BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARBON NANOTÜP KATKISI İLE KATMANLI CAM, KARBON VE ARAMİD ELYAF TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE MEKANİK PERFORMANSLARININ GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erdem FERİK

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2021

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARBON NANOTÜP KATKISI İLE KATMANLI CAM, KARBON VE ARAMİD ELYAF TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE MEKANİK PERFORMANSLARININ GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erdem FERİK
171080310
ORCID: 0000-0002-0418-5124

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Cihan KABOĞLU
ORCID: 0000-0002-6249-0565

ŞUBAT 2021

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 171080310 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Erdem FERİK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "KARBON NANOTÜP KATKISI İLE KATMANLI CAM, KARBON VE ARAMİD ELYAF TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE MEKANİK PERFORMANSLARININ GELİŞTİRİLMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Cihan KABOĞLU** .....
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Deniz UZUNSOY** .....
Bursa Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Egemen AVCU .....
Kocaeli Üniversitesi

Teslim Tarihi : 04 Şubat 2021
Savunma Tarihi : 01 Şubat 2021

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 200Y010 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Erdem FERİK

İmzası:

Emeği geçenlere,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmalarımın çıktısı olan bu çalışmada, bana desteğini esirgemeyen, çalışmalarıma ve bana değer katan, üst düzey sabrı ve emeği ile yüksek lisans çalışmalarımı tamamlamamı sağlayan danışmanım sayın Doktor Öğretim Üyesi Cihan KABOĞLU Hocama teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Tez savunma jürisi üyeleri sayın Prof Dr. Deniz UZUNSOY Hocama ve sayın Doç. Dr. Egemen Avcu Hocama teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Ayrıca çalışmada gerçekleştirilen, Çekme, Üç Nokta Eğme ve Düşen Ağırlık Darbe Deneyi analizleri için Bursa Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Safa ŞENAYSOY ve Ali Osman GÜNEY'e, çalışmalar kapsamında laboratuvarda yardımcı olan Bursa Teknik Üniversitesi Metalürji Malzeme ve Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Taha Yasin EKEN'e içten dileklerimle teşekkür ederim. Bu yüksek lisans sürecinin bana kazandırdığı, her zaman desteğini hissettiğim değerli ağabeyim sayın Dr. Ümit KOÇ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bu zorlu süreçte beni destekleyen ve benim yanımda olan aileme, meslektaşım babam sayın Turgut FERİK'e, kıymetli annem sayın Halime FERİK'e ve meslektaşım ağabeyim sayın Dr. Erman FERİK'e sonsuz saygılarımı, sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Şubat 2021 Erdem FERİK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
KISALTMALAR ..... **viii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvi**
1. GİRİŞ **1**
2. LİTERATÜR **3**
2.1 Kompozit Malzemeler 3
2.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 4
2.1.1 Metal Matrisli Kompozitler 4
2.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler 9
2.1.3 Polimer Matrisli Kompozitler 10
2.1.4 Karbon-Karbon Kompozitler 12
2.1.5 Nano Kompozitler 14
2.1.6 Hibrit Kompozitler 15
2.2 Elyaf Takviyeler 17
2.2.1 Karbon Elyaflar 17
2.2.2 Cam Elyaflar 18
2.2.3 Silika ve Kuvars Elyaflar 19
2.2.4 Polimerik Elyaflar 19
2.2.5 Bor Elyaflar 20
2.2.6 Seramik Elyaflar 20
2.2.7 Bazalt Elyaflar 21
2.2.8 Metalik Elyaflar 21
2.2.9 Aramid Elyaflar 22
2.3 Karbon Nanotüp 22
2.4 Kompozit Üretim Süreçleri 24
2.4.1 El Yatırması 25
2.4.2 Püskürtme Kalıplama 26
2.4.3 Sıkıştırma Kalıplama 26
2.4.4 Enjeksiyon Kalıplama 26
2.4.5 Reçine Transfer Kalıplama 27
2.4.6 Filament Sarımı 27
2.4.7 Pultrüzyon 28
2.4.8 Vakumda Torbalı Kalıplama ve Otoklav 28
2.4.9 Savurma Döküm 29
2.4.10 Vakum İnfüzyonu 30
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **33**
4. DENEYSEL SONUÇLAR **44**

4.1 Çekme Deneyi Sonuçları 44
4.2 Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları 50
4.3 Düşen Ağırlık Darbe Deneyi Sonuçları 57
5. SONUÇLAR 69
5.1 Çekme Deneyi Sonuçları 70
5.2 Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları 71
5.3 Düşen Ağırlık Darbe Deneyi Sonuçları 72
5.4 Genel Sonuçlar 73
5.5 Öneriler 74
KAYNAKLAR 75
EKLER 81
ÖZGEÇMİŞ 105

KISALTMALAR

ASTM : Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
CCC : Karbon-Karbon Kompozit
cm : Santimetre
cm³ : Santimetreküp
CNT : Karbon Nanotüp
dk : Dakika
g : Gram
GPa : Gigapascal
J : Joule
KNT : Karbon Nanotüp
LCP : Sıvı Kristal Polimer
m : Metre
mm : Milimetre
MMC : Metal Matrisli Kompozit
MPa : Megapascal
N : Newton
nm : Nanometre
PMC : Polimer Matrisli Kompozit
RTM : Reçine Transfer Kalıplama
SMC : Seramik Matrisli Kompozit
TPa : Terapascal
VARTM : Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama
Å : Ångström
µm : Mikrometre
°C : Derece Santigrat

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Dost Kimya A.Ş.'den temin edilen elyaf takviye malzemeleri özellikleri.. ..... **33**
Çizelge 3.2 : Ege Nanotek Firması'ndan temin edilen karbon nanotüp (CNT) malzemesi özellikleri. **33**
Çizelge 3.3 : Üretilen kompozit plakalarındaki tabakaların yerleşimi. **34**
Çizelge 3.4 : Çalışmada matris olarak tercih edilen epoksi ve sertleştirici malzemenin özellikleri. **34**
Çizelge 3.5 : Çalışmada üretilmiş her bir kompozit plakada kullanılan malzemelerin miktar bilgileri. **35**
Çizelge 3.6 : CNT katkısı yapılmış alkol kolloid karışımları için malzeme miktar özellikleri. **36**
Çizelge 3.7 : Çalışma kapsamında üretilen elyaf takviyeli kompozit plakaların kalınlık özellikleri. **40**
Çizelge 4.1 : Çalışmada numuneler üzerinde gerçekleştirilen çekme deneyleri için dayanım (MPa) verileri. **45**
Çizelge 4.2 : Çalışmada numuneler üzerinde gerçekleştirilen çekme deneyleri için uzama (%) verileri. **45**
Çizelge 4.3 : Çalışmada numuneler üzerinde gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyleri için eğme dayanımı (MPa) verileri. **51**
Çizelge 4.4 : Çalışmada numuneler üzerinde gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyleri için maksimum eğme kuvveti (N) verileri. **52**
Çizelge 4.5 : Çalışmada numuneler üzerinde gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyleri için maksimum eğme kuvvet altındaki eğme uzaması (mm) verileri. **52**
Çizelge 4.6 : Çalışmada numuneler üzerinde gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyleri için numunelerin yük altındaki kopma uzaması (mm) verileri. **53**
Çizelge 4.7 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için darbe enerjisi (J) verileri. **58**
Çizelge 4.8 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için maksimum darbe enerjisinin sönümlendiği zaman (ms) verileri. **59**
Çizelge 4.9 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için maksimum darbe enerjisinin sönümlendiği sapma/yer değiştirme (mm) verileri. **59**
Çizelge 4.10 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için temas kuvveti (N) verileri. **60**

Çizelge 4.11 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için temas kuvveti altındaki zaman (ms) verileri. **61**
Çizelge 4.12 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için temas kuvveti altında sapma/yer değiştirme (mm) verileri. **62**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Çalışma kapsamında temin edilen cam elyaf takviye kumaş. **33**
Şekil 3.2 : Tabakalar halinde yerleştirilerek tabakalı kompozit malzeme yapılacak şekilde hazırlanan cam elyaf kumaş örneği. **35**
Şekil 3.3 : Çalışmada kullanılan boya sprey tabancası. **35**
Şekil 3.4 : Çalışma kapsamında CNT-Alkol kolloid karışımıyla CNT kaplaması yapılmış kevlar elyaf kumaşlar. **36**
Şekil 3.5 : Vakum İnfüzyon ile üretim işlemine hazır hale getirilmiş vakum infüzyon sistemi. **37**
Şekil 3.6 : Vakum infüzyon üretim yöntemi ile kürleşmeye devam eden üretim sonrası vakum infüzyon sistemi içerindeki kompozit plaka. **38**
Şekil 3.7 : Çalışma kapsamında üretilen sekiz adet kompozit plakadan elde edilmiş her bir plakadan ASTM D3039 standardına uygun olarak altı adet üretilmiş çekme deneyi numuneleri. **40**
Şekil 3.8 : Çalışma kapsamında üretilen sekiz adet kompozit plakadan elde edilmiş her bir plakadan ASTM D7264 standardına uygun olarak altı adet üretilmiş 3 nokta eğme deneyi numuneleri. **40**
Şekil 3.9 : Çalışma kapsamında üretilen sekiz adet kompozit plakadan elde edilmiş her bir plakadan ASTM D7136 standardına uygun olarak altı adet üretilmiş düşen ağırlık darbe deneyi numuneleri. **41**
Şekil 3.10 : Çalışmada çekme deneyi uygulaması için tercih edilen Shimadzu AG-X Plus test cihazı. **41**
Şekil 3.11 : Çalışmada çekme deneyi uygulaması için tercih edilen Shimadzu AG-X Plus test cihazında yapılan deney esnasındaki bir numune. **42**
Şekil 3.12 : Çalışmada 3 nokta eğme deneyi uygulaması için tercih edilen Shimadzu AGS-X test cihazı. **42**
Şekil 3.13 : Çalışmada 3 nokta eğme deneyi uygulaması için tercih edilen Shimadzu AGS-X test cihazında yapılan deney esnasındaki bir numune. **43**
Şekil 3.14 : Çalışmada 3 nokta eğme deneyi uygulaması için tercih edilen Instron CEAST 9350 test cihazı. **43**
Şekil 4.1 : Cam, karbon, Kevlar ve hibrit elyaf takviyeli ve CNT katkılı veya katkısız toplam sekiz polimer matris kompozit plaka için ortalama çekme gerilmesi altında çekme dayanımı (MPa) ve standart sapma (kırmızı). **46**
Şekil 4.2 : Cam, karbon, Kevlar ve hibrit elyaf takviyeli ve CNT katkılı veya katkısız toplam sekiz polimer matris kompozit plaka için ortalama çekme gerilmesi altında uzaması (%) ve standart sapma (kırmızı). **47**
Şekil 4.3 : Çekme deneyi sonrasında CNT katkılı ve CNT katkısız cam elyaf takviyeli matris kompozit numuneleri için makrograflar. **49**
Şekil 4.4 : Çekme deneyi sonrasında CNT katkılı ve CNT katkısız karbon elyaf takviyeli matris kompozit numuneleri için makrograflar. **49**
Şekil 4.5 : Çekme deneyi sonrasında CNT katkılı ve CNT katkısız kevlar elyaf takviyeli matris kompozit numuneleri için makrograflar. **49**

Şekil 4.6 : Çekme deneyi sonrasında CNT katkılı ve CNT katkısız hibrit elyaf takviyeli matris kompozit numuneleri için makrograflar. **50**
Şekil 4.7 : Çalışmada üç nokta eğme deneyleri uygulanmış numuneler. **51**
Şekil 4.8 : Cam, karbon, Kevlar ve hibrit elyaf takviyeli ve CNT katkılı veya katkısız toplam sekiz polimer matris kompozit plaka için ortalama maksimum eğme dayanımı (MPa) ve standart sapma (kırmızı). **54**
Şekil 4.9 : Cam, karbon, Kevlar ve hibrit elyaf takviyeli ve CNT katkılı veya katkısız toplam sekiz polimer matris kompozit plaka için ortalama maksimum eğme kuvveti (N) ve standart sapma (kırmızı). **55**
Şekil 4.10 : Cam, karbon, Kevlar ve hibrit elyaf takviyeli ve CNT katkılı veya katkısız toplam sekiz polimer matris kompozit plaka için ortalama maksimum eğme kuvveti altında uzaması (mm) ve standart sapma (kırmızı). **56**
Şekil 4.11 : Cam, karbon, Kevlar ve hibrit elyaf takviyeli ve CNT katkılı veya katkısız toplam sekiz polimer matris kompozit plaka için eğme kuvveti altında ortalama kopma uzaması (mm) ve standart sapma (kırmızı). **56**
Şekil 4.12 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için darbe enerjisi (J) ve standart sapma (kırmızı). **63**
Şekil 4.13 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için maksimum darbe enerjisinin sönümlendiği zaman (ms) ve standart sapma (kırmızı) verileri. **63**
Şekil 4.14 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için maksimum darbe enerjisinin sönümlendiği sapma/yer değiştirme (mm) ve standart sapma (kırmızı) verileri. **65**
Şekil 4.15 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için temas kuvveti (N) ve standart sapma (kırmızı) verileri. **65**
Şekil 4.16 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için temas kuvveti altındaki zaman (ms) ve standart sapma (kırmızı) verileri. **66**
Şekil 4.17 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için temas kuvveti altında sapma/yer değiştirme (mm) ve standart sapma (kırmızı) verileri. **66**
Şekil 4.18 : Düşen ağırlık darbe deneyi uygulanmış CNT katkılı (sol) ve CNT katkısız (sağ) cam elyaf kumaş takviyeli polimer matrisli kompozit malzeme numuneleri. **67**
Şekil 4.19 : Düşen ağırlık darbe deneyi uygulanmış CNT katkılı (sol) ve CNT katkısız (sağ) karbon elyaf kumaş takviyeli polimer matrisli kompozit malzeme numuneleri. **68**
Şekil 4.20 : Düşen ağırlık darbe deneyi uygulanmış CNT katkılı (sol) ve CNT katkısız (sağ) kevlar elyaf kumaş takviyeli polimer matrisli kompozit malzeme numuneleri. **68**
Şekil 4.21 : Düşen ağırlık darbe deneyi uygulanmış CNT katkılı (sol) ve CNT katkısız (sağ) hibrit yapılı elyaf kumaş takviyeli polimer matrisli kompozit malzeme numuneleri. **68**
Şekil A.1 : Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için dayanım-uzama grafiği. **81**
Şekil A.2 : CNT katkılı cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için dayanım-uzama grafiği. **81**

Şekil A.3 : Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için dayanım-uzama grafiği. **82**
Şekil A.4 : CNT katkılı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için dayanım-uzama grafiği..... **82**
Şekil A.5 : Kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için dayanım-uzama grafiği. **83**
Şekil A.6 : CNT katkılı kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için dayanım-uzama grafiği..... **83**
Şekil A.7 : Hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için dayanım-uzama grafiği. **84**
Şekil A.8 : CNT katkılı hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için dayanım-uzama grafiği. **84**
Şekil A.9 : Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-uzama grafiği. .. **85**
Şekil A.10 : CNT katkılı cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-uzama grafiği..... **85**
Şekil A.11 : Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-uzama grafiği. **86**
Şekil A.12 : CNT katkılı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-uzama grafiği..... **86**
Şekil A.13 : Kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-uzama grafiği. **87**
Şekil A.14 : CNT katkılı kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-uzama grafiği..... **87**
Şekil A.15 : Hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-uzama grafiği. **88**
Şekil A.16 : CNT katkılı hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-uzama grafiği. **88**
Şekil A.17 : Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-zaman grafiği. .. **89**
Şekil A.18 : Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-zaman grafiği. **89**
Şekil A.19 : Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-yer değiştirme grafiği. **90**
Şekil A.20 : Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-yer değiştirme grafiği. **90**
Şekil A.21 : CNT katkılı cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-zaman grafiği. **91**
Şekil A.22 : CNT katkılı cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-zaman grafiği..... **91**
Şekil A.23 : CNT katkılı cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-yer değiştirme grafiği. **92**
Şekil A.24 : CNT katkılı cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-yer değiştirme grafiği. **92**
Şekil A.25 : Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-zaman grafiği. **93**
Şekil A.26 : Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-zaman grafiği. **93**
Şekil A.27 : Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-yer değiştirme grafiği. **94**
Şekil A.28 : Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-yer değiştirme grafiği. **94**

Şekil A.29 : CNT katkılı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-zaman grafiği. **95**
Şekil A.30 : CNT katkılı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-zaman grafiği. **95**
Şekil A.31 : CNT katkılı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-yer değiştirme grafiği. **96**
Şekil A.32 : CNT katkılı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-yer değiştirme grafiği. **96**
Şekil A.33 : Kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-zaman grafiği. **97**
Şekil A.34 : Kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-zaman grafiği. **97**
Şekil A.35 : Kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-yer değiştirme grafiği. **98**
Şekil A.36 : Kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-yer değiştirme grafiği. **98**
Şekil A.37 : CNT katkılı kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-zaman grafiği. **99**
Şekil A.38 : CNT katkılı kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-zaman grafiği. **99**
Şekil A.39 : CNT katkılı kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-yer değiştirme grafiği. **100**
Şekil A.40 : CNT katkılı kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet yer değiştirme grafiği. **100**
Şekil A.41 : Hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-zaman grafiği. **101**
Şekil A.42 : Hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-zaman grafiği. **101**
Şekil A.43 : Hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-yer değiştirme grafiği. **102**
Şekil A.44 : Hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-yer değiştirme grafiği. **102**
Şekil A.45 : CNT katkılı hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-zaman grafiği. **103**
Şekil A.46 : CNT katkılı hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-zaman grafiği. **103**
Şekil A.47 : CNT katkılı hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-yer değiştirme grafiği. **104**
Şekil A.48 : CNT katkılı hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-yer değiştirme grafiği. **104**

KARBON NANOTÜP KATKISI İLE KATMANLI CAM, KARBON VE ARAMİD ELYAF TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE MEKANİK PERFORMANSLARININ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Kompozit malzemeler iki veya daha fazla sayıda birbirinden farklı malzemelerin belirli düzenlerde makro ölçekte bir araya getirilmeleri ile elde edilen bir malzeme türüdür. Kompozit malzemelerin alt grubunu oluşturan polimer matrisli kompozitler günümüzde birçok sektörde kullanımı tercih edilen bir kompozit malzeme türüdür. Son yıllarda polimer matrisli kompozit malzemelerin kullanım alanlarının genişlemesi bu malzemeler için giderek artan yüksek bir malzeme performansı ihtiyacı oluşturmuştur. Bu ihtiyaç, kompozit malzemelerde ana takviye malzemelerine ek olarak başka malzemeler ile de kompozit malzemenin takviye edilerek polimer matrisli hibrit kompozit yapısı elde edilmesini sağlamıştır.

Bu yüksek lisans çalışmasında, karbon nanotüp (CNT) katkısının vakum infüzyon yöntemi ile üretilen elyaf takviyeli epoksi reçine matrisli kompozit levha malzemelerinin mekanik özelliklerine üzerindeki olası etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada aynı kumaş örgü yapısı ve benzer alan yoğunluğu değerlerine sahip cam, karbon ve kevlar elyaf kumaşlar kullanılarak cam, karbon ve elyaf kumaş takviyeli polimer matris kompozit plakalar üretilmiştir. Aynı üretim parametreleri kullanılarak, aynı kompozit plakalar toplam kompozit kütle bazında %0,5 CNT ile hibrit kompozit olarak üretilmiştir. Ayrıca CNT'nin farklı elyaf türlerinde performansa etkisinin her elyaf takviyeli yapı için farklı olabileceği düşünüldüğünden cam, karbon ve elyaf kumaşlardan oluşan bir bileşimi içeren hibrit yapılı elyaf kumaş takviyeli kompozit levha malzemesi üretilmiştir. Bu malzeme önceki elyaf takviyeli kompozit levha üretimlerinde olduğu gibi üretim parametreleri aynı tutularak CNT katkısı ile üretilmiştir. Çalışmada, CNT katkısı içeren ve içermeyen kompozit plakalar, cam, elyaf, kevlar ve hibrit yapılı elyaf kumaşları içeren çeşitli takviyeler ile üretilmiştir. Çalışma sonunda CNT takviyesinin elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzeme üzerindeki mekanik etkisi incelenmiştir. Bu mekanik performans analizi için çekme deneyi, üç nokta eğme deneyi ve düşen ağırlık darbe deneyleri çalışma kapsamında uygulanmıştır.

Gerçekleştirilen mekanik deneyler sonucunda kompozit yapısına katılmış CNT'nin malzeme performanslarına olan katkısı çekme deneyinde cam elyaf takviyeli kompozit yapıda %14, üç nokta eğme deneyinde kevlar elyaf takviyeli kompozit yapıda %15, düşen ağırlık darbe deneyinde ise cam elyaf takviyeli kompozit yapıda %11 ve karbon elyaf takviyeli kompozit yapıda ise %120 kadar olmuştur.

Anahtar kelimeler: Karbon nanotüp, cam elyaf, karbon elyaf, kevlar elyaf, vakum infüzyon, hibrit kompozit

PRODUCTION OF LAYERED GLASS, CARBON AND ARAMİD FIBER REINFORCED HYBRID COMPOSITE MATERIALS WITH CARBON NANOTUBE ADDITIVE AND IMPROVING MECHANICAL PERFORMANCE

SUMMARY

Composite materials are a type of material obtained by combining two or more different materials in certain order in macro scale. Polymer matrix composites, which constitute the subgroup of composite materials, are a type of composite material preferred to be used in many sectors today. The expansion of the usage areas of polymer matrix composite materials in recent years has created an increasing need for high performance for these materials. This need has enabled a hybrid composite structure with polymer matrix to be obtained by reinforcing the composite material with other materials in addition to the main reinforcement materials in composites.

In this graduate study, the possible effect of carbon nanotube (CNT) additive on the mechanical properties of fiber reinforced epoxy resin matrix composite plates produced by vacuum infusion method was investigated. In this study, glass, carbon and fiber fabric reinforced polymer matrix composite plates were produced by using glass, carbon and kevlar fiber fabrics with the same fabric mesh structure and similar area density values. Using the same production parameters, the same composite plates were produced as hybrid composite with 0.5% CNT on the total composite mass basis. In addition, since it is thought that CNT's effect on performance in different fiber types may be different for each fiber-reinforced structure, a hybrid-structured fiber fabric reinforced composite plate containing a combination of glass, carbon and fiber fabrics was produced and same plate was also produced with CNT additive, keeping the production parameters the same as in the previous fiber reinforced composite plate productions. In the study, composite plates with or without CNT additive were produced with various reinforcements including glass, fiber, kevlar and hybrid fiber fabrics. At the end of the study, the mechanical effect of CNT reinforcement on fiber reinforced polymer matrix composite material was investigated. For this mechanical performance analysis, tensile test, three point bending test and low velocity drop weight impact tests were applied within the scope of the study.

As a conclusion of the mechanical tests performed, the contribution of CNT to the material performance of the composite structure was 14% in the tensile test, 15% in the kevlar fiber reinforced composite structure in the three-point bending test, 11% in the glass fiber and 120% in the carbon fiber reinforced composite structures in the low velocity drop weight impact test.

Keywords: Carbon nanotube, glass fiber, carbon fiber, kevlar fiber, vacuum infusion, hybrid composite

1. GİRİŞ

İmalat sanayilerindeki hızlı büyüme, dayanıklılık, yoğunluk ve düşük maliyet açısından malzemelerin iyileştirilmesi ve sürdürülebilirliğin arttırılması ihtiyacını doğurmuştur. 20. yüzyılın ortalarında ise modern teknoloji için yeni beklentiler sağlayan umut verici bir mühendislik malzemesi sınıfı olarak ortaya çıkan kompozit malzemeler günümüzde insanlık için vazgeçilmez malzeme türlerinden biri olmuştur. Genel olarak bileşenler arasında farklı özelliklere ve farklı sınırlara sahip iki veya daha fazla bileşenden oluşan herhangi bir malzeme, kompozit malzeme olarak adlandırılabilir [1,2].

Ülkemizde Kompozit malzeme sektörü yaklaşık 270 milyon Euro ihracat rakamlarına ulaşmıştır. İhracat payı cam takviyeli polimer kompozit boru üretimi, cam elyafı ve polyester reçine üretimi, teknik tekstil üretimi ve reçine transfer kalıplama metodu ile üretimlerine aittir. Küresel olarak yaygın olarak kullanılan elyaf takviye malzemeleri üretimleri incelendiğinde dünyadaki toplam üretimde ülkemiz %86 cam ve %12 karbon elyaf ile yüksek bir paya sahiptir. Matris malzemesi olarak reçine malzemeleri için ise doymamış polyester ve vinil ester reçineler ülkemizde üretilirken epoksi ve termoplastik reçineler ithal edilmektedir. Reçine hammaddelerinin az bir kısmı ülkemizde üretilirken büyük çoğunluğu ithal edilmektedir. Kompozit malzeme üretiminde hammadde olarak kullanılan teknik tekstillerin ülkemizde yüksek miktarlardaki üretimi ve yaygınlaşması ile kompozit sektörü hammadde ihtiyacını günümüzde ülke içinden sağlayabilmektedir. Ülkemiz kompozit sektörü ithalat ve ihracat rakamları bakımından 270 milyon Euroluk bir ticari hacme sahiptir [3].

Ülkemizde ve dünyada yapılan çeşitli uygulamalarda karbon allotroplarının kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak kullanımı mevcuttur. Polimer matrisli hibrit kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu ise literatürde belirli alanlarla sınırlı kalmıştır. Ülkemiz araştırmalarında ise çoğunlukla ticari anlamda ülkemizde yaygın olarak bulunabilen özellikle cam elyaf ve karbon elyaf malzemelerin takviye malzemesi olarak tercih edildikleri polimer matrisli kompozit malzemelerin malzeme

performansları irdelenmiştir. Ülkemizde Cam ve Karbon elyaf lamine kumaşların farklı kompozisyonları ve kombinasyonları ile reçine transferi (vakum infüzyon) yöntemi kullanılarak üretilen polimer matrisli kompozit malzemeler incelenmiştir. Cam ve karbon elyaf malzemelerle takviye edilmiş karbon esaslı, özellikle de Karbon Nanotüp partikül katkılarında çalışmaların ise az olduğu gözlemlenmiştir. Cam ve karbon elyaf takviye malzemelerine ek olarak aramid (kevlar) elyafın da beraberinde olduğu karbon nanotüp katkılı polimer matrisli hibrit kompozit malzemeler için çalışmaların reçine transfer (vakum infüzyon) yönteminde ise çalışmaların neredeyse olmadığı görülmüştür. Ticari uygulamalarında giderek artan kullanımı ve paralel olarak üretimindeki artışı ülkemizde de kaliteli ve yüksek performanslı elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit üretiminin gerekliliğini daha çok arttırmaktadır. Bu bağlamda elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin farklı elyaf malzemeler ve farklı katkı malzemeleri kullanılarak üretilmesi ve malzeme performans analizleri giderek daha çok önem arz etmektedir. Ülkemiz literatürüne yapacağı katkı göz önünde bulundurulduğunda cam, karbon ve aramid (kevlar) elyaf takviyeli ve karbon nanotüp katkılı polimer matrisli hibrit kompozit malzemelerin reçine transfer (vakum infüzyon) yöntemi ile araştırılması planlanmıştır. Bu yüksek lisans tez çalışmasında ticari uygulamaları ülkemizde giderek yaygınlaşmaya başlayan elyaf takviyeli epoksi reçine polimer matrisli kompozit malzemelerin vakum infüzyon yöntemi kullanılarak karbon nanotüp katkısı ile üretilerek malzeme performanslarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu yüksek lisans çalışmasının ilk kısmında literatür incelenmiştir. Devamında deneysel çalışmalar bölümünde çalışma kapsamında hangi kompozit malzemelerin hangi ham maddelerden hangi üretim yöntemi ile ne şekilde üretildiği ve bu malzemelerden elde edilen numunelerin hangi standartlarda hangi test parametreleri ile hangi mekanik testlerin uygulandığı incelenmiştir. Deneysel sonuçlar bölümünde kompozit malzemelerden elde edilen numunelere uygulanan mekanik testlerin sonuçları incelenmiştir. Sonuç bölümünde ise bu yüksek lisans tezi kapsamında yapılan çalışmalar ile çalışmaların sonuçları irdelenmiştir.

2. LİTERATÜR

2.1 Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler iki veya daha fazla sayıda birbirinden farklı malzemelerin belirli düzenlerde makro ölçekte bir araya getirilmeleri ile elde edilen bir malzeme türüdür. Kompozit malzemenin performans karakteristikleri kompozit malzemenin yapısını oluşturan farklı malzemelerin belirli oranlarda yapıya katılması ile sağlanır. Kompozit malzemelerin üretilmesindeki ana amaç, farklı malzemelerin üretilmek kompozitin istenen yapısına katılmasıdır [1,2,4]. Kompozit malzemelerin imalatında doğal veya sentetik malzemelerin kullanılması, inşaat, mekanik, otomobil, havacılık, biyomedikal ve deniz gibi çeşitli alanlarda önemli uygulamalar ortaya koyulmuştur [1,2,4].

Kompozit malzemeler temel olarak malzeme performansının arttırılması istenen bir ana matris malzemesini ve bu matris ana malzemesinin malzeme performansını arttırmak amacıyla yapıya katılmış olan takviye malzemesinin belirli bir kompozisyonda yapıya ilavesi ile üretilmektedir [1,2,4,5].

Kompozit malzemeler matris malzemesinin türü, takviye malzemesinin boyutu ve şekli olmak üzere farklı sınıflandırma kriterlerine sahiptirler [1,2,4,5]. Matris malzemesinin türüne göre kompozitler; metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitler olmak üzere üç ana malzeme grubundan oluşmaktadır. Takviye malzemesinin şekline ve boyutuna göre ise kompozitler; parçacık takviyeli, elyaf takviyeli kompozitler ve yapısal kompozitleri olmak üzere farklı yapısal özelliklere sahip malzeme türleri ile takviye edilmektedirler [1,2,4,5].

2.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

2.1.1 Metal Matrisli Kompozitler

Metaller son derece çok yönlü mühendislik malzemeleridir. Metalik bir malzeme, uygun alaşım bileşimi seçimi ve termomekanik işleme yöntemi yoluyla çok çeşitli kolayca kontrol edilebilir özellikler sergileyebilir. Metalik alaşımların mühendislikte yoğun kullanımı, yalnızca güçlerini ve tokluklarını değil, aynı zamanda geniş bir üretim süreci yelpazesi ile mühendislik bileşenlerinin göreceli kolaylığını ve düşük maliyetini de yansıtır [6].

Metal matrisli kompozitler (MMC) 1970'lerin başında geliştirilmiştir ve geliştirilmeleri için birincil destek havacılık endüstrisinden gelmiştir. Şu anda, MMC'lerin yüzde 80'inden fazlası kara taşımacılığı için kullanılmaktadır. MMC üretim teknolojisi, derin potansiyeline rağmen otomotiv endüstrisinde henüz yaygın olarak benimsenmiş değildir. Bu, üretimin, şirket finansmanı üzerinde ağır bir yük oluşturan ve kabul edilebilir maliyet-performans oranının altında sonuçlanan özel tesisler gerektirdiği gerçeğine bağlanabilir. Çeşitli mühendislik çabaları, geleneksel ve dolayısıyla uygun maliyetli bir yöntem kullanarak MMC üretimini mümkün kılmıştır. MMC materyallerinin sunduğu ek değerlerin, araç teknolojilerinde yeni bir sınıra öncülük edeceğine inanılmaktadır [7, 8].

MMC'ler otomotiv uygulamalarında gittikçe artan bir kullanım bulmaktadır ve bu, korozyon dirençleriyle ilgili endişeleri artırmıştır. Genel olarak metal matrisli kompozitler, matris ile takviyeler arasındaki galvanik korozyon nedeniyle matris malzemelere göre çok daha yüksek korozyon oranları gösterir. Metal matrisli kompozitlerdeki galvanik korozyon, dikkatli malzeme seçimi ile azaltılabilir. Ek olarak, metal matrisli kompozitlerin galvanik korozyonu, bunları oluşturan malzemelere ve ayrıca imalat ve işlemeye bağlıdır. Metal matrisli kompozit bileşenlerinin elektrokimyasal ve kimyasal özelliklerinin bilgisi, metal matrisli kompozitin korozyon davranışını bir dereceye kadar doğrulukla tahmin etmek için kullanılabilir, ancak yalnızca bazı durumlarda. MMC bileşenlerinin akıllıca seçilmesi, korozyona karşı yeterli dirence sahip metal matrisli kompozitlerin geliştirilmesine yardımcı olabilir. İşlem değişkenlerinin metal matrisli kompozitlerin korozyon davranışı üzerindeki etkilerinin tahmin edilmesi daha zordur ve bazen yalnızca MMC

üretilip korozyon davranışı için test edildikten sonra tam olarak bilinebilir. Yeterli korozyon direncine sahip metal matrisli kompozitler üretmek için işleme yöntemlerinin değiştirilmesi gerekebileceği tahmin edilmelidir [9].

MMC'lerin korozyonuna ilişkin deneysel veriler, genel olarak, metal matrislere takviye eklenmesinin, özellikle hava ve klorür iyonlarının varlığında korozyon oranlarını artırdığını göstermektedir. Bununla birlikte, takviyelerin dahil edilmesinin korozyon oranını azalttığı bazı durumlar vardır. Korozyon üzerindeki etkinin, donatıların geometrisi ve hacim yüzdesinden etkilendiği görülmektedir; genellikle lifler korozyon direncini partiküllerden daha fazla bozar ve bozunma daha yüksek hacim yüzdelerinde daha yüksektir. MMC'lerin korozyon direnci, donatıların yakınındaki matrisin doğasını değiştirdiği için ısıl işlem ve ısıl döngüden büyük ölçüde etkilenir. Anotlama genellikle kompozit üzerinde daha az etkilidir ve ara yüzey alanları korozyona en duyarlı olanlardır. Ara fazların varlığı, çeşitli kompozitlerde korozyon oranlarını artırır. Tüm kompozit yüzeyin uygun kaplamalarla kaplanarak güçlendirilmesi, korozyona karşı koruma sağlayabilir [9].

MMC'ler, matris malzemelerine bağlı olarak farklı kategorilere ayrılır. En yaygın kullanılan metalik matris konfigürasyonlarının bazı örnekleri şunlardır:

- Alüminyum esaslı kompozitler; matris olarak alüminyum, dökme alaşım veya dövme alaşım olabilir (yani, AlMgSi, AlMg, AlCuSiMn, AlZnMgCu, AlCu, AlSiCuMg)
- Magnezyum bazlı kompozitler
- Titanyum bazlı kompozitler
- Bakır bazlı kompozitler
- Süper alaşım bazlı kompozitler

Alüminyum, MMC'lerde en çok kullanılan matris malzemesidir [9].

Alüminyum-matris kompozitler, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde yaygın olarak kullanıldıkları için en yaygın olarak incelenen MMC'dir. SiC, Al_2O_3 ve B_4C gibi takviye bileşikleri, erimiş alüminyumda kolayca ve etkili bir şekilde karıştırılabilir. Magnezyum-matris kompozitler benzer avantajlara sahiptir, ancak fabrikasyondaki sınırlamalar ve düşük ısıl iletkenlik nedeniyle, alüminyum bazlı MMC'lere kıyasla yaygın olarak kullanılmamaktadır. Magnezyum ve alaşımlarının düşük yoğunluğu

sayesinde uzay endüstrisi için magnezyum-matris kompozitler geliştirilmiştir. Titanyum alaşımları, yüksek sıcaklıklarda iyi mukavemetleri ve mükemmel korozyon direnci nedeniyle MMC'lerin imalatında matris malzemesi olarak kullanılır. Alüminyum ile karşılaştırıldığında, titanyum alaşımları gücünü daha yüksek sıcaklıkta tutar, bu da çalışma hızları çok yüksek olan uçak ve füze yapılarının üretiminde avantajlıdır. Bununla birlikte, temel sorunları, yüksek reaktif titanyumun takviye malzemeleriyle işlenmesidir. Elyaf bazlı titanyum kompozitler, uçak yapılarının geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Isı iletkenliği ve yüksek sıcaklık mukavemeti özellikleri açısından, bakır-matris kompozitler diğer MMC'lere kıyasla üstündür. Süper alaşımlar, genellikle daha yüksek sıcaklıklarda ve hızlarda çalıştıkları gaz türbini kanatlarının üretimi için aday malzemeler olarak kullanılır [10].

MMC'ler düşük yoğunlukları, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, yüksek sıcaklık mukavemeti tutma özellikleri ve mükemmel sünme, yorulma ve aşınma dirençleri sayesinde, motor ve frenlerdeki dökme demir ve diğer malzemeleri değiştirme potansiyeline sahiptir. Tipik olarak, otomotiv uygulamaları için düşünülen metal matriksli kompozitler, silikon karbür (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3) veya diğer seramik partiküller veya alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi hafif bir alaşımdan kısa lifler içerir. Metal matriksli kompozitler dizel motor pistonlarında, silindir gömleklerinde, fren kampanalarında ve fren rotorlarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir. MMC'lerin denendiği diğer potansiyel uygulamalar bağlantı çubukları, piston pimleri ve tahrik milleridir. Daha geniş kullanımlarının önündeki en büyük engel yüksek maliyetleridir [11].

Havacılık endüstrisinde 2024Al, 7075Al ve Ti-6Al-4V gibi kullanılan metal alaşımları, birçok MMC için popüler matris malzemeleridir. Nikel süper alaşımları, yüksek sıcaklık uygulamaları için metal matrisli kompozitlerde matris fazı olarak kullanılabilir [12].

Havacılık endüstrisinde metal matris fazı, sürekli lifler veya parçacıklar şeklinde seramik veya metal oksit kullanılarak güçlendirilir. Bor (veya borsik, SiC kaplı bir bor), karbon ve silisyum karbür (SiC) genellikle sürekli elyaf takviyesi olarak kullanılır ve bunlar matris fazı boyunca dağıtılır. Silisyum karbür, alümina (Al_2O_3) ve bor karbür (B_4C) popüler parçacık takviyeleridir. MMC'lerde maksimum takviye hacmi içeriği genellikle %30'un altındadır ve bu, havacılık ve uzay karbon-epoksi kompozitlerinin lif içeriğinden (hacimce %55-65) daha düşüktür. Yüksek sertlik ve

düşük süneklik nedeniyle MMC'lerin işlenmesi, şekillendirilmesi ve imalatındaki zorluk nedeniyle yaklaşık %30'un üzerindeki takviye içerikleri sıklıkla kullanılmamaktadır [13].

Bir MMC sistemi, genellikle matrisin metal alaşımı tanımı ve seramik takviyenin malzeme türü, hacim oranı ve formu ile basit olarak adlandırılır. Örneğin, 6061Al/30V/o SiCp, hacimce yüzde 30 silikon karbür partikül takviyesi ile kesintili olarak güçlendirilmiş bir 6061 alüminyum alaşımını belirtir [6].

MMC'ler, diğer havacılık uygulamalarında da uygulanmıştır. Elektronik raflar için ekstrüde bölümler şeklinde SiC partikül takviyeli alüminyum kullanılmıştır. Spesifik olarak, bir 6061Al/SiC/25p malzeme, bir askeri uçaktaki güçlendirilmemiş alüminyum rafları %30 ağırlık tasarrufu ile değiştirilmiştir [13].

Ek olarak, MMC'lerin termal genleşme katsayısını özelleştirme yeteneği, termal stabilite gerektiren yapılarda malzemelerin değiştirilmesinde faydalı olmuştur. General Electric Co., düşük genleşme ve yüksek aşınma direnci gerektiren seçilmiş alanlarda 6061/SiC/40p metal matrisli kompozit kullanarak Gelişmiş Kompozit Optik Sistem Gimbal'ı tasarlamıştır [13].

Isıl genleşme katsayısını eşleşen malzemelerle eşleştirme yeteneğini kullanan bir başka uygulama, eylemsiz yönlendirme ünitesi için kapaklarda 6061/SiC/40p MMC kullanılmasıydı. Bu uygulamada MMC, katı bir bloktan işlenmesi gereken berilyumun yerini almıştır. MMC malzemesi, sadece nihai işleme ile neredeyse net şekle dönüştürülebilir. Ek olarak, MMC'lerin işlenmesi, berilyum işlemenin sahip olduğu toksisite sorunlarına sahip olmadığı için geleneksel makine atölyelerinde yapılabilir [13].

MMC'lerin gelişimi, yalnızca monolitik metallerde elde edilebilenlerin ötesinde özellik kombinasyonlarına ulaşma ihtiyacını yansıtmıştır. Bu nedenle, bir metale takviye ilavesinden kaynaklanan özel kompozitler, sonuçta ortaya çıkan metal matris kompozitte geliştirilmiş yorulma ve aşınma direnci ile birleştirilmiş gelişmiş spesifik sertlik veya belki de arzu edilen termal özelliklerle (örneğin, azaltılmış termal genleşme katsayısı ve iletkenlik) birlikte artan spesifik mukavemet sağlayabilir. Bununla birlikte, özelliklerinin iyileştirmelerini gerçekleştirmenin maliyeti, birçok potansiyel metal matris kompozit uygulamasında bir sorun olmaya devam etmektedir [6].

MMC'ler, polimer matris kompozitlere veya seramik matris kompozitlere kıyasla belirgin şekilde farklı özellik kombinasyonları ve işleme prosedürleri içerir. Bu, büyük ölçüde matris malzemeleri olarak metaller, polimerler ve seramikler arasındaki doğal farklılıklardan ve kullanılan takviyelerin doğasından kaynaklanmaktadır. Saf metaller opak, parlak kimyasal elementlerdir ve genellikle iyi ısı ve elektrik iletkenleridir. Cilalandıklarında ışığı iyi yansıtma eğilimindedirler. Ayrıca, çoğu metal sünektir ancak yoğunlukları nispeten yüksektir. Bu özellikler, atomların elektron kaybetme eğiliminde olduğu metallerdeki atom bağının doğasını yansıtır; ortaya çıkan serbest elektron "gazı" daha sonra pozitif metal iyonlarını yerinde tutar. Buna karşılık, seramik ve polimerik malzemeler, elementlerin kimyasal bileşikleridir. Seramikte bağlanma ve polimerlerdeki intramoleküler bağ, ya atomlar arasında elektron paylaşımı ya da elektronların bir atomdan diğerine transferi ile karakterize edilir. Seramiklerde ve polimerlerde serbest elektronların bulunmaması (moleküller arası van der Waals bağı nedeniyle polimerlerde serbest elektron oluşmaz), ısı ve elektriğin zayıf iletkenliğine ve metalik malzemelere kıyasla daha düşük deformasyon ve tokluğa neden olur [6].

MMC'ler diğer kompozit malzemelerden birkaç yönden farklılık gösterir. Bu genel ayrımlardan bazıları aşağıdaki gibidir:

- Bir MMC'nin matris fazı, bir polimer veya seramiğin aksine, saf veya alaşımlı bir metaldir.
- MMC'ler, seramik veya seramik matrisli kompozitlerlerden daha yüksek süneklik ve tokluğa sahip olmakla birlikte, kendi takviyesiz metal matris alaşımlarından daha düşük süneklik ve tokluğa sahiptirler.
- MMC'lerde takviyenin rolü, polimer matrisli kompozitlerlerde olduğu gibi mukavemeti ve modülü artırmaktır. Seramik matrisli kompozitlerlerde takviye genellikle iyileştirilmiş hasar dayanımı sağlamak içindir.
- MMC'ler genellikle polimerlerden ve polimer matrisli kompozitlerden daha yüksek ancak seramik ve seramik matrisli kompozitlerden daha düşük bir sıcaklık kapasitesine sahiptir [6].

2.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik matrisli kompozitler benzersiz ve nispeten yeni bir yapısal malzeme sınıfıdır ve teknik seramiklerdir İşleme yoluna ve ara faz tipine bağlı olarak. arayüz, geniş bir mekanik ve termofiziksel özellikler değişkenliği elde edilebilir ve yeni uygulamalarla sonuçlanabilir. Tüm Seramik matrisli kompozit malzemeleri, gözenekli ve/veya mikro çatlaklı bir matris, yüksek bir anizotropi ve yüksek bir kırılma tokluğu ile karakterize edilir [14]. Seramik bir matris içine gömülü seramik elyaflardan oluşurlar ve seramik elyaf takviyeli bir malzeme oluştururlar. Bileşenleri kırılgan olmasına rağmen, seramik matrisli kompozitler matristeki çatlakları durduran ve saptıran elyaf-matris arayüzünün etkili tasarımı sayesinde sağlamdır ve lifli takviyenin bozulmasını önler. Seramik matrisli kompozitler aşırı koşullarda kullanılır ve tribolojik tepkilerini önemli bir konu haline getirir [15].

Seramik matrisli kompozitler, monolitik seramiklerin temel dezavantajının, yani kırılganlıklarının üstesinden gelmek için tasarlanmıştır. Ters kompozitler olarak adlandırılırlar, yani matrisin bozulma geriliminin, elyafların bozulma geriliminden daha düşük olduğu, halbuki çoğu polimer veya metal matris kompozitinde bunun tersi olduğu anlamına gelir. Bu nedenle, yük altında ilk başarısız olan matristir. Matris mikro çatlamaya başladığında kırılgan liflerin erken kırılmasını önlemek için, işlem sırasında lif/matris bağlanması kontrol edilmelidir. Seramik matrisli kompozitler, sert malzemelerdir ve lif/matris bağı çok güçlü veya çok zayıf olmadığında, genellikle ara faz olarak adlandırılan bir elyaf kaplamanın kullanılmasıyla elde edilen yüksek bir kırılma gerilimi gösterir. Seramik matrisli kompozitlerin imalatı özel işleme teknikleri gerektirir. Ara fazın ve matrisin, gazlı veya sıvı öncüllerden liflerin etrafında oluşturulduğu gaz veya sıvı faz yolları (veya her ikisinin bir kombinasyonu) genellikle tercih edilir. Seramik matrisli kompozitler, ağır hizmet koşullarında, örneğin yük altında yüksek sıcaklıklarda ve yanma gazları gibi korozif atmosferlerde termo yapısal malzemeler olarak kullanılır. En yaygın olarak kullanılan Seramik matrisli kompozitler, karbon/karbon (C/C), karbon/silisyum karbür (C/SiC) ve silikon karbür/silikon karbür (SiC/SiC) olarak adlandırılan, oksit olmayan seramik matrisli kompozitlerdir [16].

Seramik matris kompozitler havacılık sektöründe (gaz türbinleri, yapısal yeniden giriş termal koruma) ve enerji sektöründe (ısı eşanjörleri, füzyon reaktör duvarları) yaygın

olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, türbin kanatları, pistonlu motor valfleri ve turbo şarj cihazı bileşenleri gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında da kullanılır [17, 18].

2.1.3 Polimer Matrisli Kompozitler

Kompozit Malzemelerin ana malzeme grubunu oluşturan Polimer Matrisli Kompozitler, termoset (epoksiler, fenolikler) veya termoplastik (polikarbonat, polivinilklorür, naylon, akrilikler) ve gömülü cam, karbon, çelik veya aramid (Kevlar) liflerinden bir matristen oluşur. Takviyenin öncelikle kırılma tokluğunu arttırmak için kullanıldığı bir seramik matrisli kompozitlerden farklı olarak, polimer matrisli kompozitteki takviye malzemesi yüksek mukavemet ve sertlik sağlar. Polimer matrisli kompozitin avantajları, hafifliği, takviye yönü boyunca yüksek sertliği ve mukavemeti ve metallere kıyasla üstün korozyon ve yorgunluk direncinden kaynaklanmaktadır. Polimer matrisli kompozit uygulamasına örnek olarak ikincil yük taşıyıcı havacılık yapıları, tekne gövdeleri, kanolar, fren ve debriyaj balataları gibi otomotiv parçaları, radyo kontrollü araçlar, spor malzemeleri (golf sopaları, kayaklar, tenis raketleri, oltalar), kurşun geçirmez yelekler ve diğer zırh parçaları verilebilir [1,2,4,5].

20. yüzyılın ilk çeyreğinden itibaren devam eden uygulamalarda polimer matrisli kompozit malzemelerde giderek artan bir malzeme performansı ihtiyacı olmuştur. Bu amaçla araştırmacılar, temel üretim yöntemleri ve hammadde malzemelerinin özelliklerinin iyileştirilmesi için çalışmalar yapmışlardır. Bunun yanında kompozit malzemelerin üretim amacına uygun olarak başka katkı malzemeleri ile de kompozit malzemenin malzeme performansının, özellikle de mekanik performansının geliştirilmesi de araştırmacılar tarafından uygulanmıştır. Temel üretim yöntemleri ile matris malzemesinin birden fazla katkı malzemesi ile malzeme performansı iyileştirilmesi uygulamaları hibrit kompozit malzeme kavramını ortaya çıkarmıştır [1,2,4,5].

Polimer matris kullanılarak üretilen kompozitler için ticari uygulamalar arasında elyaf malzeme takviyeleri kullanımı kompozit malzeme üretiminde tercih edilmektedir. Büyük ticari uygulamalar için elyaf malzemelerin kullanımı, çok miktardaki küçük boyutlu elyaf parçalarının ürünün şekline göre yüzeye yayılmasını veya uzun ve sürekli elyafların kumaş örgü sistemleri ile belirli bir yüzey büyüklüğüne getirilerek lamine kumaşlar ile uygulanarak nihai ürün haline getirilmesini içermektedir [2,4,7]. Bu üretim yöntemleri sonucunda elde edilen kompozit malzemelerin kullanım

ömürleri mekanik performanslarının başarısı ile doğru orantılıdır. Başta yorulma ömrü ve darbe dayanım olmak üzere malzeme performansları ön planda olan elyaf takviyeli lamine polimer kompozit malzemeler havacılık ve uzay sanayinde üstün özellikleri sebebiyle de hava araçlarının gövde parçalarında artan oranlarda tercih edilmektedir [1,2,4,5,19].

Elyaf takviyeli lamine polimer kompozitlerin yorulma ömrü ve darbe dayanım gibi performans özelliklerinin belirleyici etkenlerinden biri de bu lamine kompozitlerin başka malzemeler ile birleşim ve etkileşim yerleridir. Ticari olarak da ülkemizde uygulamaları görülen rüzgâr enerji santrallerinde türbin kanatlarının gövde parçalarında da vakum infüzyon üretim yönteminde elyaf takviyeli lamine polimer matrisli kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Artan malzeme performansı beklentileri ile üstün özellikli takviye malzemelerinin tercih edildiği görülmektedir. Bu durum, üretimi ucuz fakat mekanik performansı karbon elyafa göre düşük olan cam elyafının yerine üretimi zor ve pahalı olan karbon elyafının rüzgâr türbin kanatlarında tercih edilmesi ile anlaşılabilir. Artan malzeme performansı beklentisini karşılayacak malzemelerin üretim ve işleme maliyetlerinin azaltılması için ticari firmalar ve araştırmacılar bu duruma yeni yaklaşımlar getirmek istemektedirler [20,21].

Çeşitli alanlarda Cam, Karbon, Aramid (Kevlar) vb. elyaf malzemeleri ile takviye edilmiş polimer matrisli kompozitlerde ise matrise farklı malzemelerle katkı yapılması ve sonucunda polimer matrisli hibrit kompozitlerin üretimi göz önünde bulundurulmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları matrise kısa elyaf, partikül malzemelerin takviye edilmesini içermektedir. Takviye partikül malzemelerinin performans özelliklerinin yükseltilmesi malzemelerin yüzey alanı/hacim oranlarının azaltılması ile sağlanabilmektedir. Günümüz teknolojisi ile yeni üretim metotları geliştirilmiş, malzemelerin yüzey alanının ve hacminin azaltılması partikül malzemelerin nanometre seviyesinde boyutlara sahip olmasının önünü açmıştır [20-22].

Takviye malzemesi olarak kompozit malzemelerde kullanılabilirliği ispatlayan karbon elyafa ek olarak karbon esaslı partikül katkı malzemeleri de kullanılmaktadır. Nanometre ölçeğinde ise karbon esaslı ve karbon allotropu olan katkı malzemeleri olarak 2-boyutlu grafen ve 3-boyutlu karbon nanotüp malzemeler ağırlıklı olarak tercih edilmektedir Her iki malzeme de üstün özelliklere sahiptirler ve hem laboratuvar hem de ticari kompozit takviye malzemeleri olarak uygulamaları yapılmakta,

kompozit malzemelerin malzeme performanslarını arttırmak için takviye malzemesi olarak kullanılmaktadırlar [23].

Ülkemizde ve dünyada yapılan çeşitli uygulamalarda karbon allotroplarının kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak kullanımı mevcuttur. Polimer matrisli hibrit kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu ise literatürde belirli alanlarla sınırlı kalmıştır. Ülkemiz araştırmalarında ise çoğunlukla ticari anlamda ülkemizde yaygın olarak bulunabilen özellikle cam elyaf ve karbon elyaf malzemelerin takviye malzemesi olarak tercih edildikleri polimer matrisli kompozit malzemelerin malzeme performansları irdelenmiştir. Ülkemizde Cam ve Karbon elyaf lamine kumaşların farklı kompozisyonları ve kombinasyonları ile reçine transferi (vakum infüzyon) yöntemi kullanılarak üretilen polimer matrisli kompozit malzemeler incelenmiştir. Cam ve karbon elyaf malzemelerle takviye edilmiş karbon esaslı, özellikle de Karbon Nanotüp partikül katkılarında çalışmaların ise az olduğu gözlemlenmiştir [24-27].

Cam ve Karbon Elyaf takviye malzemelerine ek olarak Aramid (Kevlar) Elyafın da beraberinde olduğu Karbon Nanotüp katkılı polimer matrisli hibrit kompozit malzemeler için çalışmaların reçine transfer (vakum infüzyon) yönteminde ise çalışmaların neredeyse olmadığı görülmüştür. Ticari uygulamalarında giderek artan kullanımı ve üretim artışı ülkemizde kaliteli ve yüksek performanslı elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit üretiminin gerekliliğini daha çok arttırmaktadır. Bu bağlamda elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin farklı elyaf malzemeler ve farklı katkı malzemeleri kullanılarak üretilmesi ve malzeme performans analizleri giderek daha çok önem arz etmektedir. Bu tezde ülkemiz literatürüne yapacağı katkı göz önünde bulundurulduğunda Cam, Karbon ve Aramid (Kevlar) Elyaf takviyeli ve Karbon Nanotüp Katkılı Polimer Matrisli Hibrit Kompozit Malzemelerin Reçine Transfer (Vakum İnfüzyon) Yöntemi ile araştırılması yapılmıştır [24-27].

2.1.4 Karbon-Karbon Kompozitler

Karbon-karbon kompozitler, karbonlu bir matris içine gömülü karbon elyaflardan oluşan benzersiz bir kompozit malzemedir. Başlangıçta havacılık uygulamaları için geliştirilmiş, düşük yoğunluğu, yüksek termal iletkenliği ve yüksek sıcaklıklarda mükemmel mekanik özellikleri, onu uçak frenleri, roket nozulları ve yeniden giriş burun uçları için ideal bir malzeme haline getirmektedir. 2000°C'yi aşan sıcaklıklara

büyük bir deformasyon olmaksızın dayanır. Özellikler, üretim için kullanılan üretim yöntemlerine büyük ölçüde bağlıdır. Genel üretim teknolojisi bilinmesine rağmen, özel olarak uyarlanmış özelliklere ulaşmak için işlemlerin kombinasyonu, belirli üreticilerin uzmanlığı olmaya devam etmektedir. Geliştirilmiş oksidasyon direnci ve sürekli olarak düşen üretim maliyetleri, bu malzeme ailesini yüksek performanslı uygulamaların yanı sıra genel mühendislik tasarımı için giderek daha çekici hale getirir [28].

Karbon-karbon kompozitler, çok geniş sıcaklık aralıklarında boyutsal olarak son derece kararlıdır. Elyaf yönlerindeki termal genleşme, kompozit işleme sırasında grafitleştirme sıcaklıklarına kadar ısıl işlem görmüş yüksek modüllü elyaflar ve elyaflar için başlangıçta negatif olan, 150°C'nin üzerinde küçük bir pozitif değere yükselen elyafların kendi değerleri tarafından kontrol edilir. Sonuç, 2800°C'lik bir sıcaklık aralığında doğrusal genişlemenin yalnızca %0,7 olmasıdır. Bu değer, tabaka düzleminde ve çok boyutlu kompozitlerde elyaf yönlerinde aşağı yukarı hakimdir. Enine yönlerde, durum daha karmaşıktır, genleşme katsayısı, grafit kristalinin büyük "c ekseni" genişlemesinin mikro çatlaklara ne kadar uyduğuna ve katmanlı bölgelerin ve ilgili çatlakların yönüne göre belirlenir [29].

Karbon-karbon kompozitler, aşırı ortamların zorluklarına direnmek için bir karbon matrisini güçlendirmek için karbon elyafların gücünü ve modülünü kullanır. Yoğunluğun onda birinde karbon-karbon kompozitler, refrakter metallere göre yüksek performanslı, uygun maliyetli bir alternatif sunar. Genellikle karbon/karbon kompozitlerinden üretilen havacılık bileşenleri arasında roket motoru nozul boğazları ve çıkış konileri, burun uçları/ön kenarlar ve termal koruma sistemleri bulunur. Güvenilir performans, bu bileşenlerin en kritik gerekliliğidir. Karbon/karbon kompozitler, özellikle bir montajdaki birden fazla bileşen tek parçalı bir karbon-karbon kompozit tasarımla değiştirilebildiğinde, güvenilirlik ve düşük sistem maliyetleri göstermiştir [30].

Karbon-karbon kompozitler, sıvı emdirme yöntemi veya CVI kullanılarak üretilir. İlkinde, preform, bir polimer reçinesi veya kömür katranı veya petrol zifti ile emdirilir ve daha sonra karbonize edilir, yani karbon dışındaki tüm elementlerin (hidrojen, nitrojen, vb.) Buharlaşmasına neden olmak için oksijensiz bir atmosferde ısıtılır. Sıvının ön kalıba akışına yardımcı olmak için tahliye ve basınçlandırma kullanılabilir.

Bir otoklavda olduğu gibi yüksek basınçta karbonizasyon da gerçekleştirilebilir. Karbon matrisinin grafitin kristal yapısına yaklaşmasını sağlamak için 1500–3000°C aralığında yürütülen grafitleştirme adı verilen sonraki bir yüksek sıcaklık işlem adımı kullanılabilir. İlgili aşamaları gösteren bir işlem diyagramı Şekil 3'te gösterilmektedir. Reçine ve zift, karbonizasyon sırasında büzülür ve yoğun, yani düşük gözenekli kompozitler elde etmek için çok sayıda emdirme ve karbonizasyon döngüsü gerektirir. Bazen bileşenler, daha sonra matris gözenekliliğini daha da azaltmak için CVI kullanılarak emdirme işlemi kullanılarak başlangıçta yoğunlaştırılır. Zifttten türetilen bir karbon matrisi, reçine kullanıldığında olduğundan daha kolay grafitize edilir ve bu nedenle zift türevi kompozitler, termal stabilitenin ve/veya yüksek termal iletkenliğin önemli olduğu belirli yüksek sıcaklık ve termal yönetim uygulamaları için kullanılır. CVI işlemi ayrıca kolayca grafitleştirilen bir matris verebilir. CVI işlemiyle yapılan karbon-karbon, büzülme olmadığı için çoklu emdirme-karbonizasyon döngüleriyle yapılan malzemeden daha iyi yapısal özelliklere sahiptir ve bu nedenle kritik uygulamalar için sıklıkla tercih edilir [31].

Karbon/karbon kompozit malzemelerin ticari uygulamaları arasında fırın fikstürleri, ısı kalkanları, yük plakaları, ısıtma elemanları ve X-ışını hedefleri bulunur. Roket nozulları, yüksek derecede bütünlüğü korurken, oldukça aşındırıcı bir atmosferde son derece hızlı bir sıcaklık artışına dayanmalıdır. Şiddetli termal streslere maruz kalmanın yanı sıra, nozül malzemesi, gerekli doğruluğu ve aralığı sağlamak için tahmin edilebilir ve üniform performans göstermelidir [30].

Karbon-karbon kompozitler şu anda deneysel füzyon reaktörlerinde kullanılmaktadır ve özel yüksek sıcaklıkta gaz soğutmalı fisyon reaktörleri için düşünülmektedir. Bu nükleer uygulamalarda malzeme, yapısal hasara ve fiziksel özellik bozulmasına neden olan hızlı nötronlara maruz kalacaktır. Nötron hasarının karbon- karbon kompozitlerindeki etkilerini aydınlatmak için nispeten az çalışma yapılmasına rağmen, grafitte nötron hasarı için geniş bir literatür mevcuttur [32].

2.1.5 Nano Kompozitler

Nanopartikül, 1 ile 100 nm arasında boyuta sahip partikülleri içerir. Bu parçacıklar boyutlarından dolayı atom düzeyinde farklı özelliklere sahiptir. Nanopartiküllerin özelliklerindeki bu değişiklik birçok alanda kullanışlıdır [33].

Nanopartiküller, metal nanopartiküller, metal olmayan seramik nanopartiküller, yarı iletken nanopartiküller olarak sınıflandırılabilir ve iyi bilinen bir türü de karbon nanopartiküllerdir Nanopartiküller, küçük boyutları ve büyük yüzey/hacim oranları nedeniyle onları karşılık gelen dökme malzemelerden çok farklı kılan bu kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir. Optik, elektrik, manyetizma, seramik ve kataliz gibi pek çok alanda potansiyel uygulamaları nedeniyle büyük ilgi görmektedirler [33].

Nanokompozitler, bir fazın nanopartiküller, nanotüpler veya katmanlı nanoyapı gibi nano ölçekli morfolojiye sahip olduğu kompozitlerdir. Çok fazlıdırlar, bu sebeple çok fazlı malzemelerdir, en azından fazların boyutları 10–100 nm aralığında olmalıdır. Günümüzde farklı mühendislik malzemelerinin sınırlamasının üstesinden gelmek için, yararlı alternatifler sağlamak üzere nanokompozitler ortaya çıkmaktadır. Nanokompozitler, dağılmış matriksleri ve dağılmış faz malzemeleri temelinde sınıflandırılabilir. Günümüzde hızla genişleyen bu alanın yardımıyla, yenilikçi sentetik yaklaşımlarla yeni özelliklere sahip birçok heyecan verici yeni malzeme üretmek mümkün olmuştur [33].

Nanokompozitler, nanometrik ölçekte inorganik katı maddelerle (kilden oksitlere) polimerlerin karışımları ile üretilen heterojen/hibrit malzemelerdir. Yapılarının mikro kompozitlerden daha karmaşık olduğu bulunmuştur. Bireysel özelliklerinin yapısı, bileşimi, arayüz etkileşimleri ve bileşenlerinden oldukça etkilenirler. En popüler olanı, nanokompozitler, biyopolimer ve inorganik matrisin in situ büyümesi ve polimerizasyonu içindeki süreçle hazırlanır. Bu çarpıcı potansiyel olarak gelişmiş malzemelerin hızlı tahmini talebi ile, onları küçük ölçekten büyüğe ve çok büyük üretim birimlerine kadar değişen çeşitli endüstrilerde çok kullanışlı hale getirir. Çevre dostu olan insanlık için büyük bir miktar olan bu ürünler, otomobil, inşaat, elektronik ve elektrik, gıda paketleme ve teknoloji transferi gibi çeşitli endüstriyel sektörlere gelişmiş iş fırsatlarının yanı sıra gelişmiş teknolojiler sunar [33].

2.1.6 Hibrit Kompozitler

Hibrit kompozit malzemeler, kompozitin özelliklerini geliştirmek için en az iki takviye elemanının bir matrise entegre edildiği birkaç fazın bir kombinasyonunun sonucudur [34].

Hibrit kompozitler, iki veya daha fazla farklı türde elyafın ortak bir matris içinde birleştirilmesiyle üretilen malzemelerdir. Çeşitli araştırmacılar tarafından verilen hibrit kompozitlerin birkaç tanımı vardır. Hibrit kompozitler, farklı matrislerin bir karışımına dahil edilen bir takviye malzemesi olarak tanımladılar. Öte yandan, diğer araştırmacılar, bu kompozitlerin tek bir matriste bulunan iki veya daha fazla takviye ve dolgu malzemesine dahil edilen bir takviye malzemesi olduğunu açıklamıştır. Hibrit kompozitler, diğer elyaf destekli kompozitlerden daha gelişmiştir ve daha geniş bir potansiyel uygulama yelpazesine sahiptir [34].

Hibrit kompozitlerin performansı, içsel avantajlar ve dezavantajlar arasında daha uygun bir dengenin olduğu ayrı bileşenlerin ağırlıklı bir toplamıdır. Bir tür lifin faydaları, hibrit kompozitlerdeki diğer bileşen türlerinde eksik olan özellikleri tamamlayabilir. Sonuç olarak, uygun malzeme tasarımı yoluyla maliyet ve performansta bir denge sağlanabilir [35].

Ticari, endüstriyel, havacılık, denizcilik ve rekreasyon yapılarındaki birincil yapılar için bir hibrit kompozit kullanılabilir. Havacılık endüstrisinde büyük yorulma ve korozyon direnci ve mükemmel darbe direnci gibi çok çeşitli faydalara sahiptir. En önemli avantaj %20-50 aralığında tasarruf sağlayabileceği ağırlık azaltmadır. Dahası, mekanik özellikler, takviye kumaşının kalınlıkları inceltilerek ve yön değiştirilerek "yerleştirme" tasarımı ile özelleştirilebilir [35].

Bileşenlerin morfolojisi, doğası ve yönelimi, kompozitin taleplere karşı tepki verme şeklini önemli ölçüde etkiler. Aslında, kompozitin özellikleri, kompozitin bileşen elemanlarının karakteristik özellikleri tarafından yönetilen iç yapılarıyla yakından bağlantılıdır. Kompozit malzemelerin mikroskobik düzeyde heterojenlik sorunu, malzemenin davranışının ölçülebildiği homojen bir küresel düzeye doğru ilerlemeyi zorlaştırmaktadır [34].

Hibrit kompozit malzemeler, geleneksel kompozit malzemelere göre bir dizi gelişmiş özellik ve çeşitli avantajlar sundukları için birçok mühendislik uygulamasında giderek daha fazla kullanılmaktadır. Hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri, çok önemli olan iki ve daha fazla fazın birlikte çalıştığı fazlardan oluşur. Bu nedenle hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin daha önce bahsedildiği gibi modellenmesi, sayısal simülasyon modellerinin doğrusal bir bağlantısı kullanılarak yapılır. Bununla birlikte, hibrit kompozitlerin mekanik davranışı sadece bir matrisin ve takviyelerin

karakterine değil, aynı zamanda bu bileşenler ve matris arasındaki arayüzün özelliklerine de bağlıdır [34].

2.2 Elyaf Takviyeler

Takviyeler kompozitlerin çeşitli özelliklerini arttırmak için kullanılan malzemelerdir. Bazıları belirli matris sistemleri için tasarlanmış pek çok takviye mevcuttur. Bunların çoğu nispeten yüksek sertliğe ve düşük yoğunluğa sahiptir. Karbon, cam ve bir dereceye kadar aramid elyaflar (Kevlar gibi), polimer matrisli kompozitlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Seramik elyaflar (ve partiküller) metalleri güçlendirmek için kullanılabilirken, hem metalik hem de seramik elyaflar genellikle seramik bazlı kompozitlerde kullanılır. Sonuncusu, uçak frenleri gibi uygulamalar için büyük önem taşıyan karbon-karbon kompozitleri içerir [36].

Takviyelerden en yaygın olarak kullanılan elyaf türleridir. Elyaflar, hafif, sert ve güçlü oldukları için kompozitlerde kullanılır. Elyaflar, yapıldıkları malzemeden daha güçlüdür. Bunun nedeni, moleküllerin elyaf yönü boyunca tercihli oryantasyonu ve dökme malzemenin aksine bir elyafta bulunan kusurların sayısının azalmasıdır. E-camın (E-glass) gerilme mukavemeti düşükken (yaklaşık 1,5 GPa) aynı malzeme, esasen yüzey kusurlarının sayısındaki ve boyutundaki azalma nedeniyle elyaf formunda 3,5 GPa'ya ulaşır [36].

2.2.1 Karbon Elyaflar

Grafit elyaflar olarak da adlandırılan karbon elyafları, mükemmel kimyasal dirence sahip hafif ve güçlü elyaflardır. Karbon elyaflar havacılık sektöründe hakim elyaf türüdür. Karbon elyafların mekanik özellikleri, karbon zincirlerinin atomik konfigürasyonu ve grafit kristal yapıya benzer olan bağlantıları ile belirlenir. Karbon elyafın gücü, karbon atomik yapıların karbon elyafı yönü boyunca en güçlü atomik bağlantılarıyla yönlendirilmesiyle kontrol edilir [37].

Karbon lifleri büyük ölçüde, lifin eksenine paralel uzanacak şekilde yönlendirilmiş grafen düzlemlerinden oluşur. Bu durum ve birkaç bitişik düzlemin birbirine paralel olma eğiliminin dışında, düzenleme oldukça düzensizdir. Böyle bir düzenleme bazal düzlemlerin hizadan kaydığı bir yapıyı tanımlamak için kullanılan terim olarak genellikle "turbostratik" olarak adlandırılır. Yapının ayrıntıları, liflerin üretilme şekline bağlıdır, ancak kilit nokta, grafenin düzlem içinde çok güçlü bir bağa sahip

olmasıdır, bu nedenle karbon liflerindeki hizalama, eksenel sertliğin ve mukavemetin yüksek olmasını sağlar [36].

2.2.2 Cam Elyaflar

Cam elyaflar, kum, kireçtaşı ve diğer oksidik bileşiklerin bir karışımından üretilen amorf bir madde olan dökme camdan işlenir. Dolayısıyla, cam elyafların temel kimyasal bileşeni (%46-75) silikadır (SiO_2). Kimyasal bileşimi ve üretim sürecini kontrol etmek, farklı için çok çeşitli cam elyafları uygulama türleri elde edilebilir, ancak bunlar tipik cam sertlik, korozyon direnci ve inertlik özelliklerini sergiler. Dahası, esnek, hafif ve ucuzdurlar. Bu özellikler, cam elyafı, düşük maliyetli endüstriyel uygulamalarda kullanılan en yaygın elyaf türü yapar. Cam elyafının yüksek mukavemeti, elyaf yüzeyindeki düşük kusur sayısı ve boyutuna bağlanmaktadır. Tüm cam elyaflar benzer sertliğe, ancak farklı mukavemet değerlerine ve çevresel bozulmaya karşı farklı dirence sahiptir [36].

Cam elyaf birçok farklı amaç için kullanılmaktadır. Bunların çoğu, kalsiyum, bor, sodyum, demir ve alüminyum gibi oksit ilaveleri ile silikaya (SiO_2) dayanmaktadır. Atom ölçeğindeki yapı amorftur. Ana yapı taşı SiO_4 tetrahedradır. Temel bir sorun, kuvars (saf silika) cam durumunda, bu dörtyüzlülerin katı bir ağının, Na_2O gibi "ağ değiştirici" (düşük değerli) oksitlerin varlığıyla ne ölçüde bozulacağıdır. Bu tür eklemeler cam geçiş sıcaklığını düşürür, böylece malzemenin nispeten düşük sıcaklıklarda deforme olması (çekilmesi) daha kolay olur, ancak bu, elbette maksimum kullanım sıcaklığını düşürme etkisine sahiptir. Sertlik gibi diğer özellikler de bileşimden sadece sınırlı bir dereceye kadar etkilenir. Birçok farklı kompozisyonu kullanımdadır, ancak çoğu kompozit yapımında kullanılan elyaflar, bu uygulamaya çok uygun özelliklerin bir kombinasyonuna sahip olan, E-cam olarak adlandırılan bir tiptedir. Cam elyafları, hammaddelerin bir rezervuarda eritilmesi ve her birinin tabanında birkaç yüz delik bulunan bir dizi platin burcun beslenmesi ile üretilir. Cam yerçekimi altında akar ve ince filamentler mekanik olarak aşağı doğru çekilere deliklerden akışkan cam çıkar. Elyaflar, dakikada birkaç bin metrelik hızlarda tambura sarılır. Elyaf çapının kontrolü, tanktaki camın kafası, camın viskozitesi (bileşime ve sıcaklığa bağlı olarak), deliklerin çapı ve sarım hızı ayarlanarak sağlanır. E-camın çapı genellikle 8 ile 15 μm arasındadır [36].

2.2.3 Silika ve Kuvars Elyaflar

Silika elyaflar ve kuvars elyaflar, klasik cam elyaflardan yüksek silika (SiO_2) içeriği olmakla beraber silika elyaflar için saflık %96-98 ve kuvars elyaflar için %99,95-99,97'dir. Silika ve kuvars elyaflar, cam elyaflara göre %25-50 daha fazla maliyetlidir ve buna karşılık fiziksel ve mekanik özelliklerde avantaj sağlarlar. Silika elyaflar için 900°C'ye ve kuvars elyaflar için 1050°C'ye kadar uzun süreli çalışma sıcaklıkları ile karşılaştırılabilir veya daha iyi sertlik, cam elyaflara göre mukavemet ve cam elyafla ısıl kararlılığa sahiptirler. Aynı zamanda iyi termal ve elektriksel yalıtım özellikleri ve farklı kimyasallar altında çok iyi stabilite sergilerler, neredeyse neme karşı duyarsızdırlar. Özellikleri yüksek sıcaklık, yüksek kimyasal korozyon uygulamaları için çekici kılmaktadır [37, 38].

2.2.4 Polimerik Elyaflar

Çok çeşitli organik elyaflar arasında, polimerik elyaflar, esas olarak çok düşük yoğunlukları nedeniyle, çok yüksek özgül mukavemet ve sertlik değerleri ile yüksek sertlikte, yüksek mukavemetli yapısal uygulamalar için uygundurlar. Polimerik elyaflar, bir öncü olarak kullanılan baz polimere bağlı olarak birçok farklı ürünü içerir. Polimerik elyaf üretmek için kullanılan üretim süreci iki ana aşamadan oluşur. Bunlar, katı döküm polimerin eritme veya çözelti ile sıvı faza dönüşümü, ardından ekstrüzyon ve soğutmadır. Sıvı Kristal Polimer (LCP) elyaflar, belirtilen üretim sürecini ve bazı polimerlerin sıvı fazlarında anizotropik kristal davranışa sahip oldukları ve belirli yönlerde daha güçlü kimyasal bağlantılar oluşturdukları gerçeğini ifade eder. Bu yönelimli güçlü bağlantılar daha sonra elyaf üretim sürecinde korunur ve bunun sonucunda eksenleri boyunca anizotropik davranışa sahip güçlü elyaflar oluşur. Bu şekilde, LCP elyafları, karbon elyaflarıyla benzer kuvvete sahip olabilir [39].

En iyi bilinen polimer elyaflar, DuPont, Teijin ve Akzo Nobel tarafından Kevlar, Technora ve Twaron ticari isimleri altında üretilen aramid elyaflar (aromatik poliamid) olarak adlandırılan poliamidden işlenen elyaflardır. Aramid elyaflar, LCP elyaflardır. Kırılma sırasında yüksek enerji emilimine sahiptirler, bu da onları darbe ve balistik koruma için ideal kılar. Düşük yoğunlukları nedeniyle, yüksek gerilme mukavemeti-ağırlık oranı ve yüksek modül-ağırlık oranı sunarlar, bu da onları uçaklar ve vücut zırhları için çekici kılar. Aramid elyaflar bir polimer malzemeden yapıldığından, polimer matrislere benzer özelliklere sahiptirler. Düşük basınç dayanımına sahiptirler;

Sürünme davranışları vardır, nemi emerler ve ultraviyole (UV) ışığa duyarlıdırlar. Ayrıca, mekanik özellikleri sıcaklığa göre değişir ve 177°C'deki gerilme mukavemeti oda sıcaklığı değerinin %75-80'ine düşer. Çeşitli türlerde aramid elyafları farklı malzeme özellikleri sunar, Kevlar 49 en yaygın kullanılanıdır. Technora elyafları, geliştirilmiş termal stabiliteye sahip olan aramid elyaflarının bazı zayıflıklarının üstesinden gelir; 200–250°C'ye kadar kullanılabilirler ancak sertlik kaybı ve %50'ye kadar dayanım kaybı ile kullanılabilirler [39].

2.2.5 Bor Elyaflar

Bor elyaflar yüksek sertlik, yüksek mukavemet ve düşük yoğunluğa sahiptir. Bor elyaflar en çok hava-uzay ve spor ürünlerinde takviye olarak kullanılırlar. Mekanik özellikler yüksek sıcaklıklarda korunur (tipik olarak, 500°C'deki çekme dayanımı, oda sıcaklığındaki ilk dayanım değerinden yaklaşık %60'tır). Ayrıca yüksek tokluk, yüksek yorulma dayanımı ve çok iyi bir sıkıştırma davranışına sahiptirler. Kırılgandırlar ve düşük darbe mukavemetine sahiptir. Bor elyaf, bir tungsten tel üzerinde kimyasal buhar biriktirme ile üretilir. Yavaş üretim hızı nedeniyle, bor elyafların şu anda üretilen tüm elyafların en pahalıları arasındadır [40].

2.2.6 Seramik Elyaflar

Seramik elyaflar, yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanılır. Başta titanyum olmak üzere metal matrisler için takviye olarak en büyük uygulamalarına sahiptirler, ancak aynı zamanda sıcaklığa dayanıklı polimerik matrislerle kombinasyon halinde de kullanılmıştır. Bor elyafları gibi SiC elyafları da yüksek sertlik ve yüksek mukavemete sahiptirler ve en önemlisi, başlangıç gerilme mukavemetlerini yaklaşık 1300°C'ye kadar muhafaza ettikleri için daha yüksek sıcaklık kapasitesi sergilerler. Silisyum Karbür (SiC) elyaflar, bor elyafları gibi, ancak bir karbon substrat üzerinde üretilir. Sınırlı kullanım ve düşük üretim hacimleri nedeniyle, bu elyafların maliyeti yüksektir. Alümina elyafları, alümina oksit Al_2O_3 bazlıdır. Diğer seramik elyafların aksine, kimyasal biriktirme ile üretilmezler. Bu nedenle yüksek hacimli kullanılabilirliğe ve nispeten düşük maliyete sahip değildirler. İlk olarak dizel pistonları güçlendirmek için kullanılan seramik elyaflar, genellikle metal özelliklerinde bozulmanın meydana geldiği yüksek sıcaklıklarda metal matris kompozitlere güç ve sertlik katmaktadırlar [40].

2.2.7 Bazalt Elyaflar

Bazalt elyaflar mineral elyaflar olarak sınıflandırılabilir. Bu yeni ürün, eritilmiş ve elyaf haline getirilmiş volkanik bazalt kayayı kullanmaktadır. Bazalt elyaflar, cam elyaflardan daha iyi mekanik özelliklere sahiptir ve karbon elyaflardan daha az maliyetlidir. Mükemmel termal stabilite, yüksek mukavemet ve sertlik, iyi kimyasal stabilite, iyi korozyon direnci ve iyi matriks yapışması sergilemektedirler. Radyasyondan etkilenmezler. Termal koruma ve yapısal uygulamalar için potansiyel olarak uygulanabilirdir [38].

2.2.8 Metalik Elyaflar

Metalik elyaflar çeşitli baz metallerden ve alaşımlardan yapılan elyaflar içerir. Ham maddenin bir mikron (μm) mertebesinde küçük boyutlarda elyaflar halinde işlenmesiyle, dökme malzemenin doğasında bulunan kusurlar neredeyse ortadan kaldırılır ve gelişmiş özellikler elde edilir. Elyafların mukavemeti doğrudan elyaf lifinin çapı ile ilişkilidir, bu da elyaf üretim maliyetiyle ilgilidir. Metalik elyaf malzemelere örnek olarak hafif alüminyum, güçlü çelik elyaflar veya sert tungsten elyaflar verilebilir. Bu elyafların diğer avantajları, mükemmel elektriksel ve termal iletkenlikleridir. Metalik elyaflar tipik olarak, son yapısal kompozit malzemeye elektriksel iletkenlik, elektromanyetik girişim koruması veya yıldırım çarpması koruması sağlayan, polimer matrisler için dolgu ağları olarak kullanılır [38].

Sürekli olarak çeşitli yeni elyaflar piyasaya sürülmekte veya geliştirilmektedir, ancak piyasada yapısal uygulamalar için yeni elyaf ürünlerinin kabulü, çeşitli koşullar altında güvenli ve etkili uygulamayı garanti etmek için gereken çok sayıda karakterizasyon testi nedeniyle yavaştır. Havacılık uygulamaları için yüksek mukavemet-ağırlık ve sertlik-ağırlık oranları avantajlı olmakla birlikte, bu elyaflarla üretilebilen kompozitlerin diğer özellikleri, uygulamalarında sınırlayıcı faktörler olması muhtemeldir. Çevresel bozulma, maksimum çalışma sıcaklığı, enine ve kesme mukavemeti, herhangi bir yeni malzeme için araştırılması gereken sınırlayıcı faktörlerden bazılarıdır [38].

2.2.9 Aramid Elyaflar

Aromatik poliamid elyaflara aramid elyaflar da denir. Aramid elyaflar, elyafı oluşturan maddenin doğrudan iki aromatik halkaya bağlı en az %85 amid bağlantılarına (-CO-NH-) sahip uzun zincirli sentetik bir poliamid olduğu, ısıya dayanıklı ve güçlü bir sentetik polimer elyaf sınıfıdır [40, 41].

Aramid elyaflar ticari olarak ilk olarak 1960'ların başlarında meta-aramid elyafları olarak kullanılmıştır ve daha sonra para-aramid elyafları 1960'larda ve 1970'lerde geliştirilmiştir

ABD'de DuPont tarafından yapılan üretimin yanı sıra, meta-aramid Hollanda'da ve Japonya'da Teijin tarafından TeijinConex ticari adı altında ve Çin'de Yantai tarafından New Star ticari adıyla üretilmiştir. Bununla birlikte Fransa'da, Kermel ticari adı altında Kermel tarafından bir meta-aramid çeşidi üretilmiştir. Para-aramid elyafları en iyi temsil eden çeşidi p-fenilen tereftalamid (PPTA) elyaflarıdır ve ticari isimleri Kevlar (DuPont), Twaron (daha önce Akzo ve şu anda Teijin'e aittir) ve Technora'dır (Teijin).

Aramid elyaflar esas olarak polimer matrisli kompozitleri, kauçukları ve metalleri takviye etmek için kullanılırlar, bu da güçlendirme özelliklerinde önemli iyileştirmeler sağlar ve bu nedenle çoğunlukla uzay, havacılık, petrol, inşaat malzemeleri, trafik, ulaşım ve kamu güvenliği alanlarında kullanılırlar. Ayrıca katı roket motorlarının kabuklarında, kurşun geçirmez yeleklerde, lastiklerde, halatlarda kullanılırlar [42,46].

2.3 Karbon Nanotüp

Karbon nanotüpler uzun zamandır bugüne kadar bilinen en sert ve en mukavemetli insan yapımı malzeme olarak kabul edilmektedir. Ek olarak, yüksek elektrik iletkenlikleri, elektrikli cihazlar ve haberleşme ile ilgili uygulamalar alanında ilgi uyandırmıştır. Bununla birlikte, çok küçük boyutlarından dolayı, bu nanoyapıların mükemmel özelliklerinden ancak bir dizi mühendislik polimeri tarafından sunulanlar gibi hafif matrislere homojen bir şekilde gömülmeleri halinde yararlanılabilir. Bunların mühendislik polimer matrislerine kimyasal afinitesini arttırmak için, grafitik yan duvarların ve uçların kimyasal modifikasyonu gereklidir [44].

Karbon nanotüpler (CNT), tamamen kusursuz bir silindire yuvarlanmış neredeyse hatasız bir grafitik düzlemde bulunan karbon atomlarından oluşur. Hatalarının

olmaması ve karbon-karbon bağlarının mukavemeti, CNT'nin eşsiz sertliği ve mukavemeti, 1,5 TeraPascal (TPa) modülü ve 200 GigaPascal (GPa) gerilme mukavemetini sağlar [44,45].

Karbon nanotüplerin iki yapısal formu vardır, tek duvarlı (SWCNT) ve çok duvarlı (MWCNT). MWCNT'ler ilk olarak 1991 yılında keşfedilmiştir. Bunlar, 3,5 Ångström (3,5 Å = 0,35 nm) sabit ara katman ayrımı ile çoklu duvarlara sahip tek bir yapı oluşturan çoklu eşmerkezli açık uçlu tek duvarlı nanotüplerden oluşur. 2-100 nm aralığı ve onlarca mikrona kadar uzunluklara sahip SWCNT'lerin çapı yaklaşık 1 nm'dir ve tek bir grafit levha, her iki ucunda kapaklı dikişsiz bir silindire sarılır ve santimetreye kadar uzunluklara sahip olabilir [45-47].

Karbon nanotüplerin (KNT veya CNT) ve bu malzemelerin özellikleri ve uygulamaları, son on yılda çok aktif araştırma alanları olmuştur. CNT'ler yüksek esnekliğe, düşük kütle yoğunluğuna ve büyük en boy oranına (tipik olarak >1000) sahiptir. Bireysel tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT) metalik veya yarı iletken olabilir. İkincisi, elektronları önemli bir kesinti olmaksızın uzun uzunluklar boyunca taşıyabilir ve bu da onları bakırdan daha iletken yapar. Gerçekten de onları bir dizi uygulamada ideal takviye maddeleri yapan, tek tek nanotüplerin mekanik ve elektriksel özelliklerinin bu kombinasyonudur [48-53].

Dolgu maddesi olarak CNT kullanan ilk polimer nanokompozitler 1994 yılında rapor edilmiştir. O zamandan beri, imal edilmiş polimer nanokompozitlerin mekanik ve/veya elektriksel özellikleri üzerine yapılmış birçok makale ve çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda, CNT agregasyonunun fabrikasyon nanokompozitlerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde engellediği bulunmuştur [48-53].

Bir polimer yapı içerisindeki gömülü CNT'ler potansiyellerinin yalnızca bir kısmını sergiler. Bu nedenle, CNT'lerin üstün özellikleri henüz tam olarak yüksek mukavemetli ve sertlikte bitmiş ürünlere dönüştürülememiştir [48-53].

Üretim prosedürü göz önüne alındığında, mekanik yükün veya elektrik yükünün bir kompozit bileşen içindeki tek tek nanotüplere aktarılması için en uygun koşulları oluşturmak için muazzam bir çaba olmuştur. Böyle bir çabanın ön koşulu, tek tek nanotüplerin verimli bir şekilde dağılması ve çevreleyen polimer matris ile güçlü bir kimyasal afinite (kovalent veya kovalent olmayan) oluşturulmasıdır. Daha iyi nanotüp

dağılımına ve nihayetinde nanotüplerin polimer matrislerle verimli termodinamik ıslatılmasına katkıda bulunan fonksiyonel parçaların tanıtılmasında çeşitli CNT kimyasal modifikasyon yöntemlerinin oldukça başarılı olduğu kanıtlanmıştır [54].

Yoğun araştırma yapılan bir diğer alan da makromoleküllerin nanotüp yüzeyine aşılanmasıdır. Aslında, bütün bir polimer zincirinin eklenmesinin, nanotüp özellikleri ve bunların, düşük moleküler ağırlıklı işlevselliklerin eklenmesine kıyasla polimer matrislere afinitesi üzerinde daha büyük etkiye sahip olması beklenmektedir. CNT'lerin polimerler tarafından modifikasyonu, nanotüp yüzeyine bağlanmanın kovalent olup olmadığına bağlı olarak iki ana kategoriye ayrılır. Kovalent modifikasyonun kendisi ya "aşılama" ya da "aşı alma" stratejilerini içerir [55-57].

CNT'lerin polimer matrislere kimyasal afinitesini geliştirmenin yanı sıra, çeşitli modifikasyon stratejileri, gelişmiş mekanik veya elektriksel özelliklere sahip CNT/polimer bileşenleri oluşturmak için etkili olmasına yardımcı olur. İyi bilindiği gibi, polimer kompozitlerde CNT'lerin herhangi bir agregasyonu, tek tek nanotüplere etkili gerilim transferini önlediği için düşük özelliklere neden olur. Şimdiye kadar, üretim yöntemlerinin çoğu, en azından mutlak mekanik özellik değerlerinde ticari polimer kompozitlerle ciddi şekilde rekabet edemeyen CNT'lerin düşük hacim fraksiyonunu içeren malzemelere yol açmıştır [58,59].

Çekme modülü açısından, kimyasal olarak modifiye edilmiş nanotüplerin, matris reçinesine kıyasla modülde önemli bir artış sergilediği çok sayıda çalışma tarafından tespit edilmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi, bunun temel nedeni, nanotüplerin dağılımının stres transferini iyileştirmesidir. Bununla birlikte, bazı durumlarda CNT işlevselleştirmesinin ve en önemlisi CNT hacim fraksiyonunun bir fonksiyonu olarak belirli gelişmeler gözlenir [60,61].

2.4 Kompozit Üretim Süreçleri

Son 40 yılda çok sayıda kompozit üretim süreci geliştirilmiştir: temaslı kalıplama, sıkıştırmalı kalıplama, vakumlu torba/otoklav kalıplama, rotasyonel kalıplama, reçine transfer kalıplama (RTM), bant sarma, filament sarma, pultrüzyon vb. Tüm bu süreçlerin birkaç ortak özelliği vardır; takviyeler bir alet veya kalıp içinde gerekli şekle getirilir, reçine ve lifler reçineyi sertleştirmek için muhtemelen yüksek sıcaklık ve basınç altında bir araya getirilir ve reçine sertleştikten sonra kalıp parçadan sıyrılır.

Farklı üretim teknikleri, kalıplama noktasında bir araya getirilen ayrı lifleri ve reçineyi kullanan doğrudan işlemler (ör. RTM, pultrüzyon, temaslı kalıplama) veya reçine ile önceden emdirilmiş lifleri kullanan dolaylı işlemler (ör. Vakum torbası/otoklav kalıplama, sıkıştırmalı kalıplama). İmalat işleminin seçimi, doğal olarak, bileşenin kalitesi, mekanik özellikleri ve üretim maliyeti üzerinde büyük bir etkiye sahip olacaktır [62].

Kompozit üretiminde ideal bir süreç şu şekilde tanımlanabilir:

- Yüksek Verimlilik-kısa döngü süreleri, düşük işçilik içeriği,
- Minimum malzeme maliyeti-düşük katma değerli malzemeler,
- Düşük malzeme depolama ve işleme maliyeti,
- Maksimum geometrik esneklik-şekil karmaşıklığı ve bileşenin boyutu,
- Maksimum özellik esnekliği-matris aralığı,
- Takviye türleri aralığı,
- Mekanik özellikleri kontrol etme ve özelleştirme özellikleri,
- Minimum bitirme gereksinimleri-net şekil imalatı,
- Güvenilir ve yüksek kaliteli üretim-düşük ret oranları, düşük değişkenlik vb.

Tüm bu gereksinimleri aynı anda karşılayabilecek hiçbir üretim süreci yoktur; en önemlisi, bu gereksinimlerden bazıları birbirini dışlayabilir [62].

2.4.1 El Yatırması

Bu yöntemde elyaflar katmanlanır ve tek taraflı bir kalıba yönlendirilir. Reçine daha sonra elyaf/kumaş yüzeyine dökülür ve bir el rulosu kullanılarak fırçalanır veya bir rulo ile açılır. Bu manuel yuvarlama/fırçalama hareketi hapsolmuş havayı giderir, kumaşın tamamen ıslanmasını sağlar ve kompoziti yoğunlaştırır. Reçine sisteminin sertleşmesini (sertleşmesini) başlatmak için bir katalizör kullanılabilir, böylece ürün harici ısı olmadan sertleşebilir/kurutulabilir. Bu en basit ve en kolay yöntemdir. El yatırması işlemi tipik olarak rüzgâr türbinlerinin bileşenleri gibi genellikle daha büyük yapıların düşük hacimli üretiminde kullanılır [62,63].

2.4.2 Püskürtme Kalıplama

Bu yöntem el yatırması yöntemine benzer, ancak doğranmış lifleri ve oda sıcaklığında kürleme reçinelerini düşük maliyetli bir açık kalıp üzerinde biriktirmek için bir doğrayıcı/püskürtme tabancası kullanır. Daha sonra, elle yerleştirmede olduğu gibi, sıkışan havayı vb. çıkarmak için manuel rulolama kullanılır. Bu yöntem tipik olarak, elle yerleştirmede kullanılanlardan daha karmaşık kalıplar için kullanılır ve daha hızlı üretim sağlar. Küvet/duş üniteleri ve havalandırma davlumbazları gibi daha büyük parçaların üretimi için idealdir. Elyaflar kısadır, bu da mukavemeti tehlikeye atar ve reçine püskürtüldüğü için düşük viskozite, mukavemet ve termal özellikler de tehlikeye girer [63].

2.4.3 Sıkıştırma Kalıplama

Sıkıştırmalı kalıplama yöntemi kompozit parçaların yüksek hacimli üretimi için en yaygın seçenektir. Eşleşen metal kalıplar bir hidrolik prese monte edilir ve kalıplara bir yük (matristen oluşan erimiş malzeme ve farklı bir şekle sahip olmayan takviye) yerleştirilir ve ardından belirli bir basınç ve sıcaklık altında belirli bir süre kapatılır. Bu kombinasyon malzemeyi hızla kürleştirir. Kalıplar hidrolik veya mekanik yöntemlerle preslenir ve ısıtılır. Birkaç tür sıkıştırma kalıplama vardır. Süreç otomatikleştirilebilir ve bileşenlerin tasarım esnekliğini sağlar. Çok çeşitli ebatlarda yüksek mukavemetli, karmaşık parçalar üretilir [62].

2.4.4 Enjeksiyon Kalıplama

Pek çok takviye edilmemiş plastiğin kalıplandığı gibi, kürlenmemiş reçinede karıştırılan kısa elyafların kalıplara enjekte edilmesi mümkündür. 30 mm'ye kadar elyaf uzunluklarına sahip bileşikler kullanılır ve malzemenin bir rulo veya yığın halinde elle veya otomatik olarak beslenir. Çelik kalıplar 140–160°C sıcaklık aralığında ısıtılır. Bu yöntem, küçük kalın numuneler yapmak için uygundur. Yöntemin, bileşiğin kalıba enjekte edilme biçiminde temelde farklılık gösteren varyasyonlar mevcuttur. Bileşik, bir piston ile ana enjeksiyon odasına aktarılabilir ve daha sonra başka bir piston tarafından kalıba enjekte edilebilir. Bu şekilde lifler daha kısa uzunluklara parçalanmaz, bu da nihai kompozit üründe optimum mekanik özelliklerin muhafaza edilmesinde büyük önem taşır. Alternatif olarak, takviye edilmemiş plastiklerin bir vida dişli enjeksiyon sistemi kullanılarak enjeksiyon

kalıplamasında olduğu gibi enjeksiyon gerçekleştirilebilir. Bileşik, bir piston tarafından enjeksiyon odasına verilir ve ardından Arşimet vida prensibine göre çalışan bir vida dişi, onu kalıba enjekte eder. Bu taşıma aşamasında herhangi bir basınç uygulanmaz ve besleme hızı sabit tutulduğu için, genellikle 50 ila 90 rpm arasındaki düşük bir dönüş hızı ile liflerde minimum hasar meydana gelir. Enjeksiyon kanalı, bileşiğin varış noktasında 30°C'den kalıp girişinde tipik olarak 150–200°C sıcaklıkta 80–90°C'ye çıkarak ısıtılır. Bu teknikle ilgili bir zorluk, kalıp doldurulduktan sonra bileşiğin enjeksiyonunun durdurulmasının gerekmesidir. Bu, vida dişinin hareketini basitçe durdurarak veya kalıbın girişini kapatan bir valf kullanarak olabilir. Bu eylemlerin her ikisi de kalıba yerleştirilen bileşik miktarına bir miktar değişkenlik getirebilir ve ayrıca liflerin kırılmasına neden olabilir. Bununla birlikte, genel olarak, vida dişi, üretim döngüleri azaltılabildiğinden ve ürün kalitesi üzerinde daha büyük bir kontrol sağlanabildiğinden, bir pistona göre avantajlar sunar. [62,63]

2.4.5 Reçine Transfer Kalıplama

Reçine transfer kalıplama yöntemi, kompozit malzemenin her iki tarafında da üstün yüzey pürüzlülüğü kalitesi sahip olması istenildiğinde kullanılır. Takviye tabakaları makinenin boşluğuna kuru olarak serilir. Boşluk, parça kalınlığını belirler. Büyük ve küçük ebatlı ürünler için kullanılabilir. Bu yöntem ile seçici takviye ve hatasız elyaf yönetimi elde edilebilir. Yöntem ile %65'e kadar elyaf hacim fraksiyon yüklemeleri oluşturma yeteneği elde edilir. Avantajları arasında yüksek boyut toleransları ve stabilite, üstün yüzey kalitesi, yüksek üretim oranları, yüksek tekrarlanabilirlik ve parçadan parçaya en düşük değişkenlik bulunur. Sonradan işleme nadiren gereklidir. Dezavantajları ise, yöntem için boyutsal olarak hassas işleme takımları gerektiği için daha yüksek takım maliyetleri ve daha uzun süreleri içerir [63].

2.4.6 Filament Sarımı

Bu yöntem yüksek derecede yapısal bütünlüğe sahip (tanklar, borular, basınçlı kaplar, vb.) ürünlerin üretiminde kullanılır. Kalıp olarak dönen bir mandrel kullanılır ve otomatik hale getirilir. Reçine emdirilmiş edilen lifler, mandrel (kalıp) etrafına önceden belirlenmiş geometrik desenle sarılırken dönen mandrel döner. Bu işlemde birçok elyaf/reçine sistemi kullanılabilir [63].

Avantajları, çok hızlı bir yöntem olması, reçine içeriğinin kontrol edilmesi, mukavemetli tabakalara yüksek ağırlık vermesi, yüksek elyaf ağırlık yüzdeleri elde edebilmesi ve yönlü mukavemet özellikleri veren kontrollü elyaf oryantasyonu sağlayabilmesidir. Dezavantajları, şeklin dairesel ve oval ürünlerle sınırlı olması, mandrelin pahalı olabilmesi ve bazı uygulamalarda aerodinamiği etkileyebilecek zayıf dış yüzey kaplamasıdır (bu nedenle bir bitirme işlemi, dış yüzeyin işlenmesi/zımparalanması gerekir). Örnek olarak yelkenli tekne direkleri, çimento karıştırıcıları, uçak gövdeleri, tanklar, kimyasal depolama tankları, gaz ve basınç silindirleri verilebilir [62,63].

2.4.7 Pultrüzyon

Bu yöntem, elyaf ve reçineyi karıştırma, kompoziti şekillendirme ve sertleştirmeyi tek bir sürekli işlemde birleştirir. Genellikle cam olan, ancak herhangi bir kesintisiz tipte olabilen elyaflar, bir dizi makaradan veya bobinden bir araya getirilir ve genellikle polyester gibi ısıyla sertleşen bir reçine ile emdirilir. Emdirilmiş elyaflar daha sonra, kalıptan yeterince güçlü bir kompozit profilin çekilmesi için reçineyi yeterince çapraz bağlayan, 90-150°C'ye ısıtılmış bir kalıptan geçer. İşlem, son derece karmaşık kesitli profillerin 0,6-1,2 m/dk aralığındaki hızlarda yapılmasına izin verir [62].

Üretilen profiller katı veya içi boş olabilir ve tüm tek tip takviyelerden veya kesintisiz elyaf ve cam elyafın bir kombinasyonundan yapılabilir. Bu tür malzemeler düz kesitler veya ince duvarlı şekiller yapmak için kullanılır [62].

2.4.8 Vakumda Torbalı Kalıplama ve Otoklav

Torba kalıplama, basıncın kompozit yapı üzerine eşit olarak uygulanmasına izin verir. Kauçuk olarak seçilebilen esnek bir tabaka, kompozit tabakanın üzerine serilir, kenarlarından kapatılır ve tabakanın altından hava emilir. Çok büyük bir emme, çapraz bağlanma işlemi için gerekli olan polyester sistemlerinden stireni çıkaracağından, basınçsızlaştırma sadece nispeten az olmalıdır. Alternatif olarak, 1 ila 3 atmosfer aralığında basınç, levhanın tüm alanına uygulanır. Genellikle hem hava tahliyesi hem de basınç uygulanır. Kompozitin iki yüzeyinin görünümü, iyidir. Bu ilk işlemden sonra bir fırında ısıtılarak daha fazla sertleştirme gerçekleşebilir. Bu genellikle yalnızca ön hazırlık tabakalarının kullanıldığı gelişmiş kompozit sistemler durumunda gerekli olarak kabul edilir [63].

Bir otoklavda kalıplama, konsolidasyon için daha yüksek basınçlar elde edilebildiğinden, ancak prensipte torba kalıplama teknikleriyle pek çok ortak noktaya sahip olduğundan, esas olarak 100 adete kadar yüksek performanslı kompozit yapıların üretimi için kullanılır. Bir ila üç saat süren üretim döngüleri ile süreç zaman alıcıdır. Bu nedenle pahalıdır. Hazırlanacak kompozit, otoklava yerleştirilir. Çoğunlukla, ayırıcı ile muamele edilmiş dokuma naylon, polyester veya cam elyaftan bir soyma katı, kompozitin üstüne veya altına yerleştirilir ve yapıştırma veya boyama gibi son yüzey bitirme için imalattan sonra çıkarılır. Üretim döngüsü sırasında fazla reçineyi emmek için genellikle cam elyaf bir hava alma malzemesi de kullanılır. Daha sonra PTFE gibi bir malzeme bariyer filmi vardır. Ardından, sertleşme sırasında hapsolmuş havanın veya uçucu maddelerin uzaklaştırılmasına izin vererek, basıncın tek tip bir şekilde uygulanmasına izin veren bir havalandırma malzemesi gelir. Formunu alması için kompozit üzerine kolayca örtülebilen gevşek dokunmuş bir kumaş veya keçe olabilir. Ardından vakum torbası geliyor. Torbadaki hava, birleştirilecek kompozit üzerine çökecek ve çözücülerin çıkarılmasına izin verecek şekilde çıkarılır. Kürleme döngüsü ve uygulanan basınç daha sonra otomatik olarak kontrol edilebilir. Otoklav, yangın riskini önlemek için genellikle nitrojen veya nitrojen ve hava karışımı ile basınçlandırılır. Otoklav, gaz sirkülasyonunun homojen bir sıcaklık elde etmesine izin verecek şekilde tasarlanmıştır. Bu üretim süreci, büyük hacimli üretim için çok az ilgi çekicidir, ancak havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [63,64].

2.4.9 Savurma Döküm

Savurma döküm yöntemi kompozit silindirler ve borular üretmek için düşük maliyetli bir işlemdir. Yöntem hem reçine hem de elyafları dönen dairesel bir kalıbın içine yerleştirmeyi içerir. Elyaflar keçe veya dokuma fitiller şeklinde olabilir veya kesilmiş elyaflar dönen kalıbın içine kadar uzanabilir [62].

Kalıp, merkezkaç kuvvetinin cam elyafların reçine ile iyice emdirilmesine ve iyi bir sıkıştırma sağlamasına neden olacak kadar yüksek bir hızda döner. Bu teknik, kompozit ürünün her iki tarafında, eşleşen kalıplar kullanılmadan iyi bir son kat veren ve her iki yüzeye de çok pürüzsüz bir yüzey veren tek işlemdir. Üretilebilen ürünlerin boyutlarında bir üst sınır yoktur ancak püskürtülen doğranmış elyaflar küçük çaplı silindirler için kullanılamaz çünkü elyafın eşit dağıtılmasını sağlamak için püskürtme

kafası ile kalıp arasında 250-300 mm boşluk bırakılmalıdır. İşlem, silindirik veya hafif konik borular yapmak için kullanılabilir [62, 63].

2.4.10 Vakum İnfüzyonu

Vakumlu infüzyon işlemi, reçineyi bir tabakaya sürmek için vakum basıncını kullanan bir tekniktir. Kalıp jel kaplı olabilir ve kuru malzemeler kalıbın içine yerleştirilir ve kuru takviye üzerine delikli bir ayırma filmi yerleştirilir. Reçine uygulanmadan önce vakum uygulanır ve kuru malzemeler sıkıştırılır. Tam bir vakum elde edildiğinde, reçine kuru malzemelere dikkatlice yerleştirilmiş tüpler aracılığıyla infüze edilir. Reçine, kalıbı reçine tuzağına ve vakum pompasına bağlayan bir çıkış tüpünün bulunduğu açık kalıbın diğer ucundan akacaktır. Vakum infüzyonu, önemli emisyon azaltımları sunar. Vakum infüzyon, çok yüksek reçine-elyaf oranlarına olanak sağlar ve tabakaların mekanik özellikleri üstündür. Bu işlem, aşırı reçine ve iş gücü kullanımı olmaksızın reçineyi eşit şekilde dağıtma kabiliyeti nedeniyle sıkça kullanılır. Bununla birlikte, bu işlemin dezavantajları, çok fazla alete ihtiyaç duyulmasıdır ve infüzyon basıncı üzerinde uygun bir kontrol olmaksızın, azalan reçine akışı, elyaf yerleştirmenin orta kısmında reçine birikmesine neden olacaktır [63-64].

Tipik olarak düşük viskoziteli reçineler (100-250 MPa), takviyenin daha kolay nüfuz etmesine izin verdiği için infüzyona yardımcı olmak için yöntemde kullanılır. Bununla birlikte, çok düşük viskoziteye sahip reçineler bile, birçok takviyenin yüksek akış direnci nedeniyle bazen tüm malzemeyi düzgün şekilde infüze etmeyecektir. Bu nedenle, yöntemde akışa yardımcı olmak için bir akış ortamı kullanılır. Akış ortamı tipik olarak, reçine için kolay bir akış kanalı sağlamak için takviye katmanları arasında tek bir katman olarak yerleştirilir. Yöntemde reçine viskozitesi infüzyon işlemi üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Viskozitedeki düşük bir değişiklik bile büyük bir sorun olabilir çünkü çok farklı infüzyon akış hızlarına yol açabilir. Örneğin reçine viskozitesi saklama koşullarından, özellikle sıcaklık değişimlerinden etkilenebilir [64,65].

Yöntem büyük ebatlı yapılar üretmek için kullanılır. Yöntem bazen Vakum Yardımlı Reçine Transferli Kalıplama (VARTM) olarak da anılır. Avantajları, Reçine Transfer Kalıplamaya (RTM) benzer olması, ancak yalnızca bir tarafın iyi bir yüzey pürüzlülüğü kalitesi vardır. Bu yöntem ile mukavemetli, hafif katmanlar üretilir ve daha büyük ebatlı ürünler üretilebilir. Bu yöntem ile yüksek reçine-elyaf oranları elde

edilir ve neredeyse hiç boşluk kalmaz, bu da onu kompozit tabakalar imal etmek için en avantajlı yöntemlerden biri haline getirir. Bu yöntem reçinelerden kaynaklanan zararlı kimyasal emisyonların azaltılmasına yardımcı olur. Vakum infüzyonu yöntemi reçineyi kalıp boşluğuna itmek için sadece atmosferik basınç kullanan tek kapalı kalıp işlemi olmasıyla ayırt edilir. Diğer kapalı kalıp işlemlerine göre daha düşük takım maliyetleri vardır. Dezavantajları ise, daha yavaş döngü sürelerine sahip olması, reçinenin viskozitesine büyük ölçüde bağımlı olması ve daha yüksek sarf malzemesi maliyetleridir. Vakum infüzyon yöntemiyle üretilen ürünlere tekneler, büyük oto gövde panelleri ve havacılık bileşenleri verilebilir [64,65].

Vakum İnfüzyon, reçine transfer kalıplama gibi kompozit üretiminde çok kullanılan geleneksel elyaf/reçine takviye ve matris sistemli kompozitlerde CNT takviyesi bazı sorunlara sebep olmaktadır. CNT'nin katkısı sıvı reçine/sertleştirici karışımına yapıldığında CNT reçine ve sertleştirici karışımıyla etkileşime girerek viskoziteyi arttırmaktadır. Yüksek viskozite reçinenin elyaf ıslatma özelliğini azaltmaktadır [66]. CNT'nin üretim öncesi matris ile karıştırılmasının olumsuz etkisi engellemek için CNT'nin elyaf/reçine sistemine katkılandırılması için I) takviye elyafların üzerine CNT eklenmesi/ aşılanması veya büyütülmesi, II) kompozit lamine arayüzeylerine üzerinde CNT kaplanmış buckypaper uygulaması, III) CNT'nin elyaf kumaşlar üzerine elle yayımı veya CNT'nin elyaf kumaşlar üzerine püskürtülmesi yöntemleri uygulanmaktadır [67]. Çoğu uygulamada tercih edilen RTM ve VARTM yöntemlerinin aksine bu çalışmada reçine matrise sertleştirici katılması CNT katkısının reçine/sertleştirici karışımına katılmasını engellemiştir.

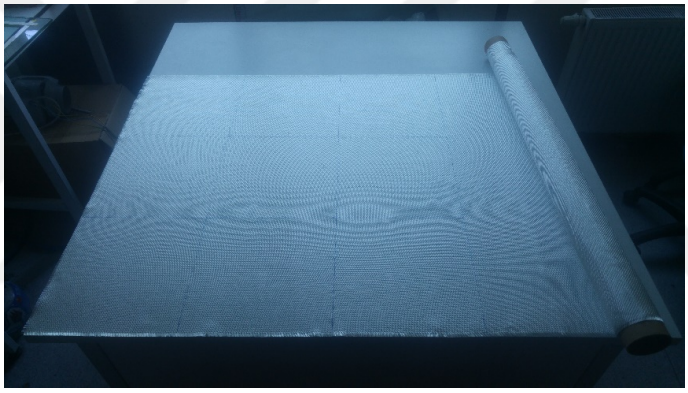
Bu yüksek lisans çalışması öncesi ön uygulamalarda reçine/sertleştirici karışımına CNT katkısı yapılmış ve vakum ortamına verilmeye çalışılmıştır. Viskozitesi artan CNT/reçine/sertleştirici karışımı elyafları yeterli bir hızda ıslatmamış, vakum ortamındaki elyaf kumaşlar adeta karışımdan CNT katkısını süzmüştür. Ayrıca ıslatma işlemi daha tamamlanmadan CNT reçine/sertleştirici karışımının kürlenmesini hızlandırıcı bir etki göstermiştir. Bu olumsuz durumdan dolayı CNT'nin kompozit yapıya katkısı yöntemi değiştirilmiş ve CNT katkısı yapıya alkol/CNT kolloid karışımının elyaf kumaşlara püskürtülmesi ile yapılmıştır.

Çalışmada ilk olarak alansal yoğunluklarına göre benzer veya aynı özelliklerde aynı örgü yapılarındaki cam, karbon ve aramid (kevlar) kumaşlar aynı üretim yöntemi ve

aynı üretim parametreleri kullanılarak elyaf takviyeleri çok katmanlı olacak şekilde aynı epoksi reçine matris malzemesine takviye edilerek vakum infüzyon yardımlı reçine transfer (RTM) üretim yöntemi ile cam elyaf, karbon elyaf, aramid (kevlar) elyaf ve bu üç farklı elyaf yapısını bünyesinde bulunduran hibrit yapılı elyaf takviyeli 4 adet polimer matrisli lamine kompozit plakalar üretilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise ilk aşamada olduğu gibi aynı parametreler kullanılarak cam, karbon ve aramid elyaf takviyeli kompozit plakalar CNT katkılı olarak üretilmiştir. Karbon nanotüp katkılı ve karbon nanotüp katkısız olmak üzere 2 farklı üretim ve cam, karbon ve aramid elyaf ile hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozitler olmak üzere 4 farklı takviye malzemesi kullanılarak toplamda 8 adet elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit plakalar üretilmiştir. Bu kompozitlerden deney numuneleri elde edilmiş ve numuneler üzerinde çekme, 3-nokta eğme ve düşen ağırlık darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu yüksek lisans tezi çalışmasında elyaf kumaş takviyeli ve karbon nanotüp (CNT) katkılı tabakalı polimer matrisli hibrit kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretim yöntemi olarak vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır. Elyaf kumaş takviyeleri için Dost Kimya A.Ş. aracılığıyla twill 2/2 kumaş örgü sistemine ve benzer g/m^2 özelliklerine sahip cam, karbon ve kevlar kumaş malzemeler tercih edilmiştir (Şekil 3.1, Çizelge 3.1). Partikül takviye malzemesi olarak Ege Nanotek firmasından çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) temin edilmiştir (Çizelge 3.2).



Şekil 3.1 : Çalışma kapsamında temin edilen cam elyaf takviye kumaş.

Çizelge 3.1 : Dost Kimya A.Ş.'den temin edilen elyaf takviye malzemeleri özellikleri [68-70].

Kompozit Takviye Malzemesi	Marka	Kumaş Örgü Tipi	Kütle (g/m^2)
Cam Elyaf	Dost Kimya	twill 2/2	300
Karbon Elyaf	Dost Kimya	twill 2/2	245
Kevlar Elyaf	Dost Kimya	twill 2/2	300

Çizelge 3.2 : Ege Nanotek Firması'ndan temin edilen karbon nanotüp (CNT) malzemesi özellikleri [71].

Malzeme	Marka	İç Çap (nm)	Dış Çap (nm)	Uzunluk (μm)	Saflık (%)
MWCNT	Ege Nanotek	2-6	<8	10-35	>96

Kompozit plaka üretimi için polimer matrise takviye olarak, cam, karbon ve kevlar elyaflar her bir kompozit plaka üretimi için tek başına kullanılmış, hibrit kumaş takviyeli olarak ise cam, karbon ve elyaf kumaşlar bir arada kullanılmıştır. Kompozit yapıdaki kumaşların yerleşiminde tüm tabakalar 0° yerleştirilmiştir (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3 : Üretilen kompozit plakalarındaki tabakaların yerleşimi.

Kompozit Plaka	Tabaka Yerleşimi
Cam Elyaf	$[(0_{cam})_9]$
Karbon Elyaf	$[(0_{karbon})_9]$
Kevlar Elyaf	$[(0_{kevlar})_9]$
Hibrit Elyaf	$[(0_{cam}/0_{karbon}/0_{kevlar})_3]$

Kompozit yapımı için her bir elyaf kumaş çeşidinden 100 cm x 100 cm boyutlarındaki kumaşlardan tabakalı kompozit plakalar üretilebilmesi için bu kumaşlardan 33 cm x 33 cm boyutlarında olacak şekilde 9 eş boyutlu kare elyaf kumaşlar kesilmiş ve bu kumaşlar tabakalar halinde yerleştirilerek tabakalı kompozit malzeme yapılacak şekilde hazırlanmıştır (Şekil 3.2).

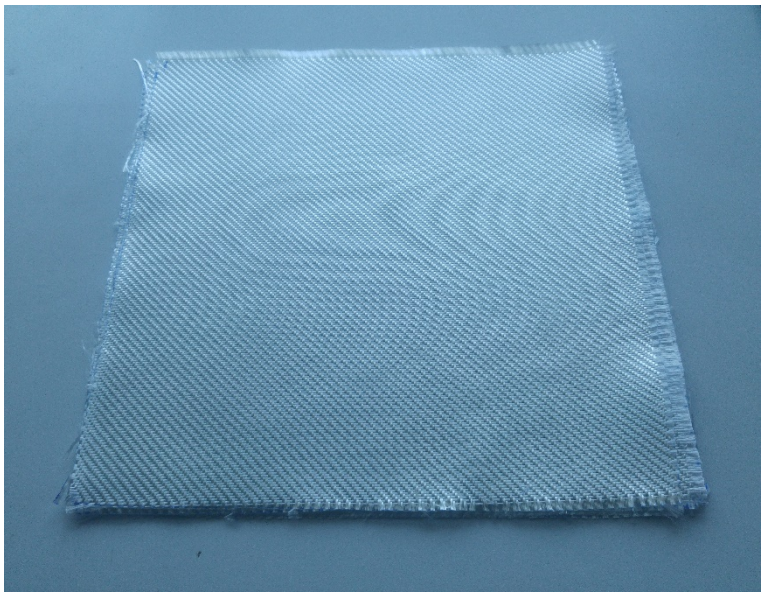
Polimer matris için epoksi reçine tercih edilmiştir. Reçine ve kürleyici olarak Hexion LR285 ve LH285 Dost Kimya A.Ş.'den temin edilmiştir (Çizelge 3.4). Elyaf/reçine oranı tüm kompozit plaka üretimleri için 50:50 olarak kullanılmıştır ve kompozit yapılara toplam kütlenin %0,5 CNT takviyesi yapılmıştır (Çizelge 3.5). CNT katkılı veya katkısız kompozit plakalar için elyaf, epoksi miktarları aynı tutulmuştur.

Alkol olarak izopropil alkol tercih edilmiştir. CNT katkısı yapılarak üretilmiş her bir kompozit yapı için alkol-CNT kolloid karışımı olarak 1 litre izopropil alkol kullanılmıştır (Çizelge 3.6). İşlem sonunda oda atmosferinde alkolün buharlaşması sağlanmış ve yapıdan alkol uzaklaştırılmıştır.

Elyaf kumaşlara CNT uygulaması boya sprey tabancası (Şekil 3.3) ile elyaf kumaşlar üzerine alkol-CNT kolloid karışımı aracılığıyla aktarılarak kaplanmıştır (Şekil 3.4).

Çizelge 3.4 : Çalışmada matris olarak tercih edilen epoksi ve sertleştirici malzemenin özellikleri [72].

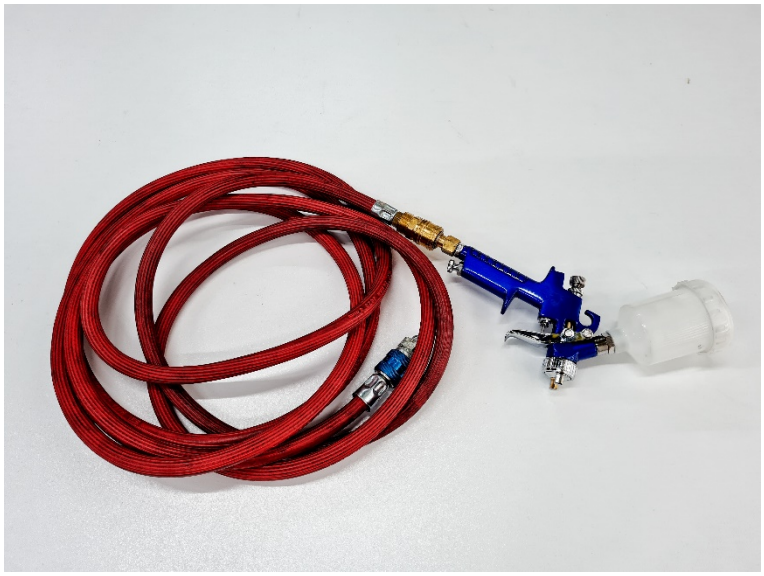
Malzeme	Marka	Yoğunluk (g/cm^3)	Vizkozite (mPa·s)	Kırılma İndisi
Reçine	Hexion LR285	1,18-1,23	600-900	1525-1530
Sertleştirici	Hexion LH285	0,94-0,97	50-100	1500-1506



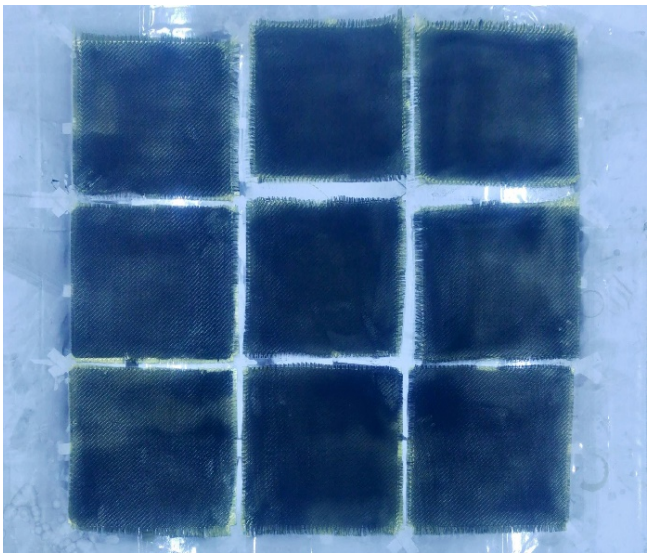
Şekil 3.2 : Tabakalar halinde yerleştirilerek tabakalı kompozit malzeme yapılacak şekilde hazırlanan cam elyaf kumaş örneği.

Çizelge 3.5 : Çalışmada üretilmiş her bir kompozit plakada kullanılan malzemelerin miktar bilgileri.

Kompozit Takviye Malzemesi	Elyaf Kütlesi (g)	Epoksi Matris Kütlesi (g)	Elyaf/Epoksi Oranı (Kütlece %)	CNT Kütlesi (g)	Kompozit/CNT Oranı (Kütlece %)
Cam	300	300	50:50	3,00	0,5
Karbon	245	245	50:50	2,45	0,5
Kevlar	300	300	50:50	3,00	0,5
Hibrit	281	281	50:50	2,81	0,5



Şekil 3.3 : Çalışmada kullanılan boya sprey tabancası.



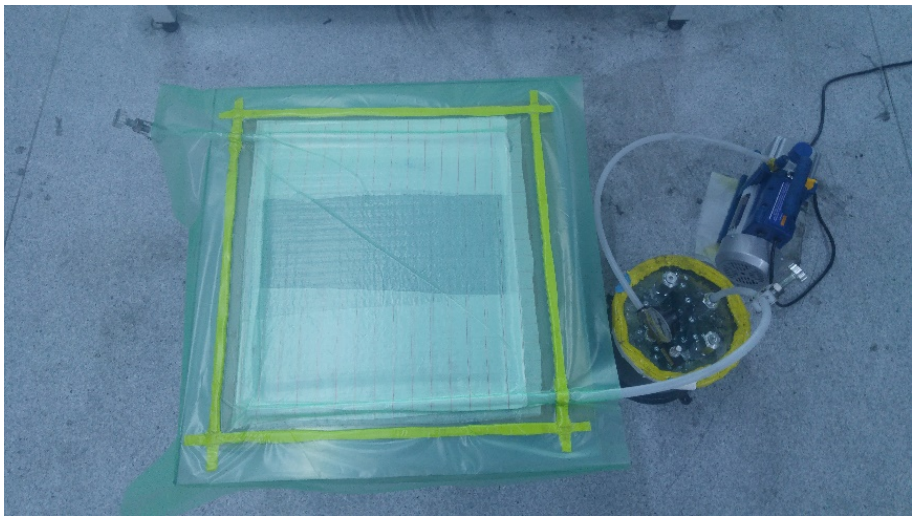
Şekil 3.4 : Çalışma kapsamında CNT-Alkol kolloid karışımıyla CNT kaplaması yapılmış kevlar elyaf kumaşlar.

Dokuz adet 33 cm x 33 cm boyutlarında elyaf kumaşın 0°'deki yerleşimiyle elde edilmiş tabakalı yapıya reçine-sertleştirici karışımı vakum infüzyon işlemiyle ıslatma sağlanabilmesi için vakum infüzyon sistemi kurulmuştur. Vakum infüzyon üretim yönteminde sistem cam plaka üzerine kurulmuştur. Cam plakalar için 60 cm x 55 cm boyutları tercih edilmiştir. Kompozit plakaların üretimi sonrasında cam plakalar üzerinden sıyrılması esnasında camda hasar gelmesini engellemek amacıyla 10 mm kalınlığında cam plakalar kullanılmıştır. Cam yüzeyleri aseton ile temizlendikten sonra üretilecek kompozit plakanın boyut uzunluklarından 5 cm büyük olacak şekildeki bir şablona uygun olarak cam yüzeyine şeritler sızdırmazlık bantı uygulanmıştır. Kompozit plakanın üretim sonrası yüzeyden ayrılabilmesi için cam plaka yüzeyinin kalıp ayırıcı ile yüzey uygulaması yapılmıştır. Kalıp ayırıcı cam yüzeyine sprey halinde uygulanarak ve kâğıt havluya emdirilerek heterojen olarak yayılmış kalıp ayırıcı homojenleştirilmiştir. En az 2 kere, tercihen 4 kere bu işlem aynı yüzeye uygulanmıştır. Kalıp ayırıcı için Blackchem'in silikonlu kalıp ayırıcısı kullanılmıştır.

Çizelge 3.6 : CNT katkısı yapılmış alkol kolloid karışımları için malzeme miktar özellikleri.

Kompozit Takviye Malzemesi	CNT Miktarı (g)	Alkol Miktarı (litre)
Cam Elyaf	3,00	1,00
Karbon Elyaf	2,45	1,00
Kevlar Elyaf	3,00	1,00
Hibrit Elyaf	2,81	1,00

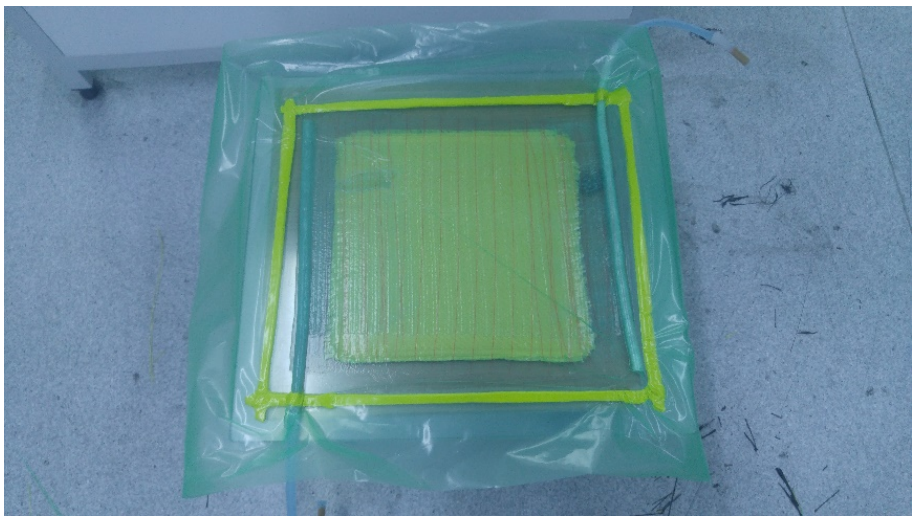
Uygun boyda polipropilen boru kesilerek vakum infüzyonda reçine akışı için epoksi matris aktarma boruları elde edilmiştir. En-boy kesimi yapılan kumaş tabakalarından daha büyük boyutta polipropilen boruları da çevreleyecek büyüklükte yaklaşık 50 cm x 100 cm boyutlarında astar kumaş kesimi ve bunun vakum odasına yerleşimi yapılmıştır. Astar kumaş üzerine reçine akışının homojen ve sabit sağlanabilmesi için üs kısmına yeterli en-boy'da akış filesi kesilmiş ve yerleştirilmiştir. Yerleri ayarlanan elyaf kumaşlar, borular, astar kumaşların yerleşiminden sonra sızdırmazlık bantı cam yüzeyine vakum odası oluşturacak şekilde uygulanmıştır. Sızdırmazlık bantı kapsayacak boyutlarda kesilmiş vakum torbası yerleştirilmiş ve sızdırmazlık bantı ile temas noktalarındaki hava kabarcıklarının giderilmiştir. Kova-vakum odası ve vakum odası-vakum pompası arasındaki borulara sıkıştırma valflerinin yerleştirilmiştir. Kova-vakum odası arasında yerleştirilecek borunun valfi kapatılmıştır. Vakum odası-vakum pompası arasındaki bağlantının boru ile sağlanarak valfinin açılması ve vakum atmosferi altına alınması sağlanmıştır. Basınç değerlerinde zamanla sabit değerler görülmüyorsa vakum odasının hava geçirgenliği giderilmiş ve vakum ortamı sağlanmıştır. (Şekil 3.5). Belirli bir süre sonunda (yaklaşık 15 dakika) basınç belirli değerde sabit kalmış ise vakum odası-vakum pompası arasındaki açık valf kısılmıştır ve potansiyel ani reçine akışının önüne geçilmiştir. Reçine-sertleştirici karışımının dolu olduğu kovanın içerisine kova-vakum odası borusunun kovanın dibine değinceye kadar yerleştirilmesiyle birlikte polimer boru kovanın ucuna sabitlenmiştir.



Şekil 3.5 : Vakum İnfüzyon ile üretim işlemine hazır hale getirilmiş vakum infüzyon sistemi.

Vakum infüzyon ile üretim işlemi için belirli bir iş akış sistemi yapılmıştır. Bu akış için başlangıç kova-vakum odası borusundaki valfin yavaş bir şekilde açılması ile

olmuştur. Devamında vakum odası dışında kalan boru kısmında gözle görülmeyen kılcal çatlaklar gibi hasar varsa hava baloncuğu yaptığından dolayı bu hasarın olup olmadığına boru içerisinden reçine daha vakum odasına verilmeden gözlemlenmiştir. Vakum pompasının basınç değerleri valfin kademeli olarak açılmasından daha hızlı bir şekilde düşüyorsa bu hasar reçine transferi sırasında boru içinde hava baloncuğu oluşumu gözlemlenmiyor olsa bile basınç ölçerden gözlemlenmiştir. Reçine akışı uygunluğu sağlanmışsa kova-vakum odası arasındaki borudaki valf tamamen açılmıştır. Vakum odası içerisindeki reçine akışı ile ıslatma yeterli seviyede ve sabit oluncaya kadar vakum odası-vakum pompası arasına yerleştirilen valfin ideal sıkıştırmaya getirilerek ıslatmanın sabit yapılması sağlanmıştır. Elyaf kumaşlara reçine emdirme sağlıklı bir şekilde yapıldığı gözlemlendiği gibi vakum odası-vakum pompası borusundaki valf kapatılmıştır. Kapatılan vakum odası-vakum pompası valfinin etkisi ile vakum odasındaki vakum kuvvetinin yeterli bulunan reçine miktarının üzerinde miktardaki reçinenin vakum odasına kovadan iletilmesini engellemek için kova-vakum odası arasındaki valf kapatılmıştır. Devamında vakum pompası kapatılmıştır. Vakum odası-vakum pompası arasında boru valf ile vakum pompası arasındaki bölümden kesilmiştir. Vakum infüzyonu üretim yöntemi ile reçine-sertleştirici karışımı aracılığıyla ıslatma sağlamış ve üretim tamamlanarak kürlenme işlemi için sistem güvenli bir yere alınmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 : Vakum infüzyon üretim yöntemi ile kürleşmeye devam eden üretim sonrası vakum infüzyon sistemi içerindeki kompozit plaka.

Vakum infüzyon üretim yönteminin sağlanmasından sonra reçinenin sertleştirici katalizörü ile kürlenmesi için reçine ve sertleştirici üreticisinin önerdiği minimum kürleşme süresi dikkate alınarak beklenmiştir. Vakum infüzyon işlemi sonrasında

matrisin akışını sağlayan polimer borular kesilmiş ve üzerlerinde bulunan valflerinde ayrılmıştır. Vakum torbası ve sızdırmazlık bantı kazıma bıçağı ile sıyrılmıştır. Kazıma bıçağı ile cam yüzeyine yapışan vakum odasının içinde kalan tüm ürünlerin kazınması ve camdan ayrılma işlemleri tamamlanmıştır. Devamında astar kumaş kesilmiş ve kompozit plakanın vakum infüzyon ile üretimi tamamlanmıştır. Son olarak kompozit plakalar temizlenmiş ve işlenmeye hazır hale getirilmiştir. Üretilen kompozit plakaların kalınlıkları birbirinden farklı olmuştur (Çizelge 3.7).

Kompozit plakalar su jeti ile çalışmada yapılması planlanan mekanik testler için kesilmişlerdir. Her bir mekanik deney uygulaması için her bir plakadan bir tanesi deneme olmak üzere toplam altı adet numune üretilmiş, deneylerde beş adet numune kullanılmıştır (Şekil 3.7-3.9). Çalışma kapsamında kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin analizi için çekme deneyi, 3 nokta eğme deneyi ve düşen ağırlık darbe deneyleri uygulanmıştır.

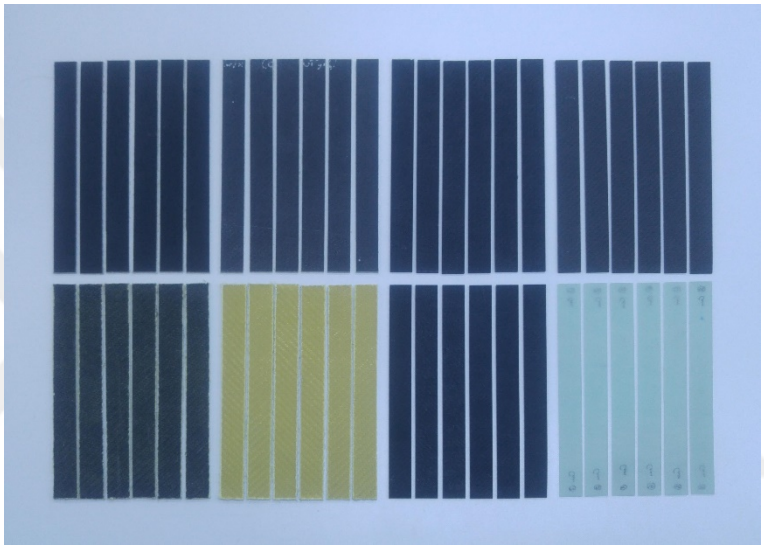
Çekme deneyi için ASTM D3039: Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Çekme Özellikleri için Standart Test Yöntemi uygulanmıştır. Çekme cihazı çenesin numune çekme hızı ASTM D3039 için 2 mm/dakikadır. Numune eni ve boyu ise 25 mm x 250 mm'dir. Çalışmada çekme deneyi uygulaması için deney cihazı olarak Shimadzu AG-X Plus tercih edilmiştir (Şekil 3.10, 3.11) [73].

3 nokta eğme deneyi için ASTM D7264: Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Eğilme Özellikleri için Standart Test Yöntemi uygulanmıştır. 3 nokta eğme cihazı problarında numune eğme hızı ASTM D7264 için 1 mm/dakikadır. Numune eni ve boyu ise 13 mm x 106 mm'dir. Çalışmada 3 nokta eğme deneyi uygulaması için deney cihazı olarak Shimadzu AGS-X tercih edilmiştir (Şekil 3.12, 3.13) [74].

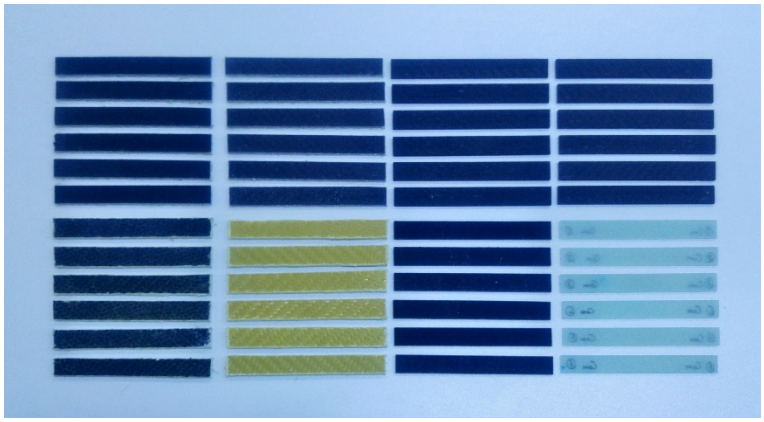
Düşen ağırlık darbe deneyi için ASTM D7136: Elyafla Güçlendirilmiş Polimer Matris Kompozitin Düşük Ağırlıklı Darbe Olayına Karşı Hasar Direncini Ölçmek için Standart Test Yöntemi uygulanmıştır. Düşen ağırlık darbe cihazının uyguladığı enerji miktarı çalışma öncesinde gerçekleştirilen ön çalışmalarla birlikte 50 Joule olarak belirlenmiştir. Numune eni ve boyu ise 100 mm x 150 mm'dir. Çalışmada düşen ağırlık darbe deneyi uygulaması için deney cihazı olarak Instron CEAST 9350 tercih edilmiştir (Şekil 3.14) [75].

Çizelge 3.7 : Çalışma kapsamında üretilen elyaf takviyeli kompozit plakaların kalınlık özellikleri.

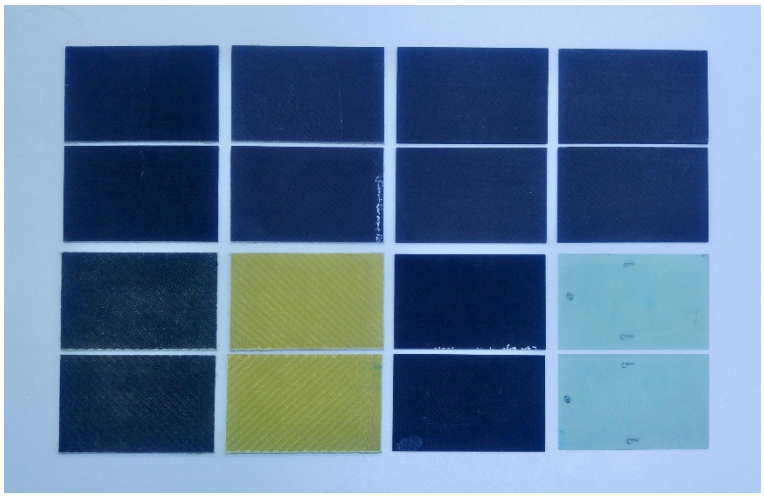
Kompozit Takviye Malzemesi	Kütlece CNT Miktarı (%)	Plaka Kalınlığı (mm)
Cam Elyaf	0	2,00
Cam Elyaf	0,5	2,19
Karbon Elyaf	0	2,42
Karbon Elyaf	0,5	2,64
Kevlar Elyaf	0	3,56
Kevlar Elyaf	0,5	3,60
Hibrit Elyaf	0	2,75
Hibrit Elyaf	0,5	2,75



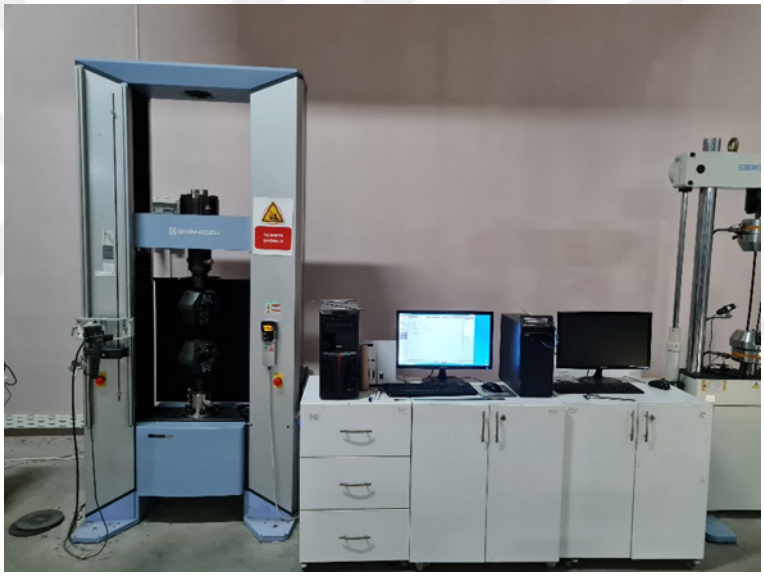
Şekil 3.7 : Çalışma kapsamında üretilen sekiz adet kompozit plakadan elde edilmiş her bir plakadan ASTM D3039 standardına uygun olarak altı adet üretilmiş çekme deneyi numuneleri.



Şekil 3.8 : Çalışma kapsamında üretilen sekiz adet kompozit plakadan elde edilmiş her bir plakadan ASTM D7264 standardına uygun olarak altı adet üretilmiş 3 nokta eğme deneyi numuneleri.



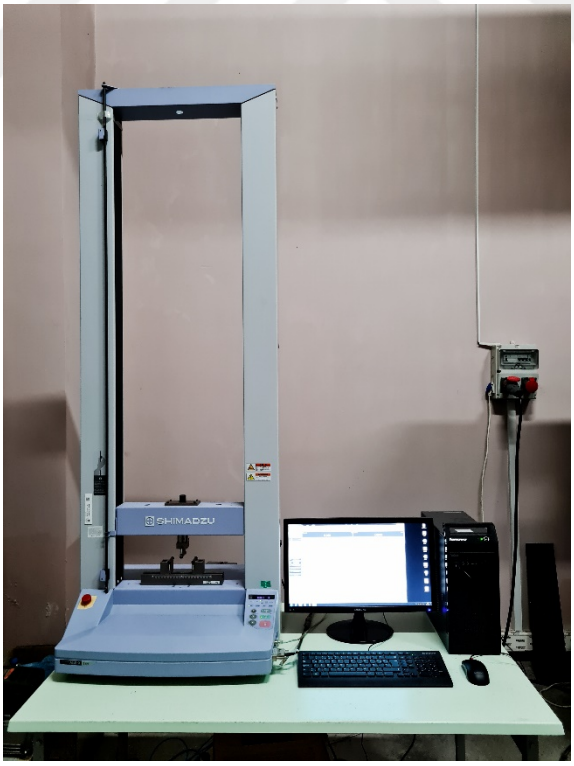
Şekil 3.9 : Çalışma kapsamında üretilen sekiz adet kompozit plakadan elde edilmiş her bir plakadan ASTM D7136 standardına uygun olarak altı adet üretilmiş düşen ağırlık darbe deneyi numuneleri.



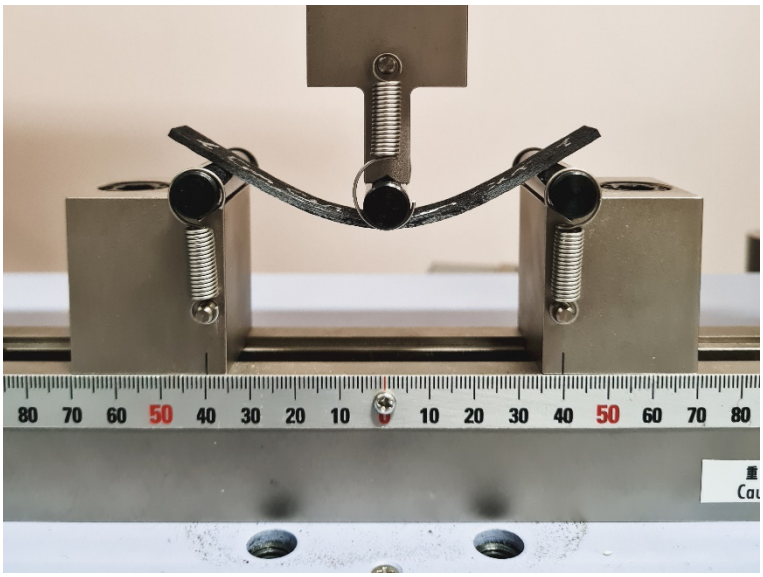
Şekil 3.10 : Çalışmada çekme deneyi uygulaması için tercih edilen Shimadzu AG-X Plus test cihazı.



Şekil 3.11 : Çalışmada çekme deneyi uygulaması için tercih edilen Shimadzu AG-X Plus test cihazında yapılan deney esnasındaki bir numune.



Şekil 3.12 : Çalışmada 3 nokta eğme deneyi uygulaması için tercih edilen Shimadzu AGS-X test cihazı.



Şekil 3.13 : Çalışmada 3 nokta eğme deneyi uygulaması için tercih edilen Shimadzu AGS-X test cihazında yapılan deney esnasındaki bir numune.



Şekil 3.14 : Çalışmada 3 nokta eğme deneyi uygulaması için tercih edilen Instron CEAST 9350 test cihazı.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 Çekme Deneyi Sonuçları

Çalışmalar kapsamında 300 g/m^2 alansal yoğunluğa sahip cam elyaf, 245 g/m^2 alansal yoğunluğa sahip karbon elyaf, 300 g/m^2 alansal yoğunluğa sahip kevlar elyaf ve 281 g/m^2 alansal yoğunluğa sahip hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozitlere yapılan CNT katkısının çekme deneyi performansına etkisinin analizi yapılmıştır. Çekme dayanımları incelendiğinde cam elyafta 326 MPa'dan 372 MPa'ya %14,2'lik artış, karbon elyafta 693 MPa'dan 701 MPa'ya %1,1'lik artış, kevlar elyafta 539 MPa'dan 509 MPa'ya %5,6 azalma ve hibrit yapılı elyafta ise 463 MPa'dan 437 MPa'ya %5,7'lik azalma gerçekleşmiştir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde Mahato ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, kütlece %0,5 CNT katkısı yapılmış cam elyaf takviyeli kompozit yapıda çekme gerilmesi altında yaklaşık 430 MPa'dan 450 MPa'ya %5'lik bir artış gözlemlenmiştir [76]. Boroujeni ve arkadaşları yaptıkları karbon elyaf üzerinde büyütülmüş CNT'lerin kompozit yapıya etkisini inceledikleri çalışma ile çekme gerilmesi altında yaklaşık 850 MPa'dan 870 MPa'ya %2'lik bir performans artışı olduğu gözlemlenmiştir [77]. Taraghi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada kütlece %0,5 CNT'nin 175 g/m^2'lik alansal yoğunluğa sahip kevlar elyaf takviyeli yapıya katılması ile çekme gerilmesi altında yaklaşık 345 MPa'dan 365 MPa'ya %6 artış olduğu gözlemlenmiştir [78].

Test verileri incelendiğinde (Çizelge 4.1), dayanım için sırasıyla en yüksek dayanım karbon elyafta, devamında kevlar elyafta, hibrit yapıda ve en düşük dayanımın ise cam elyafta olduğu görülmüştür. CNT katkısının karbon ve cam elyaf takviyeli kompozit yapılarda performansa olumlu etki yaparak dayanımı arttırdığı, Kevlar elyaf takviyeli ve hibrit elyaf takviyeli yapılarda ise kompozit yapının performansını olumsuz etkileyerek dayanımı azalttığı görülmüştür.

Çizelge 4.1 : Çalışmada numuneler üzerinde gerçekleştirilen çekme deneyleri için dayanım (MPa) verileri.

Kompozit Tipi	Kütlece CNT miktarı (%)	Numune Sayısı	Minimum Dayanım (MPa)	Maksimum Dayanım (MPa)	Ortalama Dayanım (MPa)	Standart Sapma
Cam	0	5	307,64	353,36	326,07	15,87
Cam	5	5	347,32	387,88	372,44	16,73
Karbon	0	5	633,82	781,96	693,95	68,27
Karbon	5	5	658,64	755,87	726,85	37,13
Kevlar	0	5	519,50	561,71	539,65	18,36
Kevlar	5	5	498,28	524,02	509,96	9,62
Hibrit	0	5	412,68	498,47	457,11	35,42
Hibrit	5	5	424,28	461,37	437,98	14,12

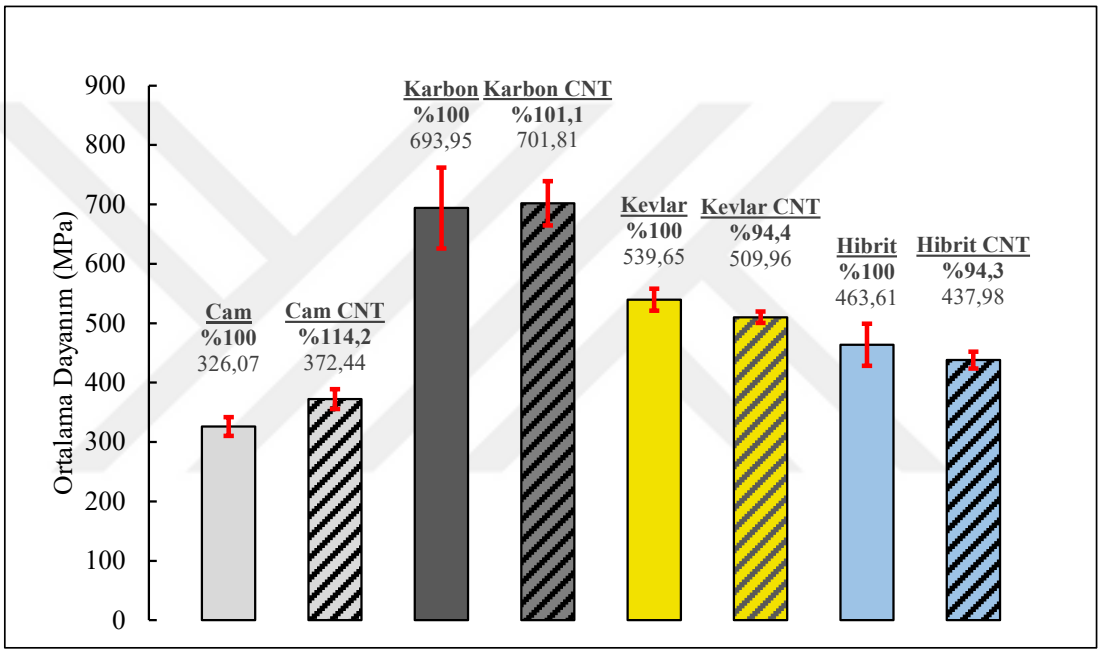
Uzama davranışı için (Çizelge 4.2) en yüksek uzamanın kevlar elyafta, devamında cam elyafta, hibrit yapıda ve en düşük uzamanın ise karbon elyafta olduğu görülmüştür. CNT katkısının cam elyaf, karbon elyaf ve hibrit elyaf takviyeli yapılarda uzama performansına olumlu etki yaparak uzamayı arttırdığı görülürken, kevlar elyaf katkılı kompozit yapıda ise uzamanın azaldığı görülmüştür.

Çizelge 4.2 : Çalışmada numuneler üzerinde gerçekleştirilen çekme deneyleri için uzama (%) verileri.

Kompozit Tipi	Kütlece CNT miktarı (%)	Numune Sayısı	Minimum Uzama (%)	Maksimum Uzama (%)	Ortalama Uzama (%)	Standart Sapma
Cam	0	5	1,56	1,70	1,63	0,05
Cam	5	5	1,67	1,74	1,72	0,05
Karbon	0	5	0,96	1,24	1,08	0,13
Karbon	5	5	1,05	1,23	1,21	0,08
Kevlar	0	5	2,12	2,26	2,19	0,07
Kevlar	5	5	2,00	2,30	2,14	0,12
Hibrit	0	5	1,33	1,62	1,44	0,13
Hibrit	5	5	1,47	1,60	1,51	0,05

Çekme verileri incelendiğinde (Şekil 4.1) ortalama dayanım (MPa) için en yüksek performans karbon elyafta, sonra sırasıyla kevlar elyaf ve hibrit elyafta, en düşük ise cam elyafta görülmüştür. CNT katkısı yapıldığında ise Karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit yapının dayanımında ortalama %1,1'lik bir artma gözlemlenirken cam elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitte bu artış %14,2'ye kadar yükselmiştir. Karbon ve cam elyaf takviyelerin aksine, CNT katkısı kevlar ve hibrit elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitlerin dayanımlarında azalmaya sebep olmuştur. Hibrit Elyaf için bu azalma %5,7'dir ve Kevlar elyaf için ise bu azalma %5,6 kadardır.

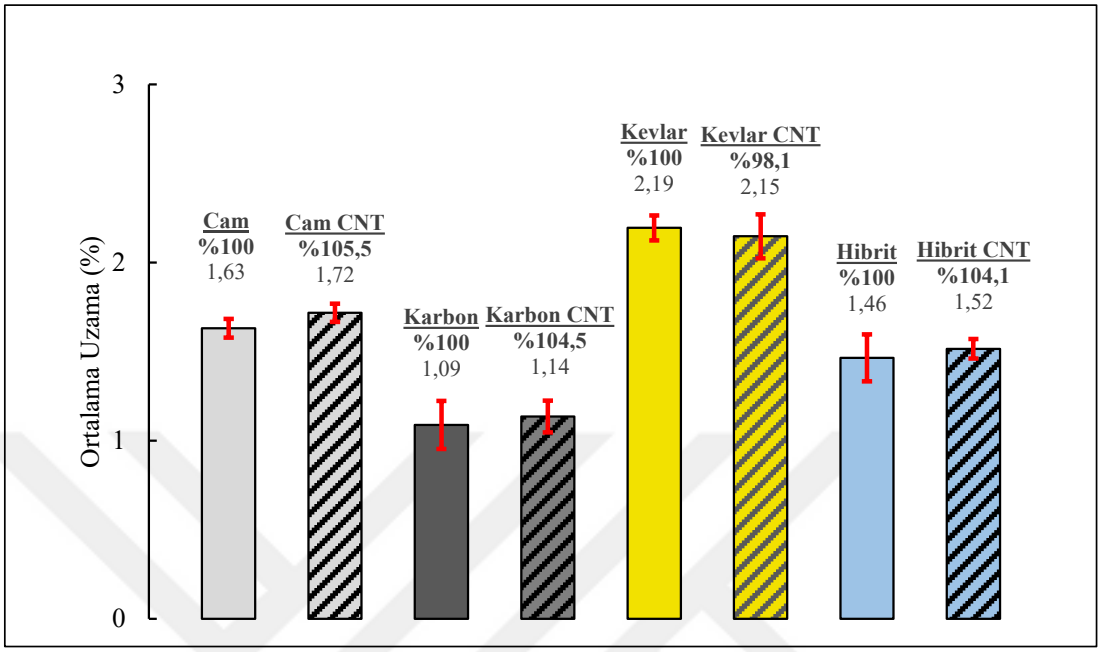
Çekme verileri incelendiğinde (Şekil 4.2) ortalama uzama (%) için en yüksek performans kevlar elyafta, sonra sırasıyla cam elyaf ve hibrit elyafta, en düşük ise karbon elyafta görülmüştür. CNT katkısı yapıldığında ise Kevlar elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit yapının uzama davranışında ortalama %1,9'luk bir azalma gözlemlenmiştir. Diğer elyaf türleri için ise cam elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit yapının uzama davranışında ortalama %5,5, Hibrit elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit yapının uzama davranışında ortalama %4,1 ve son olarak karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit yapının uzama davranışında ortalama %4,5'lik bir artış olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1 : Cam, karbon, Kevlar ve hibrit elyaf takviyeli ve CNT katkılı veya katkısız toplam sekiz polimer matris kompozit plaka için ortalama çekme gerilmesi altında çekme dayanımı (MPa) ve standart sapma (kırmızı).

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen çekme deneyleri için hasar oluşumları ve kırılma mekanikleri CNT/Matris/Elyaf malzemeleri arasındaki mekanik özellik farklılıklarından dolayı kompozit malzemelerdeki hasar mekanizmaların çatlak yayılmaları değişebilmektedir. Kompozit malzemelerde, kırılma mekaniği analizi, mekanik bileşenlerin performansını iyileştirmek için kullanılan önemli bir araçtır. Yapı hasarlarının nedenlerini anlamak ve gerçek hayattaki mekanik deney uygulamalarında yapı hasar mekanizmalarını tanımlamak için kırılma mekaniği yaygın olarak kullanılmaktadır. Kırılma mekaniği için kompozit malzemelerde hasar mekanizmaları üç ayrı şekilde tanımlanabilir. Bunlar: Mod I: Açılma/kopma modu (çatlak düzlemi üzerinde gerçekleşen normal çekme gerilimi). Mod II: Kayma modu

(çatlak düzlemine paralel ve çatlak yüzeyine dik etki eden bir kayma gerilmesi).Mod III: Yırtılma modu (çatlak düzlemine paralel ve çatlak yüzeyine paralel olarak hareket eden bir kesme gerilmesi).



Şekil 4.2 : Cam, karbon, Kevlar ve hibrit elyaf takviyeli ve CNT katkılı veya katkısız toplam sekiz polimer matris kompozit plaka için ortalama çekme gerilmesi altında uzaması (%) ve standart sapma (kırmızı).

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen çekme deneylerinde Mod I ve Mod II kırılma mekaniği karakteristikleri gözlemlenmiştir.

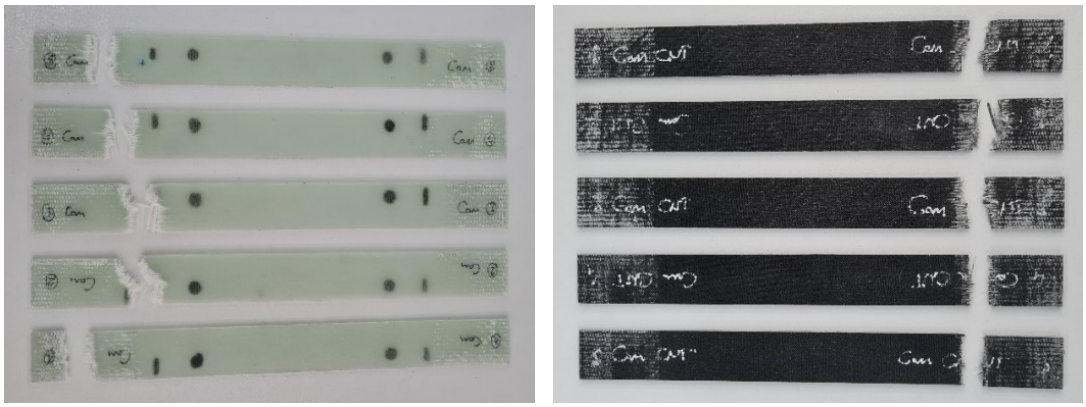
Çekme Deneyi uygulanmış numunelerin makrografları (Şekil 4.3) incelendiğinde cam elyaf takviyeli numunelerde kırılma mekanizmaları numunelerin çekme cihazına bağlandığı çenelerin olduğu yerlerden başlamıştır. CNT katkısı çekme deneyindeki hasar mekanizmasını etkilemiştir. Çekme gerilmesi altında kopan numunelerin hasarlarında cam elyafın hasar yüzeylerinde Mod I ve Mod II hasar mekanizmaları görülebilmektedir. CNT katkısı yapılmayan cam elyafın hasar bölgeleri incelendiğinde, elyaf-reçine arasındaki tutunma kuvvetinin CNT katkısı yapılan cam elyafın hasar bölgelerine göre az olduğu ve çekme kuvveti altında elyaf sıyrılması meydana gelerek delaminasyona neden olduğu görülmektedir. CNT takviyesi, cam elyaf-matris arasındaki tutunma kuvvetini arttırarak elyaf sıyrılmasını azaltmış ve olası bir delaminasyonu engellemiştir.

Karbon elyaf takviyeli numunelerde kırılma mekanizmaları Mod I halinde olmuştur. Elyaf takviyeler ve epoksi matris çekme yönüne dik olarak şekilde hasara uğrayıp

kopmuştur (Şekil 4.4). Cam elyaf takviye ile kıyaslandığında karbon elyafın kırılma mekananiğinde delaminasyonu tetikleyici bir mekanizma minimaldir. CNT takviyesi karbon elyaf takviyesi kompozit yapının mekanik performansını arttırmıştır.

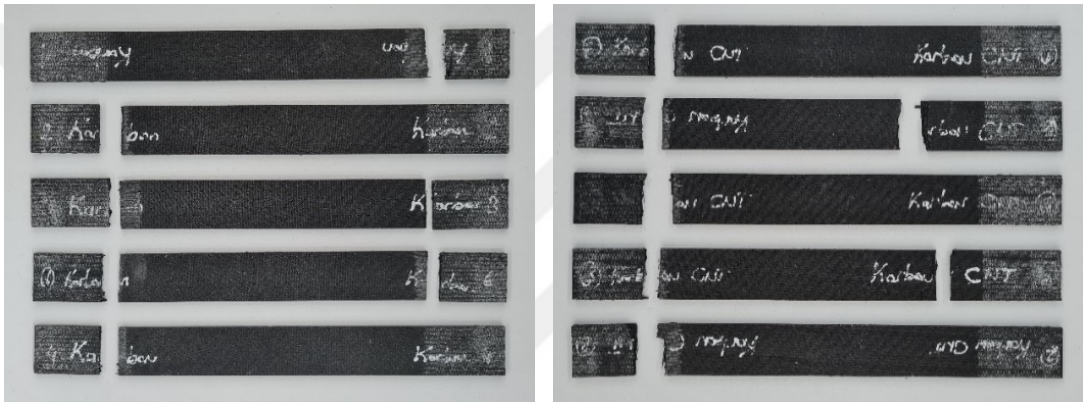
Kevlar elyaf takviyeli numuneleri incelendiğinde (Şekil 4.5), hasar mekanizmalarının başladığı yerlerdeki kumaş örgü mekanizmalarındaki twill 2/2 örgü sistemi gibi elyaf ipliklerinin kopma bölgesinde çapraz kopma özelliği gösterdiği görülmüştür. Kırılma mekaniği kopma yönünden numunelerin alt ve üst uçlarına doğru ilerlemiş ve tabakalar arası delaminasyona sebep olduktan sonra kopma işlemi gerçekleşmiştir. Kırılma mekaniği incelendiğinde yapıya CNT takviyesi yapıldığında ise tabakalar arasındaki bulunan CNT, elyaf-matris arasındaki tutunma kuvvetini geliştirmiştir. Fakat CNT katkısı yapıyı gevrek bir karaktere sokarak mekanik performansı azaltmıştır. Makrograflar incelendiğinde ise CNT katkısı yapının numunelerinde hasar numuneden delaminasyon yaparak uzaklaşmamış, yapı daha gevrek bir yapıya sahip olarak hasara uğrama eğilimi göstermiştir. Bu durum uzama ve dayanımda azalma ile görülmüştür.

Birbiri içerisinde farklı mekanik karakterlere sahip cam, karbon ve kevlar elyaf kumaşları içeren hibrit kompozit plakadan elde edilen numuneler için hasar yapıdaki cam ve karbon elyaf tabakaları için kevlara göre daha gevrek bir karakteristikte olmuştur (Şekil 4.6). Kevlarda ise kopma hasar saf kevlara sahip kompozit numunelerde olduğu çapraz kopmamış, cam ve karbon elyaflarda olduğu gibi çekme yönüne dik bir şekilde kopma gerçekleşmiştir. Çekme deneyi sonrası hasarlı numuneler incelendiklerinde yapılar elastik şekil değiştirdikten sonra kopmuştur. Farklı elyaflar farklı elastik şekil değiştirme performans özellikler gösterdikleri için çekme gerilmesi sırasında cam, karbon ve kevlar elyaf kumaş tabaları arasında Mod II ile delaminasyon meydana gelmiştir ve kırılma Mod I ile gerçekleşmiştir. CNT katkısı yapılan hibrit kompozit yapıda ise delaminasyon davranışının daha da fazla olduğu, delaminasyonun çekme test cihazı çenelerine kadar ilerlediği görülmüştür. CNT katkısı farklı elyaflar arasındaki polimer matrisin yapıyı bir arada tutmasını engellemiş ve yapının uzama davranışında bir artış gösterirken dayanım özelliklerinin azalmasına sebep olmuştur.



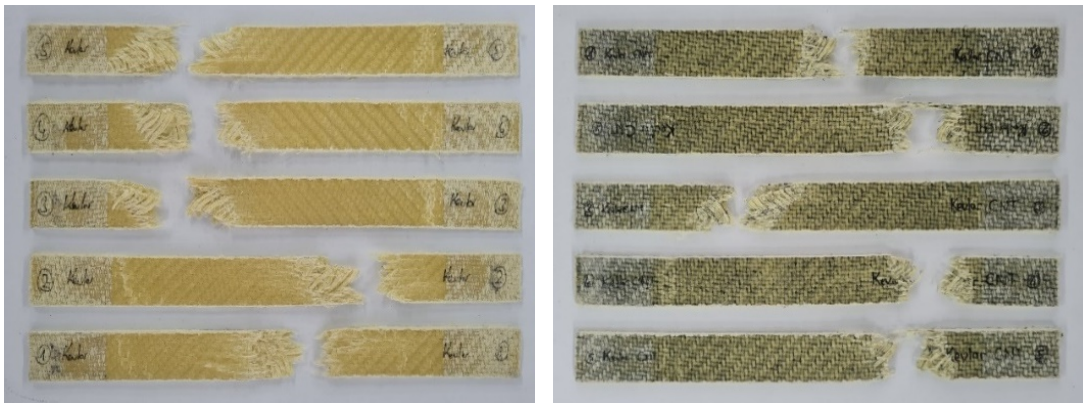
Cam Elyaf Cam Elyaf (CNT %0,5)

Şekil 4.3 : Çekme deneyi sonrasında CNT katkılı ve CNT katkısız cam elyaf takviyeli matris kompozit numuneleri için makrograflar.



Karbon Elyaf Karbon Elyaf (CNT %0,5)

Şekil 4.4 : Çekme deneyi sonrasında CNT katkılı ve CNT katkısız karbon elyaf takviyeli matris kompozit numuneleri için makrograflar.



Kevlar Elyaf Kevlar Elyaf (CNT %0,5)

Şekil 4.5 : Çekme deneyi sonrasında CNT katkılı ve CNT katkısız kevlar elyaf takviyeli matris kompozit numuneleri için makrograflar.



Hibrit Hibrit (CNT %0,5)

Şekil 4.6 : Çekme deneyi sonrasında CNT katkılı ve CNT katkısız hibrit elyaf takviyeli matris kompozit numuneleri için makrograflar.

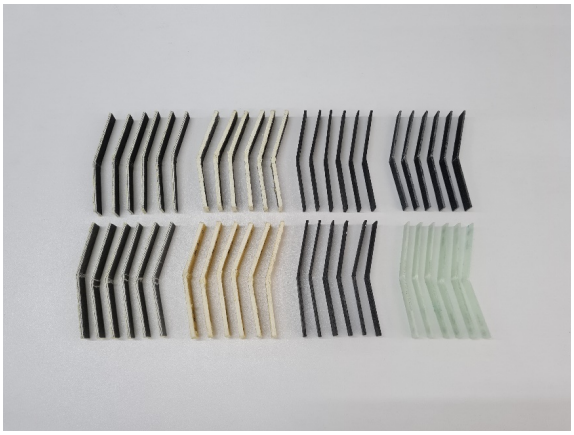
4.2 Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

Çalışmalar kapsamında 300 g/m^2 alansal yoğunluğa sahip cam elyaf, 245 g/m^2 alansal yoğunluğa sahip karbon elyaf, 300 g/m^2 alansal yoğunluğa sahip kevlar elyaf ve 281 g/m^2 alansal yoğunluğa sahip hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozitlere yapılan CNT katkısının üç nokta eğme deneyi performansına etkisinin analizi yapılmıştır (Şekil 4.7). Eğme dayanımları incelendiğinde kevlar elyafta 214 MPa'dan 246 MPa'ya %15'lik artış, hibrit yapılı elyafta 383 MPa'dan 372 MPa'ya %2,9'luk azalma, karbon elyafta 657 MPa'dan 635 MPa'ya %3,4'lük azalma ve cam elyafta ise 464 MPa'dan 439 MPa'ya %5,5'lik azalma gerçekleşmiştir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde Rathore ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, kütlece %0,5 CNT katkısı yapılmış kompozit yapıda eğme yükü altında yaklaşık 300 MPa'dan 360 MPa'ya %20'lik bir artış olduğu gözlemlenmiştir [79]. Kim ve arkadaşlarının karbon elyaf takviyeli kompozit yapıya reçine içerisinden kütlece %0,3 CNT katkılayarak yaptıkları çalışmada eğme dayanımında CNT katkısının yaklaşık 630 MPa'dan 740 MPa'ya %17 performans artışı sağladığı tespit edilmiştir [80]. Taraghi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada kütlece %0,5 CNT'nin 175 g/m^2'lik alansal yoğunluğa sahip kevlar elyaf takviyeli yapıya katılması ile eğme gerilmesi altında yaklaşık 190 MPa'dan 240 MPa'ya %27 artış olduğu gözlemlenmiştir [81].

Test verileri incelendiğinde, eğme dayanımı için sırasıyla en yüksek eğme dayanımı karbon elyafta, devamında cam elyafta, hibrit yapıda ve en düşük eğme dayanımının ise kevlar elyafta olduğu görülmüştür (Çizelge 4.3). CNT katkısının kevlar elyaf takviyeli kompozit yapılarda performansa olumlu etki yaparak eğme dayanımını

arttırdığı, cam ve karbon elyaf takviyeli ve hibrit elyaf takviyeli yapılarda ise kompozit yapının performansını olumsuz etkileyerek eğme dayanımını azalttığı görülmüştür.



Şekil 4.7 : Çalışmada üç nokta eğme deneyleri uygulanmış numuneler.

Uygulanan üç nokta eğme deneyi için maksimum eğme kuvveti değeri karbon elyafta, devamında kevlar elyafta ve hibrit yapıda ve en düşük değerin ise cam elyafta olduğu görülmüştür. CNT katkısının karbon, cam ve kevlar elyaf takviyeli kompozit yapılarda performansa olumlu etki yaparak maksimum eğme kuvvetini arttırdığı, hibrit elyaf takviyeli yapılarda ise kompozit yapının performansını olumsuz etkileyerek azalttığı görülmüştür (Çizelge 4.4). CNT katkısı yapılmamış Kevlar elyaf takviyeli polimer kompozit numuneleri üzerine uygulanan maksimum eğme kuvveti CNT katkısı yapılmamış hibrit yapının sahip olduğu maksimum eğme kuvvetinden düşük olduğu fakat hem kevlar takviyeli hem de hibrit elyaf takviyeli kompozit plakalara CNT katkısı yapıldığında kevlar elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitin hibrit elyaf yapı ile takviye edilmiş kompozite göre daha yüksek maksimum eğme kuvvetine sahip olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.3 : Çalışmada numuneler üzerinde gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyleri için eğme dayanımı (MPa) verileri.

Kompozit Tipi	Kütlece CNT miktarı (%)	Numune Sayısı	Minimum Dayanım (MPa)	Maksimum Dayanım (MPa)	Ortalama Dayanım (MPa)	Standart Sapma
Cam	0	5	447,57	486,75	464,63	16,53
Cam	5	5	430,40	448,15	439,24	8,03
Karbon	0	5	563,07	712,67	657,53	56,25
Karbon	5	5	614,84	651,87	635,40	16,09
Kevlar	0	5	205,11	231,33	214,09	11,38
Kevlar	5	5	232,30	254,74	246,68	9,25
Hibrit	0	5	352,04	426,02	383,58	30,09
Hibrit	5	5	348,51	389,90	372,60	17,50

Çizelge 4.4 : Çalışmada numuneler üzerinde gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyleri için maksimum eğme kuvveti (N) verileri.

Kompozit Tipi	Kütlece CNT miktarı (%)	Numune Sayısı	Minimum Kuvvet (N)	Maksimum Kuvvet (N)	Ortalama Kuvvet (N)	Standart Sapma
Cam	0	5	193,95	210,92	201,34	7,16
Cam	5	5	223,63	232,85	228,22	4,17
Karbon	0	5	356,11	452,15	416,94	36,16
Karbon	5	5	464,21	492,19	479,75	12,14
Kevlar	0	5	281,61	317,61	293,94	15,61
Kevlar	5	5	335,28	367,67	356,02	13,34
Hibrit	0	5	288,41	349,02	314,25	24,65
Hibrit	5	5	285,52	319,43	305,26	14,33

Uygulanan üç nokta eğme deneyindeki maksimum eğme kuvveti altındaki uzama değerleri incelendiğinde en yüksek uzamanın cam elyafta, devamında hibrit yapıda ve karbon elyafta ve en düşük değerin ise kevlar elyafta olduğu görülmüştür. CNT katkısının kevlar elyaf takviyeli kompozit yapılarda performansa olumlu etki yaparak maksimum eğme kuvvetini arttırdığı, hibrit yapı, cam ve karbon elyaf takviyelerinde ise kompozit yapının performansını olumsuz etkileyerek uzamayı azalttığı görülmüştür (Çizelge 4.5). Cam elyaf üzerine uygulanan eğme kuvvetinin cam elyaf takviyeli kompozit yapıda hasara uğramadan sadece elastik şekil değiştirerek yükselmesi maksimum eğme kuvveti için cam elyaf takviyesinin diğer elyaf takviye malzemeleri ile karşılaştırıldığında en yüksek uzamaya sahip olmasını sağlamıştır.

Çizelge 4.5 : Çalışmada numuneler üzerinde gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyleri için maksimum eğme kuvvet altındaki eğme uzaması (mm) verileri.

Kompozit Tipi	Kütlece CNT miktarı (%)	Numune Sayısı	Minimum Uzama (mm)	Maksimum Uzama (mm)	Ortalama Uzama (mm)	Standart Sapma
Cam	0	5	14,40	17,55	15,27	1,37
Cam	5	5	13,90	14,86	14,35	0,36
Karbon	0	5	5,73	7,1	6,46	0,51
Karbon	5	5	5,97	6,74	6,21	0,32
Kevlar	0	5	4,24	6,94	5,39	1,02
Kevlar	5	5	5,71	6,75	6,32	0,39
Hibrit	0	5	5,56	9,38	6,53	1,60
Hibrit	5	5	5,37	5,86	5,55	0,20

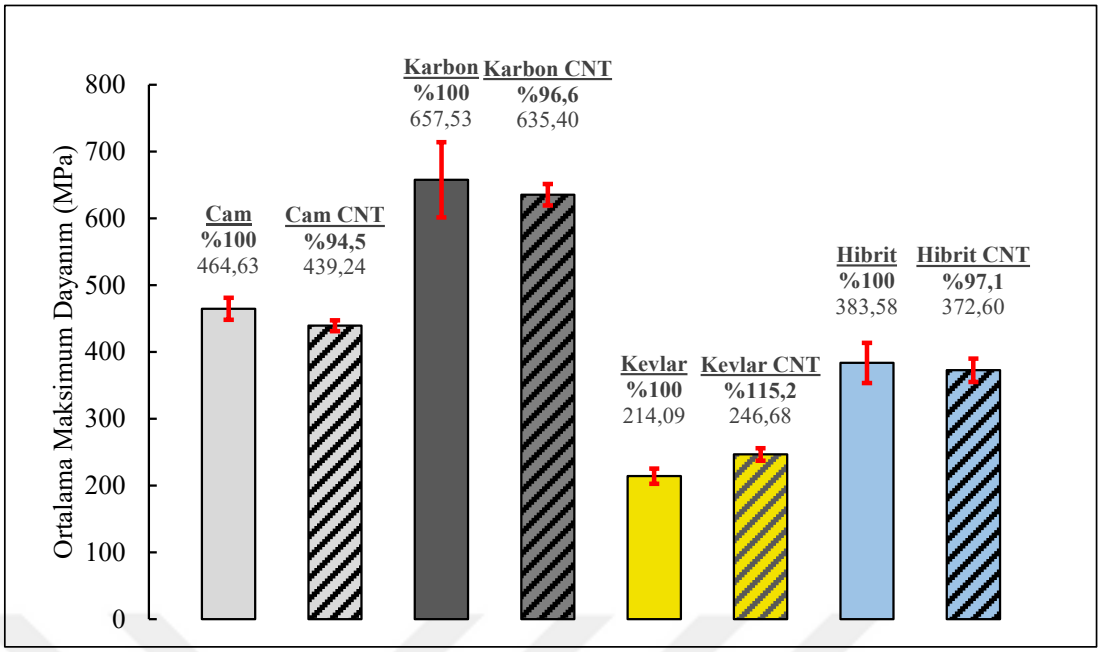
Uygulanan üç nokta eğme deneyindeki kopma uzama değerleri incelendiğinde en yüksek uzamanın cam elyafta, devamında hibrit yapıda ve kevlar elyafta ve en düşük değerin ise karbon elyafta olduğu görülmüştür. CNT katkısının hibrit yapılı elyaf

takviyeli kompozit yapıda performansa olumlu etki yaparak kopma uzamasını arttırdığı, cam, karbon ve kevlar elyaf takviyelerinde ise kompozit yapının performansını olumsuz etkileyerek kopma uzamasını azalttığı görülmüştür (Çizelge 4.6). Üç nokta eğme deney cihazının eğme probunda numuneleri 20 mm eğme hareketi uyguladığı yere kadar üç nokta eğme deneyleri uygulanmıştır. Kevlar elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit plakalardan elde edilen numunelere uygulanan üç nokta eğme deneyinde ise kevlar numuneler maksimum eğme dayanımı ve maksimum eğme kuvvetinden sonra yapı hasara uğramış ve matris kırılmıştır. Fakat yapıdaki kevlar elyaf lifleri eğme hareketi altında kırılmamış, eğme kuvveti çok azalsa bile 20 mm eğme hareketi sonrasına kadar eğme kuvveti altında performans göstermeye devam etmiştir. Kevlar elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeleri için eğme kuvveti altında 20 mm eğme hareketine kadar en düşük kuvvet değerlerinin uçurum yaptığı yerler kopma uzaması olarak kabul edilerek veri elde edilmiştir.

Çizelge 4.6 : Çalışmada numuneler üzerinde gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyleri için numunelerin yük altındaki kopma uzaması (mm) verileri.

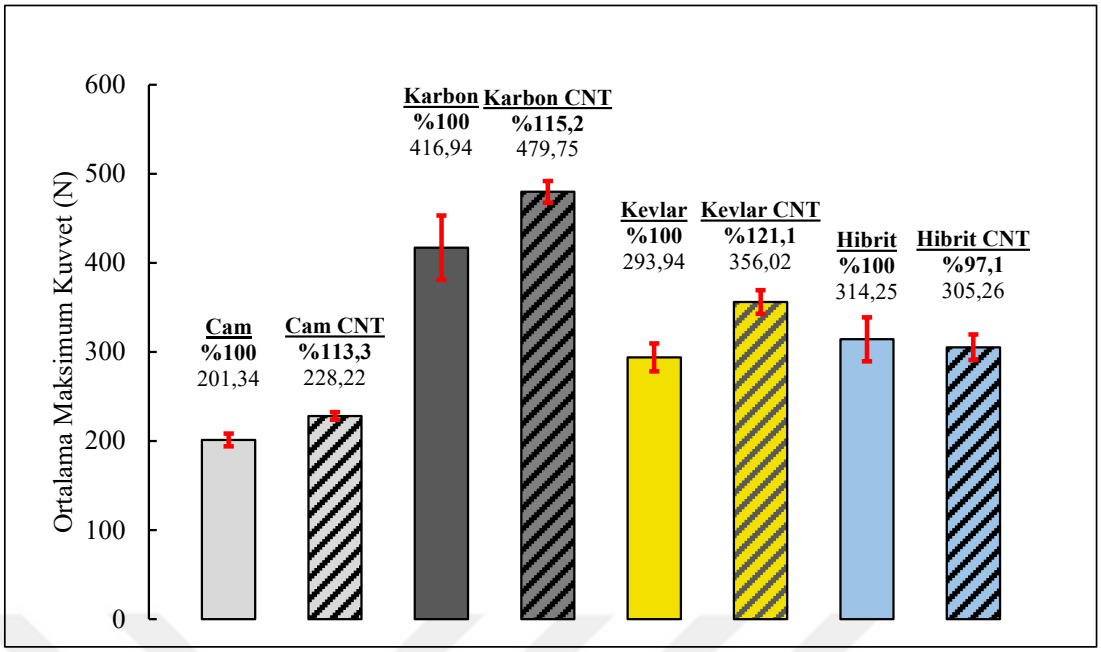
Kompozit Tipi	Kütlece CNT miktarı (%)	Numune Sayısı	Minimum Uzama (mm)	Maksimum Uzama (mm)	Ortalama Uzama (mm)	Standart Sapma
Cam	0	5	15,49	17,87	16,86	1,03
Cam	5	5	14,53	15,61	15,07	0,36
Karbon	0	5	7,13	7,52	7,31	0,15
Karbon	5	5	6,10	6,77	6,46	0,30
Kevlar	0	5	11,57	15,59	14,03	1,68
Kevlar	5	5	11,63	16,19	13,49	1,96
Hibrit	0	5	16,10	17,68	16,73	0,71
Hibrit	5	5	15,92	18,97	17,22	1,13

Üç nokta eğme deneyi verileri incelendiğinde (Şekil 4.8) ortalama eğme dayanımı (MPa) için en yüksek performans karbon elyafta, sonra sırasıyla cam elyaf ve hibrit yapılı elyafta, en düşük ise kevlar elyafta görülmüştür. CNT katkısı yapıldığında ise kevlar elyaf takviyeli yapının dayanımında ortalama %15,2'lik bir artma gözlemlenmiştir. Kevlar elyaf takviyenin aksine, CNT katkısı cam ve karbon elyaf ile hibrit yapılı elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitlerin dayanımlarında azalmaya sebep olmuştur. Hibrit Elyaf için bu azalma %2,9, karbon elyaf için %3,4 ve cam elyaf için ise bu azalma %5,5 kadardır.



Şekil 4.8 : Cam, karbon, Kevlar ve hibrit elyaf takviyeli ve CNT katkılı veya katkısız toplam sekiz polimer matris kompozit plaka için ortalama maksimum eğme dayanımı (MPa) ve standart sapma (kırmızı).

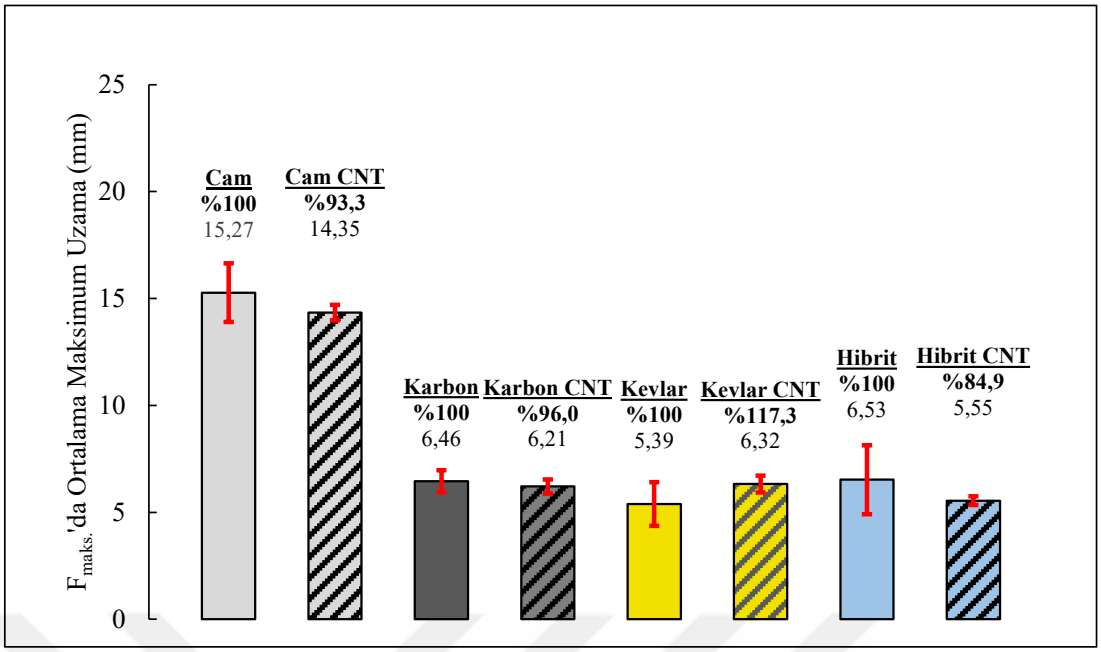
Üç nokta eğme deneyi verileri incelendiğinde (Şekil 4.9) ortalama maksimum eğme kuvveti (N) için en yüksek performans karbon elyafta, sonra sırasıyla hibrit yapılı elyaf ve kevlar elyafta, en düşük ise cam elyafta görülmüştür. CNT katkısı yapıldığında ise cam, karbon ve kevlar elyaf takviyeli yapılarda maksimum eğme kuvveti performanslarında artış olmuştur. Kevlar elyaf takviyeli yapının dayanımında ortalama %21,1'lik, karbon elyaf takviyeli yapının dayanımında ortalama %15,2'lik ve cam elyaf takviyeli yapının dayanımında ise ortalama %13,3'lük bir eğme kuvveti için performans artışı gözlemlenmiştir. Kevlar, karbon ve cam elyaf takviyelerin aksine, CNT katkısı hibrit yapılı elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitin eğme kuvveti performansında azalmaya sebep olmuştur. Bu azalma hibrit elyaf için %2,9 kadardır. CNT katkısı yapılmamış kevlar elyaf takviyeli ve hibrit yapı elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerde kevlar elyaf takviyesi hibrit yapı elyaf takviyelerinden daha düşük kuvvet performansı göstermiştir. Fakat her iki yapıya da CNT katkısı kevlar elyaf takviyeli yapıda olduğu gibi hibrit yapı elyaf takviyeli kompozit yapıda eğme kuvveti performansında artışa sebep olmamıştır. CNT katkısı yapılmamış kevlar elyaf takviyeli yapı hibrit yapı elyaf takviyeli kompozit yapının eğme kuvvetinden daha düşük performans gösterirken CNT takviyesi kevlar elyaf takviyeli yapıyı hibrit yapı elyaflı kompozit yapıya göre daha yüksek bir eğme kuvveti performansına taşımıştır.



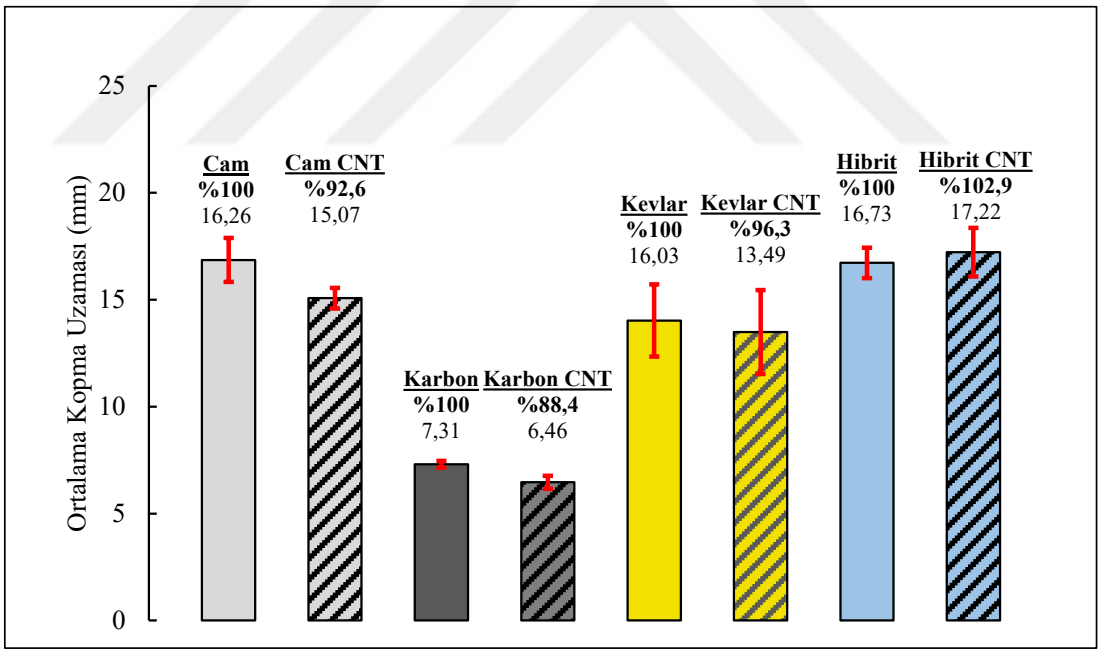
Şekil 4.9 : Cam, karbon, Kevlar ve hibrit elyaf takviyeli ve CNT katkılı veya katkısız toplam sekiz polimer matris kompozit plaka için ortalama maksimum eğme kuvveti (N) ve standart sapma (kırmızı).

Üç nokta eğme deneyi verileri incelendiğinde (Şekil 4.10) ortalama maksimum eğme kuvveti altında uzama (mm) için en yüksek performans cam elyafta, sonra sırasıyla hibrit yapılı elyaf ve karbon elyafta, en düşük ise kevlar elyafta görülmüştür. CNT katkısı yapıldığında ise kevlar elyaf takviyeli yapıda maksimum eğme kuvveti altında uzama performansında %17,3'lük artış olmuştur. Kevlar elyafın aksine cam, karbon elyaf ve hibrit elyaf takviyelerinde CNT katkısı kuvveti altındaki uzama performansında azalmaya sebep olmuştur. Bu azalma karbon elyaf takviyeli yapıda %4, cam elyaf takviyeli yapıda %6,7 ve hibrit yapı takviyeli kompozit yapıda %15,1'dir.

Üç nokta eğme deneyi verileri incelendiğinde (Şekil 4.11) ortalama maksimum eğme kuvveti altında uzama (mm) için en yüksek performans hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda, sonra sırasıyla cam elyaflı ve kevlar elyaflı, en düşük ise karbon elyaf takviyeli kompozit yapılarda görülmüştür. CNT katkısı yapıldığında ise hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda eğme kuvveti altındaki ortalama kopma uzama performansında %2,9'luk bir artış olmuştur. Hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapının aksine elyafın aksine cam, karbon ve kevlar elyaf takviyelerinde CNT katkısı eğme kuvveti altındaki kopma uzaması performansında azalmaya sebep olmuştur. Bu azalma kevlar elyaf takviyeli yapıda %3,7, cam elyaf takviyeli yapıda %7,4 ve karbon elyaf takviyeli kompozit yapıda %11,6'dır.



Şekil 4.10 : Cam, karbon, Kevlar ve hibrit elyaf takviyeli ve CNT katkılı veya katkısız toplam sekiz polimer matris kompozit plaka için ortalama maksimum eğme kuvveti altında uzaması (mm) ve standart sapma (kırmızı).



Şekil 4.11 : Cam, karbon, Kevlar ve hibrit elyaf takviyeli ve CNT katkılı veya katkısız toplam sekiz polimer matris kompozit plaka için eğme kuvveti altında ortalama kopma uzaması (mm) ve standart sapma (kırmızı).

4.3 Düşen Ağırlık Darbe Deneyi Sonuçları

Çalışmalar kapsamında 300 g/m^2 alansal yoğunluğa sahip cam elyaf, 245 g/m^2 alansal yoğunluğa sahip karbon elyaf, 300 g/m^2 alansal yoğunluğa sahip kevlar elyaf ve 281 g/m^2 alansal yoğunluğa sahip hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozitlere yapılan CNT katkısının 50 Joule darbe enerjisinin uygulandığı düşen ağırlık darbe deneyi performansına etkisinin analizi yapılmıştır. Sönümlenen enerji verileri incelendiğinde karbon elyafta 14,4 Joule'den 31,7 Joule'e %120,7'lik bir artış, cam elyafta 13 Joule'den 14,5 Joule'e %10'luk artış, hibrit yapılı elyafta 24 Joule'den 23,3 Joule'e %5'lik azalma görülmüştür. Düşen ağırlık darbe deneyi için enerji sönümlemede delme tertibatının uyguladığı 50 Joule'lük darbe enerjisi kompozit plakaları delmeye yetmemesinden dolayı CNT katkısının performansa etkisi analiz edilememiştir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde Rubio-Gonzalez ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada %0,75 CNT cam elyaf kompozit yapıya katkılanmıştır ve düşen ağırlık darbe deneyi uygulanmıştır. Darbe tertibatının uyguladığı darbe enerjisini sönümlemede CNT katkısı cam elyaf takviyeli kompozit yapıda yaklaşık 13 Joule'den 14,5 Joule'e yaklaşık %10'luk bir performans artışı sağlamıştır [82]. Kostopoulos ve arkadaşları yaptıkları çalışma ile kütlece %0,5 CNT katkısı yapılmış karbon elyaf takviyeli kompozit yapıya uygulanan düşen ağırlık darbe deneyindeki sönümlenen enerji verilerinde sönümlenen enerji performansının yaklaşık 21 Joule'den 22 Joule'e %5 artış gözlemlemişlerdir [83]. Taraghi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada kütlece %0,5 CNT'nin 175 g/m^2'lik alansal yoğunluğa sahip kevlar elyaf takviyeli yapıya katılması ile CNT katkısı düşen ağırlık darbe deneyi çalışmalarında sönümlenen darbe enerjisini yaklaşık 30 Joule'den 45 Joule'e %30 arttırmıştır [84].

50 Joule darbe enerjisi altında gerçekleştirilen düşen ağırlık darbe deneyi için deney sonrası verileri incelendiğinde cam, karbon ve hibrit yapı elyaflı takviyeli kompozitlerde darbe enerjisinin tamamının 50 Joule'e kadar sönümlendiği görülmüştür. Kevlar takviyeli kompozit malzemede ise darbe enerjisi yapıyı delmeye yetmemesi dolayısıyla çalışmada düşen ağırlık darbe deneyi için her ne kadar ölçülemese de en yüksek darbe enerjisi sönümleyen kompozit malzeme tüm elyaf takviyeler ile karşılaştırıldığında her iki kevlar takviyeli polimer matrisli kompozit malzeme veolmuştur. 50 Joule üstü bir darbe enerjisi sönümleme kapasitesi olan kevlar matrisli kompozit yapı için CNT katkısının kevlar elyaf takviyeli kompozit yapıya

etkisi de bu sebepten dolayı belirlenememiştir. Lakin, CNT katkısı kevlar elyaf takviyenin kompozit yapıdaki darbe enerjisi sönümlemesini 50 Joule'den aşağıya çekmediği de bilinmelidir. Deneysel sonuçlar bölümünün bu aşamasında kevlar elyaf takviyeli kompozit plakalar için her ne kadar darbe deneyleri sağlıklı sonuçlandırılamamışsa da çizelge ve tablolarda elde edilmiş kevlar takviyeli kompozit verileri de incelemeye katılmıştır ama cam, karbon ve hibrit yapılı kompozit yapılar gibi değerlendirilmemiştir.

Uygulanan düşen ağırlık darbe deneyinde 50 Joule darbe enerjisi altında cam, karbon ve hibrit yapı elyaflı takviyeli kompozitlerde delinme gerçekleşmiştir. Kevlar elyaf takviyeli kompozit yapı darbe tertibatı ile delinmediği için 50 Joule'e kadar darbe enerji verisi elde edilmiştir. Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozitlerin verileri incelendiğinde (Çizelge 4.7) darbe enerjisi için en yüksek performans kevlar elyaf takviyede, sonrasında hibrit yapılı elyaf takviye ve cam elyaf takviyede, en düşük darbe enerjisi performansı ise karbon elyaf takviyede görülmüştür. CNT katkısı yapıldığında karbon elyaf takviyeli kompozitlerde darbe enerjisi performansında iki kattan fazla bir artış tespit edilmiştir. Cam elyaf takviyeli ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapılarda ise CNT katkısının performansa katkısı minimaldir. Cam elyaf takviyeli yapıda darbe enerjisi performansı artarken hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda performans azalmıştır.

Çizelge 4.7 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için darbe enerjisi (J) verileri.

Kompozit Tipi	Kütlece CNT miktarı (%)	Numune Sayısı	Minimum Enerji (J)	Maksimum Enerji (J)	Ortalama Enerji (J)	Standart Sapma
Cam	0	2	22,05	22,14	22,10	0,06
Cam	5	2	24,40	24,87	24,64	0,33
Karbon	0	2	13,04	15,75	14,40	1,92
Karbon	5	2	29,79	33,74	31,77	2,79
Kevlar	0	2	50,96	52,24	51,60	0,91
Kevlar	5	2	50,50	51,42	50,96	0,65
Hibrit	0	2	22,98	25,18	24,08	1,56
Hibrit	5	2	22,99	23,65	23,32	0,47

50 Joule darbe enerjisi altında darbe enerjisinin maksimum sönümlendiği zaman için test verileri incelendiğinde (Çizelge 4.8) cam, karbon ve hibrit yapı elyaflı takviyeli kompozitler incelendiğinde en yüksek zamanın hibrit yapılı kompozit malzemede harcandığı, sonra cam elyaf takviye ve en düşük zamanın da karbon elyaf takviyeli

kompozitte harcandığı görülmüştür. CNT katkısı ile karbon ve cam elyaf takviyelerin harcanan zamanda artış sağlanmıştır. Hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozitte ise harcanan zamanda azalma görülmüştür.

Çizelge 4.8 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için maksimum darbe enerjisinin sönümlendiği zaman (ms) verileri.

Kompozit Tipi	Kütlece CNT miktarı (%)	Numune Sayısı	Minimum Zaman (ms)	Maksimum Zaman (ms)	Ortalama Zaman (ms)	Standart Sapma
Cam	0	2	4,33	4,50	4,42	0,12
Cam	5	2	4,80	4,82	4,81	0,01
Karbon	0	2	3,30	3,98	3,98	0,34
Karbon	5	2	6,12	6,82	6,47	0,49
Kevlar	0	2	7,39	8,08	7,74	0,49
Kevlar	5	2	7,49	7,81	7,65	0,23
Hibrit	0	2	4,41	4,57	4,49	0,11
Hibrit	5	2	4,17	4,47	4,32	0,21

50 Joule darbe enerjisi altında darbe enerjisinin maksimum sönümlendiği sapma/yer değiştirme için test verileri incelendiğinde (Çizelge 4.9) cam, karbon ve hibrit yapı elyaflı takviyeli kompozitlerde darbe enerjisinin tamamının 50 Joule'e kadar sönümlendiği görülmüştür. Cam, karbon ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozitler incelendiğinde en yüksek yer değiştirmenin hibrit yapılı kompozit malzemede olduğu, sonra cam elyaf takviye ve en düşük yer değiştirmenin de karbon elyaf takviyeli kompozitte olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.9 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için maksimum darbe enerjisinin sönümlendiği sapma/yer değiştirme (mm) verileri.

Kompozit Tipi	Kütlece CNT miktarı (%)	Numune Sayısı	Minimum Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)	Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Standart Sapma
Cam	0	2	12,51	12,98	12,75	0,33
Cam	5	2	13,56	13,59	13,58	0,02
Karbon	0	2	10,35	12,19	11,27	1,30
Karbon	5	2	16,88	18,22	17,55	0,95
Kevlar	0	2	12,70	12,97	12,84	0,19
Kevlar	5	2	13,69	13,84	13,77	0,11
Hibrit	0	2	12,67	12,90	12,79	0,16
Hibrit	5	2	11,97	12,82	12,40	0,60

CNT katkısı ile karbon ve cam elyaf takviyelerin yer değiştirmede artış sağlanmıştır. Hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozitte ise yer değiştirmede azalma görülmüştür. Kevlar takviyeli kompozit malzemede ise darbe tertibatı yapıyı delemeyerek yapı üzerinde sekmiş yer çekimine karşı serbest hareketinin sonucunda numune üzerinde darbe tertibatı tüm enerjisi aktarmıştır. Fakat uygulanan darbe enerjisi kevlar elyaf takviyeli kompozit yapıyı delmeye yetmediğinden dolayı sapma/yer değiştirme için veriler sağlıklı değildir ve bu yüzden dolayı yer değiştirme kevlar elyaf takviyeli kompozit için belirlenememiştir.

Uygulanan düşen ağırlık darbe deneyinde 50 Joule darbe enerjisi altında cam, karbon ve hibrit yapı elyaflı takviyeli kompozitlerde delinme gerçekleşmiştir. Kevlar elyaf takviyeli kompozit yapı darbe tertibatı ile delinmediği için 50 Joule'e kadar darbe enerji verisi elde edilmiştir. Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozitler verileri incelendiğinde (Çizelge 4.10) temas kuvveti için en yüksek performans kevlar elyaf takviyede, sonrasında hibrit yapılı elyaf takviye ve cam elyaf takviyede, en düşük temas kuvveti performansı ise karbon elyaf takviyede görülmüştür. CNT katkısı yapıldığında karbon elyaf takviyeli kompozitlerde darbe enerjisi performansında iki kattan fazla bir arttırırken temas kuvveti performansında gözle görünür bir değişim olmamış aksine temas kuvvetinde azalma görülmüştür. Cam elyaf takviyeli ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapılarda ise CNT katkısının temas kuvveti performansında artış olmuştur.

Çizelge 4.10 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için temas kuvveti (N) verileri.

Kompozit Tipi	Kütlece CNT miktarı (%)	Numune Sayısı	Minimum Kuvvet (N)	Maksimum Kuvvet (N)	Ortalama Kuvvet (N)	Standart Sapma
Cam	0	2	4371.29	4856.35	4613.82	342.99
Cam	5	2	4879.45	5081.56	4980.51	142.91
Karbon	0	2	3037.38	3158.65	3098.02	85.75
Karbon	5	2	2939.22	2956.54	2947.88	12.25
Kevlar	0	2	7633.89	8228.66	7931.28	420.57
Kevlar	5	2	7039.11	7189.25	7114.18	106.17
Hibrit	0	2	4850.58	5318.31	5084.45	330.74
Hibrit	5	2	5266.34	5872.66	5569.50	428.73

50 Joule darbe enerjisi altında gerçekleştirilen düşen ağırlık darbe deneyi için temas kuvveti altındaki zaman için test verileri incelendiğinde (Çizelge 4.11) cam, karbon ve hibrit yapı elyaflı takviyeli kompozitlerde darbe enerjisinin tamamının 50 Joule'e

kadar sönümlendiği görülmüştür. Kevlar takviyeli kompozit malzemede ise darbe enerjisi yapıyı delmeye yetmemesinden dolayı temas kuvveti için harcanan zaman belirlenememiştir. Cam, karbon ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozitler incelendiğinde en yüksek zamanın cam elyaf takviyeli kompozit malzemede harcandığı, sonra hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozitte ve en düşük zamanın da karbon elyaf takviyeli kompozitte harcandığı görülmüştür. CNT katkısı ile karbon ve cam elyaf takviyelerin harcanan zamanında azalma görülmüşken hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozitte ise harcanan zamanda artma görülmüştür.

50 Joule darbe enerjisi altında temas kuvveti altındaki sapma/yer değiştirme için test verileri incelendiğinde (Çizelge 4.12) cam, karbon ve hibrit yapı elyaflı takviyeli kompozitlerde darbe enerjisinin tamamının 50 Joule'e kadar sönümlendiği görülmüştür. Kevlar takviyeli kompozit malzemede ise darbe tertibatı yapıyı delemeyerek yapı üzerinde sekmiş yer çekimine karşı serbest hareketinin sonucunda numune üzerinde darbe tertibatı tüm enerjisi aktarmıştır. Fakat uygulanan darbe enerjisi kevlar elyaf takviyeli kompozit yapıyı delmeye yetmediğinden dolayı temas kuvveti altında sapma/yer değiştirme için veriler sağlıklı değildir ve bundan dolayı yer değiştirme kevlar elyaf takviyeli kompozit için belirlenememiştir. Cam, karbon ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozitler incelendiğinde en yüksek yer değiştirmenin cam elyaf kompozit malzemede olduğu, sonra hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemede ve en düşük yer değiştirmenin de karbon elyaf takviyeli kompozitte olduğu görülmüştür. CNT katkısı ile karbon elyaf ve hibrit yapılı elyaf katkılı kompozit malzemelerin yer değiştirmede artış sağlanırken cam elyaf takviyeli kompozitte ise yer değiştirmede azalma görülmüştür.

Çizelge 4.11 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için temas kuvveti altındaki zaman (ms) verileri.

Kompozit Tipi	Kütlece CNT miktarı (%)	Numune Sayısı	Minimum Zaman (ms)	Maksimum Zaman (ms)	Ortalama Zaman (ms)	Standart Sapma
Cam	0	2	1,11	1,43	1,27	0,23
Cam	5	2	1,10	1,19	1,15	0,06
Karbon	0	2	0,69	0,78	0,74	0,06
Karbon	5	2	0,44	0,83	0,64	0,28
Kevlar	0	2	1,82	2,08	1,95	0,18
Kevlar	5	2	1,77	1,99	1,88	0,16
Hibrit	0	2	1,08	1,17	1,13	0,06
Hibrit	5	2	1,18	1,60	1,39	0,30

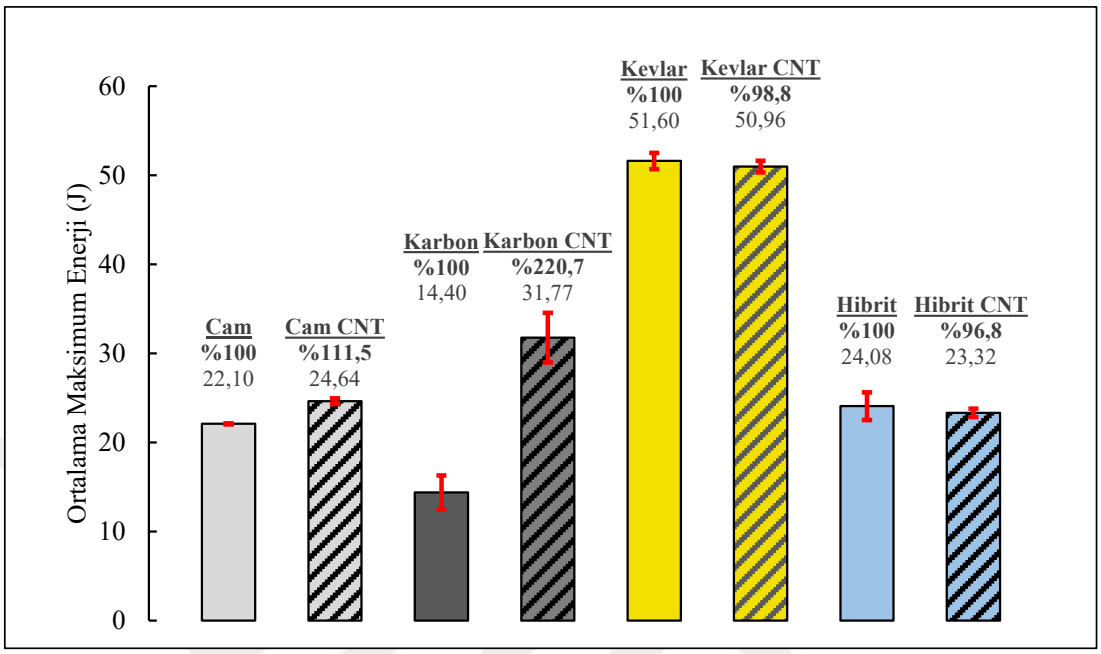
Çizelge 4.12 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için temas kuvveti altında sapma/yer değiştirme (mm) verileri.

Kompozit Tipi	Kütlece CNT miktarı (%)	Numune Sayısı	Minimum Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)	Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Standart Sapma
Cam	0	2	3,67	4,62	5,15	0,47
Cam	5	2	3,61	3,89	3,75	0,20
Karbon	0	2	2,32	2,42	2,37	0,07
Karbon	5	2	2,78	3,14	2,96	0,25
Kevlar	0	2	5,72	6,28	6,00	0,40
Kevlar	5	2	5,58	6,19	5,89	0,43
Hibrit	0	2	3,57	3,85	3,71	0,20
Hibrit	5	2	3,88	5,14	4,51	0,89

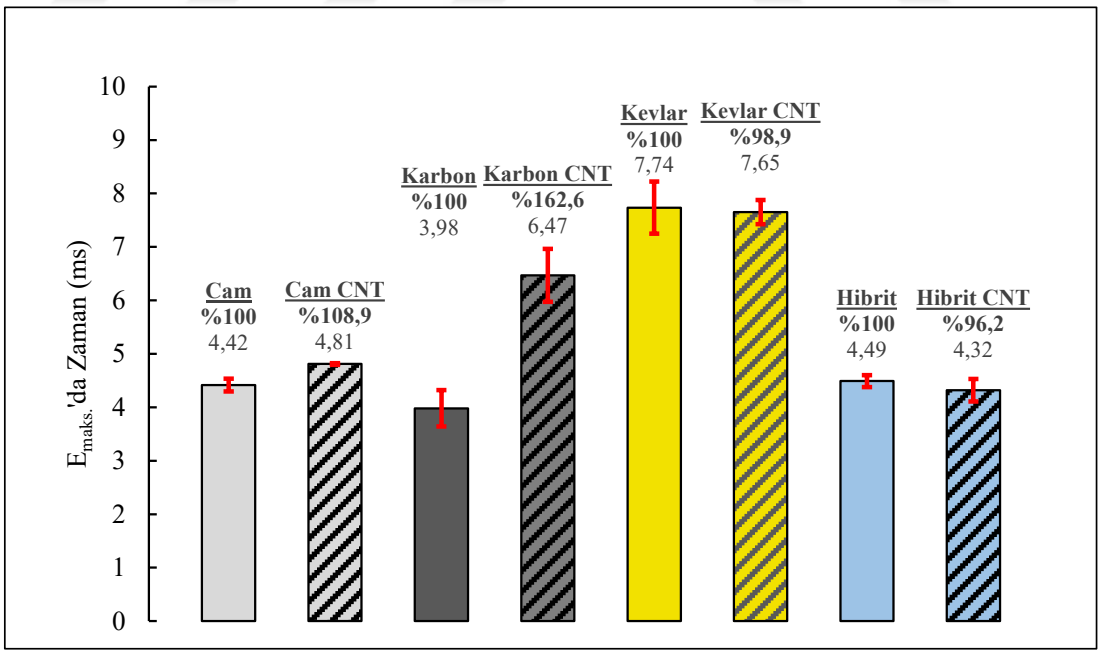
Düşen ağırlık darbe deneyi için darbe enerjisi (J) verileri incelendiğinde (Şekil 4.12) en yüksek darbe enerjisi hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda, sonra cam elyaf takviyeli yapıda ve en düşük karbon elyaf takviyeli yapıda olduğu gözlemlenmiştir. CNT katkısı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozit yapılarda darbe enerjisi performansında artış gösterirken hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapının performansında azalma görülmüştür. Karbon elyaf takviyeli kompozit yapıya CNT katkısı, CNT katkısı yapılmamış ve en düşük darbe enerjisi performansına sahip karbon elyaflı kompozitin hibrit yapılı elyaf ve cam elyaf takviyeli kompozit plakaların performansının önüne karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitin geçmesini sağlamıştır. Karbon elyaf takviyeli yapıda %120,7 ve cam elyafta %11,5 performans artışı görülürken hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda performansta %3,2'lik bir azalma görülmüştür.

Düşen ağırlık darbe deneyi için darbe enerjisinin (J) maksimum sönümlendiği zaman verileri incelendiğinde (Şekil 4.13) en fazla zamanın hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda, sonra cam elyaf takviyeli yapıda ve en düşük karbon elyaf takviyeli yapıda olduğu gözlemlenmiştir. CNT katkısı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozit yapılarda darbe enerjisinin sönümlendiği zamanda artış sağlarken hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda azalmaya sebep olduğu görülmüştür. Karbon elyaf takviyeli kompozit yapıya CNT katkısı, CNT katkısı yapılmamış ve en düşük darbe enerjisi performansına sahip karbon elyaflı kompozitin hibrit yapılı elyaf ve cam elyaf takviyeli kompozit plakaların zamanının önüne karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitin geçmesini sağlamıştır. Karbon elyaf takviyeli yapıda %62,6 ve cam elyafta %8,9 zaman artışı görülürken hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda

performansta %3,8'lik bir azalma görülmüştür. Darbe tertibatı kevlar elyaf takviyeli kompozitler ile temas ettikten sonra yapıyı delemediği için deney sonucu elde edilen veriler sağlıklı sonuçlar vermedikleri için kevlar elyaf verileri dikkate alınmamıştır.



Şekil 4.12 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için darbe enerjisi (J) ve standart sapma (kırmızı).



Şekil 4.13 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için maksimum darbe enerjisinin sönümlendiği zaman (ms) ve standart sapma (kırmızı) verileri.

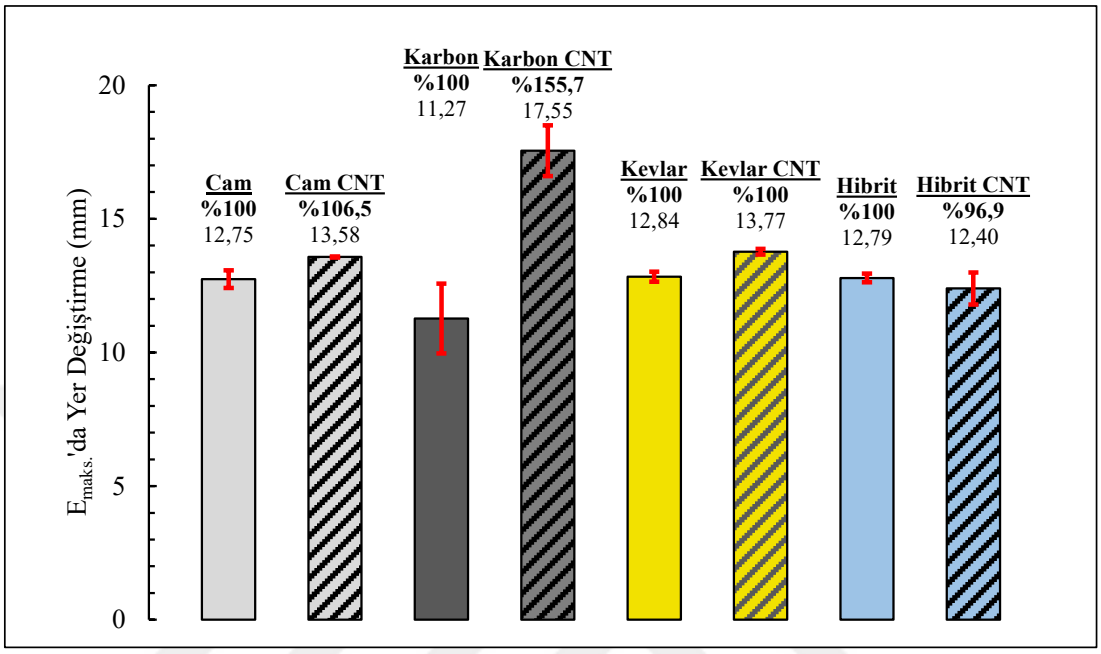
Düşen ağırlık darbe deneyi için darbe enerjisinin maksimum sönümlendiği sapma/yer değiştirme (mm) için test verileri incelendiğinde (Şekil 4.14) en fazla yer değiştirmenin hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda, sonra cam elyaf takviyeli yapıda ve en düşük karbon elyaf takviyeli yapıda olduğu gözlemlenmiştir. CNT katkısı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozit yapılarda darbe enerjisinin maksimum sönümlendiği sapma/yer değiştirmesinde artış sağlarken hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda azalmaya sebep olduğu görülmüştür. Karbon elyaf takviyeli kompozit yapıya CNT katkısı, CNT katkısı yapılmamış ve en düşük darbe enerjisinin maksimum sönümlendiği sapma/yer değiştirmesine sahip karbon elyaflı kompozitin hibrit yapılı elyaf ve cam elyaf takviyeli kompozit plakaların yer değiştirmesinin önüne karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitin geçmesini sağlamıştır. Karbon elyaf takviyeli yapıda %55,7 ve cam elyafta %6,5 artış görülürken hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda performansta %3,1'lik bir azalma görülmüştür.

Düşen ağırlık darbe deneyi için temas kuvveti (N) verileri incelendiğinde (Şekil 4.15) en yüksek temas kuvveti hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda, sonra cam elyaf takviyeli yapıda ve en düşük karbon elyaf takviyeli yapıda olduğu gözlemlenmiştir. CNT katkısı hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda ve cam elyaf takviyeli kompozit yapıda temas kuvveti performansında artış gösterirken karbon elyaf takviyeli kompozit yapının performansında azalma görülmüştür. Hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda %9,5 ve cam elyafta %7,9 performans artışı görülürken karbon elyaf takviyeli kompozit yapının performansında %4,8'lik bir azalma görülmüştür.

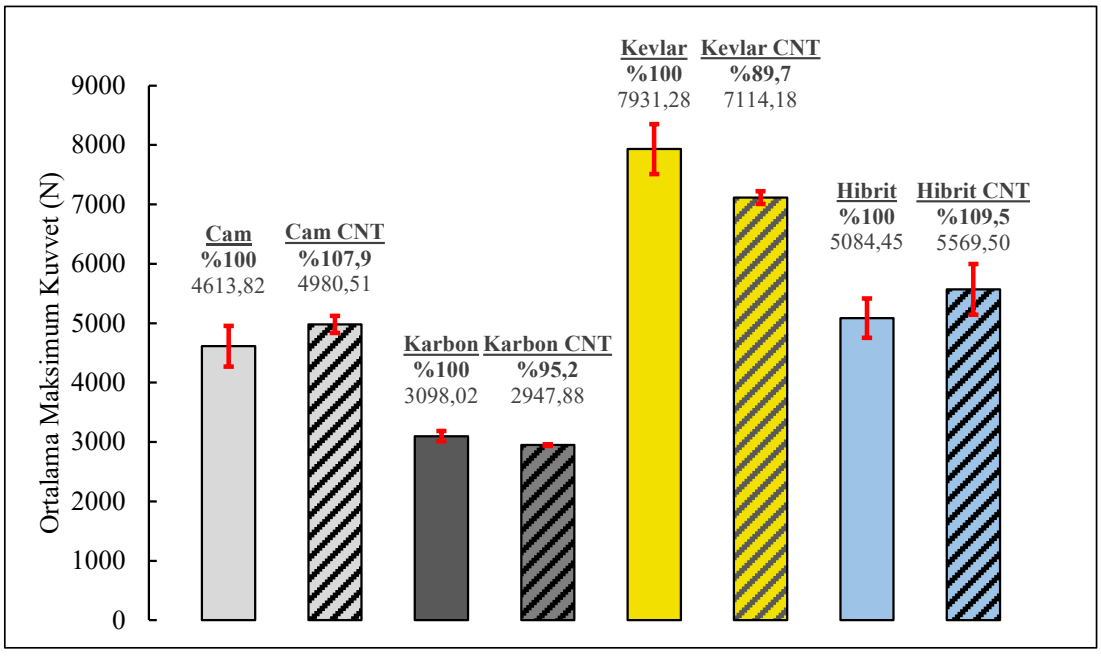
Düşen ağırlık darbe deneyi için temas kuvveti altındaki zaman (ms) verileri incelendiğinde (Şekil 4.16) en fazla zamanın cam elyaf takviyeli yapıda, sonra hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda ve en düşük karbon elyaf takviyeli yapıda olduğu gözlemlenmiştir. CNT katkısı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozit yapılarda temas kuvveti altındaki zamanda azalmaya sebep olurken hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda artmayı sağladığı görülmüştür. Karbon elyaf takviyeli yapıda %13,6 ve cam elyafta %9,8 zamanda azalma görülürken hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda performansta %23,6'lık bir artma görülmüştür.

Düşen ağırlık darbe deneyi için temas kuvveti altında sapma/yer değiştirme (mm) için test verileri incelendiğinde (Şekil 4.17) en fazla yer değiştirmenin cam elyaf takviyeli yapıda, sonra hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda ve en düşük karbon elyaf takviyeli yapıda olduğu gözlemlenmiştir. CNT katkısı karbon ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapılarda temas kuvveti altında sapma/yer değiştirmesinde artış

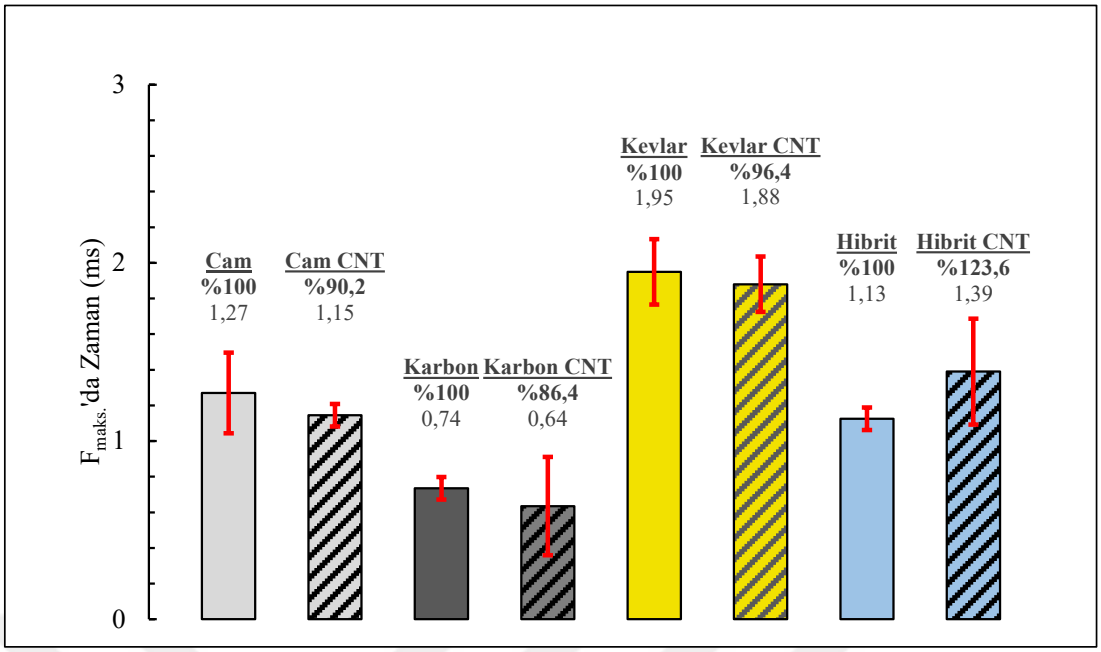
sağlarken cam elyaf takviyeli kompozit yapıda azalmaya sebep olduğu görülmüştür. Karbon elyaf takviyeli yapıda %24,9 ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıda %21,6 artış görülürken cam elyaf takviyeli kompozit yapıda performansta %27,1'lik bir azalma görülmüştür.



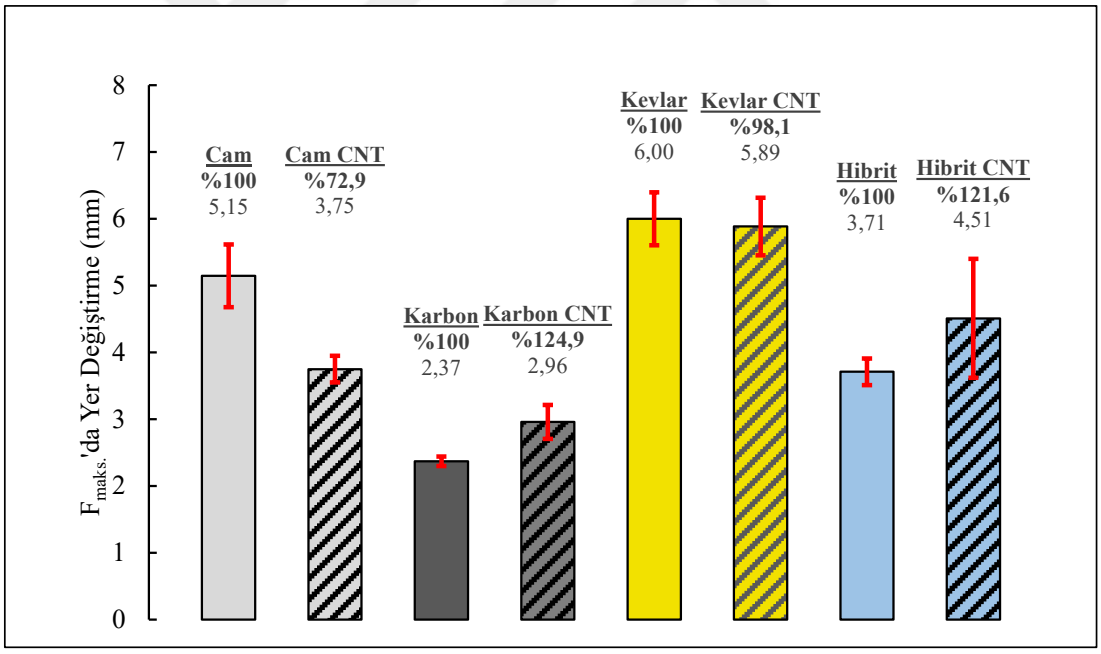
Şekil 4.14 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için maksimum darbe enerjisinin sönümlendiği sapma/yer değiştirme (mm) ve standart sapma (kırmızı) verileri.



Şekil 4.15 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için temas kuvveti (N) ve standart sapma (kırmızı) verileri.



Şekil 4.16 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için temas kuvveti altındaki zaman (ms) ve standart sapma (kırmızı) verileri.



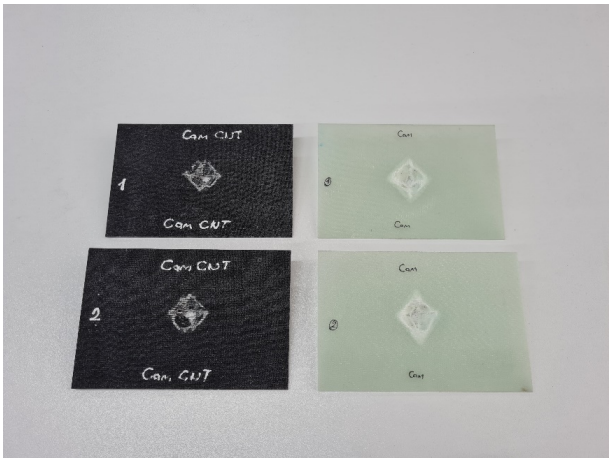
Şekil 4.17 : Cam, karbon, kevlar ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzeme yapılarına uygulanan düşen ağırlık darbe deneyi için temas kuvveti altında sapma/yer değiştirme (mm) ve standart sapma (kırmızı) verileri.

Cam elyaf takviyeli numunelerde düşen ağırlık darbe deneyi sonucunda meydana gelen delinme hasarları incelendiğinde CNT katkısının yapı üzerinde hasarın şeklinde ve yapısında görünen bir etkisinin olmadığı ortaya çıkmıştır (Şekil 4.18).

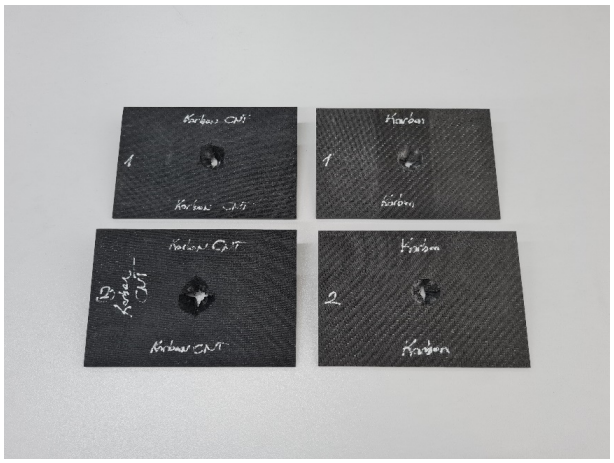
Karbon elyaf takviyeli numunelerde düşen ağırlık darbe deneyi sonucunda meydana gelen delinme hasarları incelendiğinde CNT katkısının yapı üzerinde hasarın şeklinde ve yapısında görünen bir etkisinin olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.19). CNT katkısı yapılmamış karbon elyaf takviyeli kompozit yapıda darbe tertibatının temas etmesi ile matris malzemesi hasara uğrayarak kırılmıştır. Matrisi kırılan yapıda karbon elyaflar da darbe tertibatının ilettiği kuvvet ile hasara uğrayarak gevrek bir yapıda kırılmıştır. CNT katkısı yapıldığında ise yapı daha sünek ve dayanımlı bir hale gelmiş, darbe enerjisi performansında artış gözlemlenmiştir. CNT, karbon elyaf takviyeli kompozit yapıda darbe tertibatının oluşturduğu hasarı yapının gevrek kırılmasının önüne geçecek şekilde yapının kalanına dağıtmasıyla malzeme performansının artmasını sağlamıştır.

Kevlar elyaf takviyeli numunelerde düşen ağırlık darbe deneyi sonucunda meydana gelen delinme hasarları incelendiğinde (Şekil 4.20) darbe tertibatı kevlar elyaf takviyeli kompozitler ile temas ettikten sonra yapıyı delemediği için numuneler üzerinden sekmiştir ve maksimum temas kuvveti uygulandıktan sonra hareketinin ters yönünde yer çekimine karşı yükselmiştir. Ağırlık tertibatı numune yüzeylerine yaptıkları ilk temasta numune yüzeyine verebileceği en büyük hasarı vermiştir. Fakat yapıda delinme hasarı meydana gelmemiştir.

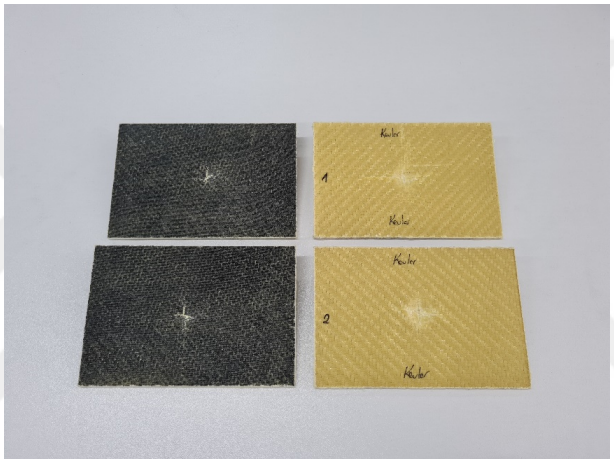
Hibrit yapılı elyaf takviyeli numunelerde düşen ağırlık darbe deneyi sonucunda meydana gelen delinme hasarları incelendiğinde CNT katkısının yapı üzerinde hasarın şeklinde ve yapısında belirli bir etkisinin olmadığı ortaya çıkmıştır (Şekil 4.21).



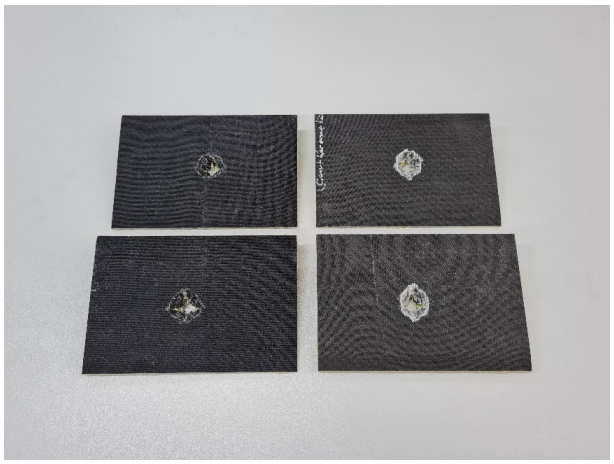
Şekil 4.18 : Düşen ağırlık darbe deneyi uygulanmış CNT katkılı (sol) ve CNT katkısız (sağ) cam elyaf kumaş takviyeli polimer matrisli kompozit malzeme numuneleri.



Şekil 4.19 : Düşen ağırlık darbe deneyi uygulanmış CNT katkılı (sol) ve CNT katkısız (sağ) karbon elyaf kumaş takviyeli polimer matrisli kompozit malzeme numuneleri.



Şekil 4.20 : Düşen ağırlık darbe deneyi uygulanmış CNT katkılı (sol) ve CNT katkısız (sağ) kevlar elyaf kumaş takviyeli polimer matrisli kompozit malzeme numuneleri.



Şekil 4.21 : Düşen ağırlık darbe deneyi uygulanmış CNT katkılı (sol) ve CNT katkısız (sağ) hibrit yapılı elyaf kumaş takviyeli polimer matrisli kompozit malzeme numuneleri.

5. SONUÇLAR

Bu yüksek lisans çalışması sonucunda elde edilen deney sonuçları ve özellikle çekme deneyi verileri göz önüne alındığında CNT/elyaf/matris arasında tek bir kompozit fazı elde edilmediği, CNT/matris ve elyaf/matris iki fazlı bir hibrit yapının geliştiği düşünülmektedir. Bu ikili hibrit kompozit malzeme yapısının elyaf takviye türünün yapıda kullanımı ile iki malzemenin mekanik özelliklerinin birbiri ile uyumuna göre gösterdiği performansın arttığı veya azaldığı düşünülmektedir. Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit yapılarda çekme gerilmesi altında uzama verileri incelendiğinde kütlece %0,5 CNT katkısı ile cam elyafta %1,63'ten %1,72'ye %5,5, karbonda ise 1,09'dan %1,14'e %4,5 performans artışı gözlemlenmiş, kevlar elyafta ise %2,19'dan %2,15'e %1,9'luk bir performans azalması gözlemlenmiştir. Literatürdeki çeşitli çalışmalar incelendiğinde epoksi reçineye kütlece %1,0'e kadar CNT katkılandığında CNT katkısının epoksi reçinenin çekme dayanımını az miktarda arttırdığını fakat kopma uzaması azalttığını ve yapıyı daha gevrek yaptığı görülmüş ve çalışmada kopma uzaması %1,65 iken kütlece %0,5 saf CNT yapıya katkılandığında kopma uzamasının %1,50'ye düştüğü ve artan CNT miktarıyla beraber kopma uzamasının daha da azaldığını görülmüştür [85]. Bu yüksek lisans çalışması verileri incelendiğinde epoksi reçine ile uyumlu uzama performansı gösteren elyaf takviyeli kompozitlere CNT katkısı yapıldığında çekme dayanımlarında iyileşme eğiliminin bahsedilen literatür çalışmalarındaki sonuçlar ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Epoksi reçinenin mekanik özellikleri ile uyumunun diğer elyaf katkılarına göre daha çok olduğu düşünülen kopma uzaması %1,63 olan cam elyaf takviyeli yapıya kütlece %0,5 CNT katkısı yapıldığında çekme dayanımı 326 MPa'dan 372 MPa'ya yaklaşık %14 artmıştır. Cam elyaflı yapıya göre uyumun daha düşük olduğu düşünülen %1,09 kopma uzamasına sahip karbon elyaf takviyeli yapıda ise bu durum 693 MPa'dan 701 MPa'ya yaklaşık %1 artış gösterdiği görülmüştür. Kevlar elyaf takviyeli kompozit yapıda ise %2,19 kopma uzamasına sahip kevlar elyaf takviyeli yapı ile reçine matrisin mekanik özellik farkının diğer elyaf takviye türleri ile kıyaslandığında daha fazla

olması nedeniyle çekme dayanımı 539 MPa'dan 509 MPa'ya %5,6'lık bir düşüşe sebep olduğu düşünülmektedir.

Çalışma kapsamında üretilen cam/karbon/kevlar kumaş takviyeli hibrit kompozitlerin üretilme amacı cam, karbon ve kevlar elyaf takviyeleri tek bir kompozit yapısında buluşturarak mekanik özelliklerini iyileştirmek üzerinedir. Çekme dayanımında cam elyafa karbon ve kevlar elyafın destek olduğu, eğme dayanımı için kevlar elyafa cam ve karbon elyafın destek olduğu, darbe enerjisi sönümleme için cam ve karbon elyafa kevlar elyafın destek olduğu hibrit kompozit yapısında mekanik özelliklerini iyileştirilmesinde elyaf takviyeler kompozit yapıyı desteklediği görülmüştür. Literatürde farklı elyaf türlerinin tabakalı hibrit kompozit yapıları üretimi için istiflenmeleri farklı mekanik özelliklere sahip farklı elyafları mekanik etkiler altında farklı karakteristik sergiliyor oluşu bu hibrit yapılardaki hasar mekanizmalarının tabakalar arası delaminasyon ile gerçekleşmesine sebep olabildiği belirtilmiştir [86]. Bu yüksek lisans çalışmasında gerçekleştirilen mekanik deneylerde de elyaf tabakaları arasında delaminasyon oluşumu gözlemlenmiştir ve bu durum literatürdeki sonuçlar ile ilişkilendirilmiştir. Bu çalışmada CNT/elyaf/matris hibrit kompozit yapısı yerine, CNT/matris ve elyaf/matris iki fazlı bir hibrit yapının geliştiği düşünülmektedir. Epoksi reçineye CNT katkısı ile daha gevrek bir yapıya sahip olduğu yapılan literatür çalışmaları ile bilinmekte ve üretilen hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemenin elyaf arayüzeylerinde oluşturduğu düşünülen CNT/matris ikili fazının CNT katkısı olduğunda elyaf/reçine ikilisi ile oluştuğu hibrit yapılı kompozitlerin yapılan deneylerde mekanik özellikleri azalttığı düşünülmektedir.

5.1 Çekme Deneyi Sonuçları

Çalışma sonucunda her bir CNT katkılı veya katkısız 4 farklı elyaf kumaş takviyeli polimer matrisli kompozit plakaların 5 adet numuneleri çekme deneyi ile test edilmiştir. Çalışmanın bu aşamasında katmanlı kumaş elyaf takviyelerinin kompozit yapının çekme gerilmesi altında mekanik özelliklerinin CNT katkısı ile nasıl etkileneceğini belirlemeyi amaçlamıştır.

Elde edilen veriler ışığında, elyaf kumaş takviyeli tabakalı kompozit plaka yapılarına CNT katkısının mekanik özellikleri etkilediğini göstermiştir. Yapıya kütlece %0,5'lik CNT katkısı cam ve karbon elyaf kumaş takviye edilmiş kompozit yapılarında hem uzama (%) hem de dayanım (MPa) performansında artışın olduğunu göstermiştir.

CNT, karbon elyaf takviyeli kompozit plakalarındaki hasar mekanizmalarını etkilememiştir. Kevlar elyafta ise kompozit yapı çekme ile delaminasyon hasarına uğramış ve devamında kopmuştur. Kevlar yapıya CNT katkısı ise tabakalar ve iplikler arasındaki delaminasyonu bir miktar da olsa engellemiştir fakat uzama (%) ve dayanım (MPa) performansında düşüşe engel olamamıştır.

Cam, karbon ve kevlar elyaf kumaş takviye içeren hibrit kompozit her bir elyaf türünün çekmeye karşı gösterdiği farklı mekanik performanslarının ve karakteristiklerinin bir araya toplandığı bir davranış göstermiştir. Yapıdaki cam ve karbon elyaf tabakalar çekme gerilmesi altında gevrek bir mekanik davranış göstereceği beklenmiştir ama yapıya eklenen kevlar elyaf bu durumu değiştirmiş ve uzamayı karbon elyafa göre %40 arttırmıştır. Karbon elyaf ise cam elyafın sahip olduğu düşük dayanımı hibrit yapıda %25 arttırmıştır. Fakat yapıya CNT katkısı hibrit yapıdaki farklı elyafların ara yüzeylerinde çekme gerilmesi altında delaminasyon miktarını arttırıcı bir etkiye sebep olmuştur. Bu durum hibrit yapının uzama (%) performansının artmasına ama dayanımda (MPa) ise performansının azalmasına neden olmuştur.

5.2 Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

Çalışma sonucunda her bir CNT katkılı veya katkısız 4 farklı elyaf kumaş takviyeli polimer matrisli kompozit plakaların 5 adet numuneleri üç nokta eğme deneyi ile test edilmiştir. Çalışmanın bu aşamasında katmanlı kumaş elyaf takviyelerinin kompozit yapının eğme kuvveti altında mekanik özelliklerinin CNT katkısı ile nasıl etkileneceğini belirlemeyi amaçlamıştır.

Elde edilen veriler ışığında, elyaf kumaş takviyeli tabakalı kompozit plaka yapılarına CNT katkısının mekanik özellikleri etkilediğini göstermiştir. Yapıya kütlece %0,5'lik CNT katkısı cam ve karbon elyaf kumaş takviye edilmiş kompozit yapılarda eğme yükü altında bazı eğme deneyi parametreleri için performans artışının, bazı parametreler için de performans azalmasının gerçekleştiğini göstermiştir.

CNT katkısı kevlar elyaf takviyeli polimer kompozit malzeme yapısının dayanım performansında artış sağlamıştır ve bu artış %15,2 olmuştur. CNT katkısının kevlar takviyeli yapıda oluşturduğu performans artışının aksine diğer elyaf takviyeli yapılar için dayanım performansında azalma gözlemlenmiştir. Bu performans azalması hibrit

yapı elyafları için %2,9, karbon elyaf için %3,4 ve cam elyaf için ise %5,5 kadar olmuştur.

Maksimum eğme kuvveti verileri incelendiğinde CNT katkısı kevlar, karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerde performans artışı sağlamıştır. Bu artış kevlar elyaf için %21,1, karbon elyaf için %15,2 ve cam elyaf için ise %13,3 kadar olmuştur. Hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozitte ise CNT katkısı eğme kuvveti altında performans azalmasına sebep olarak performansta %2,9'luk bir azalmaya sebep olmuştur.

Maksimum eğme kuvveti altındaki uzama verileri incelendiğinde CNT katkısı kevlar elyaf katkılı kompozit yapıda performans artışı sağlamıştır ve bu artış %17,3'tür. Kevlar elyaf takviyenin aksine karbon elyaf, cam elyaf ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozitlerde CNT katkısı maksimum eğme kuvveti altında uzama performansında azalmaya sebep olmuştur. Maksimum kuvvet altındaki uzama performansındaki azalma karbon elyaf için %4, cam elyaf için %6,7 ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozitte ise %15,1 kadar olmuştur.

Eğme kuvveti altında numunelerin kırılma/kopma uzamaları incelendiğinde hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozitte uzama performans artışı görülmüştür ve bu bartış %2,9 kadar olmuştur. Hibrit yapının aksine kevlar, cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit yapılarda ise kırılma/kopma uzaması performansı azalmıştır ve bu azalma sırasıyla kevlar elyaf için %3,7, cam elyaf için %7,4 ve karbon elyaf için %11,6 kadar olmuştur.

5.3 Düşen Ağırlık Darbe Deneyi Sonuçları

Çalışma için deneme numuneleri ile ön çalışmalar sonrasında asıl deneysel uygulamalarda darbe enerjisi 50 Joule olarak belirlenmiştir. Ön çalışmalarda belirlenen darbe enerjisi cam, karbon ve hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozitlere uygulanan 50 Joule üstündeki 100, 200 ve 300 Joule gibi darbe enerjilerinde bahsedilen kompozit yapılar için düşen ağırlık darbe cihazı sensörlerinde ölçülen darbe enerjisi pozitif eksende sonuç vermeden negatif bölgede -800 Joule'lere varan darbe enerjisi sonuçları verdiği için anlamlı veriler elde edilememiştir.

CNT katkısının elyaf takviyeli kompozit malzemelerin düşen ağırlık darbe deneyinde darbe enerjisi sönümleme performansına etkisi karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemede olmuştur. CNT katkısının etkisi cam, kevlar ve hibrit yapılı elyaf

takviyeli kompozit yapılardan elde edilmiş numunelerin makrograflarında fark edilmezken karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit yapıdaki darbe tertibatının sebep olduğu delinme hasarındaki CNT katkısının yapı üzerindeki etkisi gözler görülür derecede belirgindir.

Kevlar elyaf takviyeli kompozit yapı için yaklaşık 100-200 Joule darbe enerjisi ön çalışmalarda uygulandığında test cihazı sensörleri anlamlı veriler elde edebilmiştir. Fakat kevlar elyaf takviyeli kompozit yapının da diğer elyaf takviyeli yapılarla aynı düşen ağırlık darbe deneyi parametrelerinde gerçekleştirilebilmesi için 50 Joule darbe enerjisi uygulanarak performansı analiz edilmiştir. Kevlar takviyeli kompozit yapıda darbe tertibatı kompozit plakalar üzerinde delik açamadan maksimum 50 Joule'e kadar enerji sönümlemiştir. Darbe tertibatı kevlar elyaf takviyeli kompozitler ile temas ettikten sonra yapıyı delemediği için numuneler üzerinden sekmiştir.

Düşen ağırlık darbe deneyi uygulamalarında deneyin başarısı, numuneler üzerinde darbe tertibatının delik açması ile gerçekleşmektedir. Bu yüzden düşen ağırlık darbe deneyi uygulamaları için kevlar elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit plaka malzemeler için cam, karbon ve hibrit yapılı elyaf takviye içeren kompozitlere göre daha yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğu ifade edilebilir. CNT takviyeli veya CNT takviyesiz kevlar yapıların birbiri arasında CNT katkısının düşen ağırlık darbe deneyi performansına etkisi uygulanan darbe tertibatı enerjisinin kevlar takviyeli kompozit yapıyı delerek hasara uğratacak enerjiden daha yüksek olmasından dolayı CNT katkısının kevlar elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit üzerindeki etkisi deneysel uygulamalarda analiz edilememiştir.

5.4 Genel Sonuçlar

Bu yüksek lisans çalışmasında dört farklı elyaf takviyeli kompozit yapıların CNT ile katkısının malzeme performansına etkisinin analizi için çekme, üç nokta eğme ve düşen ağırlık darbe deneyleri uygulanmıştır. Çekme deneyi verileri incelendiğinde en iyi çekme dayanımı performansının cam elyaf takviyeli kompozit yapıda sağlandığı görülmüştür. Üç nokta eğme deneyi verileri incelendiğinde en iyi eğme dayanımı performansının kevlar elyaf takviyeli kompozit yapıda sağlandığı görülmüştür. Düşen ağırlık darbe deneyi verileri incelendiğinde en iyi darbe enerjisi sönümleme performansının karbon elyaf takviyeli kompozit yapıda sağlandığı görülmüştür.

Çekme deneyi ve üç nokta eğme deneyi verileri incelendiğinde başka elyaf türlerine göre CNT katkısının her ne kadar malzeme performansını yüzde oranlarla azalttığı karbon elyaf takviyeli kompozit yapı için gözlemlenmiştir. Fakat diğer elyaf türlerine göre daha yüksek mekanik özellik değerleri gösteriyor oluşu karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitin yapısına CNT katkısında en iyi malzeme performansını sağladığından söz edilebilir.

Hibrit yapılı elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemesi üzerinde uygulanan mekanik deneylerin tamamında CNT katkısının malzeme performansını azalttığı gözlemlenmiştir. Buna rağmen, çekme deneyinde karbon ve kevlar elyafların cam elyafına, üç nokta eğme deneyinde cam ve karbon elyafların kevlar elyafa, düşen ağırlık darbe deneyinde ise kevlar ve cam elyafların karbon elyafa yaptığı katkı ile hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit yapıların mekanik deney uygulamalarında kötü performans sergileyen tek tip elyaf takviyeler ile üretilmiş kompozit yapılara göre daha yüksek mekanik özellikler gösterdiğinden söz edilebilir.

5.5 Öneriler

Bu yüksek lisans çalışması kapsamında CNT/elyaf/matris ilişkisi sadece mekanik deneylerle incelenmiştir. CNT'nin kompozit yapıdaki morfolojik durumunun analizi bu çalışmadan sonra taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile olması düşünülmektedir. Elyaf kumaş tabakaları arasında elyaf köprüsü oluşumu, CNT'nin elyaf liflerine bağlanması, elyaflara bağlanan CNT'nin hasar bölgelerindeki elyaf sıyrılmasını engelleyici etkisi gibi kompozitin mekanik özelliklerini değiştirebilen ve performansa etkisi olabilecek mekanizmaların analizi SEM ile yapılması önerilmektedir. Çalışmalara ek olarak, kompozit yapılarda meydana gelebilecek porozitenin bilgisayarlı tomografi (CT) ile katmanlı bir şekilde analiz edilip yapılan katman analizlerinden simülasyon programı ile elde edilecek yüzde alansal porozite miktarından yapıdaki yüzde hacimsel porozite miktarının hesaplanarak matrisin elyaf takviye ıslatmasındaki durumunun incelenmesi, devamında olası bir CNT katkısı ile matris ıslatmasında CNT'nin yapısal porozite üzerinde nasıl bir etkisinin olduğunun analizinin bilgisayarlı tomografi ile yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Callister, W. D., ve Rethwisch., D. G.** (2011). *Materials science and engineering. Vol. 5,* NY: John wiley & sons.

[2] **Friedrich, K., Fakirov, S., Zhang, Z.** (2005). *Polymer composites: from nano-to macro-scale.* Springer Science & Business Media.

[3] **Kompozit Sanayicileri Derneği.** (2018). *Composites Turkey* (Sayı No: 19). İstanbul: Kompozit Sanayicileri Derneği.

[4] **Advani, S. G., ve Hsiao, K.-T.** (2012*). Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs).* Elsevier.

[5] **Graeme, M. W.** (2003). Theory of composites. Cambridge monographs on applied and computational mathematics*, Appl. Mech. Rev.* 56.2 B27-B28.

[6] **Njuguna J.** (2016). *Lightweight Composite Structures in Transport, Design, Manufacturing, Analysis and Performance,* Woodhead Publishing, 3-34, UK.

[7] **Singh, I., Singh, S., Singh A.** (2013). Conventional and Unconventional Hole Making in Metal Matrix Composites, *Woodhead Publishing Reviews: Mechanical Engineering Series, Machining and machine-tools, Research and Development,* 69-193.

[8] **Hayashi, T.** (2000). Application of MMCS to Engine Cylinder Blocks and Brake Disks, Comprehensive Composite Materials. *Pergamon,* Volume 6, 375-379.

[9] **Rohatgi, P. K., Xiang, C., Gupta N.** (2018). Aqueous Corrosion of Metal Matrix Composites*, Comprehensive Composite Materials II,* Volume 4, 287-312.

[10] **Haghshenas, M.** (2016). *Metal–Matrix Composites*, *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.* Elsevier.

[11] **Mallick, P. K.** (2012). Advanced materials for automotive applications: an overview, *Advanced Materials in Automotive Engineering,* Chapter II, 5-27.

[12] **Mouritz, A. P.** (2012). Metal matrix, fibre–metal and ceramic matrix composites for aerospace applications, Introduction to Aerospace Materials*, Woodhead Publishing*, 394-410.

[13] **Hunt Jr., W. H.** (2000). *Metal Matrix Composites,* Comprehensive Composite Materials, Volume 6, 57-66.

[14] **Krenkel, W. ve Reichert, F.** (2018). Design Objectives and Design Philosophies, Interphases and Interfaces in Fiber-Reinforced CMCs, *Comprehensive Composite Materials II,* Volume 5, 1-18.

[15] **Zhang, C.** (2014). Understanding the wear and tribological properties of ceramic matrix composites, *Advances in Ceramic Matrix Composites,* 312-339.

[16] **Naslain, R. R. ve Pomeroy M. R.** (2001). Ceramic Matrix Composites: Matrices and Processing, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition),* 1060-1066.

[17] **Razzell, A.G., Venkata Siva, S.B., Rama Sreekanth, P.S.** (2000). Joining and Machining of Ceramic Matrix Composites, *Comprehensive Composite Materials*, Volume 4, 689-697.

[18] **Matthews F. L., Khalfalla, Y. E., Benyounis, K. Y.** (2001). Joining Ceramic Matrix Composites, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition),* 1391-1395.

[19] **Wang, R.-M., Zheng, S.-R., Zheng, Y. G.** (2011). *Polymer matrix composites and technology.* Elsevier.

[20] **Dimitris I., C**. (2013) *Structural Analysis of Composite Wind Turbine Blades: Nonlinear Mechanics and Finite Element Models with Material Damping. Vol. 1*. Springer Science & Business Media.

[21] **Staab, G. E.** (2015). *Laminar composites*. Butterworth-Heinemann.

[22] **Aliofkhazraei, M.** (2019). *Advances in Nanostructured Composites: Volume 1: Carbon Nanotube and Graphene Composites*. CRC Press.

[23] **Tanaka, K., ve Iijima, S.** (2014). *Carbon nanotubes and graphene*. Elsevier.

[24] **Çolak, P.** (2018). *Karbon Nanotüp Katkılı Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi,* (Master's Thesis). Retrieved from https://tez.yok.gov.tr/

[25] **Khakzad, F.** (2017). *Grafen Katkılı Cam/Epoksi Nanokompozit Plakaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi,* (Master's Thesis). Retrieved from https://tez.yok.gov.tr/

[26] **Bayrak, T.** (2008). *Compaction Experiments on Different e-Glass Fabric Preforms in Vacuum Infusion Process,* (Master's Thesis). Retrieved from https://tez.yok.gov.tr/

[27] **Yüksek, M.** (2011). *Cam Lifi Esaslı Poliester Reçineli Çok Eksenli Çözgülü Örme Kompozit Yapıların Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi,* (Master's Thesis). Retrieved from https://tez.yok.gov.tr/

[28] **Windhorst, T., Blount, G.** (1997). Carbon-carbon composites: a summary of recent developments and applications, *Materials & Design*, Volume 18, Issue 1, 11-15.

[29] **Rand, B.** (2005). Composites: Carbon Matrix, *Encyclopedia of Condensed Matter Physics,* 178-192.

[30] **Park, S.-J., Seo, M.-K.** (2011). Types of Composites*, Interface Science and Technology*, Volume 18, 501-629.

[31] **Lackey, W.J.** (2001). Carbon–Carbon Composites, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology,* 952-966.

[32] **Burchell, T. D.** (2001). Radiation Effects in Carbon–Carbon Composites, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition),* 7972-7975.

[33] **Sen, M.** (2020). *Nanocomposite Materials,* Intech Open Science, London.

[34] **Jamir M. R. M., Majid, M. S. A., Khasri, A.** (2018). Natural lightweight hybrid composites for aircraft structural applications, *Sustainable Composites for Aerospace Applications,* Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 155-170.

[35] **Nabil, B., Raji, M., Boujmal, R., Essabir, H., Bensalah, M.-O., Bouhfid, R., el kacem Qaiss, A.** (2019). Numerical modeling of hybrid composite materials. *Modelling of Damage Processes in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Woodhead Publishing, 57-101.

[36] **Clyne, T. W. ve Hull, D.** (2019). *An Introduction to Composite Materials (Third Edition).* Cambridge University Press.

[37] **U.S. Department of Transportation**. (1994). NHTSA 49 CFR Part 571, Federal Register, Vol. 59, No. 248.

[38] **Lupescu, M. B.** (2004). *Fiber Reinforcements for Composite Materials*, Editura Tehnica, Bucuresti.

[39] **Lee, S. M.** (1991). *International Encyclopedia of Composites: Reinforcements, volume 5*, VCH, New York.

[40] **Yi, X.-S., Du, S., Zhang, L.** (2008). Composite Materials Engineering, Volume 1 Fundamentals of Composite Materials*, Chemical Industry Pres*s, 141-156, China.

[41] **Kotek, R.** (2008). Recent advances in polymer fibers, *Polym. Rev.,* 48(2):221-229.

[42] **Wo, D. Z.** (2000). *Comprehensive Composites,* China Science Press, Beijing.

[43] **Xu, H., Guo, M.X.** (1994). *The property of SiC whisker*, Acta Mater Compos Sinica 1:15.

[44] **Spitalksy, Z., Tasis, D., Papagelis K., Galiotis C.** (2010). Carbon nanotube-polymer composites: Chemistry, processing, mechanical and electrical properties, *Progress in Polymer Sciences*, 35, 357-401.

[45] **Iijima, S.** (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature,* 354, (6348), 56-58.

[46] **Iijima, S. ve Ichihashi, T.** (1993). Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. *Nature*, 363, (6430), 603-605.

[47] **Bethune, D. S. vd.** (1993). Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls. *Nature*, 363, (6430), 605-607.

[48] **Guldi, D. M., Rahman, G. M. A., Zerbetto, F., Prato, M.** (2005). Carbon nanotubes in electron donor-acceptor nanocomposites, *Acc. Chem. Res.,* 38:871-878.

[49] **Sgobba, V., Rahman, G. M. A., Ehli, C., Guldi, D. M.** (2007). Covalent and noncovalent approaches towards multifunctional carbon nanotube

materials. *Fullerenes, principles and applications*, RSC Nanoscience and Nanotechnology Series, 329–379, Cambridge, UK.

[50] **Bandaru, P. R.** (2007). Electrical properties and applications of carbon nanotube structures, *J. Nanosci Nanotechnol.,* 7:1239–1267.

[51] **Wie, B. Q., Vajtai, R., Ajayan, P. M.** (2001). Reliability and current carrying capacity of carbon nanotubes*, Appl. Phys. Lett.,* 79:1172–1174.

[52] **Durkop, T., Kim, B. M., Fuhrer, A. M. S.** (2004). Properties and applications of high-mobility semiconducting nanotubes, *J. Phys. Condens. Matter*, 16:R553–80.

[53] **Ajayan, P. M., Stephan, O., Colliex, C., Trauth, D.** (1994). Aligned carbon nanotube arrays formed by cutting a polymer resin–nanotube composite*, Science,* 265:1212–1214.

[54] **Tasis, D., Tagmatarchis, N., Bianco, A., Prato, M.** (2006). Chemistry of carbon nanotubes, *Chem. Rev.,*106:1105–1136.

[55] **Wang, C., Guo, Z.-X., Fu, S., Wu, W., Zhu, D.** (2004). Polymers containing fullerene or carbon nanotube structures, *Prog. Polym. Sci.,* 29:1079–1141.

[56] **Liu, P.** (2005). Modifications of carbon nanotubes with polymers*, Eur. Polym. J.,* 41:2693–2703.

[57] **Homenick, C. M., Lawson, G., Adronov, A.** (2007). Polymer grafting of carbon nanotubes using living free radical polymerization, *Polym. Rev.,* 47:265–290.

[58] **Andrews, R., Weisenberger, M. C.** (2004). Carbon nanotube polymer composites*, Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.,* 8:31–37.

[59] **Grossiord, N., Loos, J., Regev, O., Koning, C. E.** (2006). Toolbox for dispersing carbon nanotubes into polymers to get conductive nanocomposites, *Chem. Mater.*, 18:1089–1099.

[60] **Coleman J. N., Khan U., Blau W. J., Gun'ko Y. K.** (2006). Small but strong: a review of the mechanical properties of carbon nanotube polymer composites, *Carbon*, 44:1624–1652.

[61] **Yu, M., Lourie, O., Dyer, M. J., Kelly, T. F., Ruoff, R. S.** (2000). Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load, *Science*, 287:637–640.

[62] **Potter, K.** (1996). *An Introduction to Composite Products: Design, Development and Manufacture.* Springer, 5th Ed. Chapman & Hall, London.

[63] **Bunsell, A. R., Renard, J.** (2005). *Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials*, Institute of Physics Publishing Ltd.

[64] **Spasojevic, P. M.** (2019). Thermal and Rheological Properties of Unsaturated Polyester Resins-Based Composites, *Unsaturated Polyester Resins* F*undamentals, Design, Fabrication, and Applications*, 367-406.

[65] **Hashim N., Majid D. L. A., Baitab, D. M., Yidris N., Zahari, R.** (2019). Tensile Properties of Woven Intra-Ply Carbon/Kevlar Reinforced Epoxy Hybrid Composite at Sub-Ambient Temperature, Reference

Module in Materials Science and Materials Engineering, *Composite Structures* 212: 476-483.

[66] **Akcin Y., Karakaya S, and Soykasap O.** (2016). Electrical, thermal and mechanical properties of CNT treated prepreg CFRP composites. *Materials Sciences and Applications* 7.09: 465.

[67] **Khan S. U., and Jang-Kyo K.** (2011). Impact and delamination failure of multiscale carbon nanotube-fiber reinforced polymer composites: a review. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences* 12.2: 115-133.

[68] **Url-1** <https://www.kompozitshop.com/cam-fiber-kumas-300-grm2-twill>, erişim tarihi 13.01.2021.

[69] **Url-2** <https://www.kompozitshop.com/karbon-fiber-kumas-245-grm2-3k-twill>, erişim tarihi 13.01.2021.

[70] **Url-3** <https://www.kompozitshop.com/aramidkevlar-fiber-kumas-300-grm2-twill-ls>, erişim tarihi 13.01.2021.

[71] **Url-4** **<**https://www.egenanotek.com/urun/cogul-duvarli-karbon-nanotup-mwcnt-dis-cap-7-nm-uzunluk-10-30-mikron-450-500-m2-g-96**>**, erişim tarihi 13.01.2021.

[72] **Url-5** <https://www.kompozitshop.com/mgs-laminasyon-epoksi-seti-l285h285>, erişim tarihi 13.01.2021.

[73] **Url-6** <https://www.astm.org/Standards/D3039>, erişim tarihi 13.01.2021.

[74] **Url-7** **<**https://www.astm.org/Standards/D7264.htm>, erişim tarihi 13.01.2021.

[76] **Url-8** **<**https://www.astm.org/Standards/D7136.htm>, erişim tarihi 13.01.2021.

[77] **Mahato K. K., et al.** (2017). Tensile behavior of MWCNT enhanced glass fiber reinforced polymeric composites at various crosshead speeds. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 178. No. 1. IOP Publishing.

[78] **Boroujeni A. Y., et al.** (2016). Effect of carbon nanotubes growth topology on the mechanical behavior of hybrid carbon nanotube/carbon fiber polymer composites. *Polymer Composites* 37.9: 2639-2648.

[79] **Taraghi I., Fereidoon A, and Mohyeddin A.** (2014). "The effect of MWCNTs on the mechanical properties of woven Kevlar/epoxy composites." *Steel Compos. Struct* 17.6: 825-834.

[80] **Rathore, D. K., et al.** (2016). Mechanical performance of CNT-filled glass fiber/epoxy composite in in-situ elevated temperature environments emphasizing the role of CNT content. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 84: 364-376.

[81] **Kim M., et al.** (2009). Processing, characterization, and modeling of carbon nanotube-reinforced multiscale composites. Composites Science and Technology 69.3-4: 335-342.

[82] **Rubio-González, C., et al.** (2020). Low-velocity impact behavior of glass fiber-MWCNT/polymer laminates exposed to seawater and distilled water aging. *Polymer Composites* 41.6: 2181-2197.

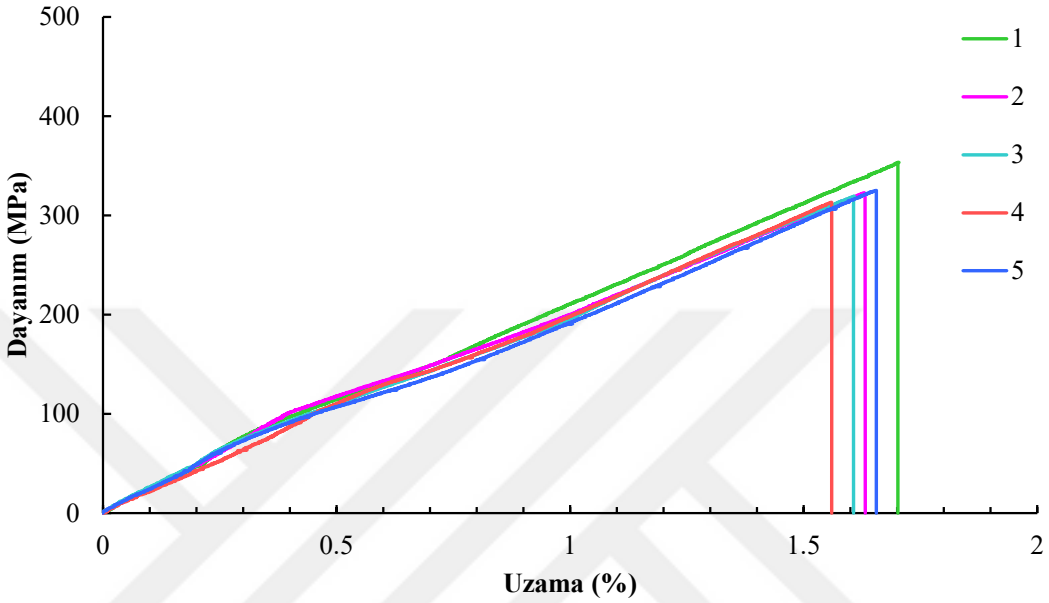
[83] **Kostopoulos, V., et al.** (2010). Impact and after-impact properties of carbon fibre reinforced composites enhanced with multi-wall carbon nanotubes. *Composites Science and Technology* 70.4: 553-563.

[84] **Taraghi I., Fereidoon A., and Taheri-Behrooz F.** (2014). Low-velocity impact response of woven Kevlar/epoxy laminated composites reinforced with multi-walled carbon nanotubes at ambient and low temperatures. *Materials & Design* 53: 152-158.

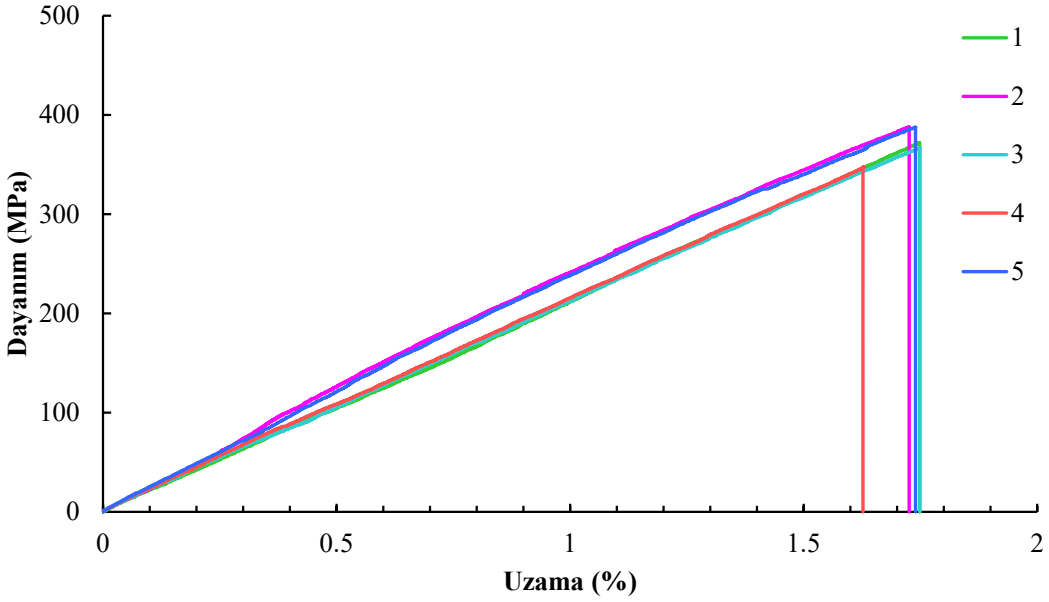
[85] **Roy S., Petrova R. S., Mitra S.** (2018). Effect of carbon nanotube (CNT) functionalization in epoxy-CNT composites. *Nanotechnology reviews* 7.6: 475-485.

[86] **Rajasekar, B. R., et al.** (2019). The Effect of Fibre Bridging on Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Carbon-Aramid/Epoxy Intra-Ply Hybrid Laminates. *Tribology in Industry* 41.1.

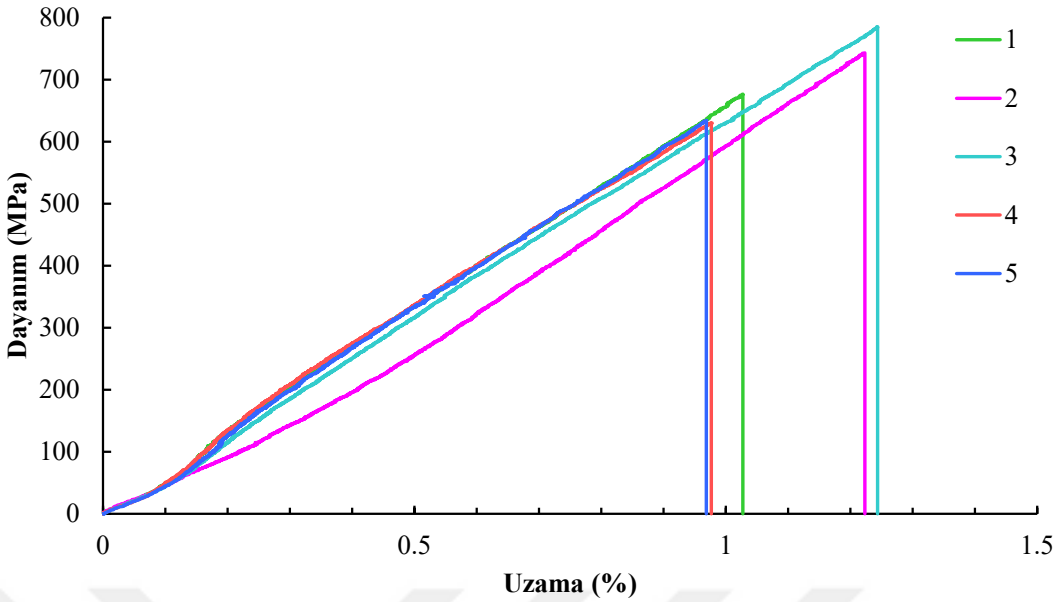
EKLER



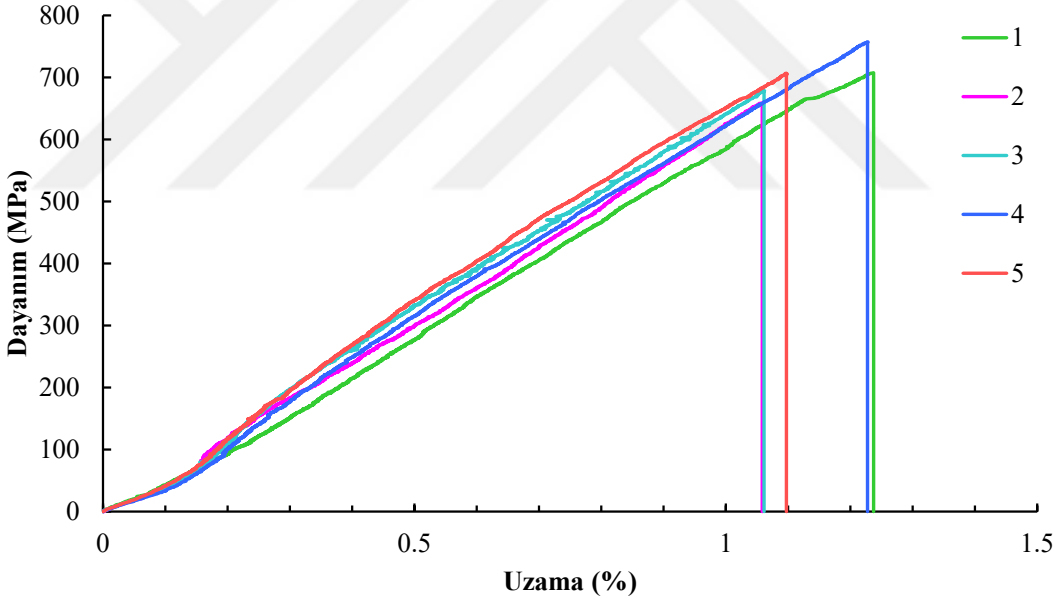
Şekil A.1 : Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için dayanım-uzama grafiği**.**



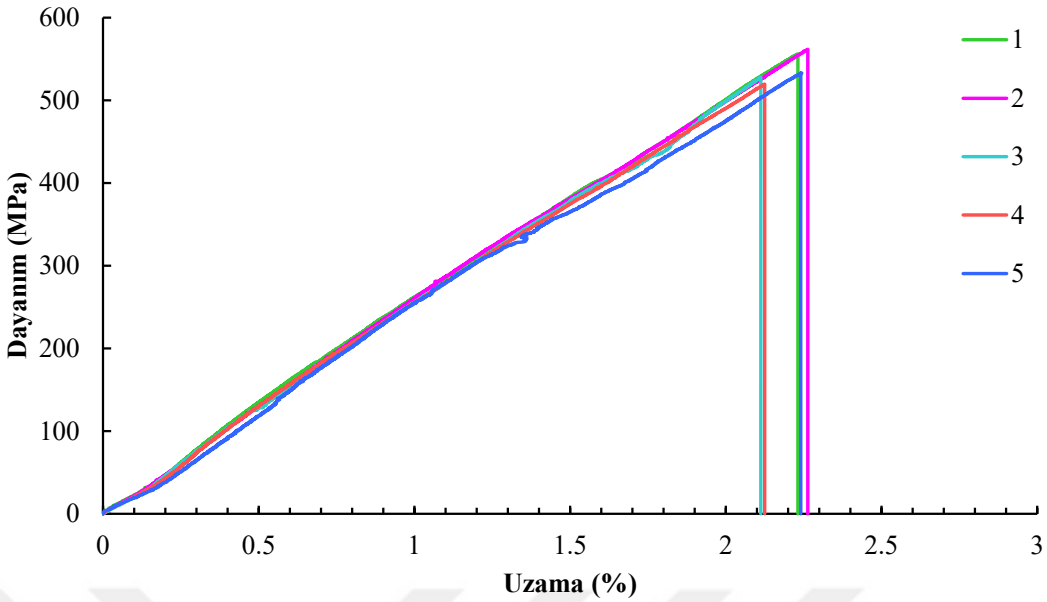
Şekil A.2 : CNT katkılı cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için dayanım-uzama grafiği**.**



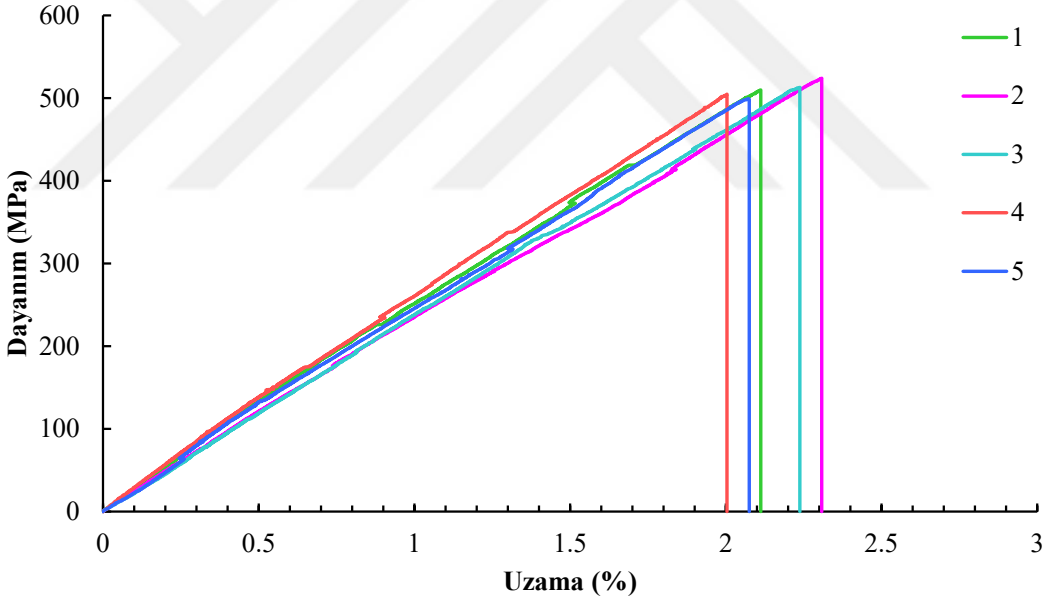
Şekil A.3 : Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için dayanım-uzama grafiği**.**



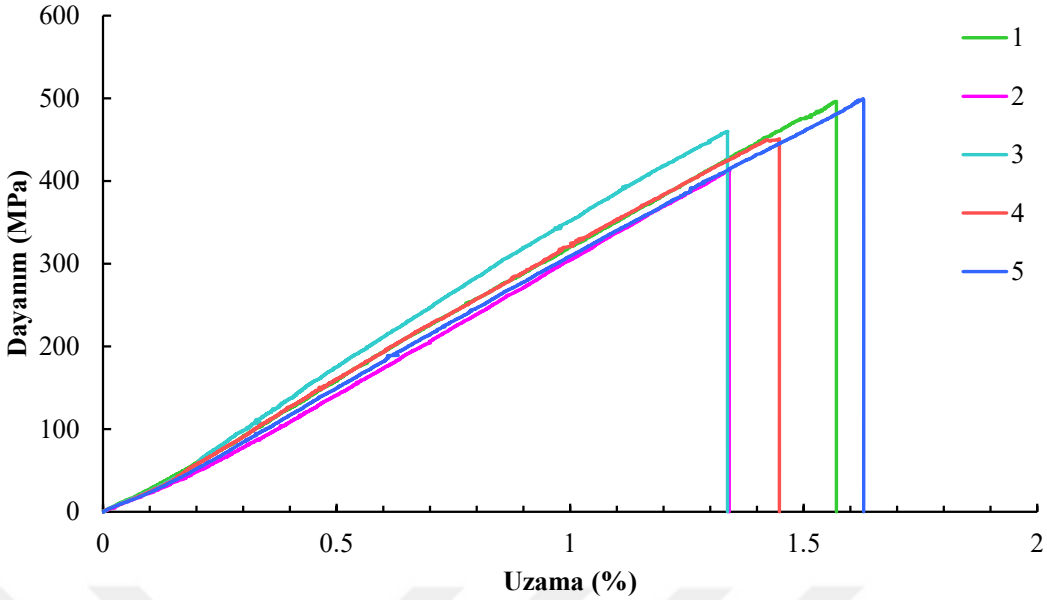
Şekil A.4 : CNT katkılı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için dayanım-uzama grafiği**.**



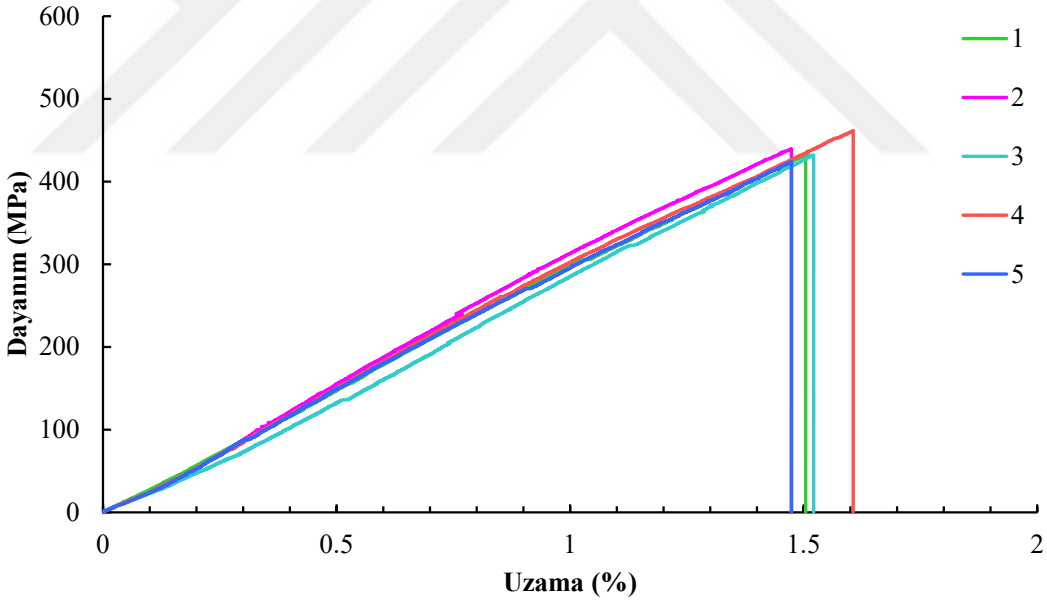
Şekil A.5 : Kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için dayanım-uzama grafiği**.**



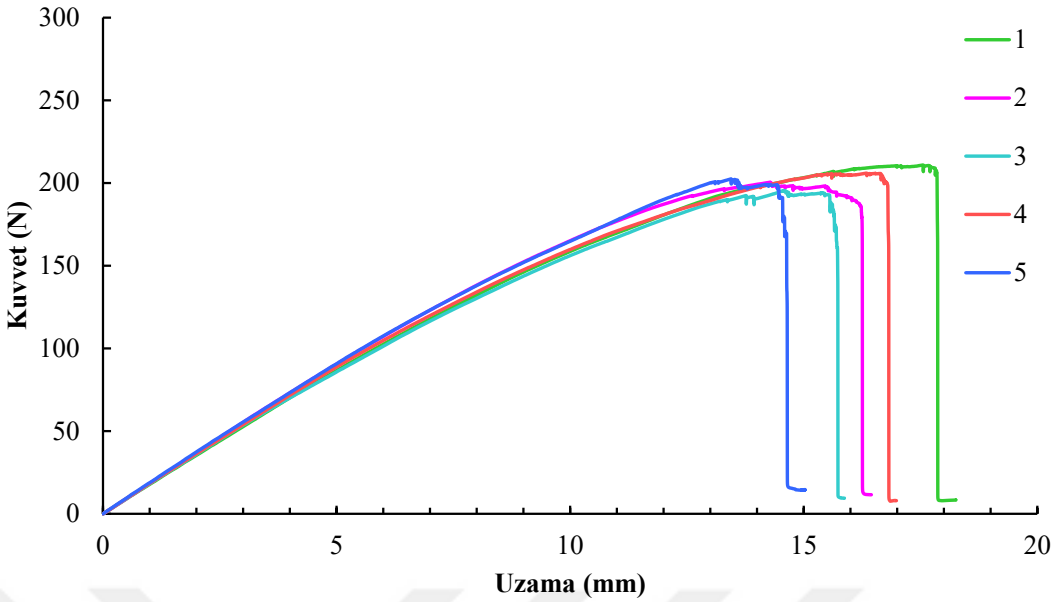
Şekil A.6 : CNT katkılı kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için dayanım-uzama grafiği**.**



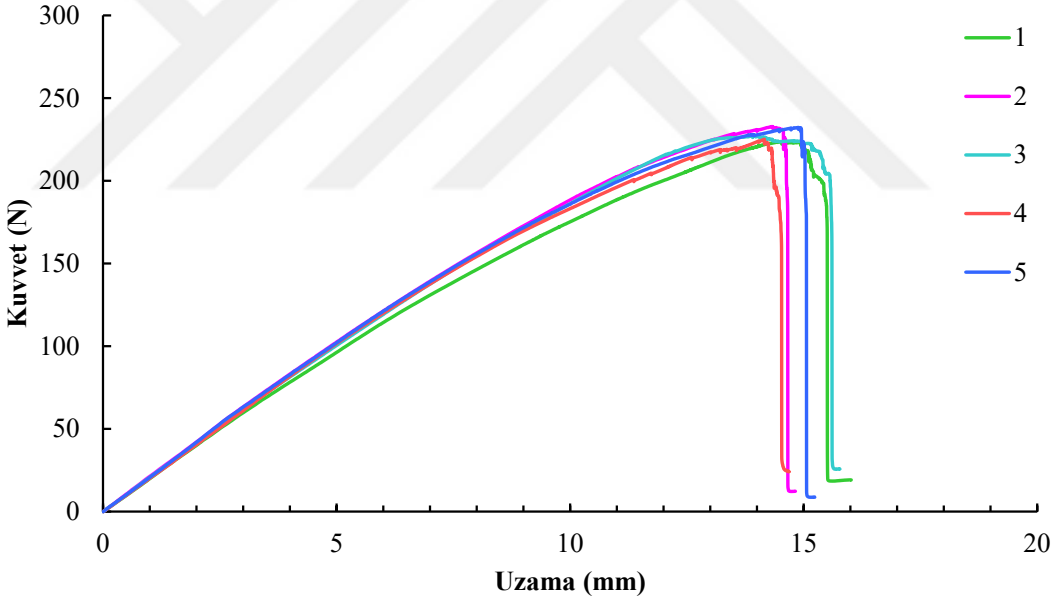
Şekil A.7 : Hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için dayanım-uzama grafiği**.**



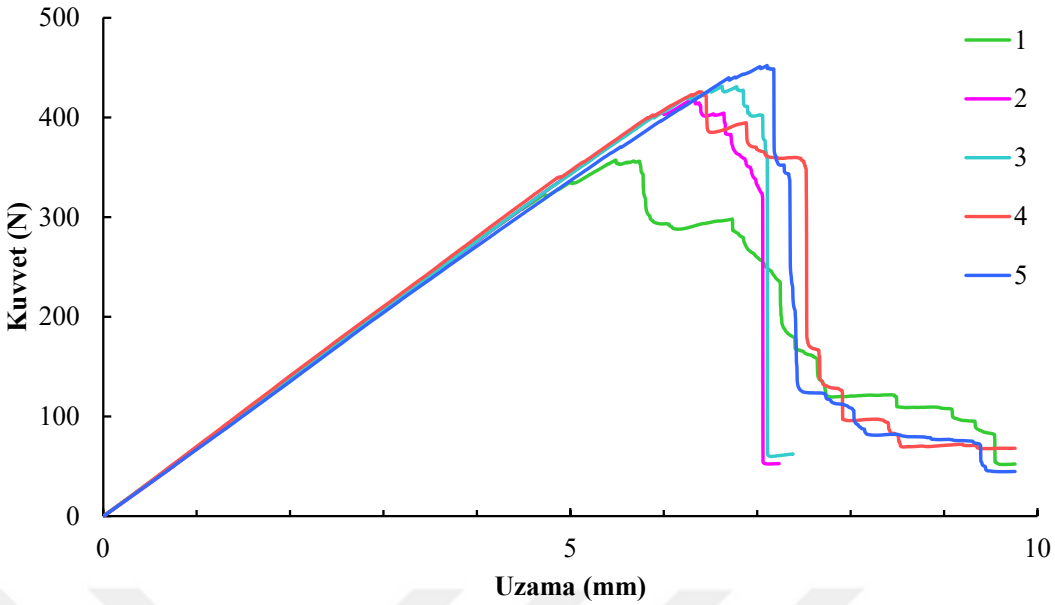
Şekil A.8 : CNT katkılı hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için dayanım-uzama grafiği**.**



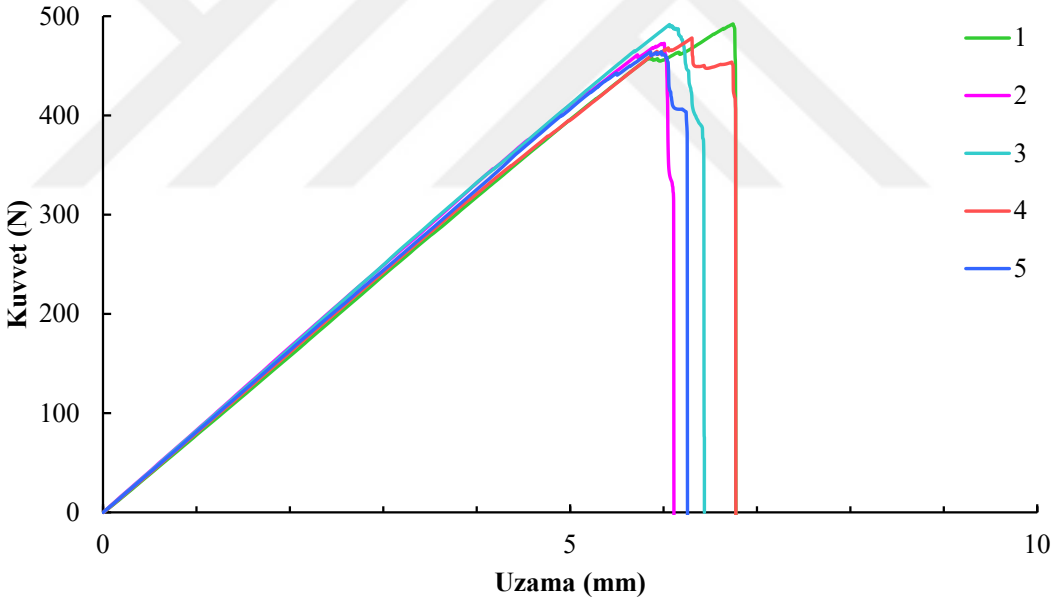
Şekil A.9 : Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-uzama grafiği**.**



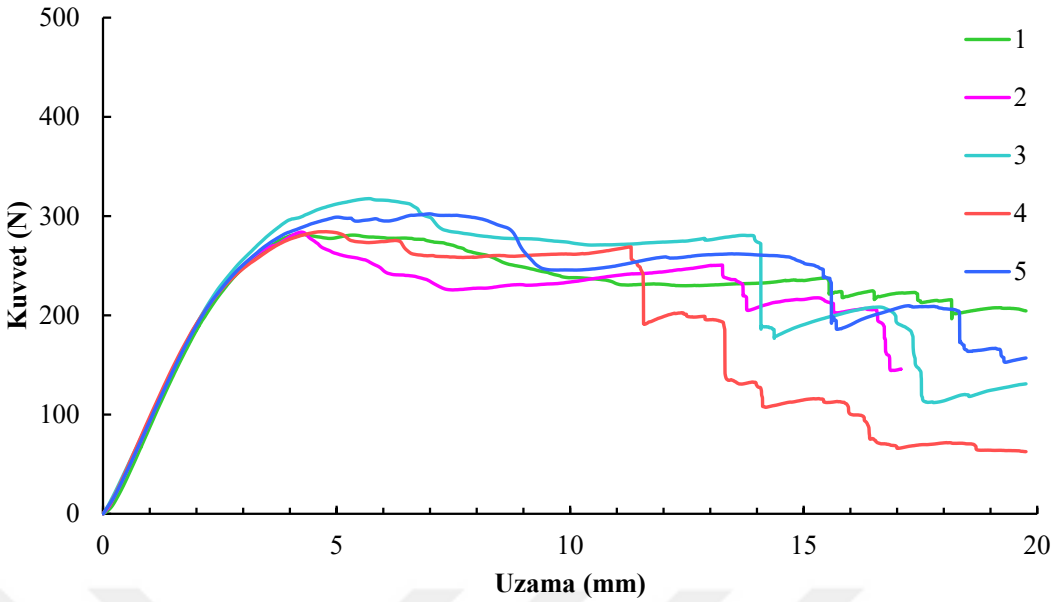
Şekil A.10 : CNT katkılı cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-uzama grafiği**.**



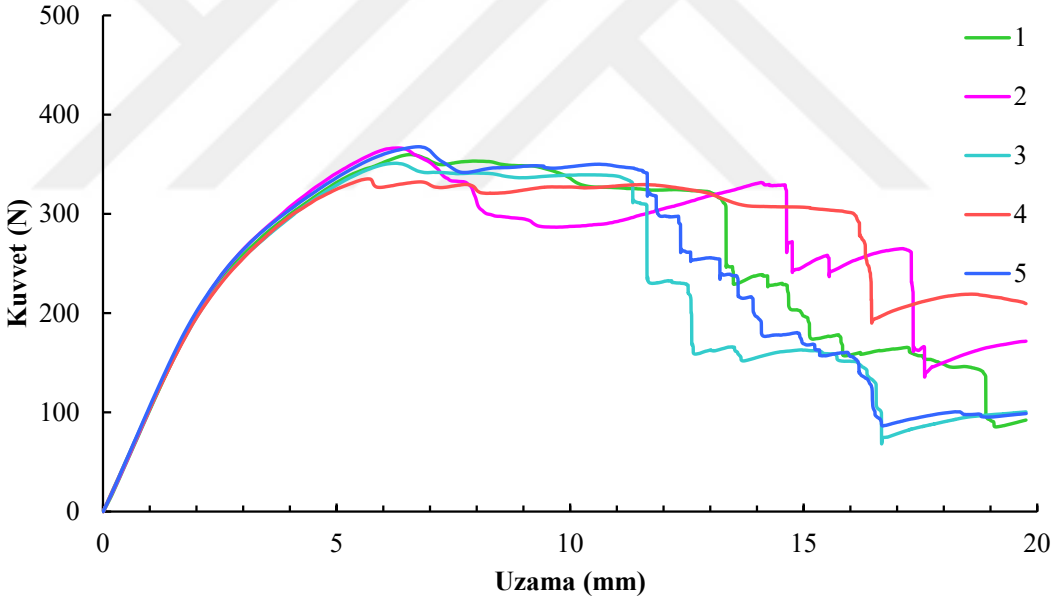
Şekil A.11 : Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-uzama grafiği**.**



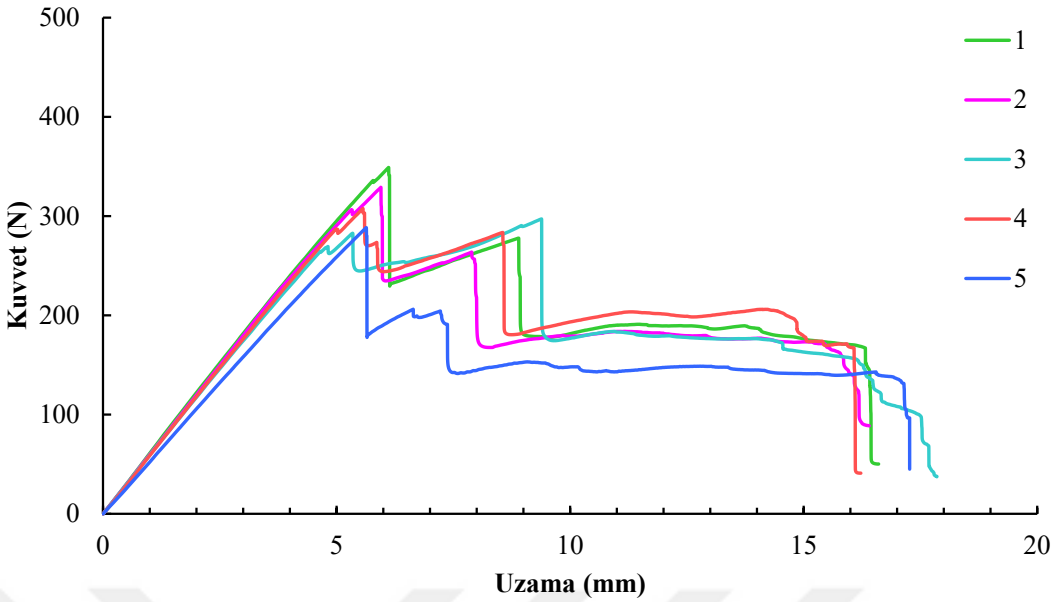
Şekil A.12 : CNT katkılı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-uzama grafiği**.**



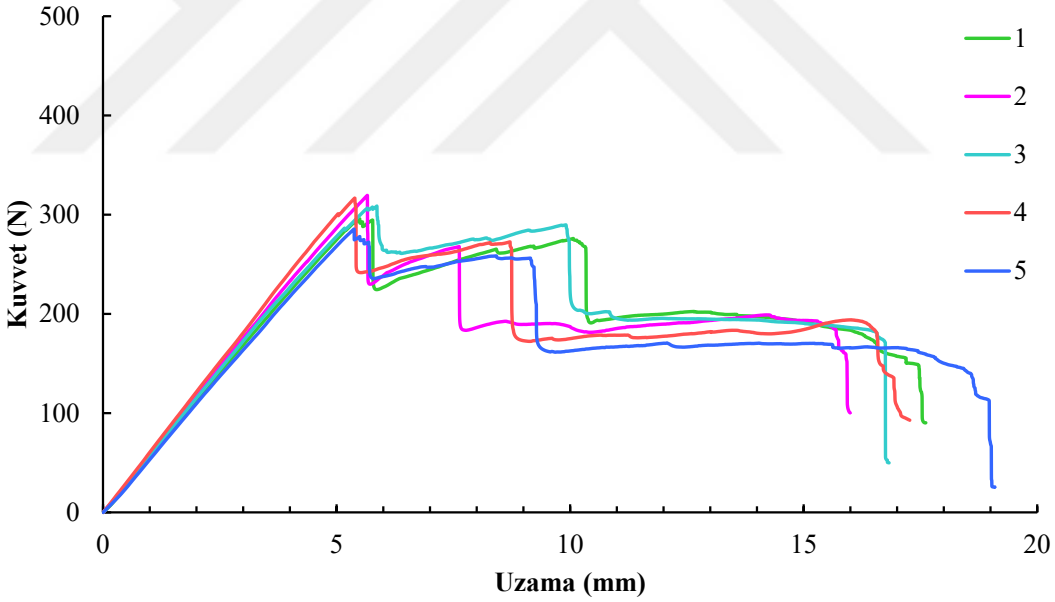
Şekil A.13 : Kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-uzama grafiği**.**



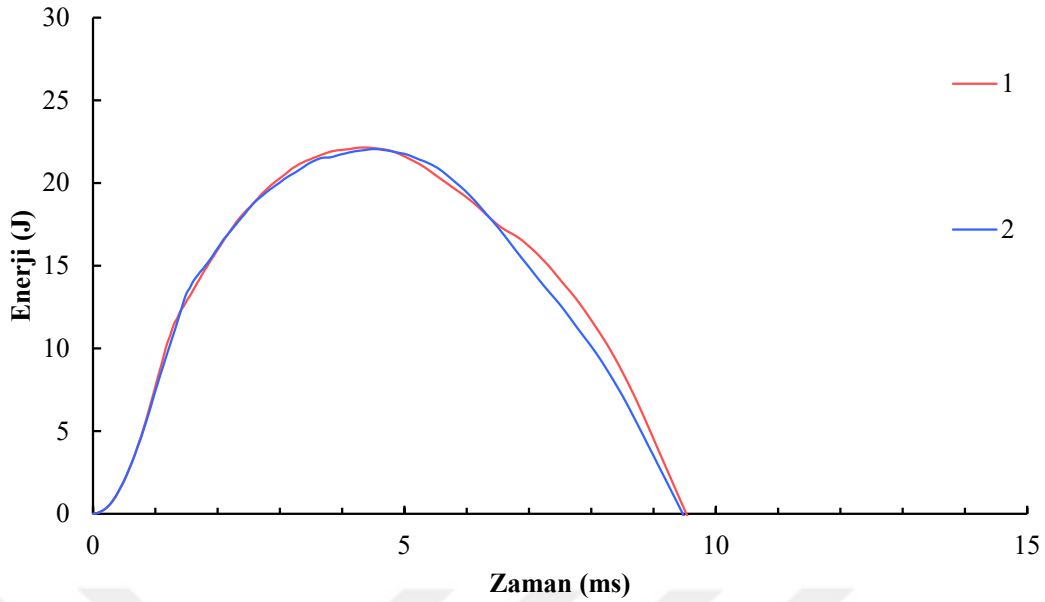
Şekil A.14 : CNT katkılı kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-uzama grafiği**.**



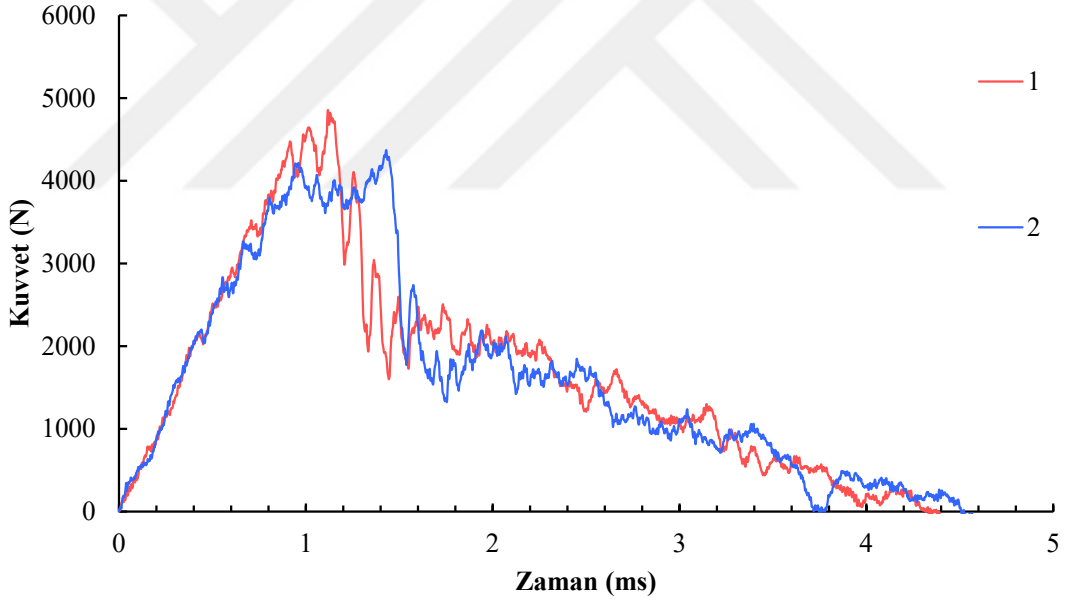
Şekil A.15 : Hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-uzama grafiği**.**



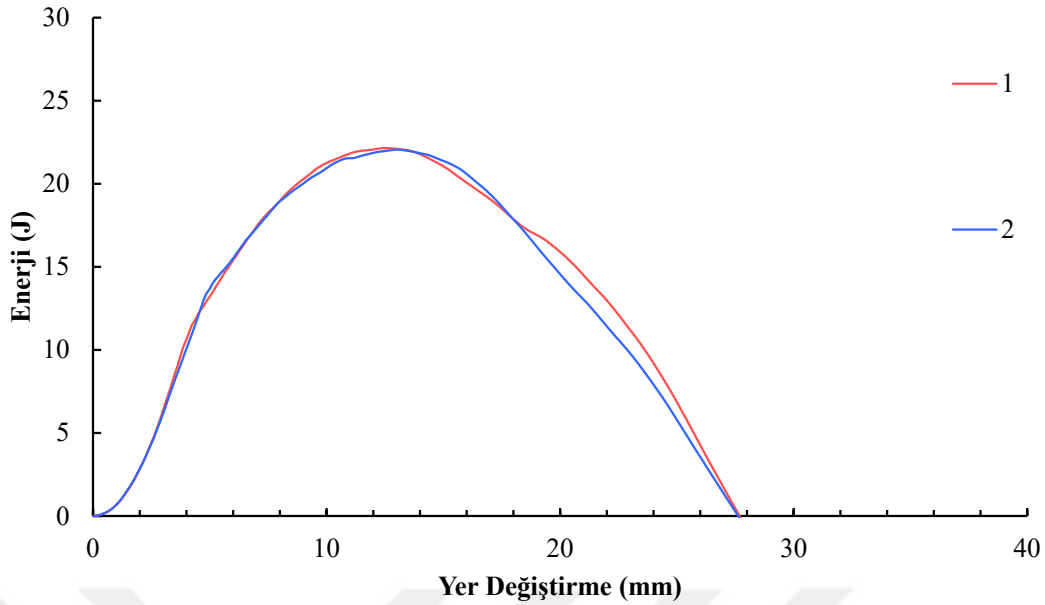
Şekil A.16 : CNT katkılı hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-uzama grafiği**.**



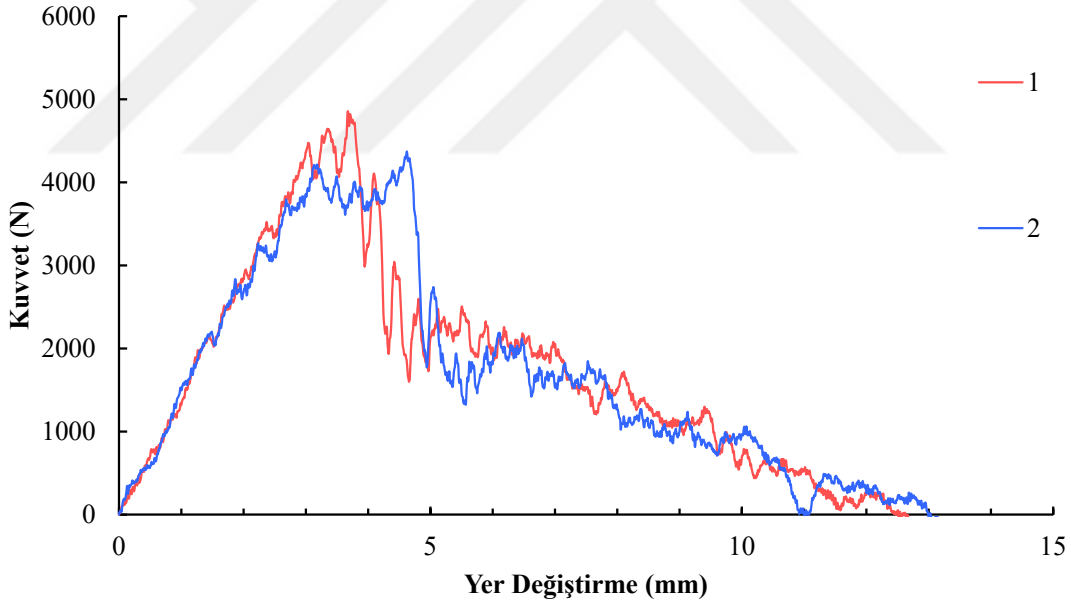
Şekil A.17 : Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-zaman grafiği**.**



Şekil A.18 : Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-zaman grafiği**.**

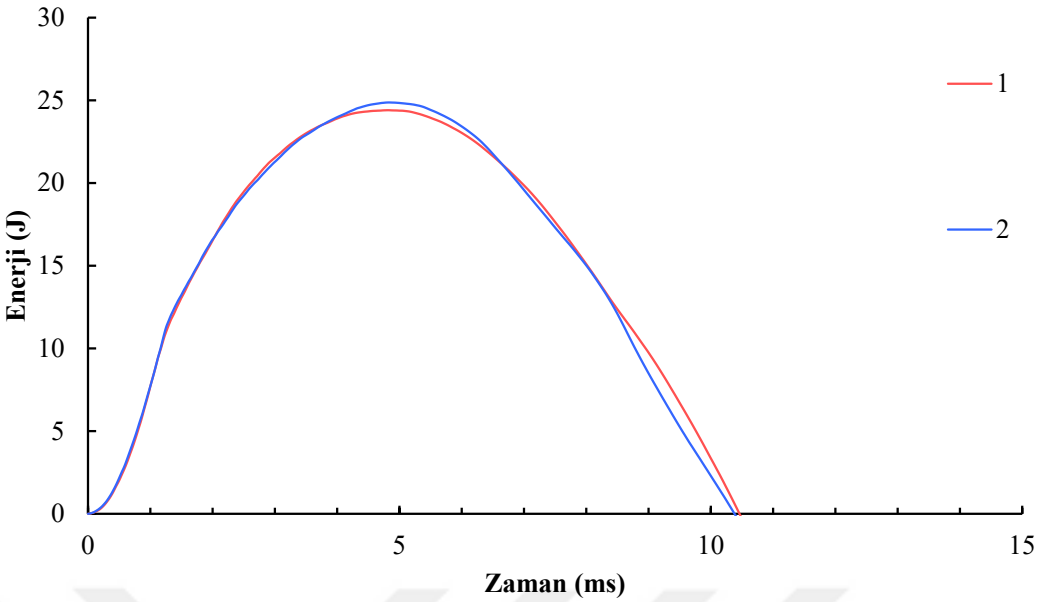


Şekil A.19 : Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-yer değiştirme grafiği**.**

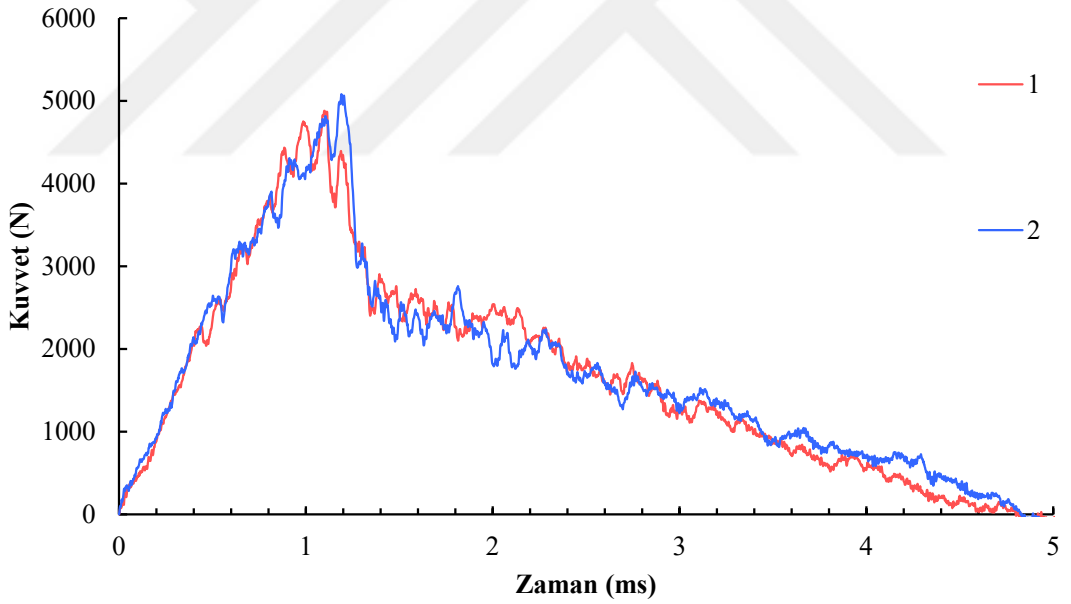


Şekil A.20 : Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-yer değiştirme grafiği**.**

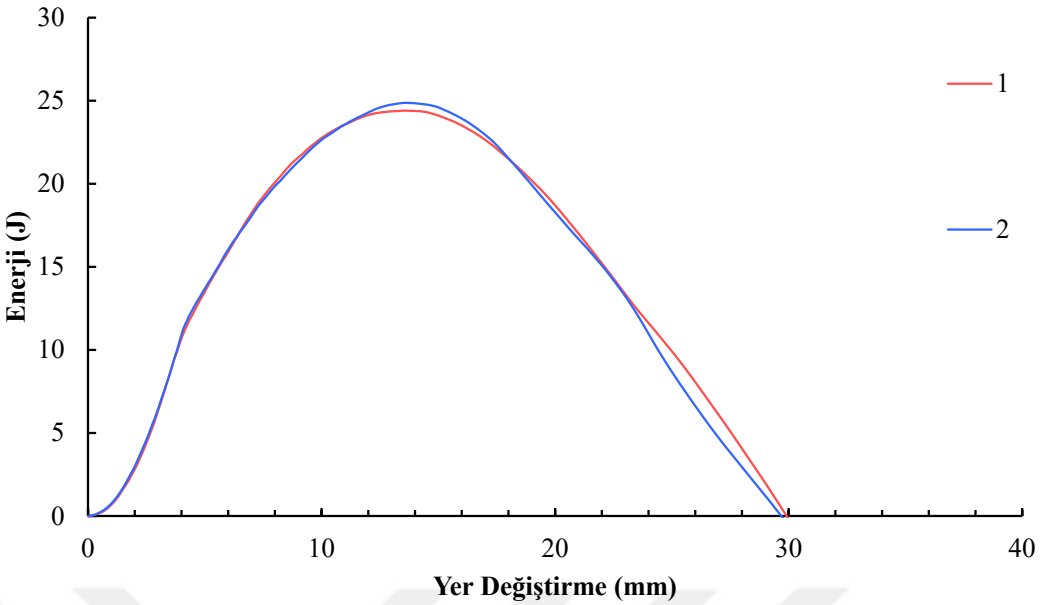
.



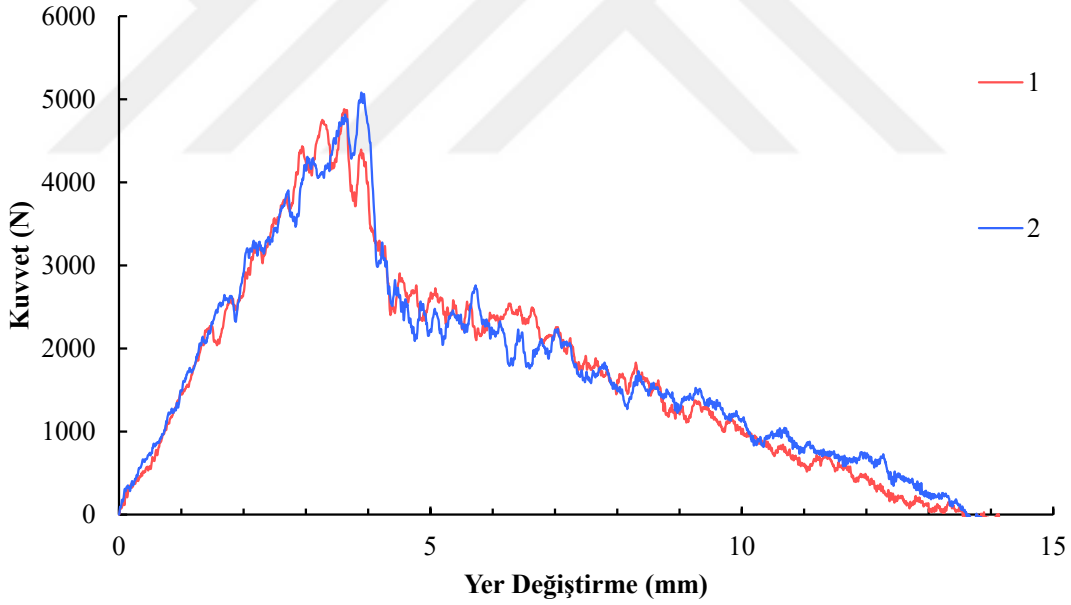
Şekil A.21 : CNT katkılı cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-zaman grafiği**.**



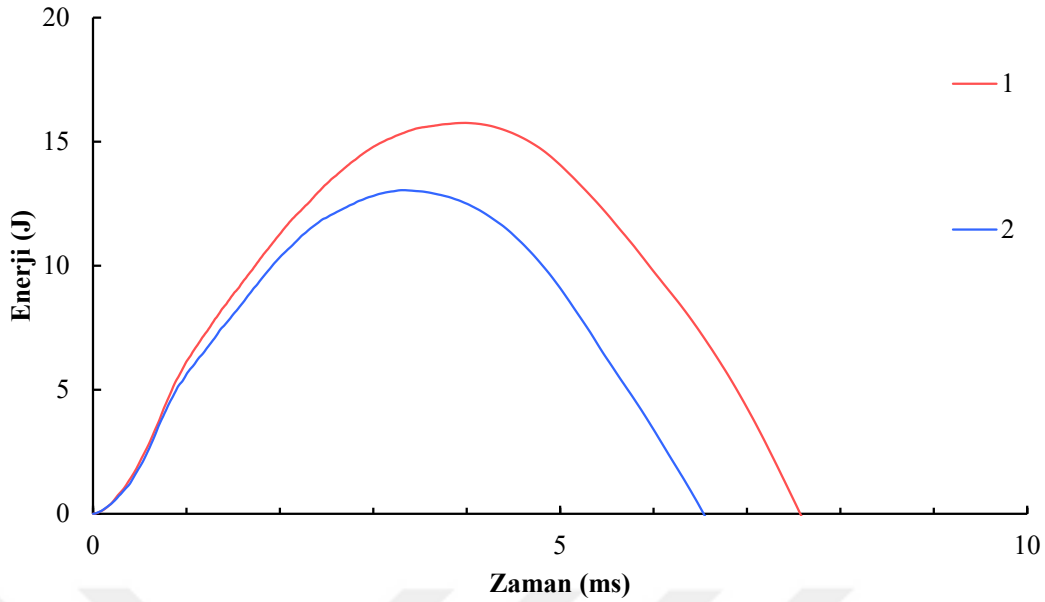
Şekil A.22 : CNT katkılı cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-zaman grafiği**.**



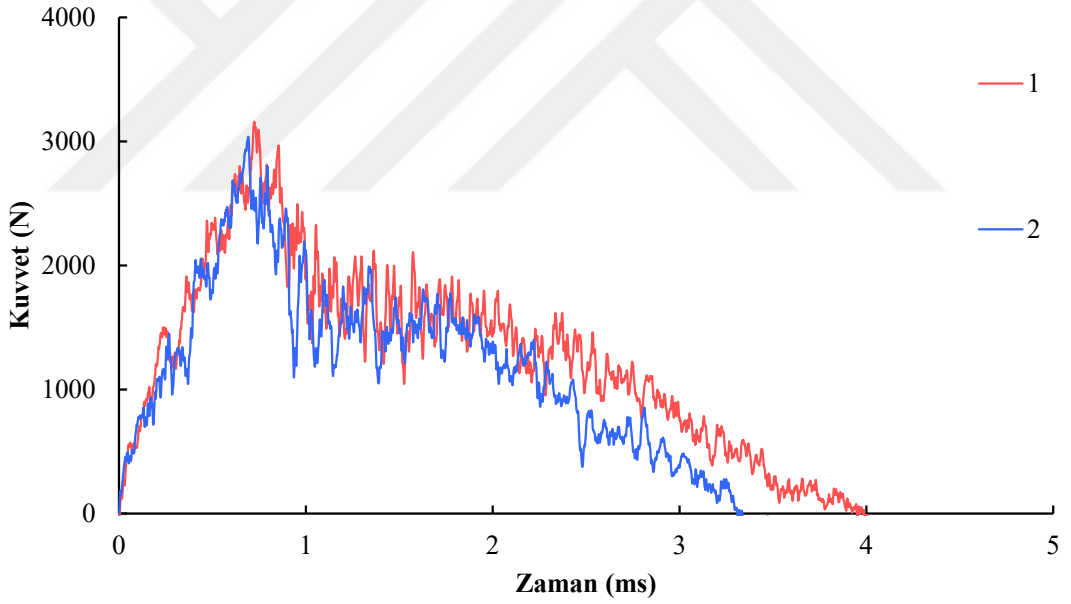
Şekil A.23 : CNT katkılı cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-yer değiştirme grafiği**.**



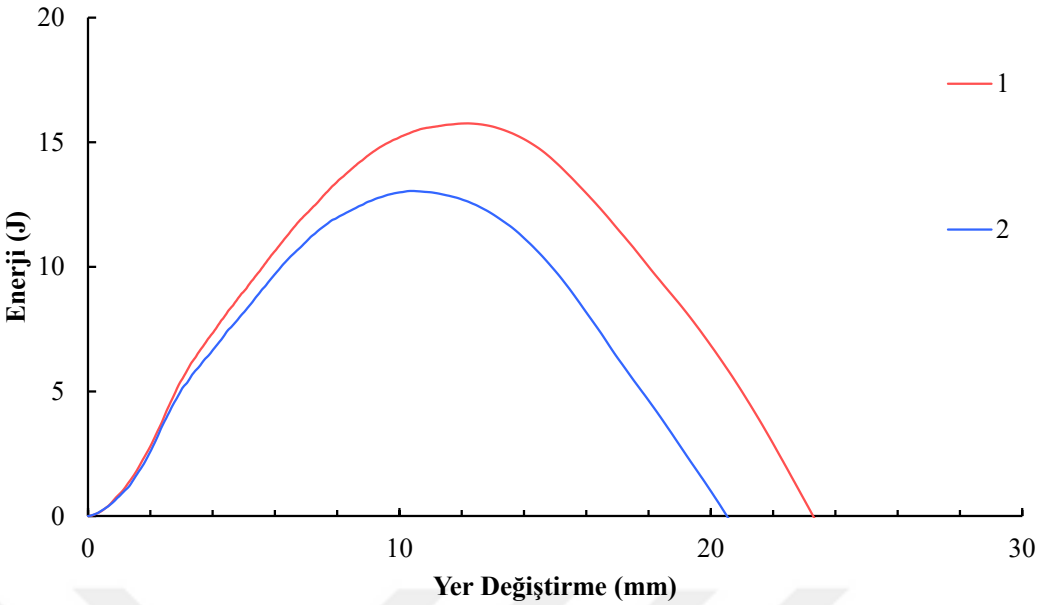
Şekil A.24 : CNT katkılı cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-yer değiştirme grafiği**.**



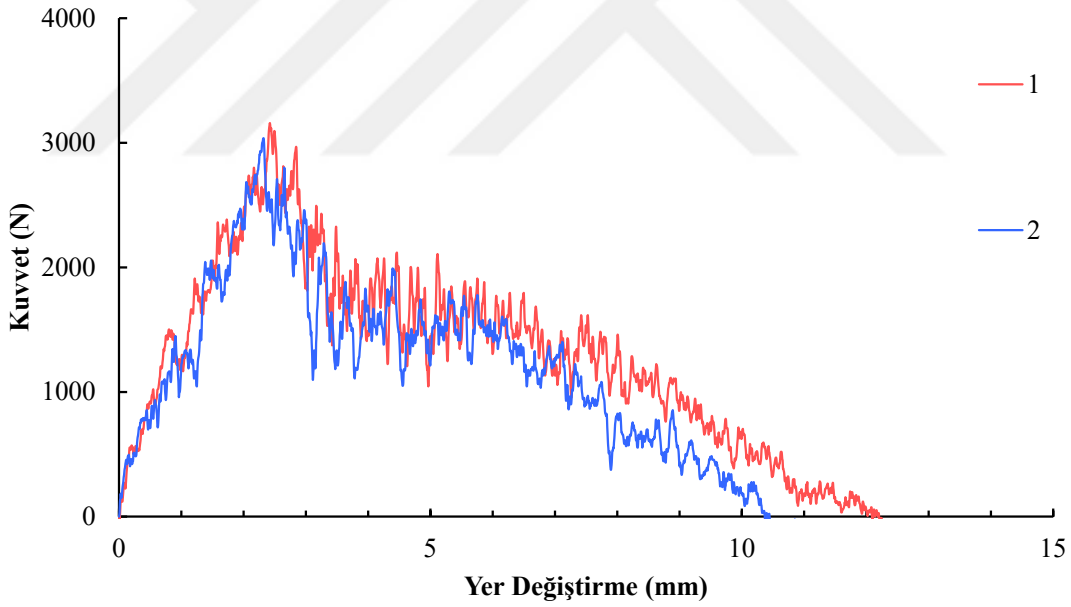
Şekil A.25 : Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-zaman grafiği.



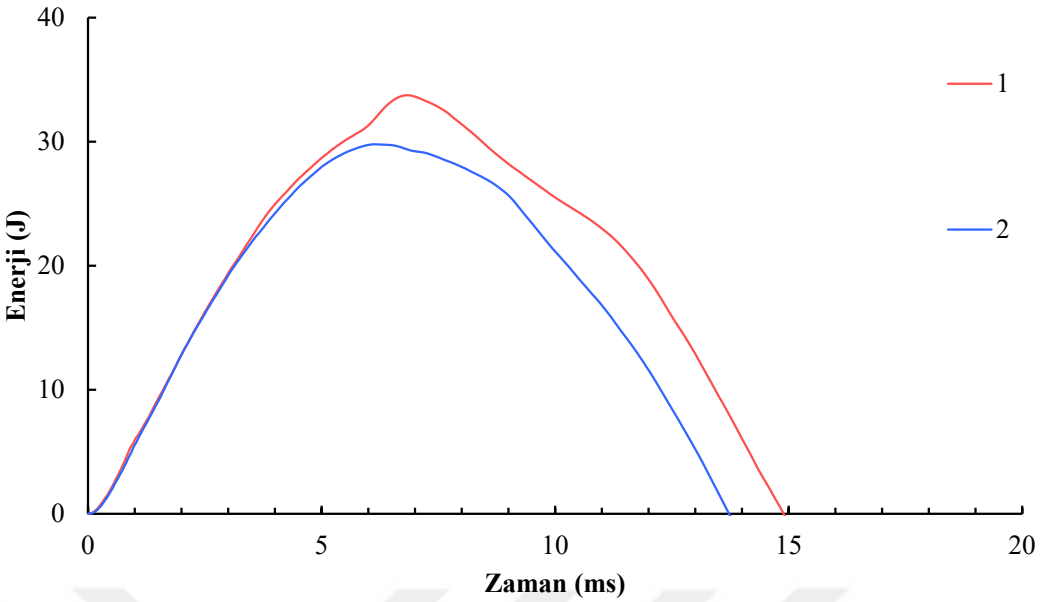
Şekil A.26 : Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-zaman grafiği**.**



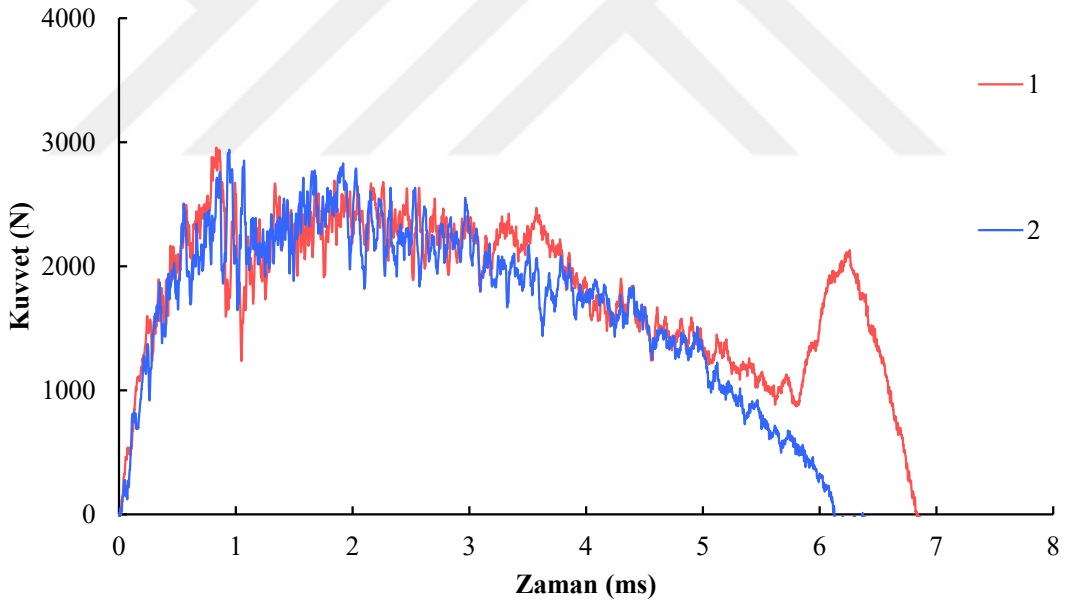
Şekil A.27 : Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-yer değiştirme grafiği**.**



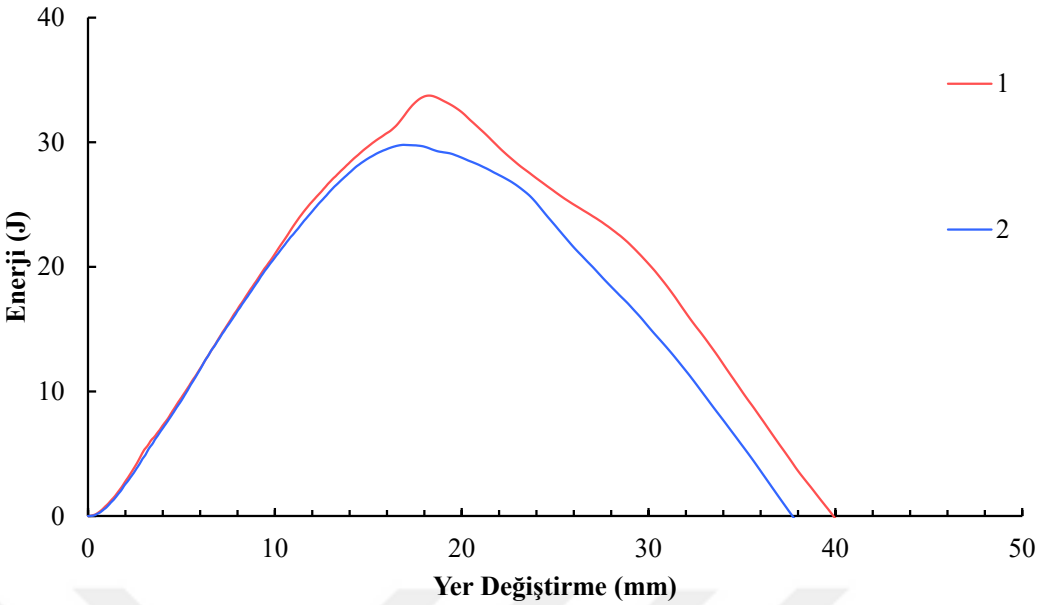
Şekil A.28 : Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-yer değiştirme grafiği**.**



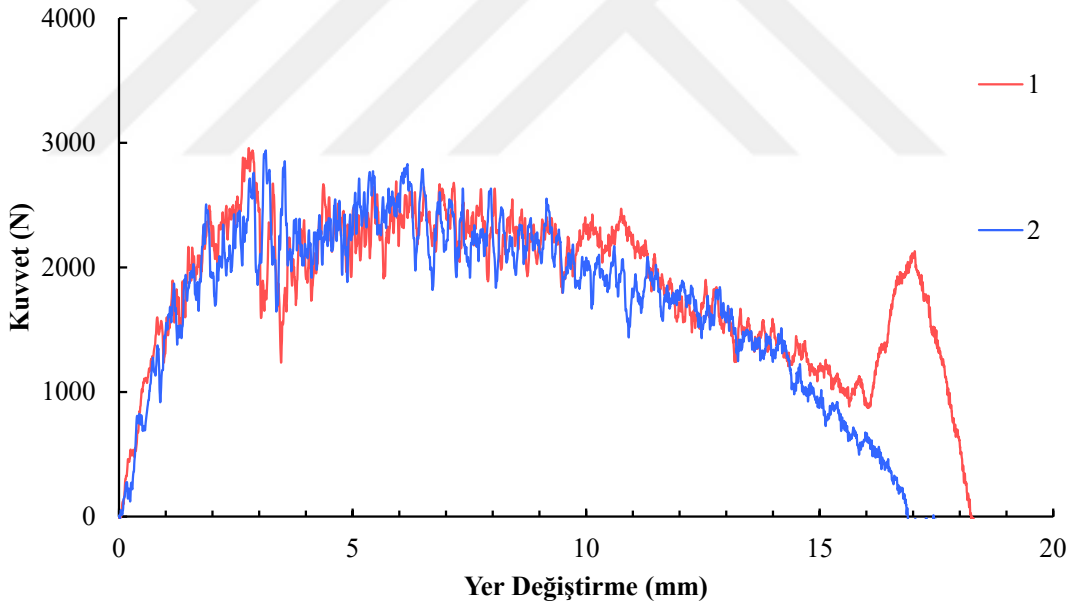
Şekil A.29 : CNT katkılı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-zaman grafiği**.**



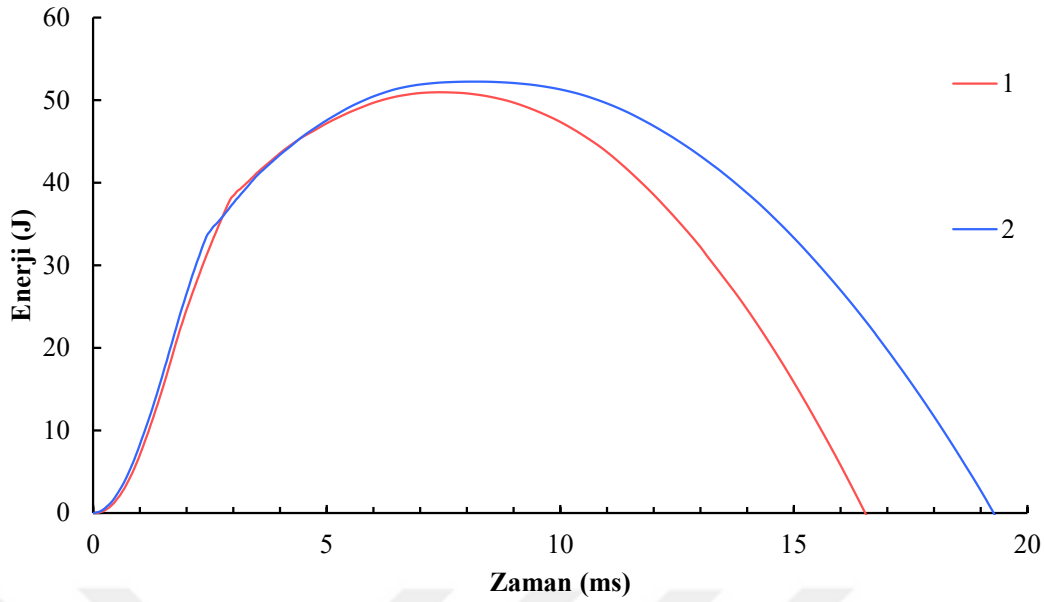
Şekil A.30 : CNT katkılı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-zaman grafiği**.**



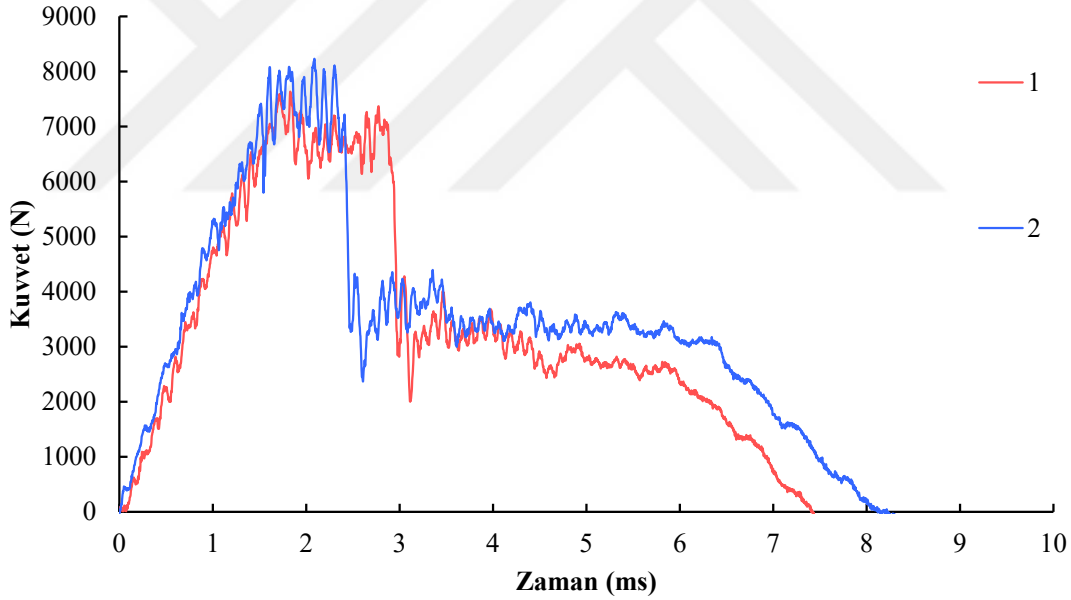
Şekil A.31 : CNT katkılı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-yer değiştirme grafiği**.**



Şekil A.32 : CNT katkılı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-yer değiştirme grafiği**.**

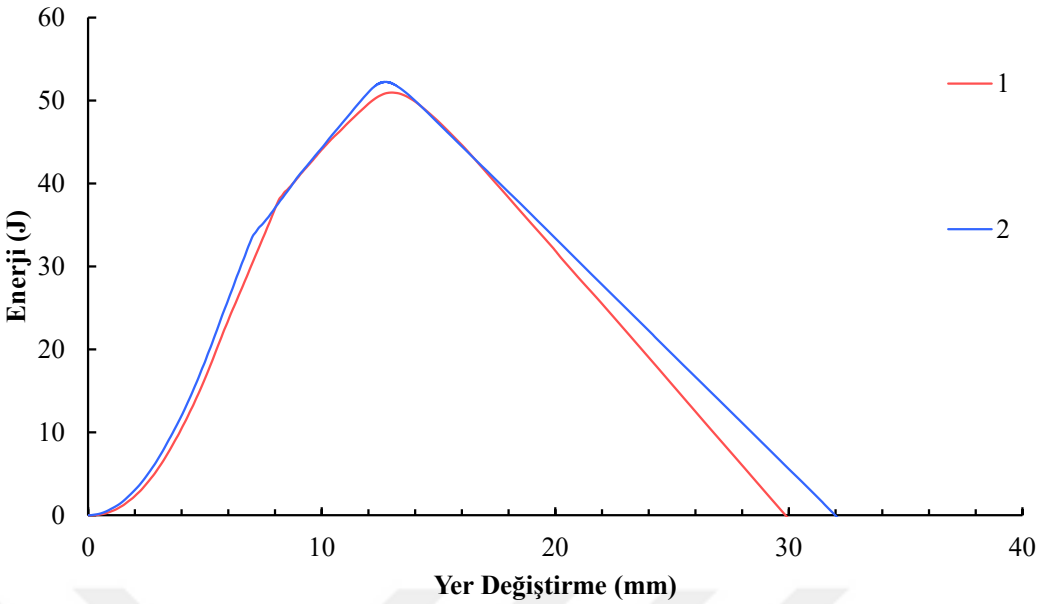


Şekil A.33 : Kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-zaman grafiği**.**

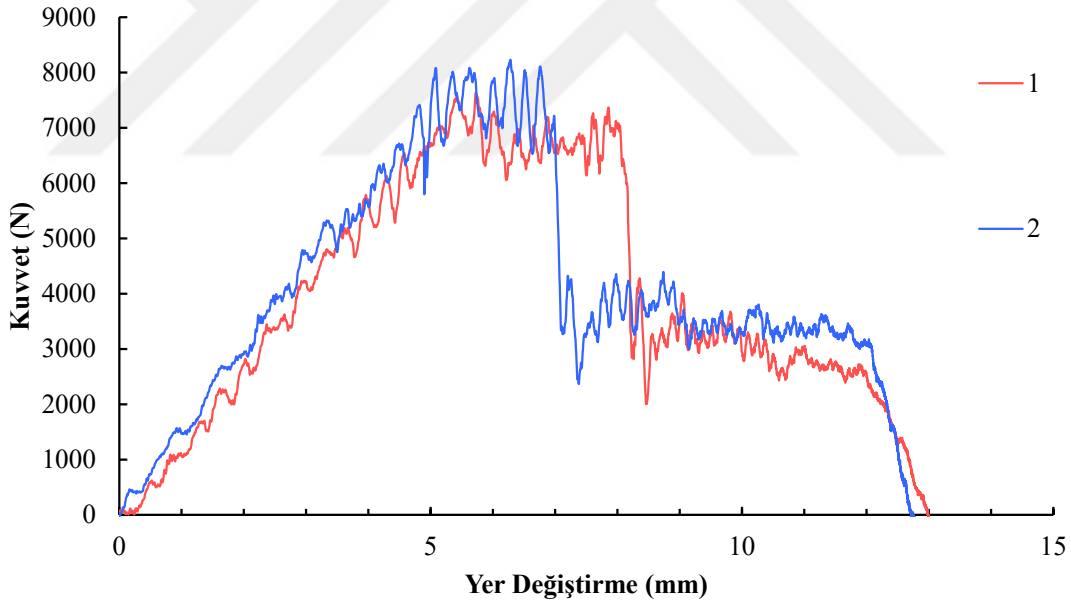


Şekil A.34 : Kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-zaman grafiği**.**

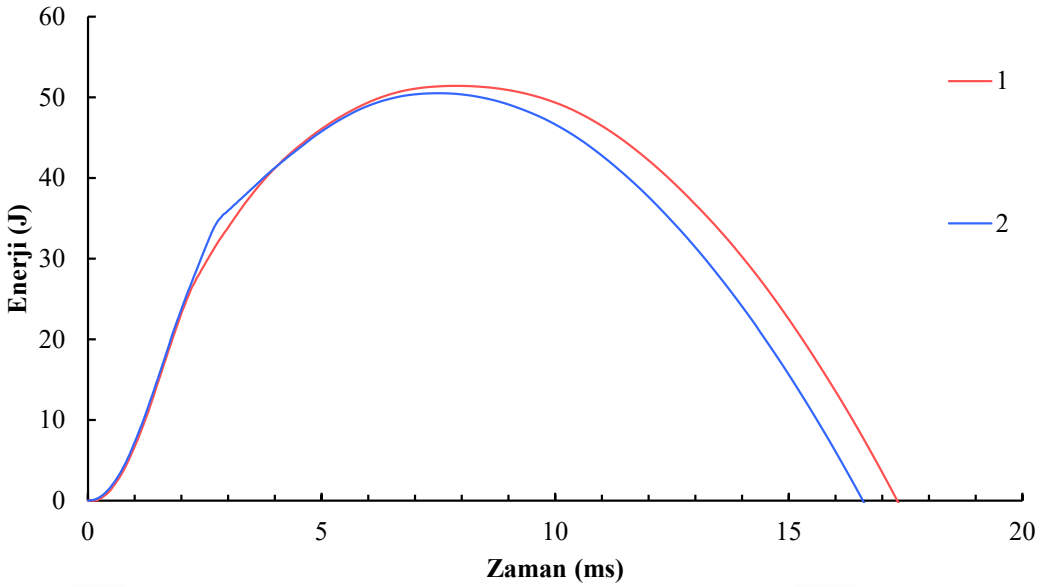
.



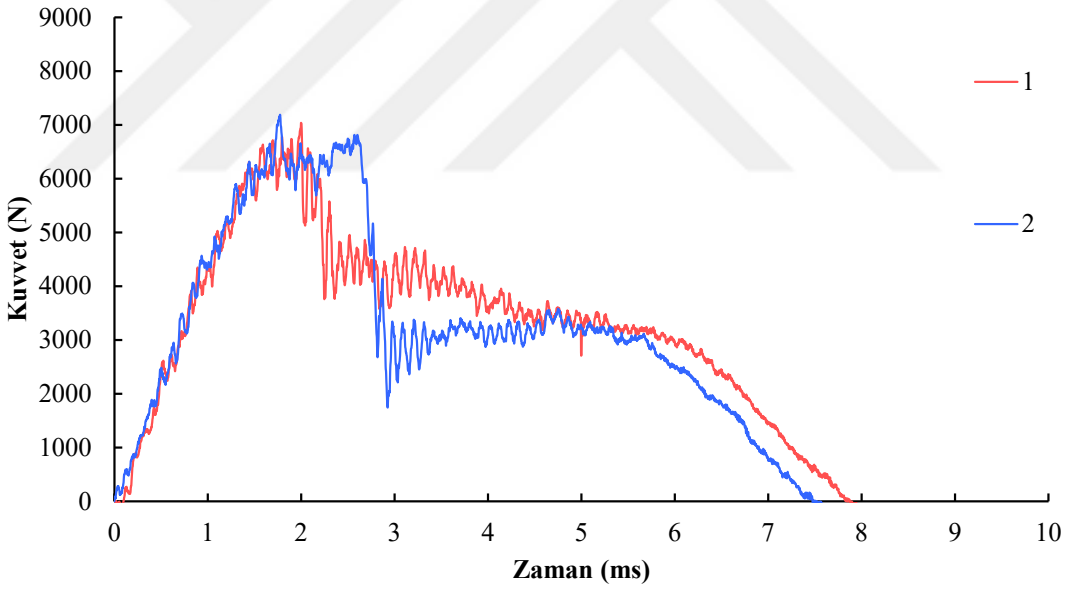
Şekil A.35 : Kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-yer değiştirme grafiği**.**



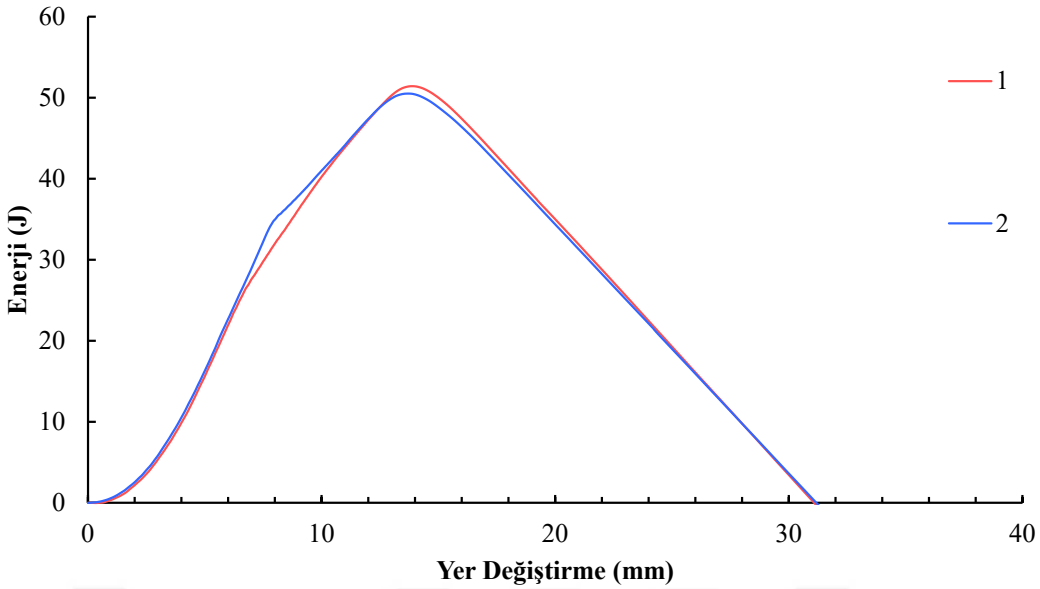
Şekil A.36 : Kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-yer değiştirme grafiği**.**



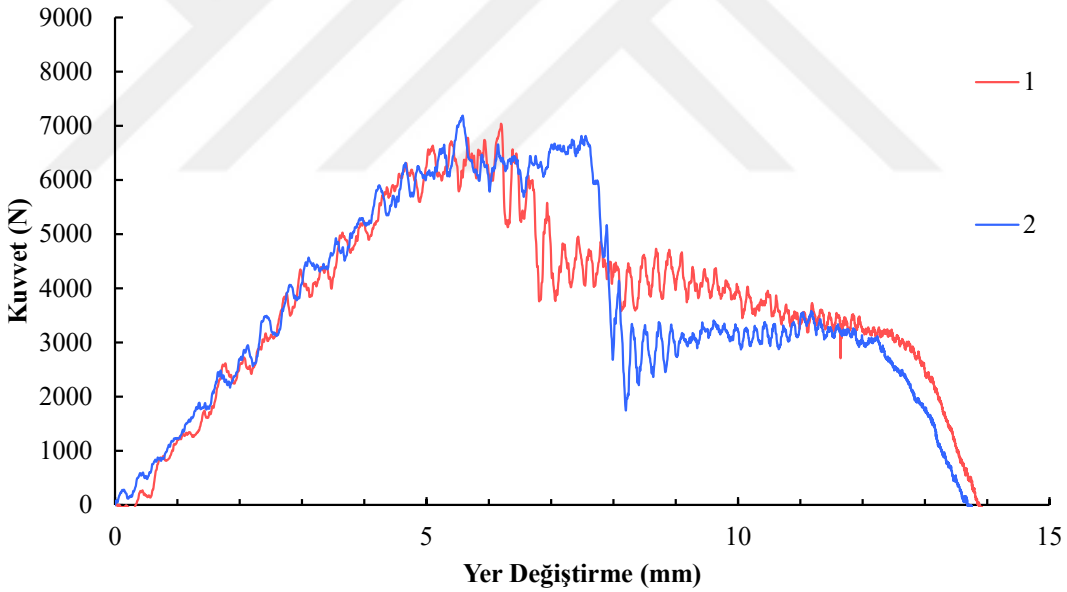
Şekil A.37 : CNT katkılı kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-zaman grafiği**.**



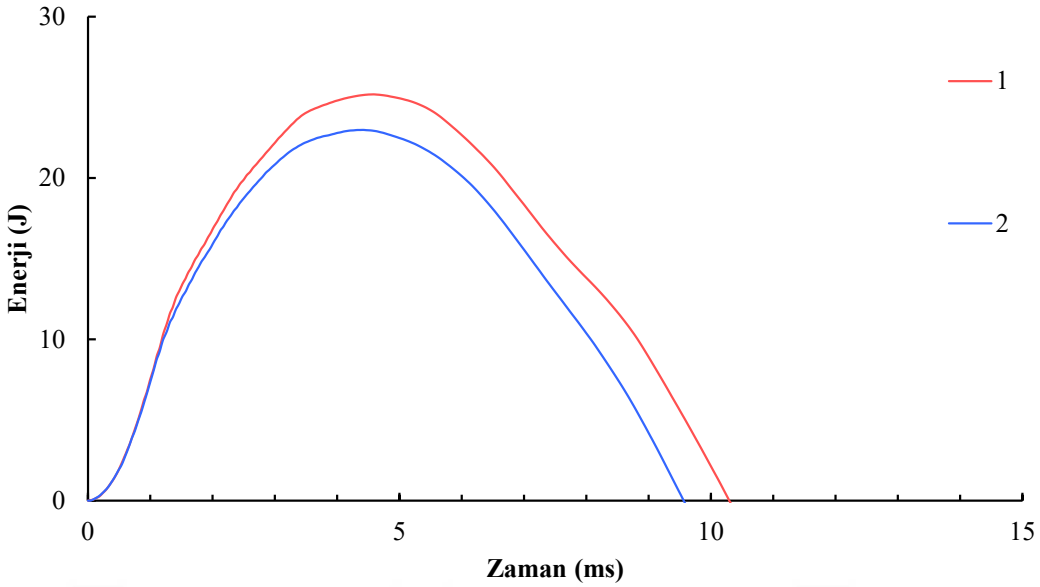
Şekil A.38 : CNT katkılı kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-zaman grafiği**.**



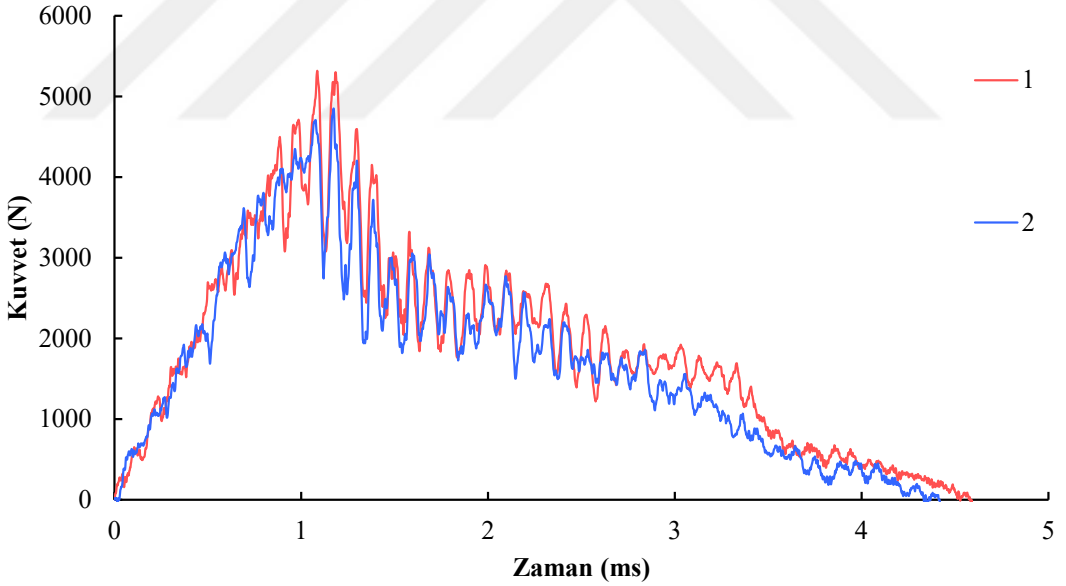
Şekil A.39 : CNT katkılı kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-yer değiştirme grafiği**.**



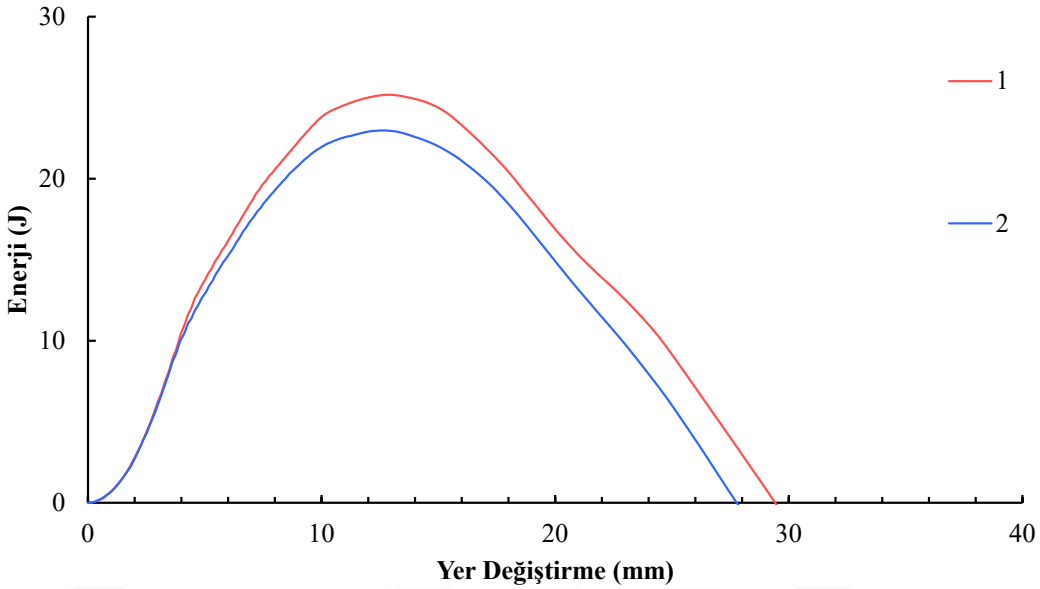
Şekil A.40 : CNT katkılı kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet yer değiştirme grafiği**.**



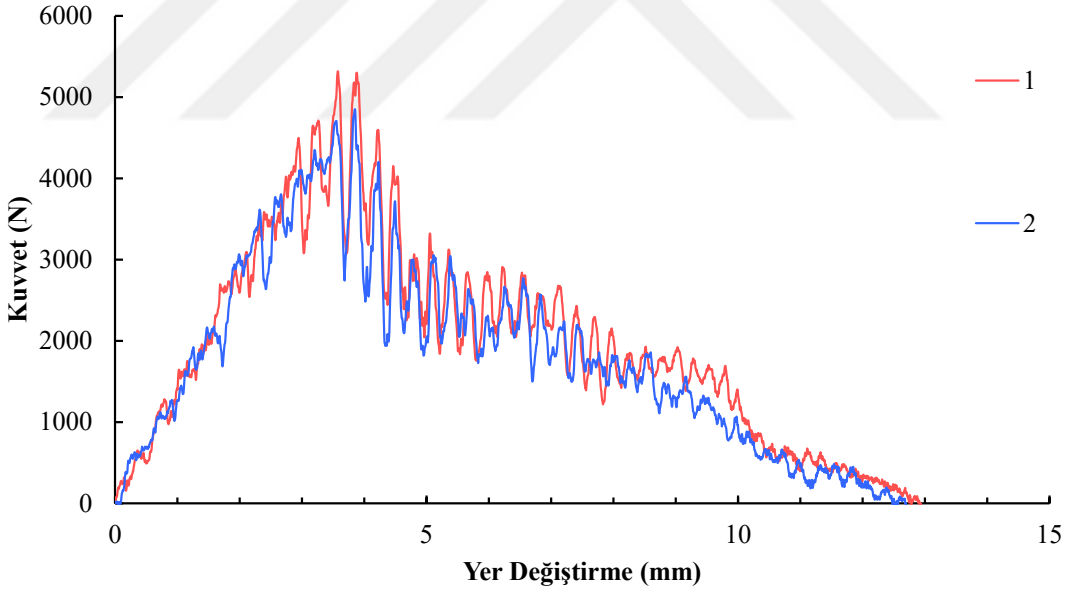
Şekil A.41 : Hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-zaman grafiği**.**



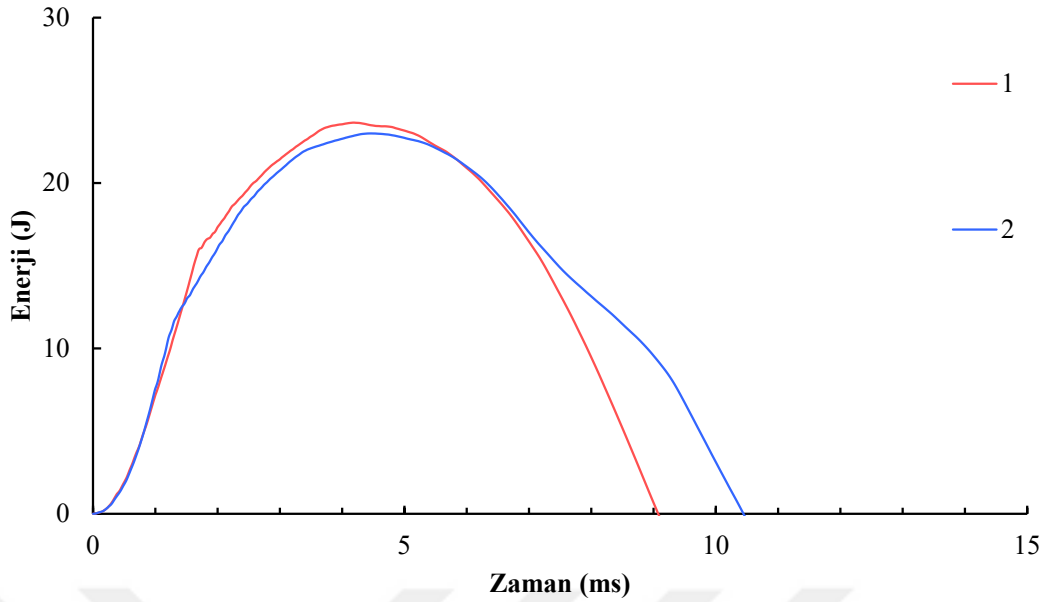
Şekil A.42 : Hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-zaman grafiği**.**



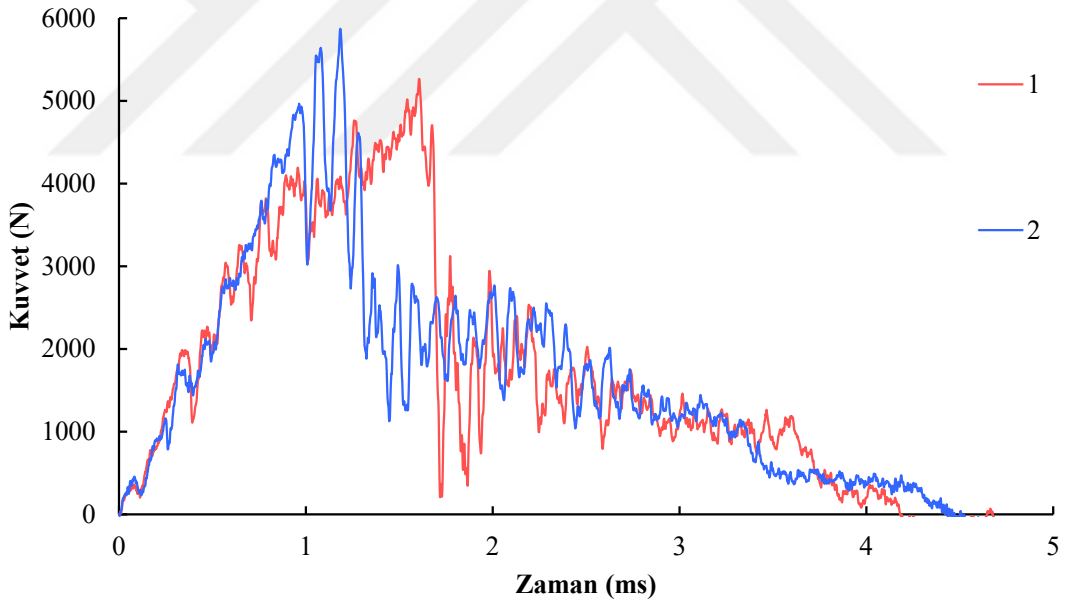
Şekil A.43 : Hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-yer değiştirme grafiği**.**



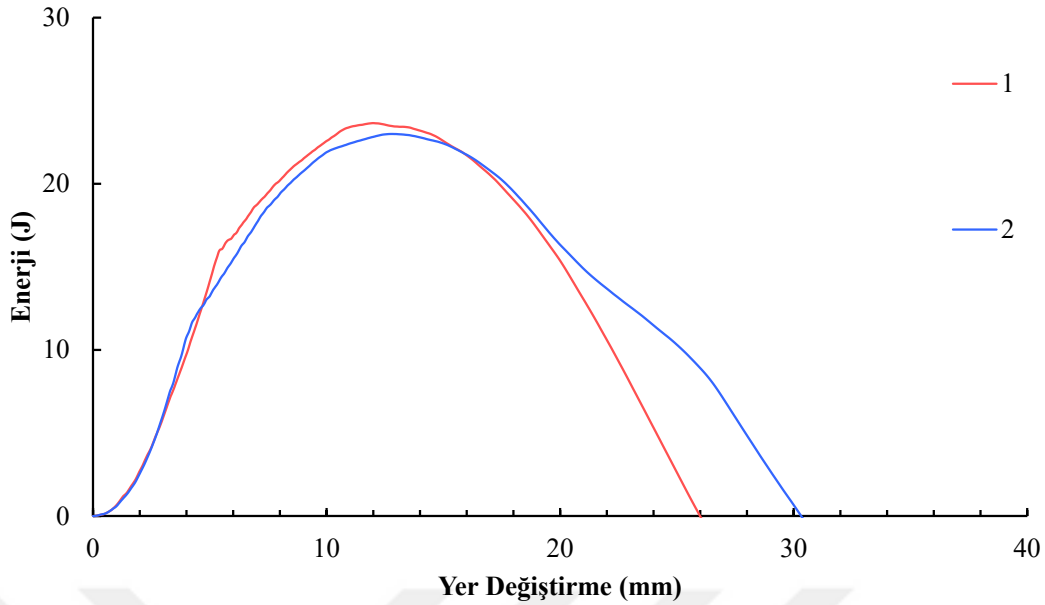
Şekil A.44 : Hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-yer değiştirme grafiği**.**



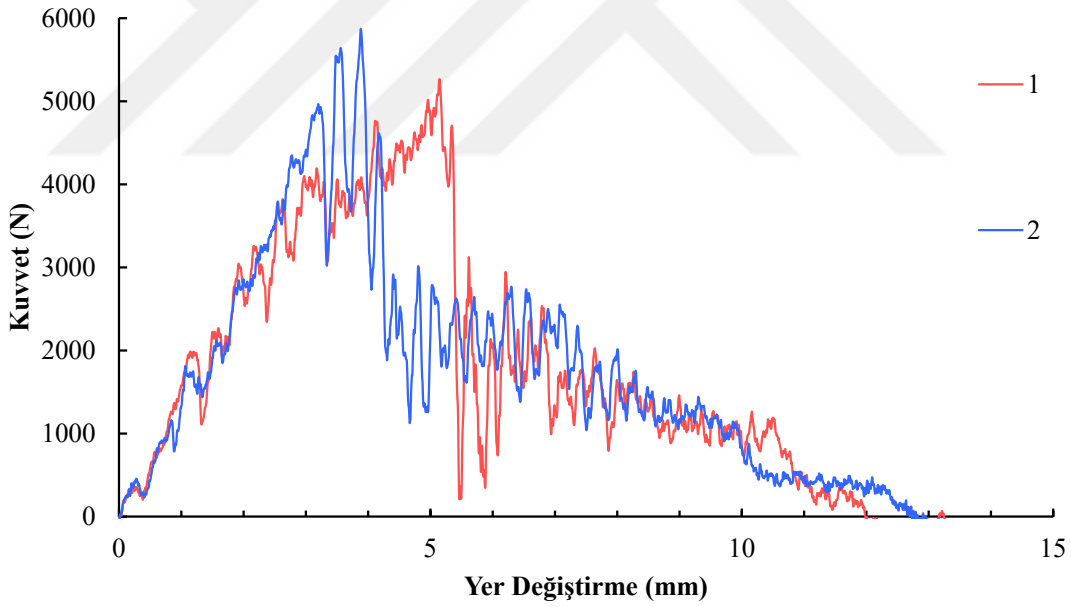
Şekil A.45 : CNT katkılı hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-zaman grafiği**.**



Şekil A.46 : CNT katkılı hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-zaman grafiği**.**



Şekil A.47 : CNT katkılı hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için enerji-yer değiştirme grafiği**.**



Şekil A.48 : CNT katkılı hibrit yapılı elyaf takviyeli kompozit malzemeler için kuvvet-yer değiştirme grafiği**.**

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad **: ERDEM FERİK**

Doğum Tarihi ve Yeri **: 27.02.1994 BURSA**

E-posta **: erdemferik@gmail.com**

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2017, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı
- **Yüksek Lisans** **:** 2021, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı