çekilmiş fiberlerin yüzeyi, üretim esnasında çevresel etkilere karşı koruyucu bir film tabakası ile kaplanır.

Kompozit üretimi öncesinde bu koruyucu film, uygun kimyasal işlemlerle uzaklaştırılır ve yerine, fiber ile matris arasında kimyasal bağ oluşturan bir kuplaj ajanı uygulanır (Callister ve Rethwisch, 2018).

Cam fiberler yüksek çekme dayanımına sahip olmalarına rağmen, sertlik bakımından sınırlayıcı bir özelliğe sahiptirler. Bu da onları uçak kanatları veya köprü gibi yüksek rijitlik gerektiren uygulamalar için yetersiz kılabilir. Ayrıca, cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin servis sıcaklıkları genellikle 200 °C'nin altındadır. Zira polimer matris, bu sıcaklıkların üzerinde viskoelastik davranışlar sergileyerek şekil bozulmalarına uğrayabilir. Ancak yüksek sıcaklıklarda kullanılmak üzere, yüksek saflıkta kaynaşmış silika fiberleri veya poliimid esaslı ısıl dayanımlı polimer matrisler ile bu sınır yaklaşık 300 °C'ye kadar çıkarılabilmektedir. Tüm bu teknik kısıtlamalara karşın, cam fiberlerin düşük maliyeti, kolay erişilebilirliği ve işleme kolaylığı gibi avantajları onları otomotiv sektörü, deniz taşıtları gövdeleri, plastik borular, depolama tankları ve endüstriyel zemin kaplamaları gibi alanlarda vazgeçilmez kılmaktadır. Bu uygulamalarda, yapısal bütünlük korunurken sistemin toplam ağırlığında da ciddi azalmalar sağlanabilmektedir (Callister ve Rethwisch, 2018).

CFTP kompozitlerin üretiminde kullanılan yöntemler, kompozitin hedeflenen uygulamasına, matris türüne, fiber formuna (sürekli veya kesikli) ve istenen yapısal özelliklere göre farklılık göstermektedir. Bu üretim tekniklerinin temel amacı, cam fiberlerin polimer matrisle etkin biçimde ıslatılması, liflerin düzgün bir şekilde yerleştirilmesi ve fiber-matris arayüzünün mekanik olarak güçlü bir şekilde oluşturulmasıdır. En yaygın kullanılan yöntemler arasında el yatırması, reçine transfer kalıplama (RTM), pultrüzyon, filament sarımı ve sıcak pres kalıplama yer almaktadır. Bu tekniklerin temel hedefi, cam fiberlerin polimer matrisle tam temasını sağlayarak homojen, yüksek dayanımlı bir kompozit yapı oluşturmaktır. Ancak her bir yöntemin avantajları, sınırlamaları ve uygulanabilirliği farklı olup, üretim parametreleri kompozitin gözeneklilik, yüzey kalitesi ve mekanik dayanımı gibi nihai özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Örneğin, pultrüzyon yöntemi sürekli fiberlerle yüksek üretim hızına olanak tanırken; RTM, karmaşık geometrilerde daha iyi kalıp dolumu sağlar. Filament sarımı ise özellikle basınca dayanıklı silindirik yapıların üretiminde etkinlik gösterirken, sıcak presleme yüksek yüzey kalitesi ve hassas kalıp toleransları sağlamaktadır. El yatırması yöntemi, düşük maliyetli prototip üretimi için tercih edilmesine rağmen, otomasyon eksikliği nedeniyle tekrarlanabilirlik ve kalite kontrolü açısından

sınırlayıcıdır. Bu yöntemlerin karşılaştırmalı özeti Tablo 1.1’de verilmiştir (Kar, 2017; Yi ve ark., 2018; Uzun ve Green, 2020).

Tablo 1.1. CFTP kompozit üretim teknolojilerinin kıyaslamalı özeti (Kar, 2017; Yi ve ark., 2018; Uzun ve Green, 2020)

Üretim Yöntemi	Açıklama	Avantajları	Dezavantajları
El Yatırması	Liflerin manuel olarak reçineyle katman katman yerleştirilmesi	Basit ve düşük maliyetli	Otomasyon az, kalite operatöre bağlı
Reçine Transfer Kalıplama (RTM)	Liflerin kalıba yerleştirilip reçinenin basınçla enjekte edilmesi	Karmaşık geometrilerde yüksek yüzey kalitesi	Kalıp maliyeti yüksek
Pultrüzyon	Sürekli liflerin çekilerek kalıptan geçirilmesi	Yüksek üretim hızı, sürekli profil üretimi	Sadece sabit kesitli parçalar üretilebilir
Filament Sarımı	Liflerin mandrel üzerine belirli açılarla sarılması	Yüksek lif yönelimi kontrolü, basınçlı kaplar için ideal	Sınırlı geometrik esneklik
Sıcak Pres Kalıplama	Lif ve matrisin önceden yerleştirilip ısı ve basınçla şekillendirilmesi	Düşük gözeneklilik, yüksek hassasiyet	Yüksek ekipman maliyeti, sınırlı üretim hızı

Üretim yöntemi, takviye malzemelerin türü, nanopartiküllerin eklenmesi ve maruz kalınan çevresel koşullar gibi faktörler, CFTP kompozitlerin boyuna ve enine yönlerdeki performansını önemli ölçüde etkileyebilir. Bu bağlamda, farklı parametrelerin etkisiyle değişen bazı temel mekanik özellikler Tablo 1.2’de verilmiştir.

Tablo 1.2. Boyuna ve enine yönlerde sürekli ve hizalanmış CFTP kompozitin özellikleri (Callister ve Rethwisch, 2018)

	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Çekme Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Nihai Çekme Gerilimi (MPa)
Boyuna	2,1	45	1020	2,3
Enine		12	40	0,4

Not: Tüm durumlardaki fiber hacim oranı 0,60’tır.

1.4. Poliürea Kaplama Teknolojisi

Günümüzde kaplama teknolojilerinde sıkça tercih edilen poliürea, yaklaşık 80 yıllık bir geçmişe sahiptir ve ilk olarak 20. yüzyılın ortalarında bilimsel literatürde tanıtılmıştır. Poliürea, izosiyanat bileşikler ile poliamin gruplarının kimyasal reaksiyonu sonucunda elde edilen elastomer yapılı bir polimerdir. Bu reaksiyon genellikle yüksek sıcaklık ve basınç altında, her iki bileşenin stokiometrik olarak bire bir oranında

karıştırılmasıyla gerçekleştirilir. Elde edilen polimer yapı, yüksek reaktivitesi sayesinde kısa sürede kürleşerek uygulandığı yüzeyde homojen bir kaplama tabakası oluşturur (Primeaux, 2004; Jabbar ve ark., 2023). Son otuz yılda poliürea üzerine yapılan araştırmalar, özellikle kaplama tekniklerinin geliştirilmesi ve uygulama yöntemlerinin iyileştirilmesine odaklanmıştır. Bu süreçte geliştirilen yeni teknolojiler, poliürea kaplamaların dayanıklılığını artırmakla kalmamış, aynı zamanda uygulama kolaylığı ve düşük maliyet avantajları sayesinde endüstriyel alanda daha geniş bir kullanım alanı bulmasına katkı sağlamıştır. Ticari olarak ilk poliürea kaplama ürünü, 20. yüzyılın son çeyreğinde pazara sunulmuş ve öncelikle yapı sektöründe çatı yüzeylerinde su yalıtımı amacıyla kullanılmaya başlanmıştır (Grujicic ve ark., 2012; Wang ve ark., 2024).

Poliürea, yüksek yüzey yapışma kabiliyeti ve hızlı reaksiyon süresi ile öne çıkan bir kaplama malzemesidir. Uygulama sonrasında yaklaşık 5 ila 15 saniye içinde katı hâle geçebilmesi, çevresel koşullardan (nem, sıcaklık, toz gibi) minimum düzeyde etkilenmesini sağlayarak kaplama kalitesini artırmaktadır. Bu özellik, poliüreayı zorlu çevre koşullarında dahi güvenle uygulanabilir hâle getirmektedir. Ayrıca, yüzeylere homojen biçimde dağılabilme yeteneği sayesinde farklı malzeme türlerinde ve karmaşık yüzey geometrilerinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Uygulama yöntemleri yalnızca sprej teknolojisiyle sınırlı olmayıp; fırça ile sürme, püskürtme ve çubukla uygulama gibi alternatif teknikler de mevcuttur. Bu çok yönlülük, poliüreanın geniş bir uygulama yelpazesinde tercih edilmesine neden olmaktadır (Yıldırım, 2019).

Poliürea kaplama, yüksek yüzey kalitesi ve dayanıklı yapısal özellikleri sayesinde uygulandığı yüzeye önemli fiziksel avantajlar sağlamaktadır. Üstün mekanik ve kimyasal özellikleriyle özellikle yapı sektöründe yüksek performans gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda poliüreanın malzeme mekaniği üzerindeki olumlu etkileri artan ölçüde araştırılmakta ve mühendislik alanında hem akademik hem de endüstriyel düzeyde kapsamlı çalışmalar yürütülmektedir. Yüksek elastikiyet, güçlü yüzey yapışması ve kimyasal dayanıklılık gibi özellikleri sayesinde poliürea kaplamalar, endüstriyel uygulamalarda vazgeçilmez malzemelerden biri haline gelmiştir (Shojaei ve ark., 2021). Poliüreanın çeşitli kullanım alanları ve bu alanlarda sağladığı temel avantajlar Tablo 1.3'te verilmiştir.

Tablo 1.3. Poliürea kaplamanın başlıca kullanım alanları ve sağladığı avantajlar (Yıldırım, 2019; Shojaei ve ark., 2021)

Kullanım Alanı	Sağladığı Avantajlar
Boru hatları, yağmur suyu olukları ve su depoları	Yüksek sızdırmazlık, kimyasal dayanıklılık, yalıtım ve koruma sağlar; petrokimya sektöründe kimyasal hatlarda kullanılır.
Endüstriyel zemin uygulamaları	Yangına dayanıklılık, yüzey sürtünmesini artırarak kayma riskini azaltma, ani mekanik yüklemelere karşı direnç.
Yer altı ve yer üstü boru hatları	Mekanik koruma, aşınma ve korozyon önleme; trafik çizgilerinin işaretlenmesinde de kullanılır.
Yapıların dış ve iç cepheleri	Çatlak ve yüzey kusurlarının onarımı; uzun ömürlü ve esnek tamir malzemesi olarak görev yapar.
Otomotiv sektörü	Dış yüzeylerin darbelere, kimyasallara ve çevresel etkilere karşı korunması.
Savunma sanayi	Korozyon önleyici kaplamalar, darbe emici sistemler ve balistik koruma panelleri; dayanıklılık ve hayatta kalma kapasitesi artırılır.
Yüksek darbe ve deformasyon riski altındaki sistemler	Yüksek darbe emme kapasitesi ve hasar toleransı ile uzun ömürlü koruma sağlar.
Tank ve depo sistemleri	Kimyasal dayanım, korozyon önleme; içme suyu, biyolojik atık su ve ağır kimyasallara karşı direnç sağlar.

Poliürea kaplamaların mühendislik uygulamalarında tercih edilmesinin temel nedeni, sahip olduğu çok yönlü fiziksel, kimyasal ve çevresel avantajlardır. Bununla birlikte, uygulama süreci ve sistem gereksinimleri nedeniyle bazı sınırlamalar da mevcuttur. Poliürea kaplamaların sağladığı başlıca avantajlar ve karşılaşılan temel dezavantajlar ile bu hususların teknik açıklamaları sırasıyla Tablo 1.4 ve Tablo 1.5’te verilmiştir.

Tablo 1.4. Poliürea kaplamaların mühendislik uygulamalarındaki avantajları (Yıldırım, 2019; Shojaei ve ark., 2021)

Avantajlar	Açıklamalar
Kısa üretim süresi	Hızlı kürleşme ile uygulama ve işletmeye alma süresi kısadır, zamandan ve işçilik maliyetinden tasarruf sağlar.
Korozyon ve aşınma direnci	Malzemede korozyon ve yüzeysel aşınmayı engelleyerek yapısal ömrü uzatır.
Yüksek nem ve su dayanımı	Su ve neme karşı geçirimsizlik sağlayarak etkili yalıtım sunar.
Çevresel güvenlik	Zararlı gaz veya toksik atık üretmez, reaksiyon son ürünü sudur, çevre dostudur.
UV ve atmosferik direnç	UV ışınları ve agresif atmosfer koşullarına karşı dayanıklıdır.
Yüksek darbe direnci	Ani mekanik darbelere karşı dayanıklıdır, yüksek enerji sönümleme kapasitesi vardır.
Esneklik ve mekanik dayanım	Yüksek elastikiyet ve mukavemetle yapısal esneklik ve yüzey dayanıklılığı sağlar.
Yangına dayanıklılık	Yanmayı geciktirici özellikler içerir, yüksek sıcaklıklara karşı dirençlidir.
Tam sızdırmazlık özelliği	Mikroskopik gözenekleri kapatarak tam yüzey sızdırmazlığı sağlar.
Yüzey çeşitliliği	Ahşap, beton, metal, plastik gibi farklı yüzeylere uygulanabilir.
Termal stabilite	Ani sıcaklık değişimlerine karşı yüksek direnç gösterir, termal deformasyon riski düşüktür.

Tablo 1.5. Poliürea kaplamaların mühendislik uygulamalarındaki dezavantajları (Yıldırım, 2019; Shojaei ve ark., 2021)

Dezavantajlar	Açıklamalar
Yüksek ekipman maliyeti	Yüksek basınç ve sıcaklığa dayanıklı özel sprej ekipmanları gerektirir, maliyetlidir.
Yüzey hazırlığının kritik önemi	Yüzeyin toz, yağ, nem ve kirleticilerden arındırılması ve düzgün olması zorunludur; yetersiz hazırlık kaliteyi düşürür.
Proses koşullarının sürekli kontrolü	Uygulama sırasında sıcaklık, nem, karışım oranları gibi parametrelerin izlenmesi gerekir; uygunsuz koşullar kaplama kalitesini etkiler.
Operatör deneyimine bağlı performans	Uygulayıcıların özel eğitimi gereklidir; deneyimsiz operatörler kaliteyi ve homojenliği olumsuz etkiler.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, cam fiber takviyeli polimer (CFTP) kompozitlerin mekanik özellikleri, lif oryantasyonu ve istifleme diziliminin malzeme davranışına etkileri, darbe dayanımı ve hasar gelişimi ile darbe sonrası mekanik performansları üzerine yapılmış kapsamlı literatür çalışmaları ele alınacaktır. Ayrıca, poliürea kaplama teknolojisinin CFTP kompozitler üzerindeki etkileri detaylı şekilde incelenerek, kaplama malzemesinin darbe direnci ve yapısal dayanıklılığa katkıları tartışılacaktır. Bu kapsamda, deneysel ve sayısal araştırmaların bulguları değerlendirilerek, tezin amacı doğrultusunda mevcut çalışmaların katkı ve sınırlılıkları ortaya konacaktır.

2.1. CFTP Kompozitlerin Mekanik Özellikleri Üzerine Yapılan Çalışmalar

CFTP kompozitler, yüksek mukavemet ve elastik modül gibi avantajları nedeniyle birçok mühendislik uygulamasında tercih edilmektedir. Literatürde, bu kompozitlerin mekanik davranışları üzerinde farklı parametrelerin etkisi detaylı olarak araştırılmıştır.

Çakır ve Berberoğlu (2018), vakum destekli reçine transfer yöntemi ile farklı cam fiber oranlarında (%30, %40, %50, %60) üretilen CFTP kompozitlerin çekme, darbe ve eğilme testlerini gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, cam fiber oranının artmasıyla mekanik performansta belirgin iyileşmeler olduğunu göstermiştir. Özellikle %60 cam fiber içeren numunelerde elastik modül ve darbe dayanımında sırasıyla %47 ve %32 artışlar gözlemlenmiştir.

Dhilipkumar ve Rajesh (2023), farklı imalat yöntemlerinin (birlikte kürlleme, birlikte yapıştırma, ikincil yapıştırma) CFTP kompozitlerin kesme mukavemeti ve dinamik davranışına etkisini incelemişlerdir. Birlikte kürlleme yönteminin en yüksek kesme mukavemeti sağladığı, cam fiber pimlerin arayüzeyde dışsal çatlak köprüleme bölgesi oluşturarak yapısal dayanıklılığı artırdığı raporlanmıştır.

Reis ve ark. (2018), CFTP kompozitleri alkali ve asit çözeltileri ile damıtılmış su ortamında maruz bırakarak çözeltide kalma süresi, sıcaklık ve konsantrasyonun çekme ve darbe dayanımları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çözeltide kalma süresi ve

sıcaklığın darbe dayanımını olumsuz etkilediği, alkali ortamın ise asit ortama kıyasla daha agresif olduğu ve darbe dayanımını kısmen azalttığı belirtilmiştir.

Saeedi (2020), cam fiber takviyeli poliüretan yüzeyli sandviç kirişlerin üç nokta eğilme ve titreşim testleriyle mekanik performansını değerlendirmiştir. Cam fiber ve poliüretan kaplamanın kiriş rijitliğinde yaklaşık %90 oranında artış sağladığı; ayrıca, yüzey kaplama olarak kullanılan poliüretan malzemenin düşük reaksiyon sıcaklığı, çevresel duyarlılığı ve yüksek mekanik mukavemeti ile özellikle eğilme yükleri altındaki deformasyon davranışını olumlu yönde etkilediği raporlanmıştır.

Topkaya ve ark. (2020), CFTP kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde grafen nanopartikül takviyesinin etkisini araştırmışlardır. Kompozitlere ağırlıkça %0,1, %0,2 ve %0,3 grafen nanopartikül eklemişlerdir. Ağırlıkça %0,2 grafen nanopartikül ilavesinin çekme dayanımı ve elastisite modülünü artırdığı gözlemlenmiştir.

Veerakumar ve ark. (2021), fonksiyonelleştirilmiş grafen nanoplateletlerin CFTP kompozitlerde fiber/matris arayüz bağlarını güçlendirdiğini ve bunun sonucunda gerilme mukavemeti ile kırılma tokluğunda artış sağladığını göstermişlerdir.

2.2. CFTP Kompozitlerde Lif Oryantasyonu ve İstifleme Dizilimi

CFTP kompozitlerin mekanik performansı, büyük ölçüde liflerin oryantasyonu ve istifleme dizilimi ile şekillenmektedir. Literatürde, lif yönelim açılarının ve katmanların diziliminin; mekanik dayanım, darbe direnci ve hasar gelişimi üzerindeki etkileri geniş kapsamda incelenmiştir.

Belingardi ve Vadori (2002), CFTP kompozitlerde fiber dokuma tipi ve istifleme açılarının darbe dayanımı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Tek yönlü ve dokuma kumaşlardan üretilen kompozitlerin farklı istifleme açılarında darbe testlerine tabi tutulduğu bu çalışmada, belirli yükleme türleri ve darbe hızları aralığında, fiber dokuma tipi ve istifleme açısının mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisi olmadığı raporlanmıştır.

Boukar ve ark. (2022), çift eksenli CFTP kompozitlerin düşük hızlı darbe testleri altındaki dinamik davranışlarını sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Çalışmada, $\pm 45^\circ$ oryantasyon açısına sahip kompozitlerin, $0/90^\circ$ oryantasyonlu kompozitlere kıyasla daha düşük tepe kuvveti, daha uzun darbe süresi ve daha yüksek enerji emilimi sağladığı gözlemlenmiştir.

Özdemir (2024), farklı fiber oryantasyonlarına sahip CFTP kompozitlerin düşük hızlı darbe altındaki davranışlarını sayısal yöntemlerle analiz etmiştir. Çalışmada, [90/90/90/90], [90/0/90/0], [90/+45/-45/0], [+45/-45/+45/-45], [+55/-55/+55/-55] gibi farklı istifleme dizilimlerine sahip dört katmanlı yapılar üzerinde sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiş ve bu yapılar ASTM-7130 standardına uygun olarak modellenmiştir. Elde edilen bulgular, rijit (düz) lif dizilimlerinin daha düşük deformasyon, daha yüksek taşıma kapasitesi ve düşük enerji kaybı ile sonuçlandığını; buna karşılık açılı lif dizilimlerinin daha fazla deformasyon, daha düşük taşıma kapasitesi ve yüksek enerji absorpsiyonu sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca yüzey alanının büyüklüğünün darbe davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Geniş yüzey alanları, darbe kuvvetinin daha geniş bir alana yayılmasını sağlayarak malzemenin daha fazla enerji absorbe etmesine ve buna bağlı olarak daha yüksek deformasyon göstermesine neden olduğu raporlanmıştır.

2.3. CFTP Kompozitlerde Darbe Dayanımı ve Hasar Gelişimi

Darbe dayanımı, CFTP kompozitlerin yapısal bütünlüğünü korumadaki önemli parametrelerden biridir. Hasar gelişimi ise kompozitin yük taşıma kapasitesi ve servis ömrü açısından kritik öneme sahiptir.

Boukar ve ark. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar, farklı lif yönelimlerinin darbe hasarı üzerindeki etkisini detaylandırmıştır. Özellikle $\pm 45^\circ$ yönelimli laminatların enerji emilimi ve hasar dağılımının daha etkin olduğu gözlemlenmiştir.

Giasin ve ark. (2021), CFTP kompozitlerin düşük hızlı darbe altındaki hasar davranışlarını, çeşitli fiber yerleşim dizilimleri ve farklı darbe enerjisi seviyeleri doğrultusunda hem deneysel hem sayısal olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, fiber yöneliminin kompozit malzemenin darbe direnci ve hasar oluşum mekanizmaları üzerinde belirleyici bir rol oynadığı ortaya konmuştur. Özellikle, tek yönlü fiber yerleşimine sahip numunelerde kayma gerilmeleri sonucu ani hasarlar meydana gelirken; simetrik ve çapraz yerleşimli numunelerde darbe enerjisinin daha geniş bir alana yayılması sayesinde delaminasyonun sınırlandığı ve yüzey hasarının önlendiği gözlemlenmiştir.

Güler ve ark. (2025), CFTP kompozitlerin düşük hızlı darbe altındaki mekanik tepkilerini, çeşitli fiber yerleşim açıları doğrultusunda incelemişlerdir. 60 J enerjili düşey

yönde uygulanan düşen ağırlık darbe testi sonuçları, fiber yöneliminin hem enerji emilimi hem de hasar davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Araştırmada, 45° açılı fiber yerleşimine sahip örneklerin daha yüksek maksimum darbe kuvvetine karşı koyabildiği, buna karşılık 0° yerleşimli numunelerin daha fazla yer değiştirme göstererek daha yüksek enerji absorpsiyonu sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, hasar alanı ile emilen enerji arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

Karakaya (2025), CFTP kompozit malzemelerin farklı istifleme açıları ve dizilimlerine bağlı olarak darbe davranışlarını incelemiştir. Bu amaçla, düşen ağırlık darbe testi ve Charpy darbe deneyi uygulanarak, istifleme parametrelerinin malzemenin elastik ve plastik deformasyon davranışları, maksimum kuvvet değerleri, kırılma biçimi ve enerji soğurma kapasitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, istifleme düzeninin darbe performansı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymuştur.

Önal ve Temiz (2021), cam elyaf/epoksi esaslı yüzey tabakalarına ve farklı kalınlıklarda balsa odunu çekirdeklere sahip sandviç kompozit yapıların düşük hızlı darbe davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, yüzey malzemesi olarak $\pm 45^\circ$ yönlenme açılarına sahip 8 ve 12 tabakalı cam elyaf takviyeli laminatlar kullanılmış, çekirdek olarak ise 4 mm, 6 mm, 8 mm ve 10 mm kalınlıklarında balsa odunu tercih edilmiştir. Kompozit numuneler vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiş ve 15 J, 30 J, 45 J ve 60 J enerji seviyelerinde darbe testlerine tabi tutulmuştur. Araştırma sonuçları, yüzey tabaka sayısının artmasıyla birlikte temas kuvvetinin yükseldiğini ancak absorbe edilen enerjinin azaldığını ortaya koymuştur. Buna karşılık, çekirdek kalınlığının artması absorbe edilen enerjide anlamlı bir artış sağlamış, ancak temas kuvveti ve deplasman üzerinde belirgin bir değişiklik yaratmamıştır. Ayrıca, darbe enerjisi arttıkça matris çatlağı, fiber kırığı, delaminasyon ve arayüzey ayrılması gibi hasar türlerinin şiddetlendiği belirlenmiştir.

Öndürücü ve Can (2020) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada ise kevlar ve cam fiber takviyeli hibrit kompozitlerin düşük hızlı darbe yükleri altındaki davranışı incelenmiş ve bu sistemlerde kullanılan katkı malzemelerinin (alümina ve silika) etkisi detaylı şekilde analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, dört farklı katkı oranına sahip 12 tabakalı kompozitlere, 60 J darbe enerjisi uygulanarak darbe sonrası kuvvet-çökme, absorbe edilen enerji ve yüzey hasarları değerlendirilmiştir. Bulgular, kevlar elyaf yüzeyine darbe uygulandığında, cam elyafa göre daha yüksek maksimum kuvvet ve daha

fazla enerji absorpsiyonu gerçekleştiğini göstermektedir. Bu durum, kevların sünek yapısı sayesinde darbe enerjisinin daha geniş bir alana yayılarak i tabakalarda daha fazla delaminasyon oluşturmasına bağlanmıştır. Elde edilen verilere göre, en iyi darbe dayanımı ve minimum hasar, %2 alümina ve %3 silika katkılı hibrit yapı olan konfigürasyonunda gözlemlenmiştir. Kevlar elyaf yüzeyine uygulanan darbelerde, kompozitlerin yük taşıma kapasitesinin cam elyafa kıyasla anlamlı biçimde yüksek olduğu belirlenmiştir.

Păduraru ve ark. (2023), CFTP kompozitlerin düşük hızlı darbe altındaki davranışlarını inceleyerek, bu malzemelerin otomotiv ve denizcilik sektörlerinde darbe dayanımı yüksek bileşenlerin tasarımında kullanılabilirliğini değerlendirmişlerdir. Dört yönlü cam fiber kumaş ($0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}$) ve epoksi reçine kullanılarak laboratuvar ölçeğinde üretilen kompozit paneller, farklı katman sayıları, darbe hızları (2–4 m/s; 11–45 J) ve hemisferik darbe ucu çapları ($\Phi 10$ mm, $\Phi 20$ mm) altında test edilmiştir. Darbe testleri sonucunda, panel kalınlığı ve darbe enerjisi gibi parametrelerin maksimum darbe kuvveti, darbe süresi ve hasar türü üzerinde belirleyici rol oynadığı ortaya konmuştur. 2 m/s hızla uygulanan düşük enerjili darbelerde ince panellerde sadece n yüzey hasarı gözlenirken, 4 m/s hızla yapılan yüksek enerjili testlerde, yalnızca altı katmanlı panellerin arka yüzeylerinde sınırlı mikro düzeyde matris hasarı oluşmuştur.

Sharma ve ark. (2019), ince cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışlarını, katmanlar arasındaki fiber yöneliminin ayrıştırılması açısından incelemişlerdir. El yatırması ve ardından vakum torbalama yöntemiyle üretilen numuneler, fiber yönelimleri bakımından iki farklı yerleşim düzenine sahip olacak şekilde hazırlanmıştır ($[90/-45/45/0]$ ve $[0/90/90/0]$). Düşen ağırlık yöntemiyle gerçekleştirilen darbe testlerinde, numunelerin hasar derecesi, ilk hasar ve maksimum kuvvet, çatlama enerjisi, eğilme rijitliği, elastik şekil değiştirme enerjisi, kalıcı deformasyon, delaminasyon boyutu ve süresi gibi çeşitli parametreler değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, $[90/-45/45/0]$ dizilimli kompozitlerin daha düşük deformasyonla daha yüksek kuvvet değerlerine ulaşabildiğini ve daha sınırlı bir delaminasyon alanına sahip olduğunu göstermiştir. Buna karşılık, $[0/90/90/0]$ dizilimli kompozitlerde daha yaygın bir delaminasyon ve daha büyük deformasyon gözlenmiştir. Ayrıca, $[0/90/90/0]$ düzeninin, boyuna ve enine doğrultulardaki uzama ve eğilme rijitliği açısından daha fazla ara katman ayrılmasına neden olduğu belirlenmiştir.

2.4. CFTP Kompozitlerin Darbe Sonrası Mekanik Performansı

Darbe sonrası mekanik performans, CFTP kompozitlerin servis ömrü ve yapısal güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Darbe sonrası eğilme dayanımı ve basma mukavemeti gibi parametreler, bu tür yapıların tekrar kullanımında belirleyici rol oynamaktadır.

Belevi ve ark. (2022), farklı sıcaklıklarda darbe almış CFTP kompozitlerin darbe sonrası basma dayanımı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan üç tabakalı kompozit levhalar, -20 °C, 20 °C ve 60 °C sıcaklıklarda 50 J'lık düşük hızlı darbe yüklemelerine maruz bırakılmış ve ardından ASTM D7137 standardına uygun şekilde basma testlerine tabi tutulmuştur. Araştırma sonuçlarına göre, CFTP kompozitlerin darbe sonrası basma mukavemeti düşük sıcaklıkta %8, yüksek sıcaklıkta ise %19 oranında değişim göstermiştir.

2.5. Poliürea Kaplama Teknolojisinin Kompozitlerdeki Etkileri

Poliürea kaplamalar, kompozit malzemelerin darbe davranışlarını iyileştirme ve hasar gelişimini sınırlama potansiyeline sahiptir. Yüksek elastik enerji absorpsiyonu ve viskoelastik özellikleri sayesinde, bu kaplamalar darbe sonrası mekanik dayanımı artırarak yapının bütünlüğünü korumada oldukça önemlidirler. Literatürde, farklı kompozit sistemlerde poliürea kaplamanın etkilerini inceleyen birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların özetleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1'de özetlenen çalışmalar arasında, CFTP kompozitlere odaklananlar, bu tür malzemelerde poliürea kaplamanın özellikle darbe sonrası yapısal dayanımı artırma potansiyelini ortaya koymaktadır. Aşağıda bu alanda öne çıkan çalışmalar detaylı olarak analiz edilmiştir.

Sazhenkov ve ark. (2020), poliürea kaplamanın CFTP kompozitlerin yüksek hızlı darbe altındaki mekanik davranışlarına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Poliürea kaplamanın özellikle levhanın ön yüzeyine uygulanması, balistik limitte %19'luk anlamlı bir artış sağlamıştır. Bu iyileşme, sadece %6,7 ek yüzey yoğunluğu artışı ile elde edilmiştir. Kaplamasız numunelerde delinme gözlenirken, kaplamalı numunelerde elastik deformasyon hakim olmuş ve delinme engellenmiştir. Ayrıca, kaplamalı levhalarda darbe sonrası delaminasyon alanlarının, kaplamasızlara kıyasla yaklaşık iki kat daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 2.1. Poliürea kaplamanın kompozit sistemlerdeki etkilerine yönelik literatür özeti

Yazarlar & Yıl	Malzeme Türü	Kaplama Kalınlığı	Test Türü	Başlıca Bulgular ve Etkiler
Ao, Zhou ve Xia (2023)	Karbon fiber kompozit	Belirtilmemiş	Yarı-statik göçertme, düşük hızlı darbe	Poliürea kaplama, düşük hızlı darbe altında enerji absorpsiyonunu artırmış, delaminasyon ve fiber kırılmasını azaltmıştır.
Guo ve ark. (2022)	Beton	Belirtilmemiş	Yüksek hızlı darbe	Poliürea kaplama, çatlak oluşumunu ve kalıcı deformasyonu azaltmış, yapısal bütünlüğü korumuştur.
Jabbar ve ark. (2023)	CFTP	Değişken	Çekme, eğilme, darbe testleri	Poliürea kaplama, poliüretandan üstün elastikiyet ve darbe enerjisi absorpsiyonu sağlamış, çevresel direnci artırmıştır.
Öztürk (2022)	Yığma duvar malzemeleri	Belirtilmemiş	Üç nokta kesme	Poliürea kaplama, kesme dayanımında %20-400 arası artış ve toklukta %494-690 oranında artış sağlamıştır.
Sazhenkov ve ark. (2020)	CFTP	1,2 mm	Yüksek hızlı darbe	Poliürea kaplama, balistik limiti %19 artırmış, delinmeyi engellemiş, delaminasyon alanını büyütmüştür.
Sazhenkov ve ark. (2021)	CFTP	Belirtilmemiş	Düşük hızlı darbe	Poliürea kaplama, delaminasyonu sınırlandırmış, hasar alanını azaltmış ve yapısal bütünlüğü korumuştur.
Yardım (2023)	Aramid esaslı kompozit	Belirtilmemiş	Balistik testler	Poliürea kaplama, penetrasyon derinliğini azaltmış, kırılmayı önlemiş ve enerji absorpsiyonunu artırmıştır.

Sazhenkov ve ark. (2021) devam niteliğindeki bu çalışmada, poliürea kaplı CFTP kompozitlerin düşük hızlı darbeler altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Elde edilen bulgular, poliürea kaplamanın darbe enerjisini yapıya homojen şekilde yayarak yerel deformasyonları azalttığını, delaminasyon eğilimini sınırladığını ve genel yapısal bütünlüğü koruduğunu göstermektedir. Ayrıca, poliürea kaplı numunelerde, kaplanmamış kontrollere kıyasla daha düşük hasar alanı ve daha yüksek geri kazanım kapasitesi gözlemlenmiştir. Yazarlar, poliürea kaplamanın viskoelastik karakterinin, darbe enerjisini sönmüleme mekanizmasında kilit rol oynadığını ve cam fiber gibi gevrek yapıli takviyelerin kırılğanlığını dengeleyerek yapıya süneklik kazandırdığını belirtmektedirler.

Genel olarak literatür, poliürea kaplamaların kompozit sistemlerde darbe sonrası performansı artırmada etkin bir çözüm olduğunu göstermektedir. Kaplama sayesinde hem enerji absorpsiyonu artmakta hem de yapısal bütünlük korunmaktadır. Poliürea, elastik ve viskoelastik özellikleriyle darbe enerjisini yayarak hasar lokalizasyonunu azaltmakta ve malzemenin tekrar kullanıma uygunluğunu artırmaktadır.

3. METERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde çalışmada kullanılan malzemeler, numune üretim süreci, kaplama işlemleri ve uygulanan deneysel yöntemler açıklanmıştır. Araştırmanın temelini oluşturan cam fiber takviyeli polimer (CFTP) kompozitler, farklı oryantasyon açılarına sahip olacak şekilde üretilmiş ve yüzeylerine elastomerik özellikte poliürea kaplama uygulanmıştır. Numunelere düşük hızlı darbe yüklemesi yapılmış; ardından, darbe sonrası yapısal davranışın belirlenmesi amacıyla üç nokta eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan test cihazları, parametreler ve veri değerlendirme yöntemleri bu bölümde ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

3.1. Cam Fiber Takviyeli Polimer (CFTP) Kompozitlerin Üretimi

Farklı oryantasyon açılarına sahip kompozitlerin üretiminde, yüksek mekanik dayanım, düşük yoğunluk, termal ve kimyasal stabilite, korozyon direnci, elektriksel yalıtkanlık ve maliyet etkinliği gibi üstün özelliklerinden dolayı endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen dokuma cam fiber, takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. 300 g/m² alansal ağırlığa sahip bu dokuma cam fiber, 127 cm genişliğinde ve 20 m uzunluğunda temin edilmiştir. Matris malzemesi olarak ise ARC 152 epoksi reçinesi ile W 152 sertleştiriciden oluşan epoksi set tercih edilmiş olup, 4 kg epoksi reçine ve 1 kg sertleştirici tedarik edilmiştir. Cam fiber takviye malzemesi ile epoksi matris sistemine ait görseller Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Kompozit üretiminde kullanılan a) dokuma cam fiber(takviye) ve b) epoksi set (matris) malzemeleri

CFTP kompozitlerdeki fiber yönelimi, yatay düzlemle sırasıyla 0° , 15° , 30° ve 45° açı yapacak şekilde dört farklı oryantasyon açısında ve tüm konfigürasyonlar 12 tabaka cam fiber takviyesinden oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Bu kapsamda, temin edilen dokuma cam fiber, belirlenen açılarda $33 \text{ cm} \times 22 \text{ cm}$ boyutlarında kesilmiştir. Kesilen dokuma cam fiberlerin görüntüleri Şekil 3.2’de verilmiştir.



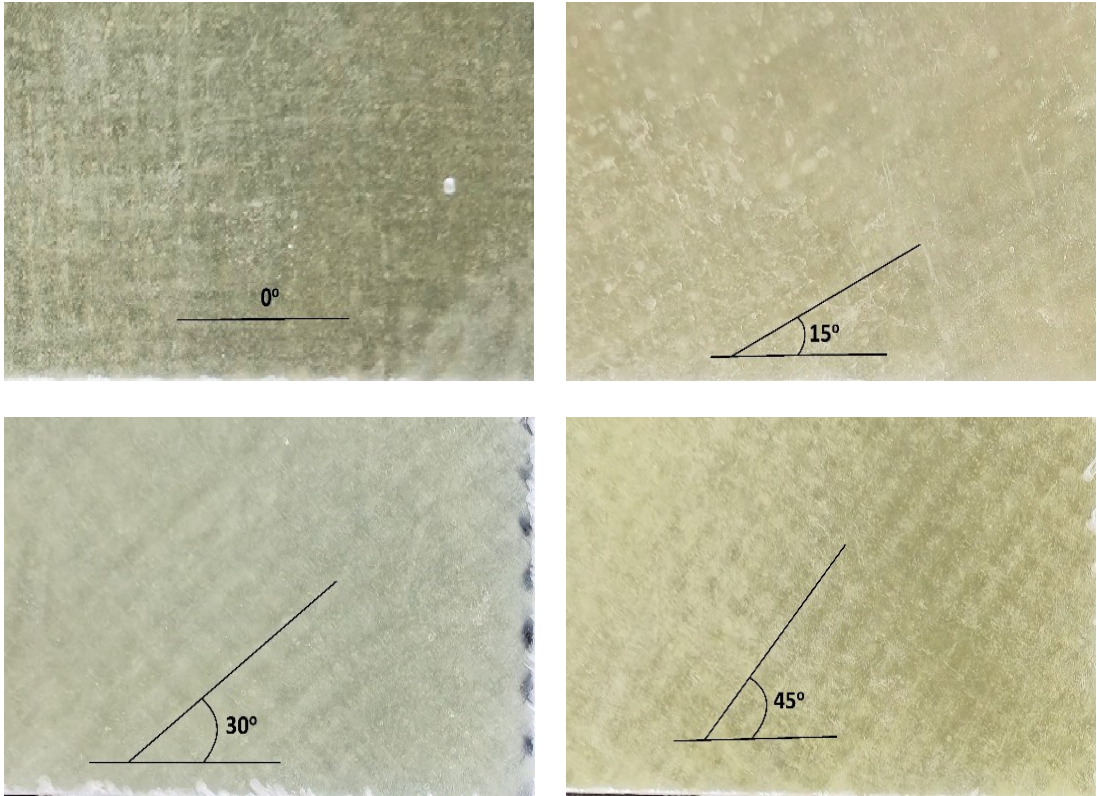
Şekil 3.2. Farklı açılarda kesilmiş dokuma cam fiberler

Her bir açıda kesilen dokuma cam fiberler, toplamda 12 tabaka olacak şekilde üst üste yerleştirilmiş ve dört farklı oryantasyona sahip CFTP kompozitlerin üretimi hedeflenmiştir. Kompozit yapı içerisinde cam fiberin toplam ağırlık oranının %60 olacak şekilde ayarlanabilmesi için, üretime geçilmeden önce her bir açıda hazırlanan fiber tabakalar hassas terazide tartılmıştır. Benzer şekilde, polimer matris malzemesi de %40 ağırlık oranını sağlayacak şekilde tartılmıştır. Bu doğrultuda, matris sistemini oluşturan epoksi reçine ve sertleştirici, üretici firma tarafından önerilen 4:1 oranında karıştırılmıştır. Matris malzemesinin tartılması ve karıştırılmasına ait görseller Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.3. Epoksi reçine ve sertleştiricinin tartılma ve karıştırılma aşaması

Dokuma cam fiberler ve polimer matris malzemesi, el yatırma yöntemi kullanılarak katmanlar halinde üst üste yerleştirilmiş ve kompozit plakalar elde edilmiştir. El yatırma yöntemiyle üretim sürecinde, cam yüzeyde yapışmayı engellemek amacıyla şeffaf naylon örtü serilmiştir. Naylonun üzerine epoksi matris malzemesi eşit şekilde yayılmıştır. Bu epoksi tabakasının üzerine bir katman cam fiber yerleştirilmiş ve hareketli bir rulo kullanılarak fiberin tamamen epoksi ile ıslanması sağlanmıştır. Ardından, tekrar epoksi yayılmış ve aynı oryantasyonda kesilmiş cam fiber katmanı yerleştirilmiştir. Bu işlem, toplam 12 katman oluşana kadar tekrarlanmış ve her katmana eşit miktarda epoksi uygulanmıştır. Tabakalama işlemi tamamlandıktan sonra, üst yüzeye yeniden naylon örtülmüş ve üzerine 25 kg ağırlığında bir yük konulmuştur. Numuneler, oda sıcaklığında 48 saat kürlenmeye bırakılarak farklı oryantasyon açılarında CFTP kompozitler elde edilmiştir (Şekil 3.4).

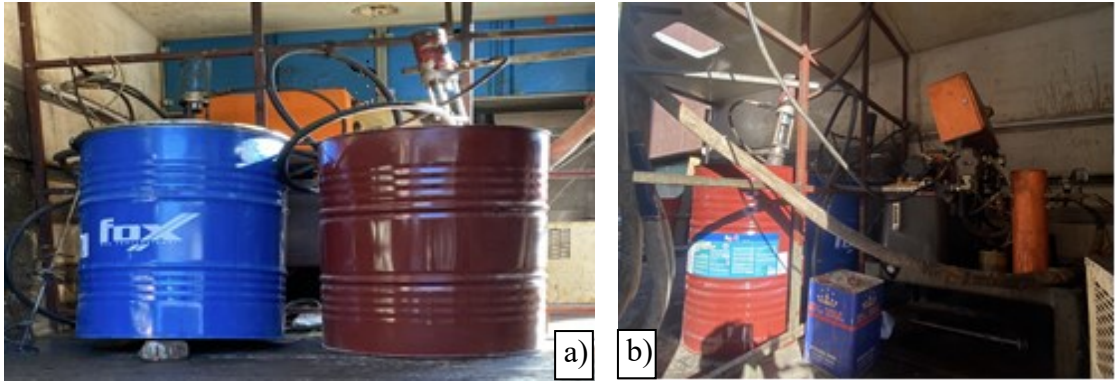


Şekil 3.4. Üretim sonrası CFTP kompozit numuneleri

3.2. Poliürea Maddesinin Temini ve Kaplama Uygulaması

Çalışmada kullanılan poliürea kaplama uygulaması, ilgili ekipmanların laboratuvar ortamında temin edilememesi ve uygulama koşullarının yetersiz olması

nedeniyle, profesyonel uygulama altyapısına sahip bir dış firma aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, kaplama işlemi TEN YAPI firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Uygulamalarda, çeşitli mekanik ve çevresel koşullara karşı yüksek dayanım sağlayan spreyci poliürea sistemlerinden biri olan FOX PURMAX FS561 kodlu ürün tercih edilmiştir. Bu ürün; hızlı uygulanabilirliği, yaklaşık 10 saniyelik kısa sertleşme süresi, uygulama kat sayısından bağımsız olarak kompakt ve pürüzsüz bir yüzey oluşturması, yüksek aşınma direnci, derzsiz ve bütüncül kaplama özelliği ile çatlak örtücülüğü, mükemmel kimyasal dayanımı ve uzun hizmet ömrü gibi avantajları nedeniyle seçilmiştir. Poliürea malzemesi, CFTP kompozit numunelerine Şekil 3.5'te gösterilen makine sistemleri aracılığıyla uygulanmıştır.



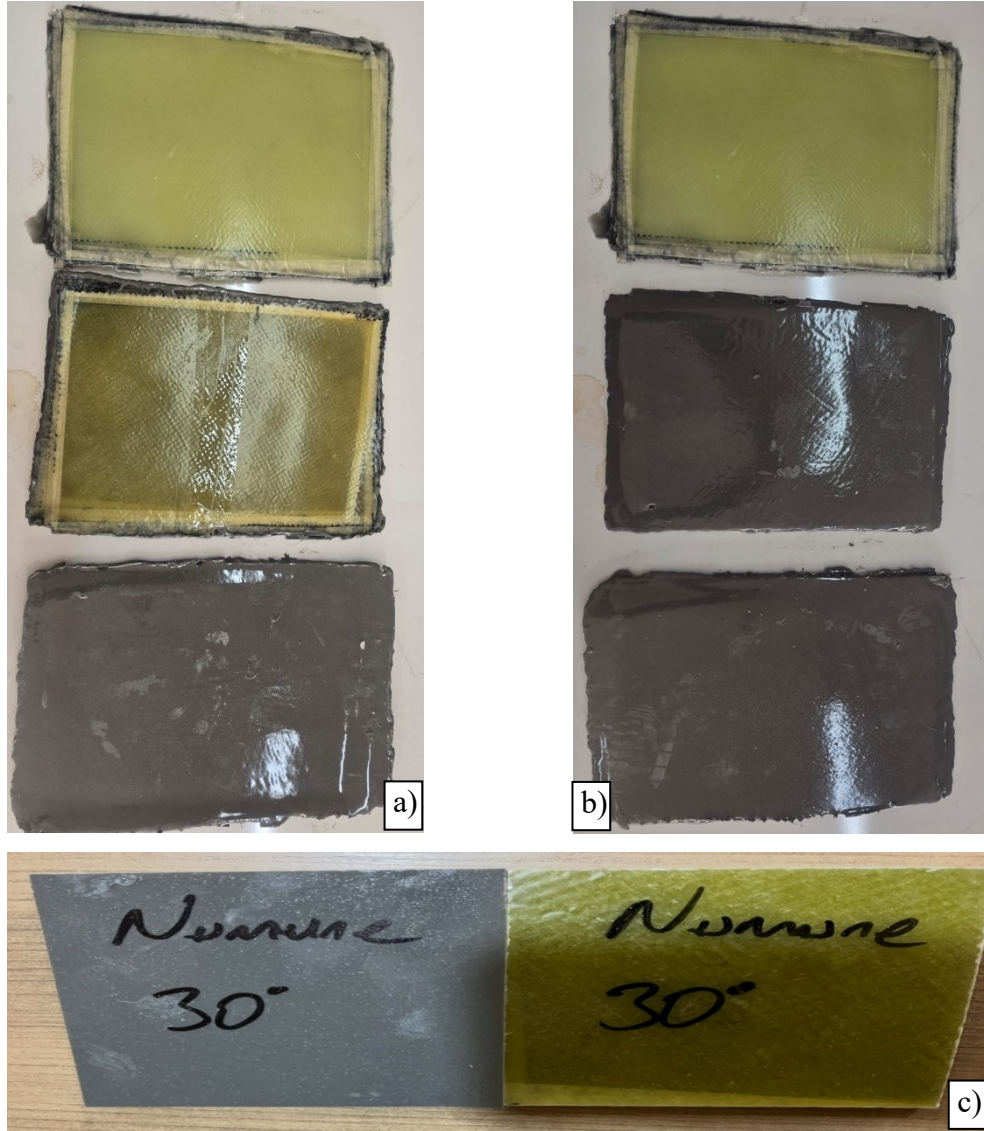
Şekil 3.5. CFTP kompozitler üzerine poliürea uygulanmasında kullanılan a) basınçlı ısıtma ekipmanları ve b) Poliürea bileşimi spreyci kaplama sistemi

Uygulama öncesinde, poliürea kaplamanın yüzeye iyi yapışabilmesini sağlamak amacıyla CFTP kompozitlerin yüzeyleri zımparalanarak pürüzlendirilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Poliürea kaplama öncesinde zımparalanan CFTP kompozit numuneleri

0°, 15°, 30° ve 45° oryantasyon açılarında üretilen CFTP kompozitlerin hem tek yüzeyi hem de çift yüzeyi poliürea ile aynı şartlar ve standartlar altında kaplanmıştır. Poliürea ile kaplanmış örnek CFTP kompozit numunelere ait görseller Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Poliürea kaplama işlemi uygulanmış a) ön yüzey, b) arka yüzey ile c) kaplanmış ve kaplanmamış yüzey (oryantasyon açısı 30°) CFTP kompozitler

3.3. Darbe Deney Prosedürü

Farklı oryantasyon açılara sahip poliürea kaplı ve kaplamasız CFTP kompozitlerin darbe sonrası mekanik tepkilerinin değerlendirilmesi amacıyla, numunelere düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar, Hitit

Üniversitesi laboratuvarlarında bulunan Instron/CEAST 9350 marka düşen ağırlık darbe test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler, ASTM D7136 standardına uygun şekilde ve 60 J sabit darbe enerjisi altında yürütülmüştür.

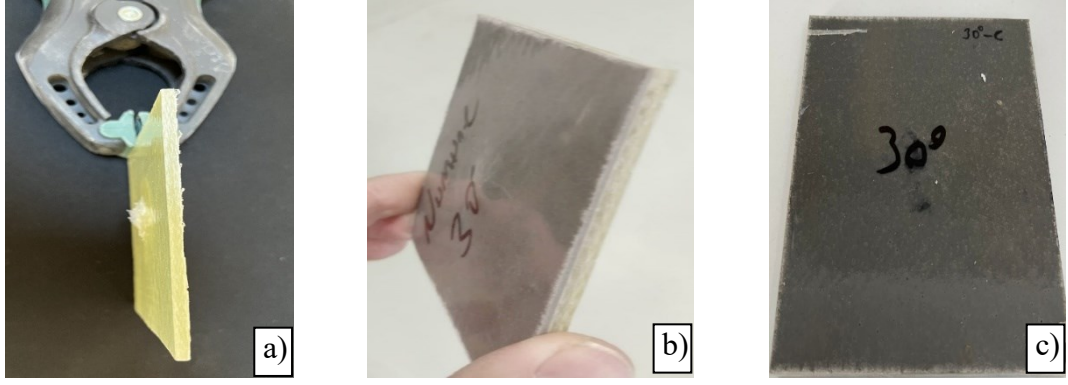
Test sürecinde kullanılan numuneler, üç farklı kaplama konfigürasyonunda (kaplamasız, tek taraflı kaplı ve çift taraflı kaplı) ve dört farklı oryantasyon açısında (0° , 15° , 30° ve 45°) hazırlanmıştır. Her numune grubu, önceden kesilmiş $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ boyutlarında olup, darbe testi sırasında cihaz, belirlenen yükseklikten kontrollü hızda düşen darbe başlığı aracılığıyla numuneye enerji iletmiştir. Her test esnasında numunenin maksimum darbe kuvveti, yer değiştirme miktarı ve emilen enerji değerleri cihaz yazılımı tarafından eşzamanlı olarak kaydedilmiştir.

Uygulanan deneysel protokol sayesinde, farklı kaplama koşulları ve oryantasyon açılarının kompozit malzemelerin darbe dayanımı üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenmiştir. Deney cihazının görüntüsü Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Ağırlık düşürme deney düzeneği

Darbe test sonrasında kaplamasız, tek yüzü poliürea kaplı ve iki yüzü poliürea kaplı CFTP kompozit numunelere ait örnek görsel Şekil 3.9’da verilmiştir.

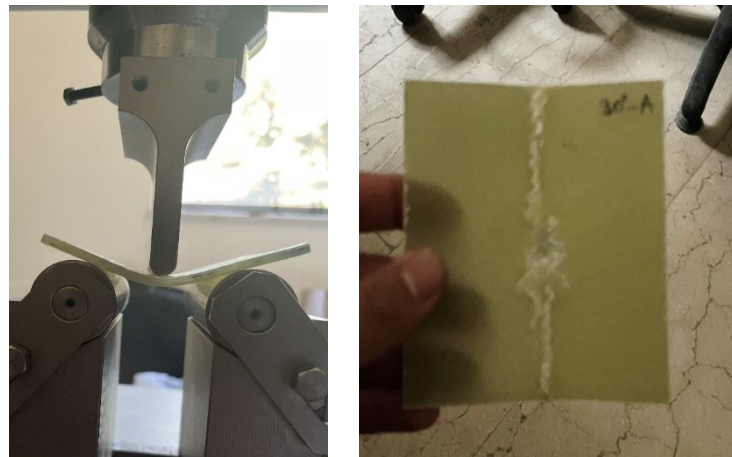


Şekil 3.9. CFTP kompozitlerin a) kaplamasız, b) tek taraflı kaplamalı ve c) çift taraflı kaplamalı darbe sonrası görüntüleri

3.4. Eğilme Test Prosedürü

Darbe testine tabi tutulan CFTP kompozit numunelerin yapısal bütünlüğü ve enerji emme kapasiteleri değerlendirildikten sonra, darbe sonrası mekanik performansın daha kapsamlı analiz edilebilmesi amacıyla, darbe testine tabi tutulan ve tutulmayan tüm CFTP kompozitlere üç nokta eğilme testi uygulanmıştır. Bu deneysel süreç, Batman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi laboratuvarlarında bulunan Shimadzu marka AG-IC universal test cihazı kullanılarak, 1,25 mm/dk hızda ve 250 kN yük kalibrasyonunda gerçekleştirilmiştir. Deneyler, ASTM D7264 standardı esas alınarak sabit test koşullarında yürütülmüştür.

Deney sırasında maksimum eğilme kuvveti ve yer değiştirme miktarı, yazılım tabanlı ölçüm sistemleri aracılığıyla kaydedilmiştir. Eğilme testi sırasında ve sonrasında test uygulamasına ait örnek görüntü Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.10. Darbe sonrası kaplamasız numunenin eğilme sonrası görüntüsü

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, cam fiber malzeme kullanılarak farklı istifleme açılarıyla üretilen kaplamasız, tek taraflı ve çift taraflı poliürea kaplı cam fiber takviyeli polimer (CFTP) kompozit malzemelere uygulanan darbe dayanımı ve darbe sonrası eğilme testlerine ait bulgular sunulmuştur. Ayrıca, darbe öncesi ve sonrası gerçekleştirilen eğilme testleri ile darbenin kompozitlerin eğilme dayanımı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen veriler grafik ve tablo biçiminde sunularak tartışılmıştır.

4.1. Darbe Deneyi Bulguları

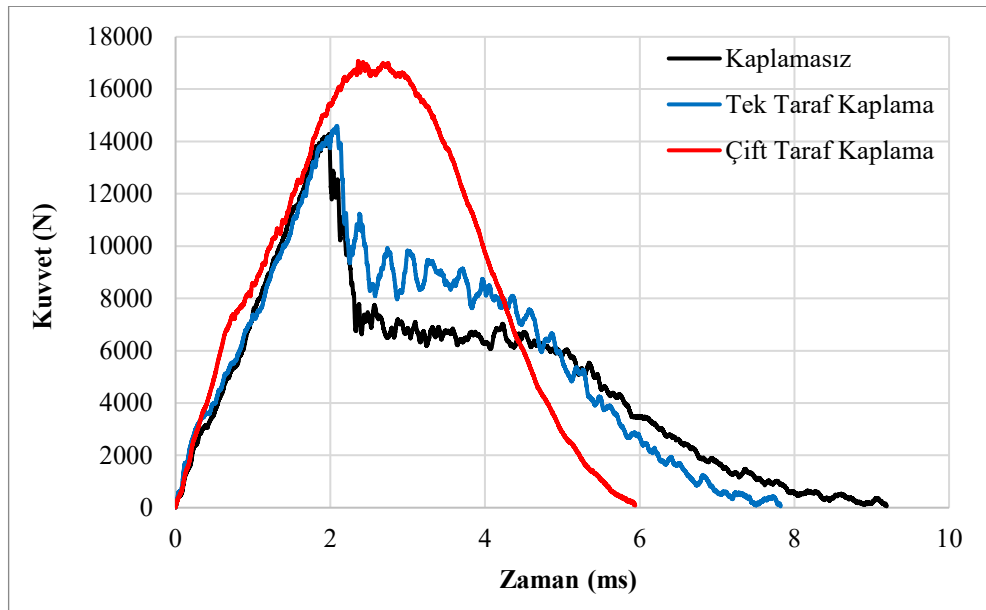
Farklı fiber yerleşim açlarına sahip kaplamasız, tek taraflı ve çift taraflı poliürea kaplanmış CFTP kompozit numuneler düşük hızlı darbe testlerine tabi tutulmuş; bu testler sonucunda kuvvet-zaman, enerji-zaman ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen bu eğriler, aşağıda her biri kendi başlığı altında sunulmuş ve detaylı şekilde analiz edilmiştir.

4.1.1. Kuvvet-zaman eğrileri

Darbe testleri sonucunda elde edilen kuvvet-zaman eğrileri, darbe uygulayıcısı ile numune arasındaki etkileşimin zamana bağlı olarak nasıl geliştiğini ortaya koymaktadır. Eğrinin ilk bölümünde, genellikle kuvvetin zamanla neredeyse doğrusal bir şekilde arttığı gözlemlenir. Bu aşama, darbe uygulayıcısının numuneye yalnızca mekanik temas sağladığı ve yapının elastik deformasyon gösterdiği başlangıç safhasını temsil eder. Kompozit yapının darbe enerjisi belirli bir seviyeye ulaştığında ise mikro ölçekte hasar mekanizmaları aktive olur. Bu hasarların başlamasıyla birlikte kuvvet-zaman eğrisinde düzensiz dalgalanmalar ve salınımlar gözlenir. Darbe enerjisinin daha da artması hâlinde, kompozit yapının arka yüzeyinde ayrılma veya kırılma gibi daha ciddi hasar türleri meydana gelir ve bu durum, eğride keskin bir kuvvet düşüşü ile kendini gösterir. Öte yandan, darbe enerjisi malzemenin elastik sınırları içinde kaldığında ve herhangi bir hasar oluşmadığında, kuvvet-zaman eğrisi daha düzenli bir biçimde yükselip düşer. Bu

durumda eğrinin ilk bölümündeki doğrusal artış sonrası kuvvet maksimuma ulaştıktan sonra yavaşça azalır ve malzeme elastik deformasyon sınırları içerisinde kalarak orijinal şekline döner. Böylece eğride dalgalanma veya keskin düşüşler gözlenmez ve malzeme darbe enerjisini hasarsız şekilde sönümlenmiş olur. Bu genel eğri davranışları, farklı yapısal özelliklere sahip numuneler karşılaştırıldığında daha belirgin hâle gelmektedir (Sharma ve ark., 2019; Sevkati ve ark., 2009; Păduraru ve ark., 2013).

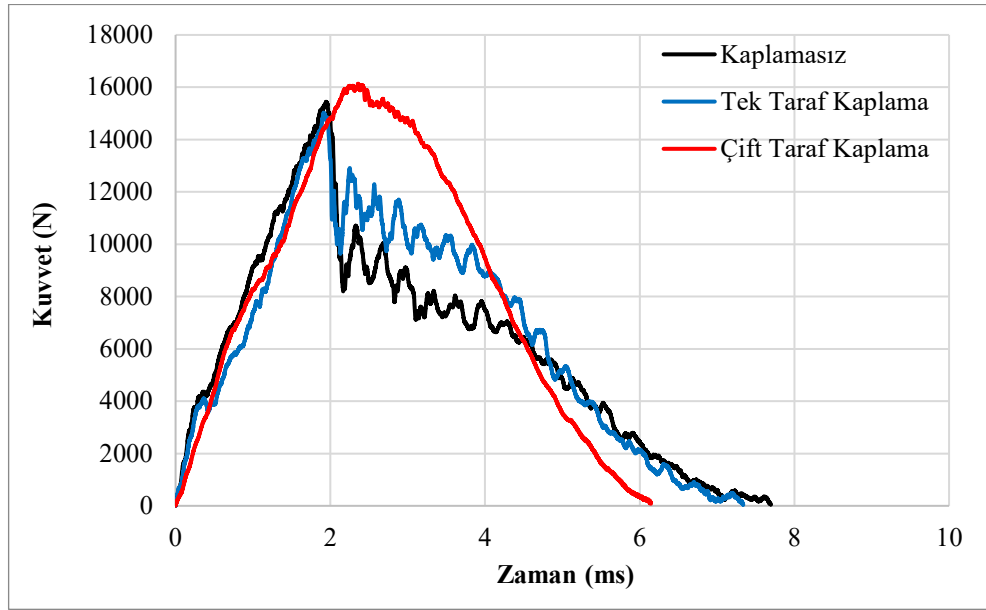
Farklı fiber oryantasyon açılara sahip kaplamasız, tek tarafı ve çift tarafı poliürea ile kaplanmış CFTP kompozit numunelere uygulanan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet-zaman eğrileri Şekil 4.1–Şekil 4.4’te verilmiştir.



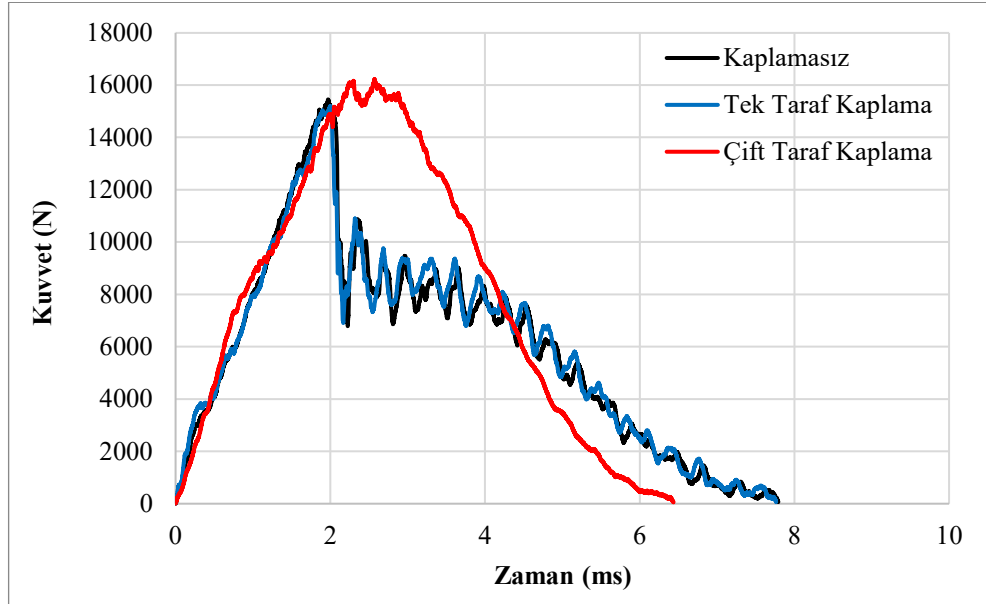
Şekil 4.1. 0° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait kuvvet-zaman eğrileri

Şekil 4.1’de, oryantasyon açısı 0° olan numunelerin kuvvet-zaman grafikleri incelendiğinde; çift tarafı poliürea kaplı CFTP kompozit numunesinin eğrisi, kaplamasız ve tek tarafı kaplı numunelerden farklılık göstermektedir. Çift tarafı kaplı numunenin kuvvet-zaman eğrisi konkav bir formda olup, kuvvet maksimum değeri olan 17075,82 N’a ulaştıktan sonra yaklaşık 5,94 ms içinde sifira inmiştir. Eğrinin ilk bölümünde bir artış gözlenmiş, maksimum kuvvete ulaşıldıktan sonra ise kuvvette yavaş bir azalma meydana gelmiş ve malzeme elastik deformasyon sınırları içinde kalmıştır. Buna karşın, kaplamasız numune ile darbe enerjisini fiber tarafından alan tek tarafı kaplı numunenin kuvvet-zaman eğrileri benzer davranışlar sergilemiş, ancak maksimum kuvvet ve maksimum zaman büyüklüklerinde farklılıklar görülmüştür. Tek tarafı kaplı numunenin

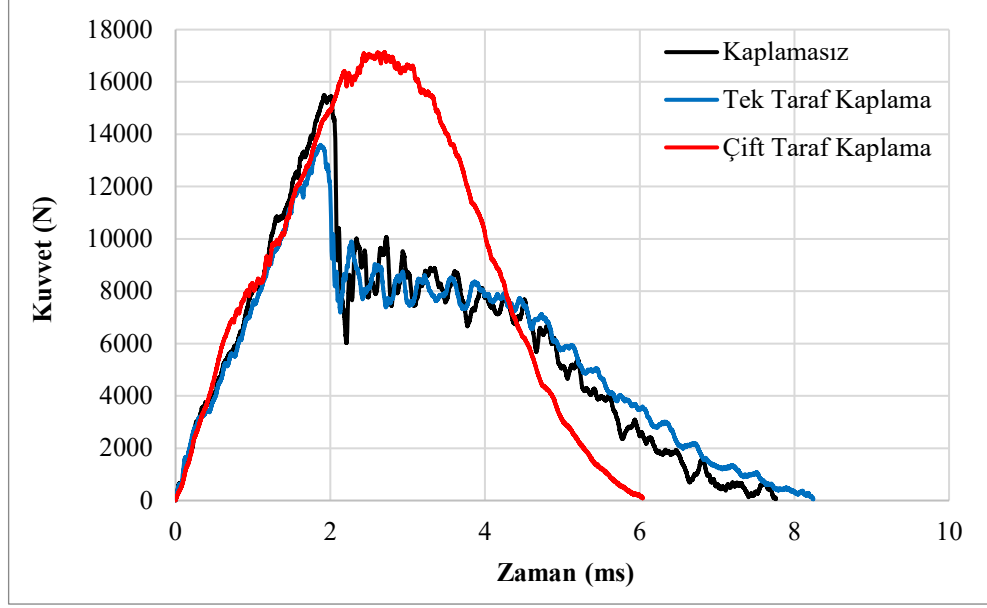
maksimum kuvveti 14593,40 N iken, kaplamasız numunede bu değer 14284,94 N olarak ölçülmüştür. Her iki eğride de maksimuma ulaşıldıktan sonra ani düşüşler gözlenmiş, eğrilerde dalgalanma ve keskin inişler meydana gelmiştir. Bu durum, kompozitte hasar mekanizmalarının oluştuğunu göstermektedir. Tek tarafı kaplı numunede kuvvet, 7,82 ms’de sıfıra inerken, kaplamasız numunede bu süre 9,19 ms civarında gerçekleşmiştir.



Şekil 4.2. 15° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait kuvvet-zaman eğrileri



Şekil 4.3. 30° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait kuvvet-zaman eğrileri



Şekil 4.4. 45° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait kuvvet-zaman eğrileri

Şekil 4.2–Şekil 4.4’te farklı oryantasyon açıları için elde edilen kuvvet-zaman grafikleri incelendiğinde, elde edilen eğrilerin Şekil 4.1’de verilen eğrilere benzer olduğu görülmüştür.

Şekil 4.2’de, oryantasyon açısı 15° olan numunelerin kuvvet-zaman grafikleri incelendiğinde; maksimum kuvvet değerinin çift tarafı kaplı numunede 15533,49 N, tek tarafı kaplı numunede 15026,72 N ve kaplamasız numunede ise 15445,36 N olduğu gözlemlenmiştir. Kuvvetin sıfıra inme süreleri ise çift tarafı kaplı numunede 6,13 ms, tek tarafı kaplı numunelerde 7,34 ms ve kaplamasız numunede ise 7,69 ms olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.3’te oryantasyon açısı 30° olan numunelere ait kuvvet-zaman grafikleri incelendiğinde, en yüksek kuvvet değeri çift tarafı kaplı numunede ölçülmüş olup 16231,21 N olarak kaydedilmiştir. Bunu 15452,70 N ile kaplamasız ve 15195,65 N ile tek tarafı kaplı numuneler takip etmiştir. Kuvvetin sıfıra inme süresi diğer oryantasyon açılı numunelerde olduğu gibi bu numunede de çift tarafı kaplı numunede olmuştur. Çift tarafı kaplı numunede kuvvet yaklaşık 6,43 ms’de sıfıra ulaşırken, kaplamasız numunede bu süre 7,79 ms, tek tarafı kaplı numunede ise 7,66 ms olarak gerçekleşmiştir.

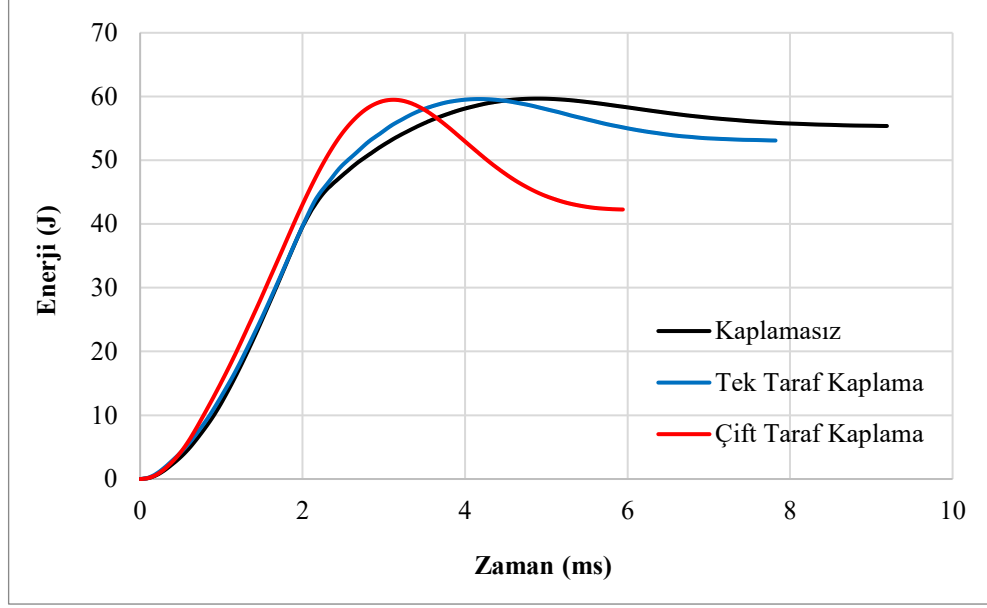
Şekil 4.4’te yer alan kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde ise çift tarafı kaplı numune 17141,92 N ile en yüksek maksimum kuvvet değerine ulaşmıştır. Bu numunede kuvvetin sıfıra inme süresi ise 6,04 ms olarak kaydedilmiştir. Kaplamasız numune, maksimum 15496,77 N kuvvet göstermiş ve kuvvet 7,76 ms’de sıfıra ulaşmıştır. Tek

tarafı kaplı numune ise 13594,56 N maksimum kuvvet değerine ulaşmış olup, bu değer diğer numunelere kıyasla daha yüksek bir seviyededir. Kuvvetin sıfıra inme süresi ise 8,24 ms olarak belirlenmiştir.

4.1.2. Enerji-zaman eğrileri

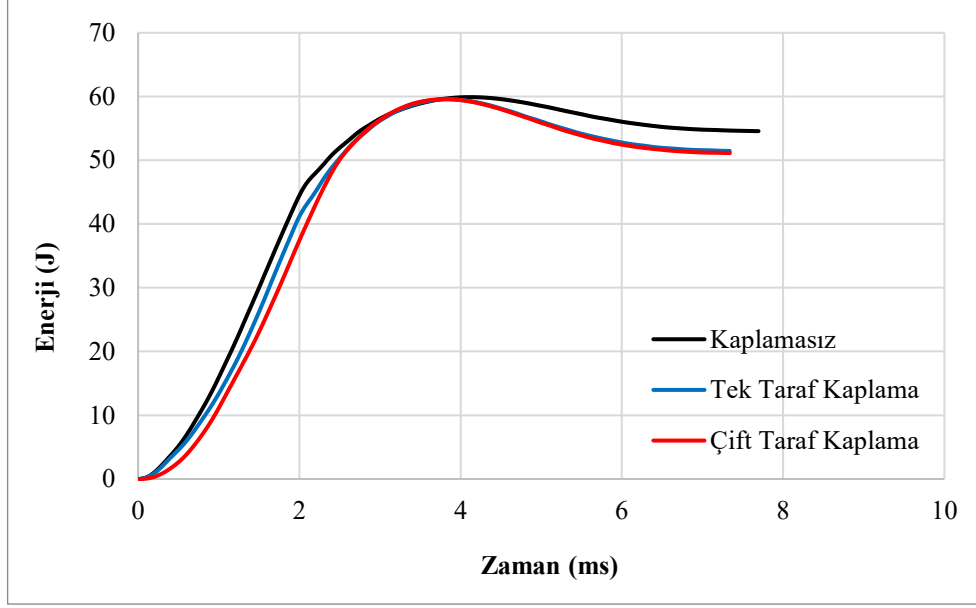
Darbe testlerinden elde edilen enerji-zaman eğrileri, kompozit malzemelerin darbe altındaki enerjisel tepkilerini analiz etmeye imkân tanır. Bu eğrilerdeki toplam enerji; darbe uygulayıcısının başlangıçtaki kinetik enerjisi, potansiyel enerji ve numune tarafından absorbe edilen enerjinin toplamı olarak tanımlanır. Testin başında sistemin enerjisi tamamen kinetiktir. Zamanla, numunede oluşan deformasyonlarla enerjinin bir kısmı absorbe edilir, geri kalanı ise elastik deformasyonla geçici olarak depolanır. Darbe enerjisinin büyük bölümü absorbe edildiğinde, eğri sürekli artar ve ardından rebound (geri sıçrama) etkisiyle maksimum noktadan sonra azalma gözlenir. Bu evrede darbe uygulayıcı geri sıçrar ve bir miktar enerji sisteme geri döner. Enerji zamanla sabitlenerek numune tarafından absorbe edilen kalıcı enerjiyi yansıtır (Cantwell ve Morton, 1991; Sevkat ve ark., 2009; Giasin ve ark., 2021).

Darbe etkisi altındaki numunelerin zamana bağlı olarak ne kadar enerjiyi absorbe ettiğini ve bu enerjinin ne ölçüde kalıcı deformasyona dönüştüğünü ortaya koymak amacıyla, farklı oryantasyon açılarına sahip kaplamasız ve kaplamalı CFTP kompozitlere ait enerji-zaman eğrileri oluşturulmuştur. Söz konusu eğriler Şekil 4.5–4.8’de verilmiştir.



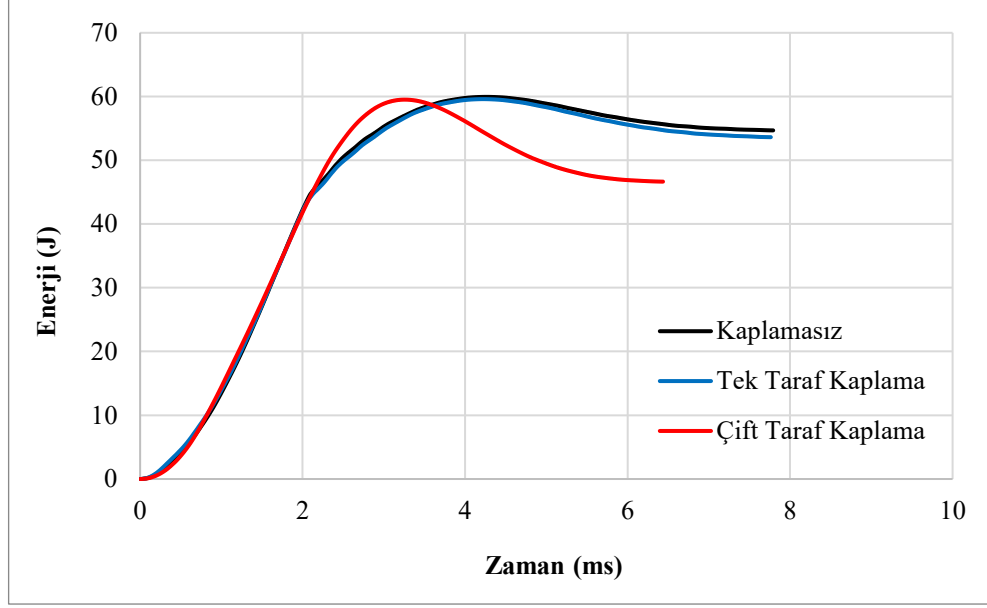
Şekil 4.5. 0° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait enerji-zaman eğrileri

Şekil 4.5'teki grafik incelendiğinde, çift taraflı kaplı numunenin enerji-zaman eğrisinin, diğer iki numuneye kıyasla belirgin şekilde farklılaştığı görülmektedir. Bu numune, yaklaşık 2,8 ms sürede maksimum enerji seviyesine ulaşmış ve ardından enerjide keskin bir azalma gözlemlenmiştir. Bu hızlı düşüşün nedeni, darbe sonrası enerjinin önemli bir kısmının rebound etkisiyle darbe uygulayıcıya geri dönmesi olarak düşünülmektedir. Bu numunenin enerji seviyesi 42,264 J değerinde sabitlenmiş olup, bu durum deformasyon sürecinin tamamlandığını göstermektedir (Karakaya, 2025). Diğer yandan, tek taraflı kaplanmış ve kaplamasız CFTP numunelerinin enerji-zaman eğrileri 2,5 ms'ye kadar benzer bir davranış sergilemiştir. Bu noktadan sonra ise farklılıklar belirginleşmiştir. Tek taraflı kaplanmış numune maksimum enerjiye 4,0 ms'de ulaşırken, kaplamasız numune bu değere 4,5 ms'de ulaşmıştır. Tek taraflı kaplı numune çift taraflı kaplı numuneden yüksek, kaplamasız numuneden düşük bir değerde sabit bir değere ulaşmıştır. Tek taraflı kaplı numune 53,086 J, kaplamasız numune ise 55,363 J değerinde sabitlenmiştir. Bu durum, tek taraflı kaplanmış numunenin orta düzeyde bir enerji kaybı yaşadığını ve sınırlı bir rebound etkisi oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Kaplamasız numunenin ise darbe enerjisinin daha büyük bir kısmını kalıcı deformasyon yoluyla absorbe ettiği, bu nedenle uygulayıcıya daha az enerji geri ilettiği söylenebilir.



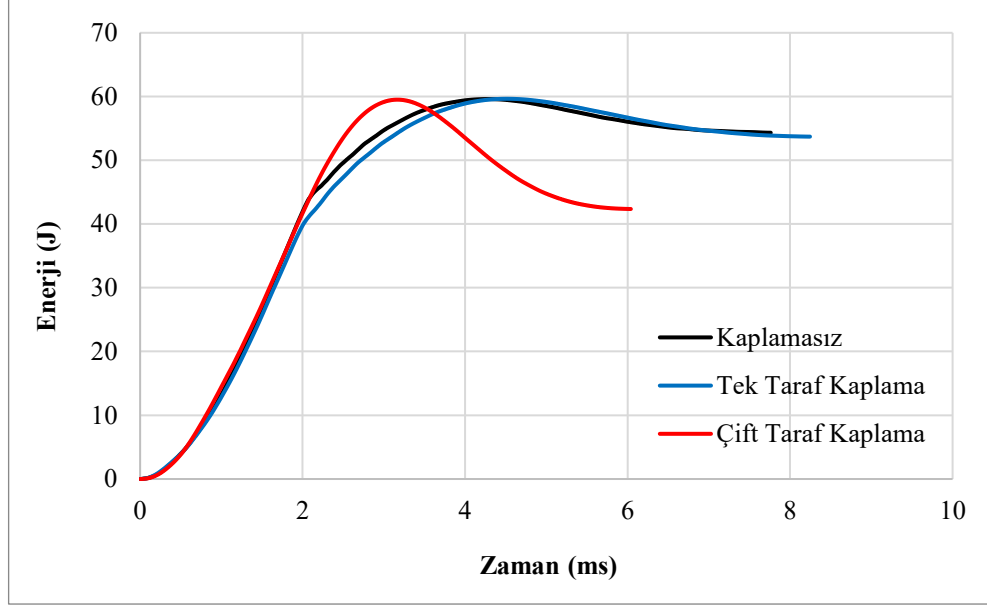
Şekil 4.6. 15° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait enerji-zaman eğrileri

Şekil 4.6'da verilen enerji-zaman eğrileri incelendiğinde, tüm numunelerin genel olarak benzer bir eğri formuna sahip olduğu görülmektedir. Ancak dikkat çeken temel farklılık, numunelerin maksimum enerjiye ulaşma süreleri ile darbe süresinin sonlanma anlarında ortaya çıkan kısmi zaman farklarıdır. Özellikle kaplamasız numunenin, kaplamalı örneklerle kıyasla daha düşük bir rebound etkisi sergilediği gözlemlenmiştir. Kaplamasız numune, darbe uygulayıcıyla yaklaşık 7,7 ms süreyle temas hâlinde kalırken; tek tarafı ve çift tarafı kaplamalı numunelerde bu temas süresi sırasıyla yaklaşık 6,7 ms ve 7,2 ms olarak gerçekleşmiştir. Bu farklılık, kaplamasız numunenin darbe enerjisini daha uzun sürede absorbe ettiğini ve darbe uygulayıcıyı geri itme süresinin daha gecikmeli olduğunu göstermektedir. Temas süresindeki uzama, malzemenin darbe enerjisini daha etkin bir şekilde sönümlediğini ve yapısal deformasyonun daha geniş bir alana yayıldığını işaret etmektedir. Kaplamalı numunelerde ise maksimum enerji seviyesine ulaşıldıktan sonra daha belirgin bir enerji kaybı yaşandığı ve enerji-zaman eğrilerinin yaklaşık 51 J seviyesine kadar düşerek dengeye ulaştığı görülmüştür. Bu durum, ortalama rebound enerjisinin yaklaşık 9 J düzeyinde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Öte yandan, kaplamasız numunede eğri yaklaşık 54,555 J seviyesine gerileyerek sabitlenmiş; rebound ise yaklaşık 5 J olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.7. 30° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait enerji-zaman eğrileri

Şekil 4.7’de verilen, oryantasyon açısı 30° olan numunelere ait zamana bağlı enerji eğrileri, genel form itibarıyla Şekil 4.5’te yer alan 0° oryantasyonlu numunelerin eğrileriyle benzerlik göstermektedir. Ancak, sayısal değerler açısından dikkat çekici farklılıklar mevcuttur. Enerji eğrilerinin maksimum noktaya ulaşma süreleri ve darbe etkisinin sona erdiği zaman dilimleri karşılaştırıldığında, kaplamasız numunenin yaklaşık 7,8 ms süresince darbe uygulayıcıyla temas hâlinde kalarak enerjisi daha kararlı ve uzun süreli bir şekilde absorbe ettiği görülmektedir. Buna karşılık, tek tarafı kaplı numune benzer maksimum enerji değerine daha kısa sürede ulaşmış ve darbe etkisini yaklaşık 7,6 ms’de sonlandırmıştır. En erken enerji sönümlenmesi ise çift tarafı kaplı numunede gerçekleşmiş olup, bu numune yaklaşık 6 ms’de darbe etkisini tamamlamıştır. Enerji eğrilerinin düşüş eğilimleri de kaplama durumuna göre farklılık göstermektedir. Çift tarafı kaplı numune, maksimumda ulaşılan yaklaşık 60 J’lik enerji seviyesinden, belirgin bir azalma ile 46,637 J’ye kadar düşmüş; bu da yaklaşık 13 J’lik bir rebound enerjisini işaret etmektedir. Bu durum, elastik geri tepme etkisinin kaplamalı yapıda daha baskın olduğunu göstermektedir. Kaplamasız ve tek tarafı kaplı numunede enerji seviyeleri sırasıyla 54,675 J ve 53,611 J’ye düşmüş, çift tarafı kaplı numuneden daha az rebound enerjisi ortaya koymuştur.



Şekil 4.8. 45° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait enerji-zaman eğrileri

Şekil 4.8'deki grafik incelendiğinde, oryantasyon açısı 45° olan CFTP kompozitlerde, kaplamasız numune, yaklaşık 7,8 ms süresince darbe uygulayıcı ile temas hâlinde kalarak maksimum enerjiyi absorbe etmiş ve enerji seviyesi 54,307 J'de dengeye ulaşmıştır. Tek tarafı kaplı numune ise maksimum enerjiye ulaştıktan sonra 53,694 J seviyesine kadar gerilemiş ve darbe etkisini yaklaşık 8,2 ms'de tamamlamıştır. Çift tarafı kaplı numune ise maksimum enerjiye ulaşma süresi bakımından en kısa tepki süresini sergilemiş (2,8 ms) ve ardından eğride keskin bir azalma göstermiştir. Enerji seviyesi 42,343 J düzeyinde sabitlenmiş, bu da yaklaşık 18 J'lık bir rebound enerjisine karşılık gelmektedir.

4.1.3. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri

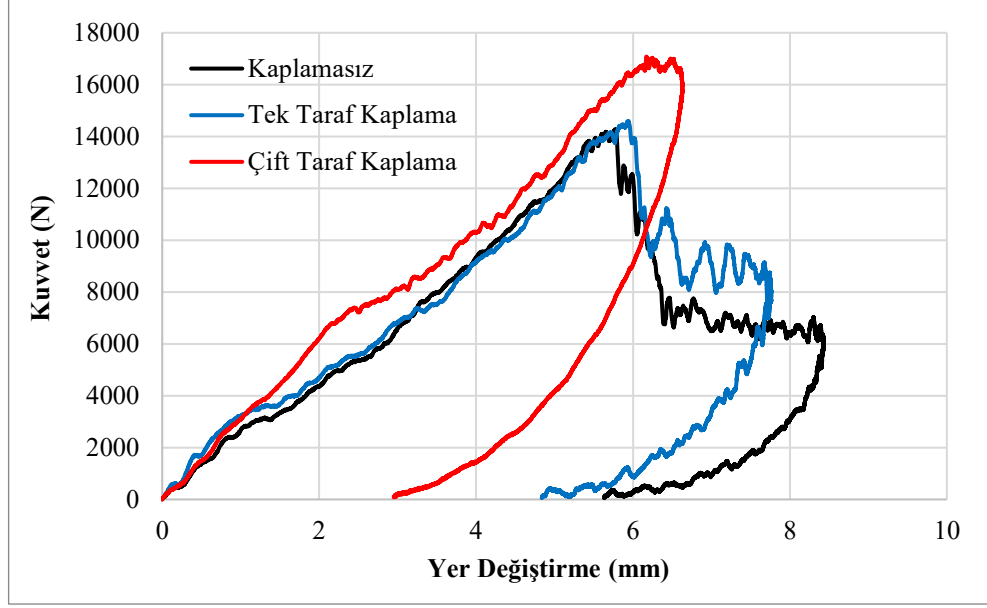
Kuvvet-yer değiştirme eğrileri, darbe sırasında uygulanan kuvvetin numune üzerinde oluşturduğu yer değiştirme (çökme miktarı) ile olan ilişkisini ortaya koyan önemli bir mekanik performans göstergesidir. Bu eğriler, özellikle rebound davranışının gözlemlendiği durumlarda tipik olarak kapalı döngü formu sergilemektedir. Eğrinin iniş eğilimindeki bölümü, darbe esnasında darbe uygulayıcısının numuneye tam anlamıyla nüfuz etmediğini; dolayısıyla kalıcı kırılma ya da delaminasyon gibi yıkıcı hasarların oluşmadığını işaret etmektedir. Döngü içerisinde kalan alan ise, malzeme tarafından absorbe edilen enerji miktarını temsil etmektedir (Belingardi ve Vadori, 2002).

Hasarın ilerleyişi ve malzemenin darbe karşısındaki tepkisi, darbe uygulayıcısının yükleme ve boşaltma evrelerinde eğride oluşan salınımlarla tanımlanabilmektedir. Eğri üzerindeki bu düzensizlikler, iç yapıda gelişen lif kırığı, matris çatlağı ve tabakalar arası ayrılma gibi hasar türlerinin göstergesi niteliğindedir. Buna karşılık, eğrinin daha düzenli ve kesintisiz bir yapıya sahip olması, darbe sırasında numunenin daha rijit davrandığını ve hasar şiddetinin sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır (Cantwell ve Morton, 1991; Giasin ve ark., 2021).

Darbe etkisi altındaki numunelerin uygulanan kuvvet karşısında ne düzeyde deformasyon gösterdiğini ve bu deformasyonun elastik mi yoksa kalıcı mı olduğunu değerlendirebilmek amacıyla, farklı oryantasyon açılarına sahip kaplamasız ve kaplamalı CFTP kompozitlere ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğriler, Şekil 4.9– Şekil 4.12’de verilmiştir.

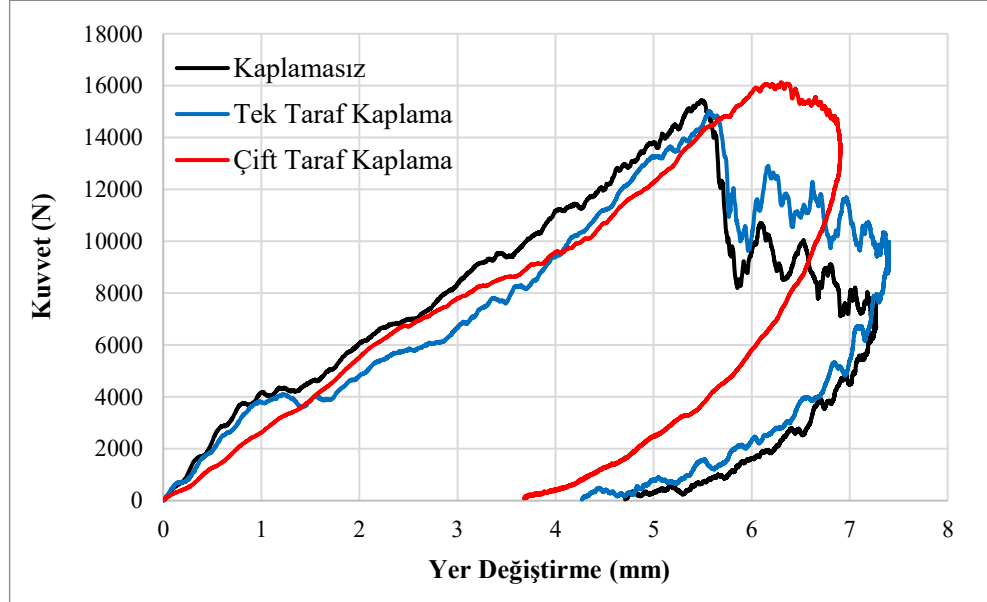
Şekil 4.9–Şekil 4.12’de verilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, tüm numuneler arasında çift taraflı poliürea kaplı olanların, yani darbe enerjisini doğrudan kaplama yüzeyinden alan kompozitlerin kısmi bir rebound davranışı sergilediği gözlemlenmiştir. Buna karşın, kaplamasız numuneler ile darbe enerjisini kaplamasız yüzeyden alan tek taraflı kaplı numunelerde hem rebound etkisi hem de kısmi penetrasyon (delinme) meydana gelmiştir.

Çift taraflı kaplı numunelerde, uygulanan kuvvetin artmasıyla birlikte yer değiştirme artmıştır. Kuvvetin maksimum değere ulaşmasının ardından, yer değiştirme değerinde kademeli bir azalma gözlenmektedir. Bu durum, darbe uygulayıcısının geri sıçrama hareketine başladığını ve yapının elastik geri kazanım davranışı sergilediğini göstermektedir. Diğer yandan, kaplamasız ve darbe enerjisini kaplamasız taraftan alan tek taraflı kaplı numunelerde, kuvvetin artmasıyla birlikte yer değiştirme hızla artmış, ancak maksimum kuvvet noktasında malzeme yüzeylerinde kısmi penetrasyon meydana gelmiştir. Bu durum, kuvvet değerinde ani bir düşüşe neden olmuştur. Eğri üzerindeki bu ani düşüş, delinmenin başladığı ve katmanlar arası ayrılma gibi hasar mekanizmalarının devreye girdiği kritik noktaları işaret etmektedir. Bu aşamadan sonra eğrinin yatay seyrettiği bölge, hasarın ilerleyerek yapısal bütünlüğün bozulduğunu göstermektedir. Son olarak, eğrinin kuvvet bileşeninin sıfıra doğru yaklaşması, darbe uygulayıcısının malzeme ile olan temasını sonlandırarak rebound hareketini tamamladığı evreyi temsil etmektedir.

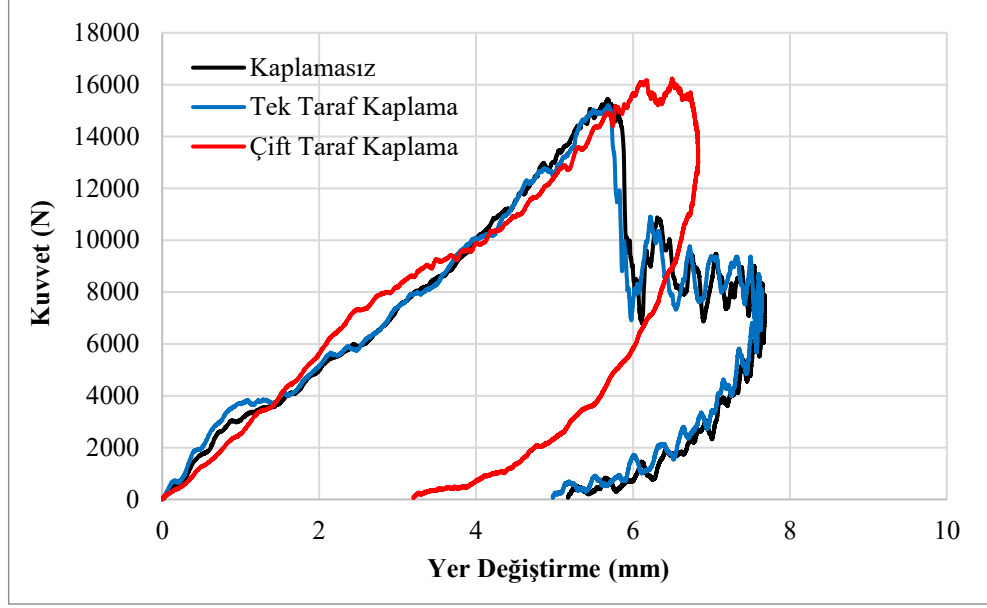


Şekil 4.9. 0° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Şekil 4.9 incelendiğinde, darbe etkisi altında en düşük yer değiştirme değerinin çift tarafı poliürea kaplı numunede gerçekleştiği görülmektedir. Bu numune, 6,628 mm'lik yer değiştirme sergilemiştir. Tek tarafı kaplı numune 7,761 mm, kaplamasız numune ise 8,434 mm yer değiştirme göstermiştir. Elde edilen bu bulgular doğrultusunda, kaplamasız numune; çift tarafı kaplı numuneye kıyasla yaklaşık %27,3, tek tarafı kaplı numuneye göre ise yaklaşık %8,7 oranında daha fazla deformasyon göstermiştir.

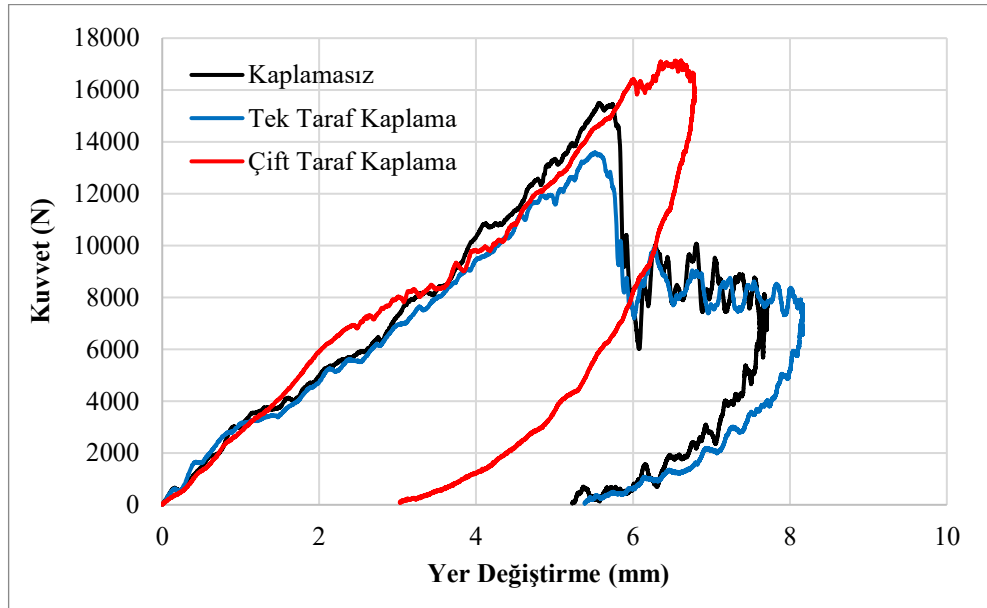


Şekil 4.10. 15° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri



Şekil 4.11. 30° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Şekil 4.10'daki oryantasyon açısı 15° olan numunelerde, kaplamasız ve tek tarafı kaplı numuneler yaklaşık 7,3 mm, çift tarafı kaplı numune ise 6,903 mm civarında yer değiştirme göstermiştir. Şekil 4.11'deki oryantasyon açısı 30° olan numunelerde ise kaplamasız numune 7,676 mm, tek tarafı kaplı numune 7,638 mm ve çift tarafı kaplı numune ise 6,830 mm yer değiştirme meydana gelmiştir. Bu veriler doğrultusunda, kaplamasız numunenin deformasyonu; çift taraf kaplamalı numuneye göre yaklaşık %12,9, tek taraf kaplamaya göre ise yaklaşık %0,5 oranında daha fazladır.



Şekil 4.12. 45° oryantasyonlu numunelerin darbe testine ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Şekil 4.12 incelendiğinde, oryantasyon açısı 45° olan numunelere ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri doğrultusunda, çift tarafı kaplı numune, 6,782 mm ile en düşük maksimum yer değiştirme değerine ulaşmış ve darbe etkisinin sona ermesiyle birlikte yer değiştirme seviyesi 3 mm civarında sabitlenmiştir. Kaplamasız numune, maksimum 7,709 mm yer değiştirme sergilemiş olup darbe uygulayıcının geri çekilmesiyle birlikte yer değiştirme değeri yaklaşık 5,25 mm seviyesinde kalmıştır. Tek tarafı kaplı numune ise yaklaşık 8,163 mm ile en yüksek yer değiştirme değerine ulaşmış ve darbenin ardından yer değiştirme değeri yaklaşık 5,39 mm düzeyinde sabitlenmiştir.

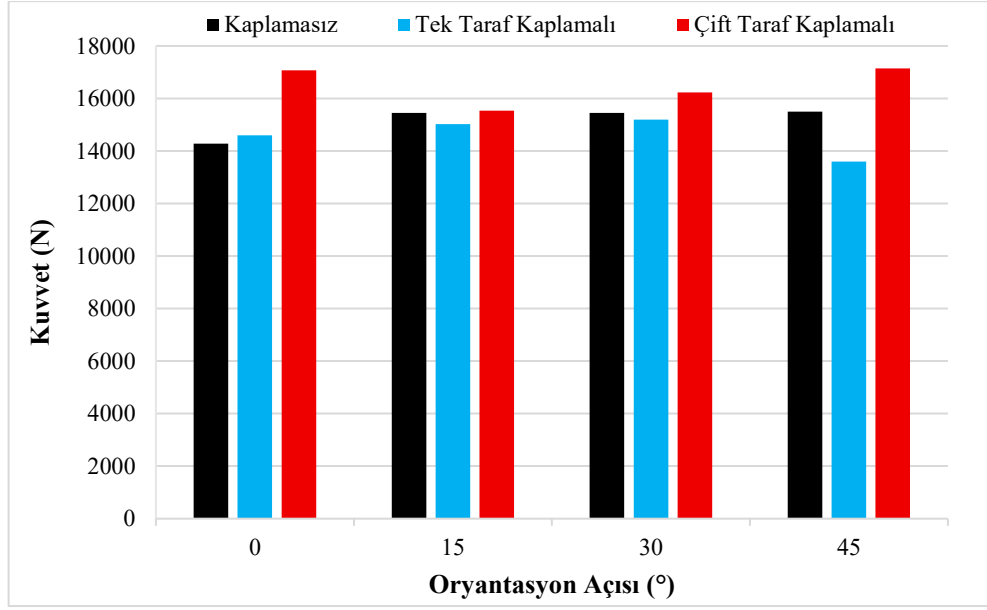
4.1.4. Darbe deneyi sonuçlarının karşılaştırmalı analizi

Düşük hızlı darbe deneylerinden elde edilen veriler ışığında kuvvet-zaman, enerji-zaman, kuvvet-yer değiştirme grafikleri her bir oryantasyon açısına sahip CFTP kompozitler için ayrıntılı olarak tartışılmıştır. 60 J olarak yapılan deneylerden elde edilen sayısal sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir.

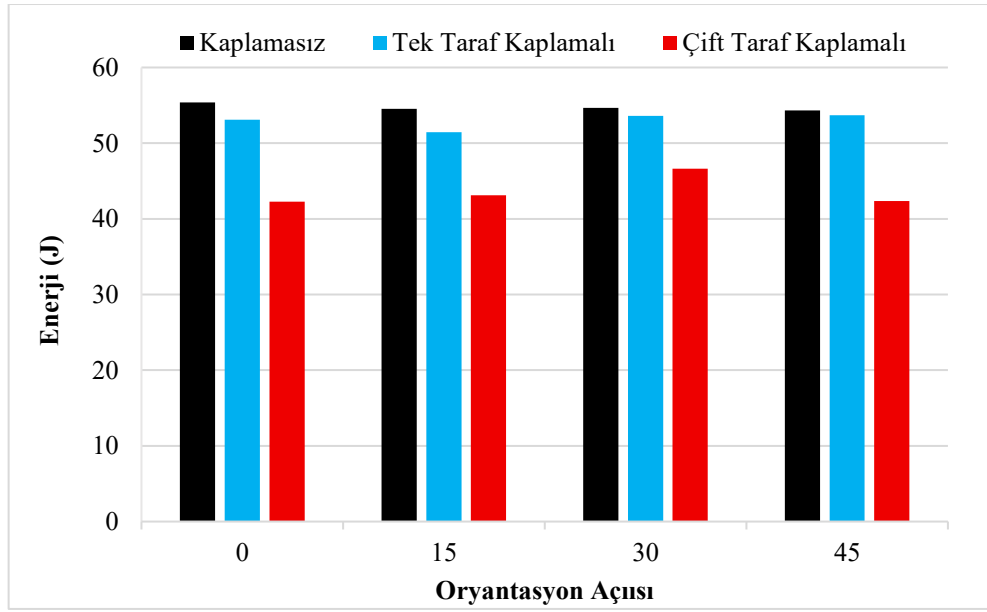
Tablo 4.1. Düşük hızlı darbe deneyi sonuçları

<i>Oryantasyon Açısı ($^\circ$)</i>	<i>Kaplamasız</i>			<i>Tek Taraf Kaplamalı</i>			<i>Çift Taraf Kaplamalı</i>		
	<i>F_{d_{mak}} (N)</i>	<i>E_A (J)</i>	<i>Y_{mak} (mm)</i>	<i>F_{d_{mak}} (N)</i>	<i>E_A (J)</i>	<i>Y_{mak} (mm)</i>	<i>F_{d_{mak}} (N)</i>	<i>E_A (J)</i>	<i>Y_{mak} (mm)</i>
0	14284,94	55,363	8,434	14593,40	53,086	7,761	17075,82	42,264	6,628
15	15445,36	54,555	7,268	15026,72	51,447	7,399	15533,49	43,108	6,903
30	15452,70	54,675	7,676	15195,65	53,611	7,638	16231,21	46,637	6,830
45	15496,77	54,307	7,709	13594,56	53,694	8,163	17141,92	42,343	6,782

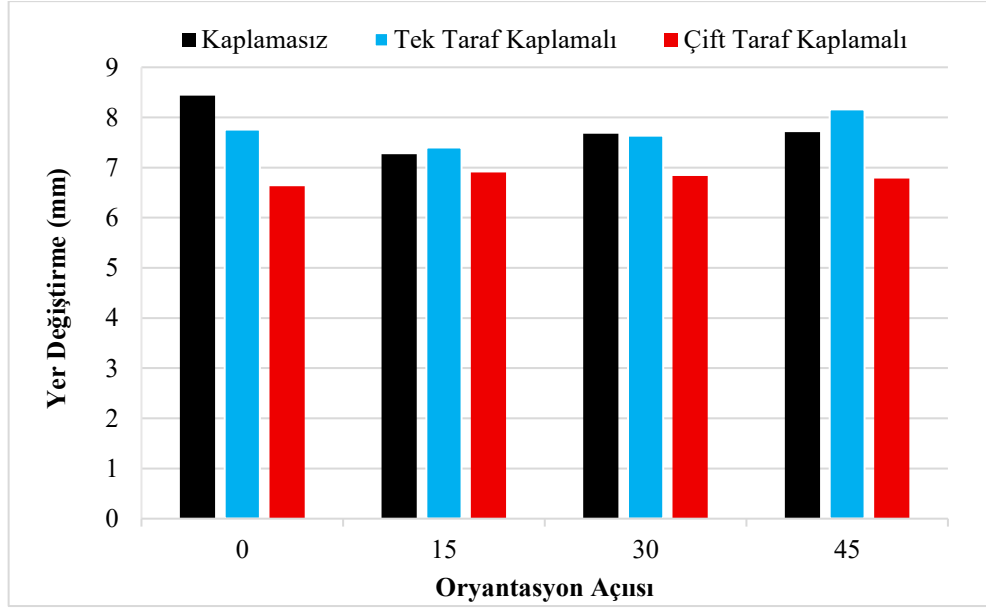
Tablo 4.1’de yer alan simgelerde; *F_{d_{mak}}*, uygulanan darbe sırasında numunenin maruz kaldığı maksimum kuvveti (N), *E_A*, darbe süresince absorbe edilen toplam enerjiyi (J) ve *Y_{mak}* ise oluşan maksimum yer değiştirme miktarını (mm) temsil etmektedir. Tablo 4.1’deki sayısal verilere bağlı olarak tüm oryantasyon açılı CFTP kaplamalı ve kaplamasız kompozitlerin düşük hızlı darbe sonucu elde edilen kuvvet, enerji ve yer değiştirme grafikleri sırasıyla Şekil 4.13–Şekil 4.15’te sütun grafiği halinde verilmiştir.



Şekil 4.13. CFTP kompozitlerin oryantasyon açısına bağlı maksimum darbe kuvveti tepkileri



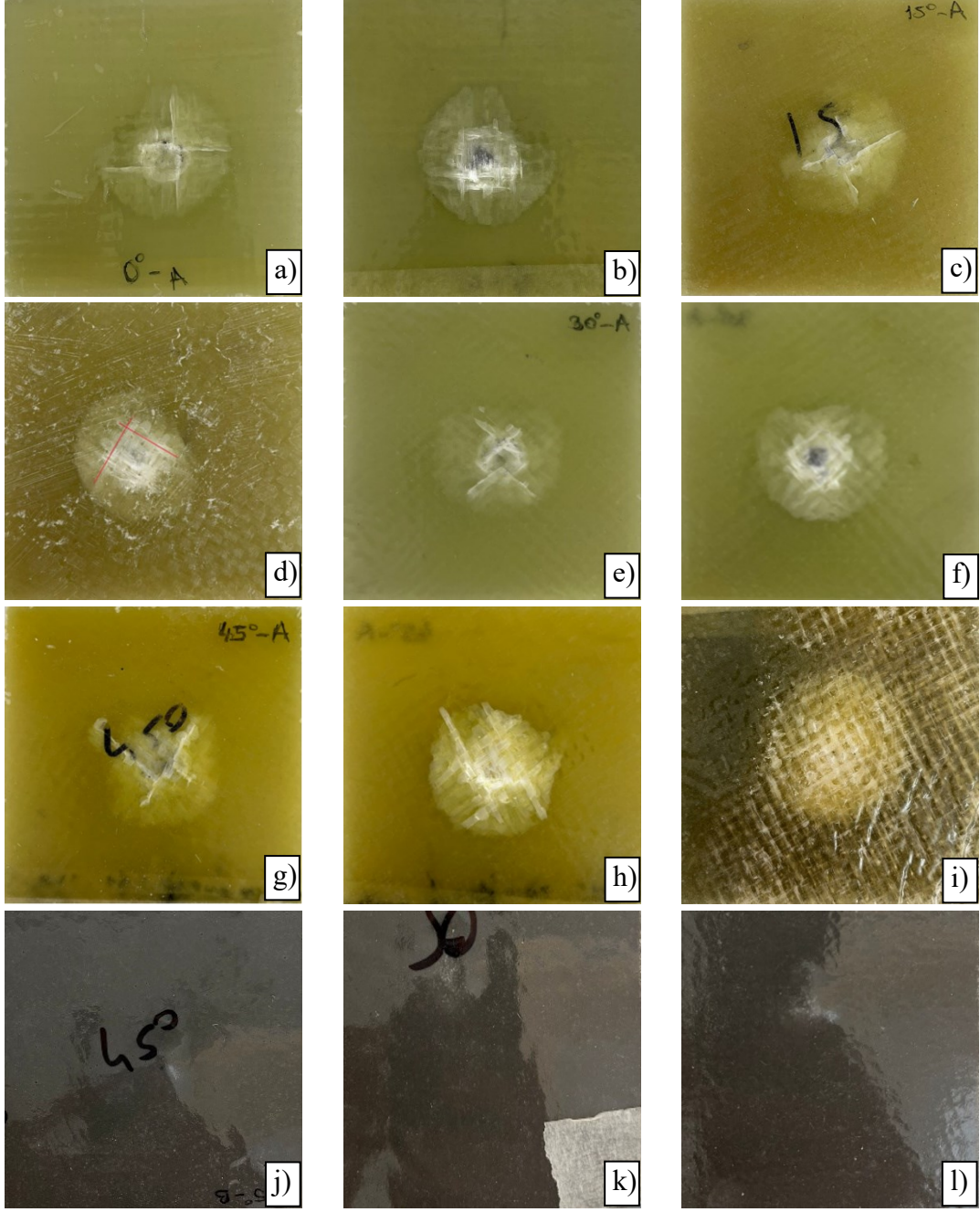
Şekil 4.14. Oryantasyon açısına göre CFTP kompozitlerde absorbe edilen darbe enerjisi



Şekil 4.15. CFTP kompozitlerde oryantasyon açısına bağlı maksimum yer değiştirme

Şekil 4.13–Şekil 4.15’te verilen kuvvet, enerji ve yer değiştirme grafikleri ayrıntılı olarak incelendiğinde, oryantasyon açısının darbe dayanımı üzerinde anlamlı bir etki oluşturmadığı görülmektedir. Bununla birlikte, 0° oryantasyon açısına sahip CFTP kompozit numunelerde maksimum kuvvet değeri bir miktar daha düşük, yer değiştirme miktarı ise kısmen daha yüksek bulunmuştur. Tüm oryantasyon açılı kompozitlerde absorbe edilen enerjiler birbirine oldukça yakın elde edilmiştir. Bu durum, literatürde benzer sonuçların bulunduğu çalışmalarda da belirtildiği gibi verilen enerji miktarının düşüklüğü, numunelerin daha fazla enerji dağıtabildiğini ve soğurabildiğini göstermiştir (Hashim ve ark., 2022). Diğer yandan, kaplamalı ve kaplamasız numuneler arasında darbe dayanımı açısından belirgin farklar gözlemlenmiştir. Özellikle çift tarafı kaplı numunelerde daha yüksek kuvvet değerleri, ancak daha düşük yer değiştirme ve absorbe edilen enerji değerleri elde edilmiştir. Bu numuneler kısmi bir rebound davranışı sergilemiştir. Buna karşılık, kaplamasız numuneler ile yalnızca darbe alan yüzeyi kaplı olan numunelerde hem rebound etkisi hem de kısmi penetrasyon gözlenmiştir. En belirgin deformasyonlar, kaplamasız numunelerde meydana gelmiştir. Şekil 4.16’da darbe testi sonrası numune yüzeylerinde oluşan deformasyonlara ait örnek görsellere yer verilmiştir.

Darbe testi sonrasında özellikle kaplamasız numunelerin darbe enerjisine maruz kalan ön yüzeylerinde, çatlak ilerleme yönünün fiber yerleşim yönüyle örtüştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum, çatlakların fiber yönüne bağlı olarak yayıldığını ortaya koymaktadır (Long ve ark., 2015; Bunea ve ark., 2019).



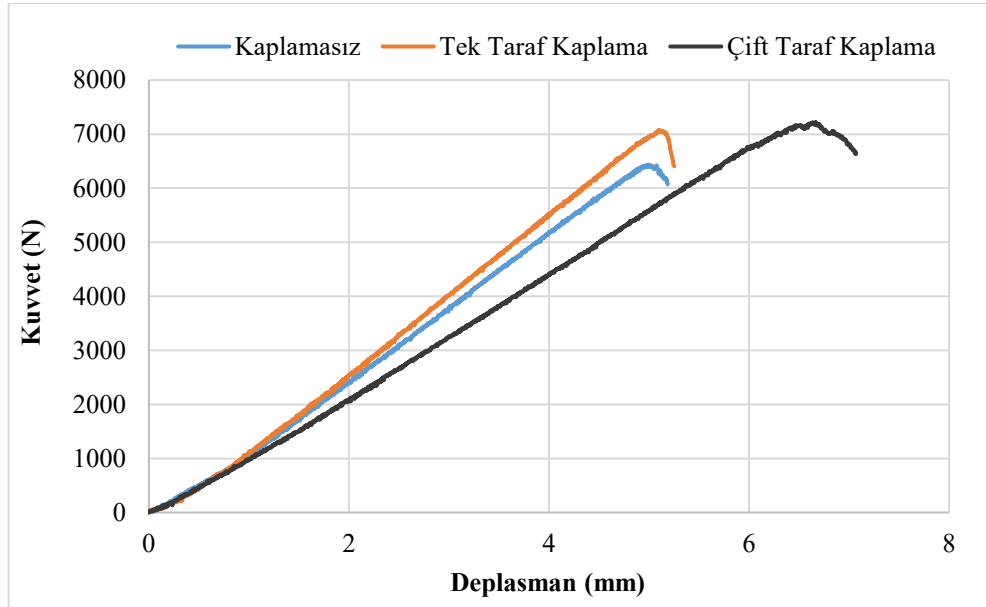
Şekil 4.16. Darbe testi sonrasında CFTP numunelerden Kaplamasız 0° a) ön yüz, b) arka yüz, Kaplamasız, 15° c) ön yüz, d) arka yüz, Kaplamasız, 30° e) ön yüz, f) arka yüz, Kaplamasız, 45° g) ön yüz, h) arka yüz, Tek tarafı kaplı, 45° i) ön yüz, j) arka yüz, Çift tarafı kaplı, 30° k) ön yüz, l) arka yüz bölgelerinde oluşan hasar görüntüleri

Kaplamasız numunelerde, darbe sonrasında ön yüzeyde impactor teması sonucu matris kırılması, fiber kırılması, fiber ayrılması ve ezilmeye bağlı delaminasyon bölgeleri oluşmuştur. Arka yüzeylerde ise yüksek düzeyde deformasyon meydana gelmiş, ancak ön yüzeyde gözlemlenen çatlak izleri arka yüzde oluşmamıştır. Darbe enerjisini fiber yönünden alan tek tarafı kaplı numunelerin ön yüzeylerinde de deformasyon gözlemlenmiş, ancak bu deformasyon kaplamasız numunelere kıyasla daha sınırlı

kalmıştır. Buna karşın, bu numunelerin arka yüzeylerinde ise poliürea kaplamada sadece plastik deformasyon izlerine rastlanmıştır. Çift tarafı kaplı numunelerde ise diğer numunelere kıyasla çok daha düşük düzeyde deformasyon meydana gelmiştir. Bu durum, poliürea kaplamanın deformasyon alanını sınırlayarak yapısal bütünlüğe katkı sağladığını göstermektedir.

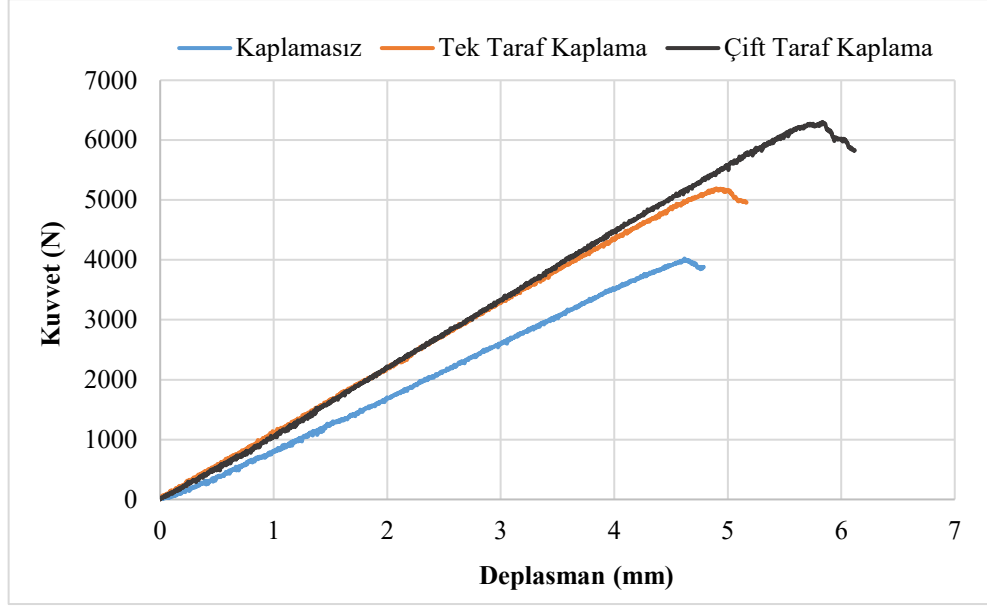
4.2. Darbe Öncesi ve Sonrası Eğilme Testi Bulguları

Oryantasyon açısı 0° olan kaplamalı ve kaplamasız numunelere ait darbe öncesi ve darbe sonrası eğilme testlerinden elde edilen kuvvet-deplasman grafiklerine sırasıyla Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de yer verilmiştir.



Şekil 4.17. 0° oryantasyonlu numunelerin darbe öncesi eğilme testine ait kuvvet-deplasman değişim eğrileri

Şekil 4.17’de, 0° oryantasyon açısına sahip numunelere ait darbe öncesi eğilme testi kuvvet-deplasman grafiği incelendiğinde; çift tarafı kaplı numune 7227 N maksimum kuvvet ve 6,67 mm deplasmanla en yüksek eğilme dayanımını ve sünekliği sergilemiştir. Tek tarafı kaplı numune, 7078 N kuvvet ve 5,10 mm deplasmanla daha kontrollü bir kırılma davranışı göstermiştir. Kaplamasız numune ise 6438 N maksimum kuvvete ve 4,99 mm deplasmana ulaşarak en düşük eğilme dayanımı ve sünekliği göstermiştir.



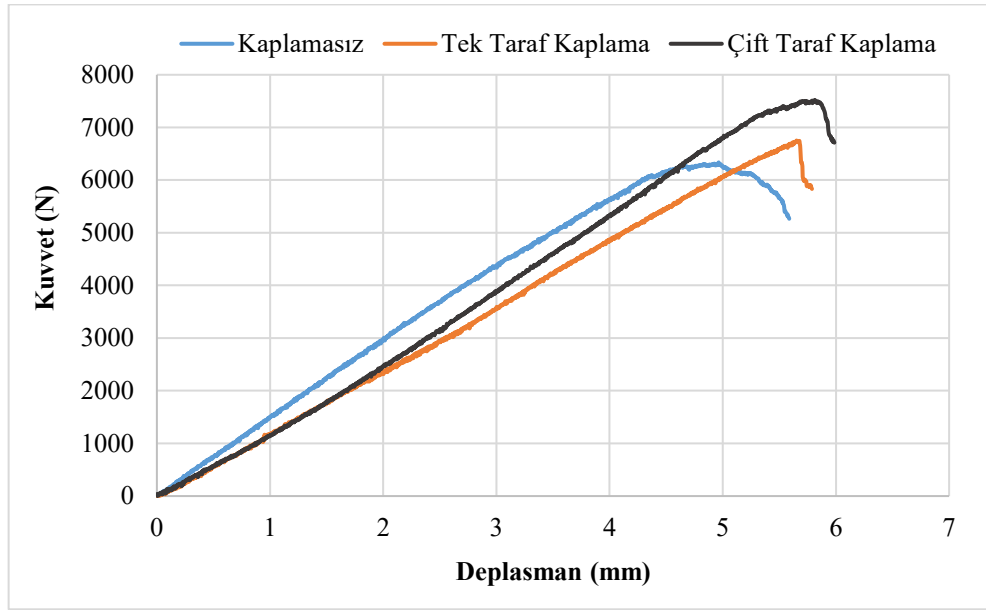
Şekil 4.18. 0° oryantasyonlu numunelerin darbe sonrası eğilme testine ait kuvvet-deplasman değişim eğrileri

Şekil 4.18’de 0° oryantasyonlu numunelerin darbe sonrası eğilme testi verileri incelendiğinde, kaplamasız numune en düşük maksimum kuvvet değeri olan 4023 N ile en düşük eğilme dayanımını göstermiştir. Buna karşılık, çift taraflı kaplanmış numune 6305 N ile en yüksek darbe sonrası eğilme dayanımına ulaşmıştır. Tek taraflı kaplamaya sahip numune ise 5195 N maksimum kuvvet değeriyle, kaplamasız numuneye kıyasla önemli bir performans artışı sağlamakla birlikte, çift taraflı kaplamanın sağladığı dayanım seviyesine erişememiştir. Ayrıca çift taraflı kaplamanın etkisi yalnızca dayanımla sınırlı kalmamış, aynı zamanda süneklik üzerinde de olumlu bir etki yaratmıştır. Bu numunelerin 5,83 mm’lik yüksek deplasman değeri, kaplamanın kompozite daha sünek bir yapı kazandırdığını göstermektedir. Oryantasyon açısı 0° olan CFTP kompozit numunelere uygulanan eğilme testlerinin darbe öncesi ve sonrası değerleri karşılaştırıldığında:

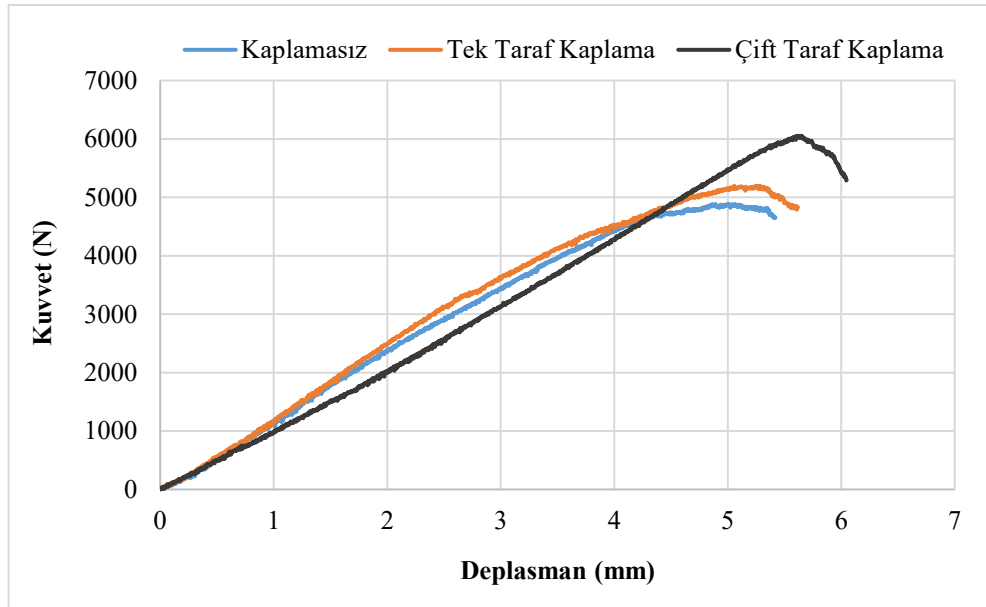
- Kaplamasız numune, darbe öncesinde 6438 N kuvvet ve 4,99 mm deplasman değerlerine ulaşırken, darbe sonrasında bu değerler sırasıyla 4023 N ve 4,62 mm’ye gerilemiş; böylece yaklaşık %37,5 kuvvet ve %7,4 deplasman kaybı yaşamıştır.
- Tek taraflı kaplı numune, darbe öncesi 7078 N kuvvet ve 5,10 mm deplasman değerleri sergilerken, darbe sonrası 5195 N kuvvet ve 4,90 mm deplasman değerlerine ulaşmış; bu da yaklaşık %26,6 kuvvet ve %3,9 deplasman kaybına işaret etmektedir.

- Çift tarafı kaplı numune ise darbe öncesinde 7227 N kuvvet ve 6,67 mm deplasman değerine ulaşmış, darbe sonrasında ise 6305 N kuvvet ve 5,83 mm deplasman ile yalnızca yaklaşık %12,8 kuvvet ve %12,6 deplasman kaybı göstermiştir. Bu sonuçlar, çift taraflı kaplamanın darbe sonrası performansı en az düşen ve en yüksek dayanımı sergileyen yapı olduğunu göstermektedir.

Oryantasyon açısı 15° olan numunelerin darbe öncesi ve sonrası eğilme test sonucu elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.19. 15° oryantasyonlu numunelerin darbe öncesi eğilme testine ait kuvvet-deplasman değişim eğrileri

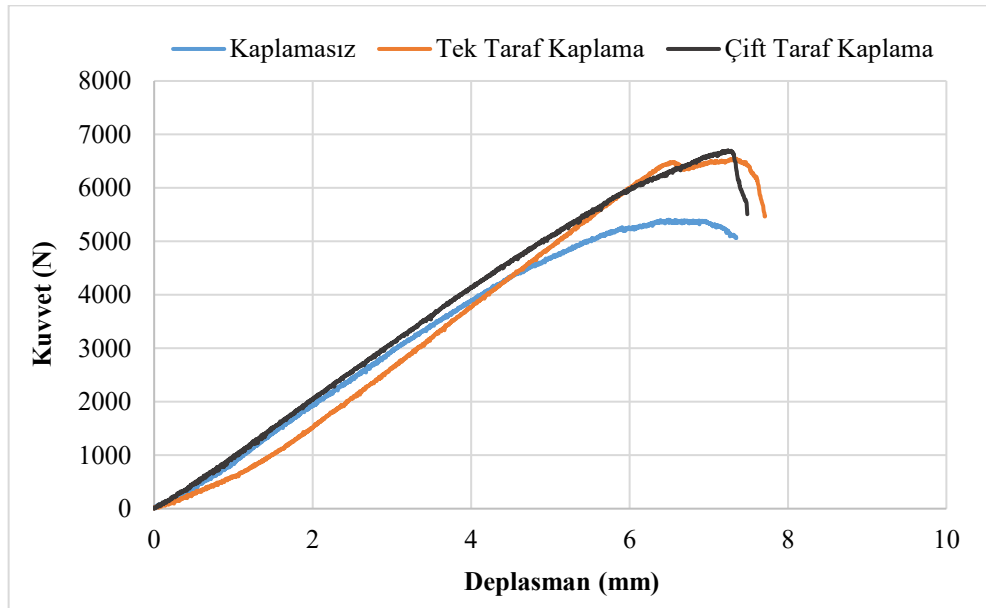


Şekil 4.20. 15° oryantasyonlu numunelerin darbe sonrası eğilme testine ait kuvvet-deplasman değişim eğrileri

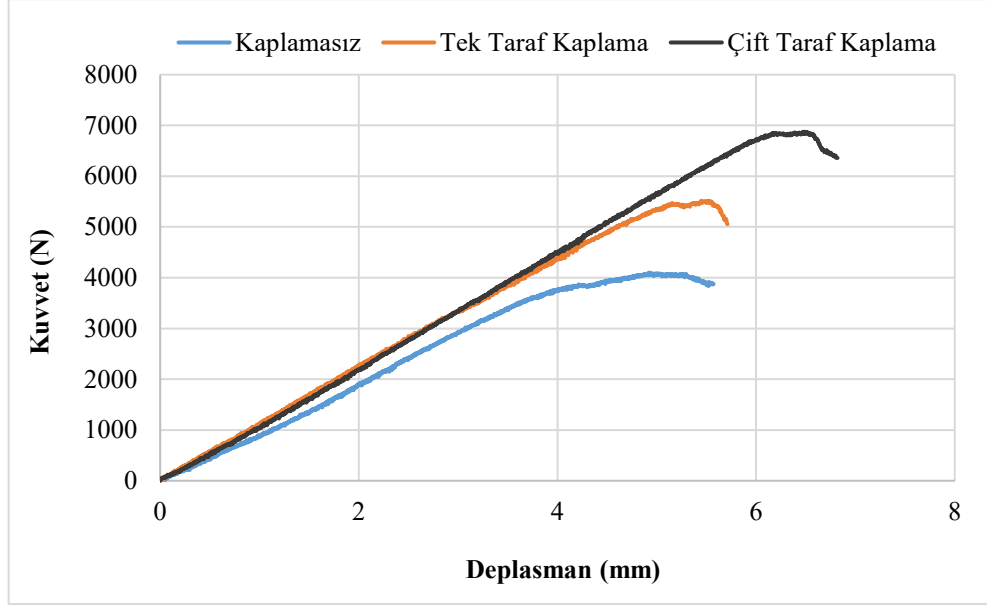
Şekil 4.19’da verilen, 15° oryantasyon açısına sahip numunelere ait darbe öncesi eğilme testi sonuçlarına göre; kaplamasız numune 6336 N maksimum kuvvet ve 4,96 mm deplasman değerleriyle en düşük dayanımı sergilemiş ve gevrek kırılma davranışı göstermiştir. Buna karşılık, tek tarafı kaplı numune 6751 N maksimum kuvvet ve 5,46 mm deplasman değerleriyle hem daha yüksek bir eğilme dayanımı hem de artan süneklik sergilemiştir. En iyi performans ise 7523 N maksimum kuvvet ve 5,81 mm deplasman değerleriyle çift tarafı kaplı numunede elde edilmiştir. Aynı numunelere ait darbe sonrası eğilme testleri incelendiğinde, maksimum kuvvet değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir:

- Kaplamasız numune, darbe sonrasında 4883 N maksimum kuvvet değeri göstermiştir. Bu değer, darbe öncesi 6336 N’lik kuvvetle karşılaştırıldığında yaklaşık %22,9 oranında bir kuvvet kaybına işaret etmektedir.
- Tek tarafı kaplı numune, darbe sonrası 5197 N maksimum kuvvet değerine ulaşmış; bu da 6751 N’lik darbe öncesi değere kıyasla yaklaşık %23 kuvvet kaybı anlamına gelmektedir.
- Çift tarafı kaplı numune, darbe sonrasında 6055 N maksimum kuvvet değerine gerilemiş olup, darbe öncesi 7523 N’lik değere göre yaklaşık %19,5 oranında bir kuvvet kaybı yaşamıştır.

Oryantasyon açısı 30° olan numunelerin darbe öncesi ve sonrası eğilme testinden elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.21. 30° oryantasyonlu numunelerin darbe öncesi eğilme testine ait kuvvet-deplasman değişim eğrileri

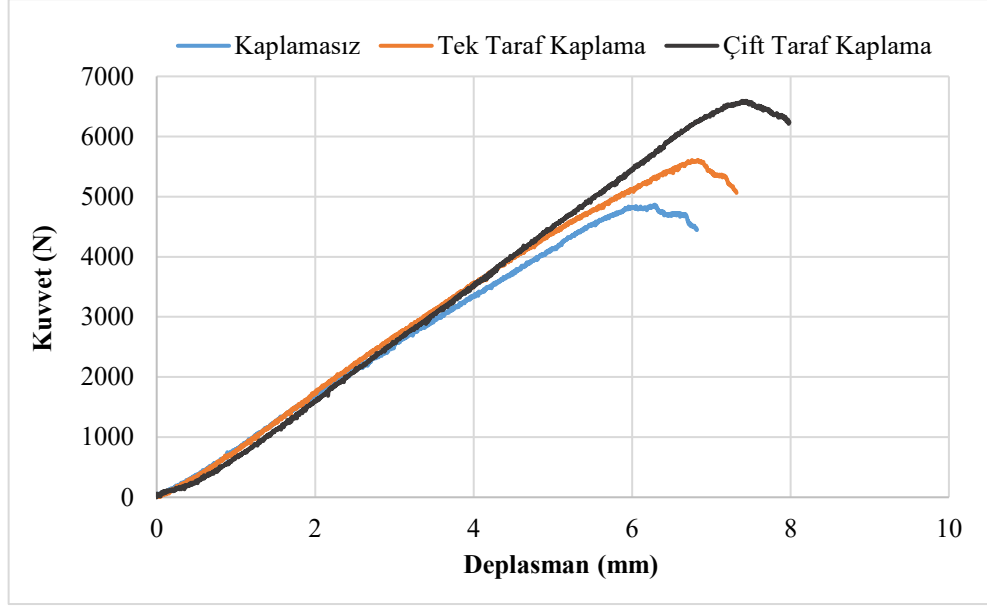


Şekil 4.22. 30° oryantasyonlu numunelerin darbe sonrası eğilme testine ait kuvvet-deplasman değişim eğrileri

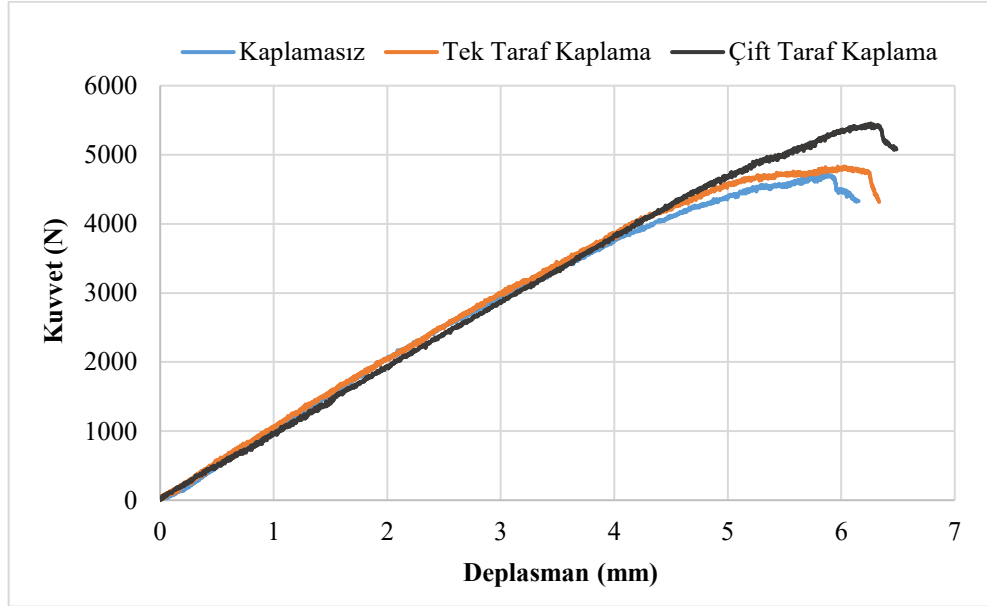
Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de verilen verilere göre, 30° oryantasyon açısına sahip numunelere uygulanan eğilme testleri sonucunda darbe öncesi ve sonrası değerler önemli farklılıklar göstermiştir.

- Kaplamasız numune, darbe öncesinde 5406 N kuvvet ve 6,50 mm deplasman değerine ulaşırken, darbe sonrasında bu değerler 4102 N ve 4,92 mm’ye gerilemiş; böylece yaklaşık %24,1 kuvvet ve %24,3 deplasman kaybı gözlemlenmiştir.
- Tek tarafı kaplı numune, darbe öncesinde 6455 N kuvvet ve 7,32 mm deplasman sergilerken, darbe sonrası 5516 N kuvvet ve 5,45 mm deplasman değerlerine ulaşmış; bu da yaklaşık %15,7 kuvvet ve %25,5 deplasman kaybına karşılık gelmektedir.
- Çift tarafı kaplı numunede darbe öncesi 6703 N kuvvet ve 7,24 mm deplasman değerleri kaydedilirken, darbe sonrası kuvvet 6531 N’ye ve deplasman ise 6,47 mm’ye düşmüştür. Bu durum, darbe sonrası yaklaşık %2,6 oranında kuvvet ve %10,6 oranında ise deplasman kaybına karşılık gelmektedir.

Oryantasyon açısı 45° olan kaplamalı ve kaplamasız numunelere ait darbe öncesi ve darbe sonrası eğilme testlerinden elde edilen kuvvet-deplasman grafiklerine sırasıyla Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’te yer verilmiştir.



Şekil 4.23. 45° oryantasyonlu numunelerin darbe öncesi eğilme testine ait kuvvet-deplasman değişim eğrileri



Şekil 4.24. 45° oryantasyonlu numunelerin darbe sonrası eğilme testine ait kuvvet-deplasman değişim eğrileri

Şekil 4.23'te verilen darbe öncesi eğilme testi kuvvet-deplasman grafiği incelendiğinde; 45° oryantasyon açısı için en yüksek eğilme dayanımı ve sünekliği, 6594 N maksimum kuvvet ve 7,39 mm deplasman ile çift tarafı kaplı numune sergilemiştir. Tek tarafı kaplı numune, 5609 N maksimum kuvvet ve 6,14 mm deplasman ile orta seviyede bir eğilme performansı göstermiştir. Kaplamasız numune ise 4867 N maksimum kuvvet ve 6,29 mm deplasman değerleri ile en düşük eğilme dayanımını sergilemiştir.

Şekil 4.24'te yer alan aynı numunelere ait darbe sonrası eğilme testleri incelendiğinde:

- Kaplamasız numune, darbe sonrası 4711 N maksimum kuvvet değerine ulaşmış; bu da darbe öncesi değere göre yaklaşık %3,2 kuvvet kaybına karşılık gelmektedir.
- Tek tarafı kaplı numune, darbe sonrası 4829 N kuvvet değeriyle yaklaşık %13,9 oranında bir kuvvet kaybı yaşamıştır.
- Çift tarafı kaplı numune, darbe sonrasında 5453 N kuvvet değeri ile, darbe öncesi kuvvetine kıyasla yaklaşık %17,3 kuvvet kaybı göstermiştir.

Deneylerden elde edilen veriler ışığında 0°, 15°, 30° ve 45° oryantasyon açılarının kaplamasız, tek tarafı kaplı ve çift tarafı kaplı CFTP malzemelerin darbe öncesi ve sonrası eğilme testi deneylerinden elde edilen sonuçlar toplu olarak Tablo 4.2'de verilmiştir.

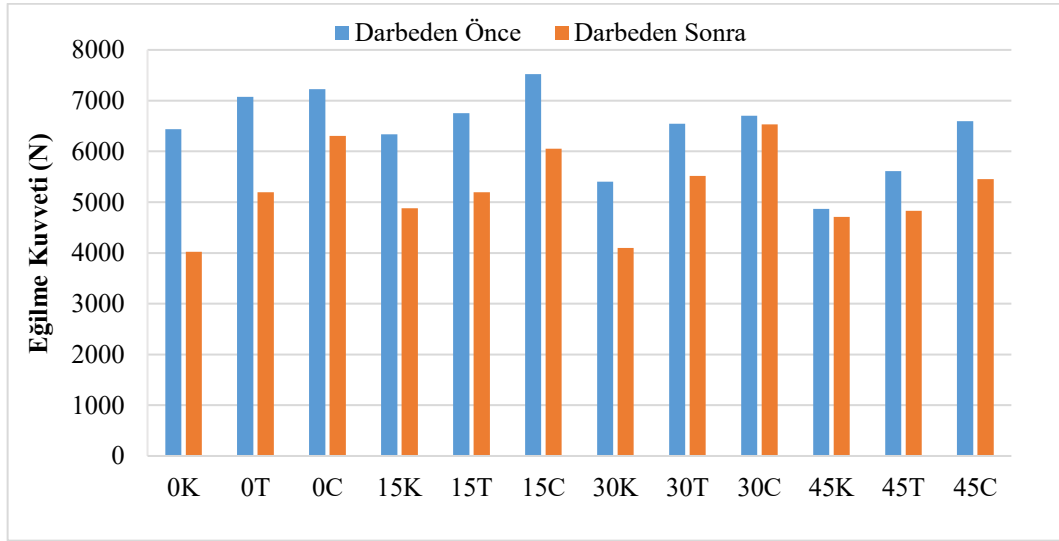
Tablo 4.2. Darbeden öncesi ve sonrası eğilme testinden elde edilen sayısal veriler

<i>Numune kodu</i>	<i>F_{emak} (N)</i>	<i>Deplasman (mm)</i>	<i>Numune kodu</i>	<i>F_{emak} (N)</i>	<i>Deplasman (mm)</i>	<i>Kuvvet değişim oranı (%)</i>	<i>Deplasman değişim oranı (%)</i>
0K0	6438	4,99	0K1	4023	4,62	-37,5	-7,4
0T0	7078	5,10	0T1	5195	4,90	-26,6	-3,9
0C0	7227	6,67	0B2	6305	5,83	-12,8	-12,6
15K0	6336	4,96	15K1	4883	4,87	-22,9	-1,8
15T0	6751	5,46	15T1	5197	5,28	-23,0	-3,3
15C0	7523	5,81	15C1	6055	5,62	-19,5	-3,3
30K0	5406	6,50	30K1	4102	4,92	-24,1	-24,3
30T0	6545	7,32	30T1	5516	5,45	-15,7	-25,5
30C0	6703	7,24	30C1	6531	6,47	-2,6	-10,6
45K0	4867	6,29	45K1	4711	5,87	-3,2	-6,7
45T0	5609	6,14	45T1	4829	5,97	-13,9	-2,8
45C0	6594	7,39	45C1	5453	6,26	-17,3	-15,3

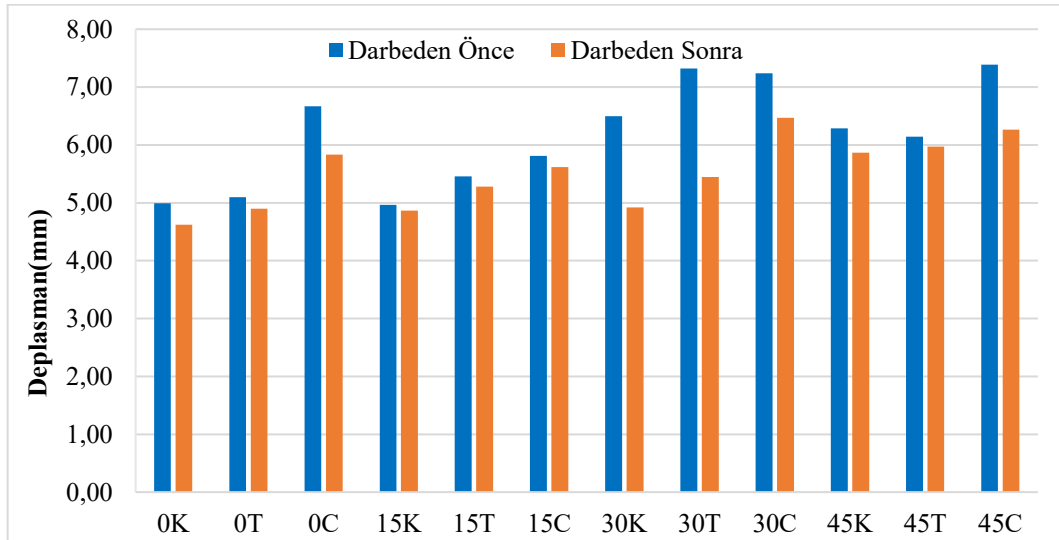
F_{emak}: Maksimum eğilme kuvvetidir.

Tablo 4.2'de verilen numune kodları; oryantasyon açısı, kaplama durumu ve darbe uygulanıp uygulanmadığına göre sistematik olarak sınıflandırılmıştır. Bu kodlamada, C: çift tarafı kaplı numune, T: tek tarafı kaplı numune ve K: kaplamasız numuneyi ifade etmektedir. Harf sembollerinin önündeki sayılar, CFTP kompozitinin oryantasyon açısını; sonunda yer alan "0" darbesiz, "1" ise darbeli durumu temsil etmektedir. Bu kodlama sistemine bağlı olarak, darbe öncesi ve sonrası farklı oryantasyon açılarına sahip kaplamasız ve kaplamalı CFTP kompozit numunelerin eğilme kuvveti ve

deplasman değerlerini gösteren sütun grafikler sırasıyla Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da verilmiştir.



Şekil 4.25. Tüm numunelerin darbe öncesi ve sonrası eğilme kuvveti değişimi



Şekil 4.26. Tüm numunelerin darbe öncesi ve sonrası eğilme deplasman değişimi

Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da verilen darbe öncesi ve sonrası eğilme kuvveti ile deplasman değişimi grafikleri incelendiğinde, darbe sonrası eğilme kuvveti ve deplasman değerlerinin tüm numunelerde azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu değerler arasında belirli farklar olsa da bu farkların malzeme kalınlığı, kaplama türüne ve oryantasyon açısına bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Poliürea kaplamanın, CFTP kompozitlere hem darbe direnci sağladığı hem de darbe sonrası eğilme performansındaki düşüşü sınırladığı belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, 0°, 15°, 30° ve 45° oryantasyon açılarına sahip cam fiber takviyeli polimer (CFTP) kompozit malzemeler üretilmiş ve bu numunelerin bir kısmına poliürea kaplaması uygulanmıştır. Kaplamalı ve kaplamasız numuneler, ilgili test standartlarına uygun şekilde hazırlanarak düşük hızlı darbe testine ve darbe sonrası üç nokta eğilme testine tabi tutulmuştur. Ayrıca, karşılaştırma amacıyla darbe uygulanmamış numunelere de üç nokta eğilme testi gerçekleştirilmiş ve böylece oryantasyon açısı ile kaplama işleminin darbe sonrası eğilme dayanımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Darbe performansı değerlendirildiğinde, poliürea kaplamanın özellikle çift yüzeye uygulandığında numunelerin taşıma kapasitesini artırdığı ve darbe sonrası yapısal bütünlüğün korunmasına katkı sağladığı belirlenmiştir. Çift tarafı kaplı numuneler, darbe altında en yüksek darbe kuvvetiyle birlikte en düşük enerji emilimi ve yer değiştirme değerlerini göstermiştir. Buna karşılık, kaplamasız numuneler en düşük darbe kuvvetini, en yüksek enerji emilimini ve yer değiştirme miktarını sergilemiştir. Kaplama işlemi, numunelerde rebound (geri sıçrama) davranışı oluşturarak hasarın daha sınırlı kalmasına neden olmuştur. Kaplamasız numunelerde ise enerjinin büyük bir kısmı iç yapısal deformasyonla sönmüldüğünden, darbe yüzeylerinde belirgin deformasyonlar ve delinmeler meydana gelmiştir.

Darbe testi sonrasında, numunelerin darbeye maruz kalan yüzeylerinde matris çatlaması, matris kırılması, fiber kırılması ve fiber ayrılması gibi çeşitli hasar türleri gözlemlenmiştir. Bu hasarların çoğu, delaminasyon etkisiyle katmanlar arası yapısal bütünlüğün zayıflamasından kaynaklanmıştır. Oluşan matris çatlaklarının fiber yönüne bağlı olarak ilerlediği, düşük oryantasyon açılarında daha doğrusal, yüksek açılarda ise daha dağınık bir yayılım gösterdiği belirlenmiştir. Kaplamasız numunelerde hasar daha geniş alanlara yayılırken, poliürea kaplamalı numunelerde hasarın daha sınırlı kaldığı ve yapısal bütünlüğün büyük ölçüde korunduğu tespit edilmiştir.

Eğilme testleri, darbe öncesinde tüm numunelerin yüksek mekanik performans sergilediğini ortaya koyarken, darbe sonrasında meydana gelen performans kayıplarının

kaplama türüne bağılı olarak değiştiği belirlenmiştir. Poliürea kaplama, yalnızca kompozit numunelerin dayanımını değil, aynı zamanda darbe sonrası sünekliğini de koruyarak yapısal hasarın sınırlandırılmasına katkı sağlamıştır.

Kompozit yapıdaki oryantasyon açısının artması, düşük hızlı darbe testlerinde dayanım üzerinde anlamlı bir etki oluşturmamıştır. 0° oryantasyon açısına sahip numuneler, diğer açılara sahip numunelere kıyasla daha düşük darbe kuvveti ve kısmen daha yüksek yer değiştirme değerleri sergilemiş olsa da tüm oryantasyon açıları arasında elde edilen darbe performansı sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Buna karşılık, eğilme testlerinde oryantasyon açısı, eğilme kuvveti ve deplasman değerleri üzerinde daha belirleyici bir rol oynamıştır. Artan oryantasyon açısı genel olarak eğilme kuvvetinde azalmaya, deplasman değerlerinde ise artışa neden olmuştur.

5.2. Öneriler

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, poliürea kaplamanın CFTP kompozitlerin darbe sonrası mekanik davranışları üzerindeki olumlu etkilerini ortaya koymuştur. Ancak, bu bulguların daha geniş bir perspektifte değerlendirilmesi ve farklı parametrelerin etkisinin incelenmesi amacıyla gelecekte yapılacak çalışmalara yönelik çeşitli öneriler aşağıda verilmiştir.

Bu çalışmada, sabit darbe enerjisi ile testler gerçekteştirilmiş ve darbe sonrası malzemeye eğilme testi uygulanmıştır. Gelecek çalışmalarda, farklı darbe enerjileri kullanılarak kompozitlerin hasar toleransı ve sınır davranışları daha ayrıntılı şekilde incelenebilir. Ayrıca, sadece darbe sonrası eğilme değil, basma ve yorulma testleri gibi farklı mekanik yükleme senaryoları da değerlendirilerek kaplamanın uzun süreli performansı ortaya konabilir.

Kompozit yapıların oryantasyon açılarının etkisi bu tez kapsamında incelenmiştir. İlerleyen çalışmalarda, farklı fiber türleri veya günümüzde çevresel faktörler nedeniyle ön plana çıkan doğal fiberlerle üretilmiş kompozitlerde poliürea kaplamanın kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri kapsamlı olarak araştırılabilir.

Bunun yanı sıra, farklı elastomer kaplama malzemelerinin kompozitlerin kaplanabilirliği üzerindeki etkileri araştırılabilir. Kaplama kalınlığı ve uygulanma şekli gibi parametrelerin değiştirilmesiyle elde edilen sonuçlar da karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Ao, W., Zhou, Q., & Xia, Y. (2023). Impact resistance and damage mechanism of polyurea coated CFTP laminates under quasi-static indentation and low velocity impact. *Thin-Walled Structures*, 193, 111258.
- Atakok, G., & Mertgenc Yoldas, D. (2024). Comparison of CFTP (glass fiber-reinforced polymer) and CFTP (carbon fiber-reinforced polymer) composite adhesive-bonded single-lap joints used in marine environments. *Sustainability*, 16(24), 11105.
- Belevi, M., Nejabatı, A., & Karasu, H. F. (2022). Darbe test sıcaklıklarının kompozit levhaların darbe sonrası bası davranışına etkisinin incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(72), 835-843.
- Belingardi, G., & Vadori, R. (2002). Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates. *International Journal of Impact Engineering*, 27(2), 213-229.
- Beura, S., Chakraverty, A. P., Pati, S. N., Pradhan, D. D., Thatoi, D. N., & Mohanty, U. K. (2023). Effect of salinity and strain rate on sea water aged CFTP composite for marine applications. *Materials Today Communications*, 34, 105056.
- Boukar, A., Corn, S., Slangen, P. R., & Ienny, P. (2022). Finite element modelling of low velocity impact test applied to biaxial glass fiber reinforced laminate composites. *International Journal of Impact Engineering*, 165, 104218.
- Bunea, M., Birsan, I. G., & Circiumaru, A. (2020). An experimental study on the low velocity impact behavior of hybrid epoxy composites. *Mater Plast*, 57, 179-190.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: an introduction*. 9th Edition. New York: Wiley, 990 pages.
- Campbell, F. C. (2010). *Structural composite materials*. ASM international. Materials Park, Ohio 44073-0002.
- Cantwell, W. J., & Morton, J. (1991). The impact resistance of composite materials – a review. *composites*, 22(5), 347-362.
- Çakır, M., & Berberoğlu, B. (2018). E-cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin elyaf oranındaki artış ile mekanik özelliklerindeki değişimlerin incelenmesi. *El-Cezeri*, 5(3), 734-740.
- Chaudhary, S. K., & Singh, K. K. (2024). Influence of multi-walled carbon nanotubes on mechanical characteristics of glass fiber reinforced polymer composites: An experimental and analytical approach. *SPE Polymers*, 5(3), 382-394.

- Demir, M. E., Çelik, Y. H., & Kılıçkap, E. (2019). Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf cinsinin, yükün, kayma hızı ve mesafesinin abrazif aşınmaya etkisi. *Politeknik dergisi*, 22(4), 811-817.
- Dhilipkumar, T., & Rajesh, M. (2023). Influence of manufacturing process and CFTP pin loading on shear and dynamic behaviour of composite joints. *The Journal of Adhesion*, 99(4), 538-557.
- Doğan, N. F., Çakır, M. V., & Özbek, Ö. (2024). Bonding performance of nano boron nitride filled epoxy adhesive. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 46(4), 240.
- Egbo, M. K. (2021). A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 33(8), 557-568.
- Firoozi, A. A., & Firoozi, A. A. (2024). Emerging trends in damage tolerance assessment: A review of smart materials and self-repairable structures. *Structural Durability & Health Monitoring (SDHM)*, 18(1), 1-18.
- Giasin, K., Dhakal, H. N., Featheroson, C. A., Pimenov, D. Y., Lupton, C., Jiang, C., Barouni, A., & Koklu, U. (2021). Effect of fibre orientation on impact damage resistance of S2/FM94 glass fibre composites for aerospace applications: An experimental evaluation and numerical validation. *Polymers*, 14(1), 95.
- Grujicic, M., He, T., Pandurangan, B., Svingala, F. R., Settles, G. S., & Hargather, M. J. (2012). Experimental characterization and material-model development for microphase-segregated polyurea: an overview. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(1), 2-16.
- Guo, H., Du, C., Chen, Y., Li, D., Hu, W., & Lv, X. (2022). Study on protective performance of impact-resistant polyurea and its coated concrete under impact loading. *Construction and Building Materials*, 340, 127749.
- Güler, I., Biliz, İ., & Çelik, Y. H. (2025). *Hızlı darbe altında farklı açılı cam/epoksi kompozitlerin karşılaştırmalı analizi*. [Konferans sunumu]. 5th International Conference on Contemporary Academic Research. 30-31 Mayıs, Konya, Türkiye. 462-469.
- Karakaya, H. (2025). *Baret üretiminde kullanılan cam fiber malzemede istifleme açısının darbe dayanımına etkisinin iş sağlığı ve güvenliği açısından incelenmesi*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Batman Üniversitesi.
- Hamzat, A. K., Murad, M. S., Adediran, I. A., Asmatulu, E., & Asmatulu, R. (2025). Fiber-reinforced composites for aerospace, energy, and marine applications: an insight into failure mechanisms under chemical, thermal, oxidative, and mechanical load conditions. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 8(1), 152.
- Hashim, M. K. R., Abdul Majid, M. S., Mohd Jamir, M. R., Kasim, F. H., Alshahrani, H. A., Deros, M. A. M., & Hui, D. (2022). Effects of ply orientations and stacking

- sequences on impact response of pineapple leaf fibre (PALF)/carbon hybrid laminate composites. *Materials*, 15(17), 6121.
- Iqbal, N., Tripathi, M., Parthasarathy, S., Kumar, D., & Roy, P. K. (2016). Polyurea coatings for enhanced blast-mitigation: a review. *RSC advances*, 6(111), 109706-109717.
- Işık, İ. (2023). *Cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin delme performansının sembolik regresyon yöntemi ile analizi*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Batman Üniversitesi.
- Jabbar, M., Adnan, M., Shaker, K., Abdullah, T., Nawab, Y., Hussain, R., & Malik, A. U. (2023). Strength and durability that last—Mechanical properties of polyurea and polyurethane coated composites. *Polymer Composites*, 44(7), 4324-4335.
- Kar, K. K. (Ed.). (2017). *Composite Materials*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49514-8>
- Kılıçkap, E., Yenigün, B., & Çelik, Y. H. (2017). The effect of drilling parameters on strength of glass fibre-epoxy laminates by produced hand lay-up. *Engineering Sciences*, 12(4), 246-254.
- LeBlanc, J., & Shukla, A. (2015). Response of polyurea-coated flat composite plates to underwater explosive loading. *Journal of Composite Materials*, 49(8), 965-980.
- Long, S., Yao, X., & Zhang, X. (2015). Delamination prediction in composite laminates under low-velocity impact. *Composite Structures*, 132, 290-298.
- Ng, L. F., Yahya, M. Y., Muthukumar, C., Woo, X. J., Muhaimin, A. H., & Majid, R. A. (2023). Mechanical characterization of aluminum sandwich structures with woven-ply pineapple leaf/glass fiber-reinforced hybrid composite core. *Journal of Natural Fibers*, 20(1), 2160404.
- Nguyen, K. Q., Cousin, P., Robert, M., Elkoun, S., & Benmokrane, B. (2024). Aging and integrity studies of CFTP composites for civil engineering applications. In *Aging and Durability of FRP Composites and Nanocomposites* (pp. 219-238). Woodhead Publishing.
- Nijssen, R. P. L. (2015). *Composite materials: an introduction*. Delft, The Netherlands: Inholland University of Applied Sciences.
- Ogbonna, V. E., Popoola, A. P. I., Popoola, O. M., & Adeosun, S. O. (2022). A review on the recent advances on improving the properties of epoxy nanocomposites for thermal, mechanical, and tribological applications: challenges and recommendations. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 61(2), 176-195.
- Önal, T., & Temiz, Ş. (2021). Balsa çekirdekli sandviç kompozitlerin darbe davranışlarının deneysel olarak incelenmesi. *El-Cezeri*, 8(1), 333-345.

- Öndürücü, A., & Can, G. (2020). Fonksiyonellendirilmiş alümina ve silika katkılı kevlarcam elyaf/epoksi reçineli hibrit kompozitlerin cam ve kevlar yüzeylerine uygulanan darbe enerjilerinin darbe davranışlarına etkisinin incelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(3), 707-717.
- Özdemir, Ö. (2024). *Cam elyaf kompozitlerin düşük hızlı darbe deneyinin matematiksel modellenmesi*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Necmettin Erbakan Üniversitesi.
- Öztürk, Ş. (2022). *Polyurea uygulamasının yığma duvar kesme davranışına etkisi*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi.
- Păduraru, I., Ojoc, G. G., Petrescu, H., Graur, I., Pîrvu, C., & Deleanu, L. (2023). The Behavior of Glass Fiber Composites under Low Velocity Impacts. *Polymers*, 15(23), 4549.
- Primeaux, D. J. (2004). Polyurea elastomer technology: history, chemistry & basic formulating techniques. *Primeaux Associates LLC*, 1-20.
- Reis, P. N. B., Neto, M. A., & Amaro, A. M. (2018). Effect of the extreme conditions on the tensile impact strength of CFTP composites. *Composite Structures*, 188, 48-54.
- Ribeiro Junior, R. F., & Gomes, G. F. (2024). On the use of machine learning for damage assessment in composite structures: a review. *Applied Composite Materials*, 31(1), 1-37.
- Saeedi, S. (2020). *Cam elyaf takviyeli poliüretan yüzöl ve MDF çekirdekli kirişlerin yapısal analiz ve testleri*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Akdeniz Üniversitesi.
- Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., & Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites—a review. *Journal of reinforced plastics and composites*, 33(13), 1258-1275.
- Sazhenkov, N. A., Semenov, S. V., Voronov, L. V., Kurakin, A. D., Nikhamkin, M. S., Stergiou, T., Baxevanakis, K. P., Roy, A., & Silberschmidt, V. V. (2020). Polyurea-coated glass-fibre-reinforced laminate under high-speed impact: experimental study. *Procedia Structural Integrity*, 28, 1572-1578.
- Sazhenkov, N. A., Voronov, L. V., & Nikhamkin, M. S. (2021). Experimental study of polyurea protective coating effectiveness for layered composite material reinforced by glass-fiber under impact loading. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1945(1), 012051.
- Sevkat, E., Liaw, B., Delale, F., & Raju, B. B. (2009). Drop-weight impact of plain-woven hybrid glass-graphite/toughened epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(8), 1090-1110.
- Sharath Chandra, H. S., Lokesh, K. S., Ravindra Babu, G., Shrinivasa Mayya, D., & Naveen Kumar, J. R. (2023). Impact of fibre orientation on mechanical properties of CFTP composites. *Materials Today: Proceedings*, 92, 78-83.

- Sharma, A. P., Khan, S. H., & Velmurugan, R. (2019). Effect of through thickness separation of fiber orientation on low velocity impact response of thin composite laminates. *Heliyon*, 5(10), e02706.
- Sheikh-Ahmad, J. Y. (2009). *Machining of polymer composites* (Vol. 387355391). New York: Springer.
- Shojaei, B., Najafi, M., Yazdanbakhsh, A., Abtahi, M., & Zhang, C. (2021). A review on the applications of polyurea in the construction industry. *Polymers for advanced technologies*, 32(8), 2797-2812.
- Sulistyo, A. B., & Wirawan, W. A. (2024). Evaluation of tensile strength and flexural strength of CFTP composites in different types of matrix polymers. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 123(2), 49-57.
- Temizkan, E., Eroğlu, G., Ergün, A., & Deligöz, H. (2021). Preparation, characterization, and influence of polyurea coatings on their layered composite materials based on flexible rebonded polyurethane. *Polymer Engineering & Science*, 61(5), 1392-1404.
- Topkaya, T., Çelik, Y. H., & Kilickap, E. (2020). Mechanical properties of fiber/graphene epoxy hybrid composites. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(11), 4589-4595.
- Uzay, Ç., & Geren, N. (2020). Advanced technologies for fiber reinforced polymer composite manufacturing. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4), 245-257.
- Veerakumar, V. G. S., Shanmugavel, B. P., & Harish, S. (2021). On the influence of the functionalization of graphene nanoplatelets and glass fiber on the mechanical properties of CFTP composites. *Applied Composite Materials*, 28(4), 1127-1152.
- Wang, Y., Ding, L., Lin, J., Qiu, X., Wu, C., Liu, C., Tian, Y., Zhang, R., Huang, W., & Ma, M. (2024). Recent developments in polyurea research for enhanced impact penetration resistance and blast mitigation. *Polymers*, 16(3), 440.
- Yalçın, B., Bolat, Ç., Ergene, B., Karakılınç, U., Yavaş, Ç., Öz, Y., Ercetin, A., Maraş, S., & Der, O. (2024). Effect of drilling parameters and tool diameter on delamination and thrust force in the drilling of high-performance glass/epoxy composites for aerospace structures with a new design drill. *Polymers*, 16(21), 3011.
- Yardımcı, C. Ş. (2023). *Poliüre kaplı kompozit plakaların balistik performanslarının araştırılması*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Erciyes Üniversitesi.
- Yi, X. S., Du, S., & Zhang, L. (2018). *Composite materials engineering, volume 1: fundamentals of composite materials*. Chemical Industry Press. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5696-3>
- Yıldırım, M. (2019). *Poliürea kaplı metal levhaların mekanik özelliklerinin incelenmesi ve zırh malzemesi olarak kullanımının değerlendirilmesi*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi.