

**NANO KATKILI KOMPOZİTLERDE DÜŞÜK HIZLI DARBE
DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI**

ESRA ALTUNDAL

HAZİRAN 2025

DİYARBAKIR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NANO KATKILI KOMPOZİTLERDE DÜŞÜK HIZLI DARBE
DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI**

ESRA ALTUNDAL

DİCLE ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM-ÖĞRETİM VE SINAV
YÖNETMELİĞİNİN BİR PARÇASI OLARAK
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALINDA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
OLARAK HAZIRLANMIŞTIR

HAZİRAN 2025

DIYARBAKIR

NANO KATKILI KOMPOZİTLERDE DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI

Esra ALTUNDAL tarafından Dicle Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin bir parçası olarak hazırlanan bu çalışma, aşağıda bilgileri yazılı jüri üyeleri tarafından değerlendirilerek **Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı**'nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ
Müdür, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Doç. Dr. Gurbet ÖRÇEN
Danışman, **Makine Mühendisliği Bölümü,**
Dicle Üniversitesi

Sınav Jürisi:

Prof. Dr. Onur Mete KAMAN (*)
Makine Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi

Doç. Dr. Gurbet ÖRÇEN (**)
Makine Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

Prof. Dr. Kadir TURAN
Makine Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

ONAY

Savunma Tarihi: 12 / 06 /2025

(*) Jüri Başkanı.

(**) Tez Danışmanı.

Anneme...





Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tez çalışmasında yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bahse konu bu kural ve ilkelerin gerektirdiği üzere, bu çalışmada özgün olmayan tüm bilimsel içerikleri kurallara uygun biçimde alıntılıyıp kaynak gösterdiğimi beyan ederim. Beyanımınla çelişen herhangi bir delil bulunduğu takdirde tüm sorumluluğu üstleneceğimi kabul ederim.

Ad, Soyad: Esra ALTUNDAL

İmza:

TEŞEKKÜR

Öncelikle, danışmanım Doç. Dr. Gurbet ÖRÇEN'e; çalışmanın fikir aşamasından başlayarak ders süreci, deney setlerinin oluşturulması, makale ve analizlerin yorumlanması ile tez taslağındaki düzeltmeler konusunda gösterdiği destek, ilgi ve sabırdan dolayı en içten teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans ders hocam ve bölüm başkanımız Prof. Dr. Sedat BİNGÖL'e, derslerde aktardığı değerli bilgiler için teşekkür ederim. Ayrıca, değerli jüri üyelerime, bu tezin daha nitelikli bir hale gelmesine katkı sağlayan yapıcı eleştiri ve önerileri için teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tezin her aşamasındaki yardımları ve yol göstericiliği için değerli arkadaşım Yük. Mak. Müh. Akile YILMAZ'a şükranlarımı sunarım. Analizlerin yorumlanması ve çizim aşamalarında sağladığı destek için Elektrik-Elektronik Mühendisi Mehmet SEZER'e teşekkür ederim. Laboratuvarında ve tez sınavım öncesinde desteğini esirgemeyen Dr. Mak. Müh. Ahmet Murat AŞAN'a; tezin son hâlini okuyup düzeltmeler konusunda önerilerde bulunan, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizikokimya Doktora Programı öğrencisi kız kardeşim Zeynep ALTUNDAL'a; Kâtip Çelebi Ortaokulu'nda müdür yardımcısı olarak görev yapan abim Şuayb ALTUNDAL'a; tez aşamasında desteklerini esirgemeyen Diyarbakır İl Sağlık Müdürlüğü Destek Hizmetleri Başkan Yardımcılarım Melahat ERDEMİR'e ve Muhtesim ÖĞER'e; ayrıca destekleriyle motivasyon sağlayan değerli oda ve iş arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca, yaşamıma değer katan sevgili arkadaşlarım Av. Remzi PAKSOY ve Op. Dr. Murat YELKEN'e saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunmak isterim.

En önemlisi, beni destekleyip bana inandıkları için annem Emetullah ALTUNDAL, kardeşlerim Musa ALTUNDAL ve Yunus ALTUNDAL'a çok teşekkür ederim.

Varlıklarını yanımda hep hissettiğim ailemizin iki değerli üyesine saygı ve hürmetle...

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	2
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	37
3.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	37
3.1.1 Matris malzemesine göre sınıflandırılması.....	38
3.1.2 Takviye malzemesine göre sınıflandırılması.....	40
3.2 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	44
3.2.1 Elle yatırma yöntemi	44
3.2.2 Püskürtme yöntemi	45
3.2.3 Sıcak presleme yöntemi	45
3.2.4 Pultrüzyon yöntemi	46
3.2.5 Enjeksiyon kalıplama yöntemi.....	47
3.2.6 Flament sarma yöntemi	47
3.2.7 Reçine transfer kalıplama yöntemi.....	48
3.2.8 Vakum torbalama tekniği yöntemi.....	49
3.2.9 Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi	49
4. NANOKOMPOZİT MALZEMELER	51

4.1	Nanokompozitlerin Avantajları.....	51
4.2	Nanokompozitlerin Sınıflandırılması.....	52
4.2.1	Uygulama alanlarına göre sınıflandırma.....	52
4.2.2	Matris Fazının Türüne Göre.....	53
4.2.3	Takviye Edici Fazın Geometrisine Göre.....	54
4.2.4	Matris-Takviye Etkileşimine Göre.....	54
4.3	Nanomalzemelerde Katkı Malzemeleri.....	55
4.3.1	Nanokil.....	55
4.3.2	Bor karbür.....	55
5.	DARBENİN TANIMI.....	57
5.1	Sarkaç Darbe Testleri.....	57
5.1.1	Charpy testi.....	58
5.1.2	İzod testi.....	58
5.2	Düşen Ağırlık Testleri.....	60
5.3	Düşük Hızlı Darbe Sonrası Oluşan Hasar Türleri.....	60
5.3.1	Matris çatlağı.....	61
5.3.2	Delaminasyon.....	61
5.3.3	Fiber kırılması.....	62
5.3.4	Penetrasyon	62
6.	MALZEME VE YÖNTEM.....	63
6.1	Üretimde Kullanılan Malzemeler.....	63
6.2	Plakaların Üretimi	66
6.2.1	Matris malzemesinin hazırlanışı	66
6.2.2	Takviye malzemesinin hazırlanışı.....	68
6.2.3	Tabakaların Birleştirilmesi.....	70
6.2.4	Presleme işlemi	70
6.3	Kesim İşlemi	71

7. DÜŞÜK HIZLI DARBE DENEYİ	73
7.1 Düşük Hızlı Darbe Testi Cihazı	73
7.2 Kuvvet-Çökme Grafikleri.....	74
7.2.1 Katkısız numunelerin kuvvet-çökme grafikleri.....	74
7.2.2 %0.75 Nanokil katkılı numunelerin kuvvet-çökme grafikleri.....	76
7.2.3 %1.25 Nanokil katkılı numunelerin kuvvet-çökme grafikleri.....	78
7.2.4 %1.75 Nanokil katkılı numunelerin kuvvet-çökme grafikleri.....	80
7.2.5 % 0.75 Bor karbür katkılı numunelerin kuvvet-çökme grafikleri.....	82
7.2.6 % 1.25 Bor karbür katkılı numunelerin kuvvet-çökme grafikleri.....	84
7.2.7 % 1.75 Bor karbür katkılı numunelerin kuvvet-çökme grafikleri.....	86
7.3 Enerji Seviyelerinden Elde Edilen Kuvvet-Çökme Grafiklerinin karşılaştırılması.....	88
7.4 Kuvvet- Zaman Grafikleri.....	97
7.5 Enerji-Zaman Grafikleri.....	102
7.6 Tüm Verilerin Karşılaştırılması	107
7.7 Numunelerden Elde Edilen Hasar Tiplerinin Karşılaştırılması	114
8. BULGULAR VE TARTIŞMA	121
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	128
9.1 Sonuçlar.....	128
9.2 Öneriler.....	128
KAYNAKLAR.....	129
ÖZGEÇMİŞ.....	142

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1 Takviye şekline göre kompozitler.....	40
Şekil 3.2 Fiber takviyeli kompozitlerin temel bileşenleri	42
Şekil 3.3 Elle yatırma yöntemi.....	44
Şekil 3.4 Püskürtme yöntemi	45
Şekil 3.5 Sıcak presleme yöntemi	46
Şekil 3.6 Pultrüzyon yöntemi.....	47
Şekil 3.7 Enjeksiyon kalıplama yöntemi.....	47
Şekil 3.8 Flament sarma yöntemi.....	48
Şekil 3.9 Reçine transfer kalıplama yöntemi	49
Şekil 3.10 Vakum torbalama tekniği.....	49
Şekil 3.11 Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi	50
Şekil 4.1 0D, 1D, 2D, 3D karbon nanoyapılara örnek	54
Şekil 5.1 Charpy ve izod darbe testlerinde test cihazının şematik gösterimi.....	57
Şekil 5.2 Charpy darbe testinde numunenin cihaza yerleştirilmesi	58
Şekil 5.3 izod darbe testinde numune yerleşimi	59
Şekil 5.4 Düşük hızlı darbe deney düzeneği	60
Şekil 5.5 a) Darbe sonrası fiber takviyeli kompozitlerde oluşabilen hasar tipleri b) Darbe enerjisi ile kalıcı deformasyon oluşumu.....	61
Şekil 6.1 Nano katkılı kompozit levha üretim akış şeması	65
Şekil 6.2 Nano malzemenin hassas terazi ile miktarının belirlenmesi (a) Nanokil, (b) Bor karbür	66
Şekil 6.3 Nano katkılı reçinenin hazırlanma aşamaları (a) Nano katkının reçineye eklenmesi (b) Manuel karıştırma (b) Ultrasonik karıştırma.....	67
Şekil 6.4 (a) Sıcaklık ölçümü (b) Buz kalıbıyla dolu kap içinde reçinenin karıştırılması (b) Solvent eklenmesi.....	67
Şekil 6.5 (a) Twill örgülü cam fiber (b) Kesimi yapılan cam fiber	68
Şekil 6.6 (a) Nano katkılı reçinenin fibere dökülmesi (b) Reçinenin fibere nüfuz ettirilmesi	69
Şekil 6.7 Cam fiber takviyeli nano katkılı plaka boyutları	69
Şekil 6.8 (a) Karbon fiberin düz zemine yatırılması (b) Nano katkılı reçinenin Karbon fibere nüfuz etmesi için emdirilme işlemi.....	70

Şekil 6.9 Karbon fiber takviyeli nano katkılı plaka boyutları	70
Şekil 6.10 Hibrit nanokompozit plakaların ebatları	71
Şekil 6.11 Kesime hazır hibrit nanokompozit plakalar	71
Şekil 6.12 (a) 100 x100 mm ² kesimi yapılan nanokil katkılı hinrit levha, (b) 100 x 100 mm ² kesimi yapılan bor karbür katkılı hinrit levha.....	72
Şekil 6.13 Katkı oranlarına göre etiketlenmiş katkısız, nanokil ve bor karbür katkılı hibrit numune örnekleri.....	72
Şekil 7.1 Instron Ceast 9350 darbe test cihazı	73
Şekil 7.2 a)30 J darbe enerjisinde katkısız hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı.....	74
Şekil 7.3 a)50 J darbe enerjisinde katkısız hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı	75
Şekil 7.4 a)70 J darbe enerjisinde katkısız hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı	76
Şekil 7.5 a) 30 J darbe enerjisinde % 0,75 nanokil katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı	76
Şekil 7.6 a) 50 J darbe enerjisinde % 0,75 nanokil katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı	77
Şekil 7.7 a) 70 J darbe enerjisinde % 0,75 nanokil katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı.....	77
Şekil 7.8 a) 30 J darbe enerjisinde % 1,25 nanokil katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı.....	78
Şekil 7.9 a) 50 J darbe enerjisinde % 1,25 nanokil katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı	79
Şekil 7.10 a) 70 J darbe enerjisinde % 1,25 nanokil katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı.....	79
Şekil 7.11 a) 30 J darbe enerjisinde % 1,75 nanokil katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzünün fotoğrafı	80
Şekil 7.12 a) 50 J darbe enerjisinde % 1,75 nanokil katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı	81
Şekil 7.13 a) 70 J darbe enerjisinde % 1,75 nanokil katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı	81

Şekil 7.14 a) 30 J darbe enerjisinde % 0,75 bor karbür katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı	82
Şekil 7.15 a) 50 J darbe enerjisinde % 0,75 bor karbür katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı	83
Şekil 7.16 a) 70 J darbe enerjisinde % 0,75 bor karbür katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı	83
Şekil 7.17 a) 30 J darbe enerjisinde % 1,25 bor karbür katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzünün fotoğrafı.....	84
Şekil 7.18 a) 50 J darbe enerjisinde % 1,25 bor karbür katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzünün fotoğrafı	85
Şekil 7.19 a) 70 J darbe enerjisinde % 1,25 bor karbür katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzünün fotoğrafı	85
Şekil 7.20 a) 30 J darbe enerjisinde % 1,75 bor karbür katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzünün fotoğrafı.....	86
Şekil 7.21 a) 50 J darbe enerjisinde % 1,75 bor karbür katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzünün fotoğrafı.....	87
Şekil 7.22 a) 70 J darbe enerjisinde % 1,75 bor karbür katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzünün fotoğrafı.....	87
Şekil 7.23 Katkısız hibrit numunelerin 3 enerji seviyesinde kuvvet-çökme karşılaştırılması.....	88
Şekil 7.24 %0.75 Nanokil katkılı hibrit numunelerin 3 enerji seviyesinde kuvvet-çökme karşılaştırılması.....	89
Şekil 7.25 %1,25 Nanokil katkılı hibrit numunelerin 3 enerji seviyesinde kuvvet-çökme karşılaştırması	90
Şekil 7.26 %1,75 Nanokil katkılı hibrit numunelerin 3 enerji seviyesinde kuvvet-çökme karşılaştırması.....	90
Şekil 7.27 Nanokil Katkı Oranı – Uygulanan Enerji – Kuvvet sütun grafiği.....	91
Şekil 7.28 Nanokil Katkı Oranı – Uygulanan Enerji –Çökme Miktarı stün grafiği...92	
Şekil 7.29 %0,75 Bor karbür katkılı hibrit numunelerin 3 enerji seviyesinde kuvvet-çökme karşılaştırılması.....	93
Şekil 7.30 %1,25 Bor karbür katkılı hibrit numunelerin 3 enerji seviyesinde kuvvet-çökme karşılaştırılması.....	94

Şekil 7.31 %1,75 Bor karbür katkılı hibrit numunelerin 3 enerji seviyesinde kuvvet-çökme karşılaştırılması.....	94
Şekil 7.32 Bor karbür Katkı Oranı-Uygulanan enerji-Kuvvet Stun Grafiği.....	95
Şekil 7.33 Bor karür Katkı Oranı-Uygulanan Enerji-Çökme Miktarı sütun grafiği...	96
Şekil 7.34 Katkısız hibrit kompozit numune kuvvet-zaman grafiği.....	97
Şekil 7.35 % 0,75 Nanokil katkılı hibrit kompozit numune kuvvet-zaman grafiği...	98
Şekil 7.36 %1,25 Nanokil katkılı hibrit kompozit numune kuvvet-zaman grafiği....	99
Şekil 7.37 %1,75 Nanokil katkılı hibrit kompozit numune kuvvet-zaman grafiği ...	100
Şekil 7.38 %0,75 Bor karbür katkılı hibrit kompozit numune kuvvet-zaman grafiği.	100
Şekil 7.39 %1,25 Bor karbür katkılı hibrit kompozit numune kuvvet-zaman grafiği.	101
Şekil 7.40 %1,75 Bor karbür katkılı hibrit kompozit numune kuvvet-zaman grafiği.....	101
Şekil 7.41 Katkısız hibrit numunelerde enerji-zaman grafiği.....	103
Şekil 7.42 %0,75 Nanokil katkılı hibrit kompozit numunelerede enerji-zaman grafiği.....	103
Şekil 7.43 %1,25 Nanokil katkılı hibrit kompozit numunelerde enerji-zaman grafiği	104
Şekil 7.44 %1,75 nanokil katkılı hibrit kompozit numunelerde enerji-zaman grafiği.....	104
Şekil 7.45 %0,75 Bor karbür katkılı hibrit kompozit numunelerde enerji-zaman grafiği.....	105
Şekil 7.46 %1,25 Bor karbür katkılı hibrit kompozit numunelerde enerji-zaman grafiği.....	106
Şekil 7.47 %1,75 Bor karbür katkılı hibrit kompozit numunelerde enerji-zaman grafiği.....	107
Şekil 7.48 30 J Darbe enerjisinde tüm numunelerin kuvvet-çökme grafiklerinin karşılaştırılması.....	108
Şekil 7.49 30 J Darbe enerjisinde kuvvet-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.....	109
Şekil 7.50 30 J Darbe enerjisinde enerji-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.....	110
Şekil 7.51 50 J darbe enerjisinde tüm numunelerin kuvvet-çökme grafiklerinin karşılaştırılması.....	111
Şekil 7.52 50 J darbe enerjiside kuvvet-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.....	111
Şekil 7.53 50 J darbe enerjisinde enerji-zaman grafiklerinin karşılaştırılması	112

Şekil 7.54 70 J darbe enerjisinde tüm numunelerin kuvvet-çökme grafiklerinin karşılaştırılması.....	113
Şekil 7.55 70 J darbe enerjisinde kuvve-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.....	114
Şekil 7.56 70 J darbe enerjisinde enerji-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.....	115
Şekil 7.57 a) Katkısız numunler b) %0,75 nanokil katkılı numuneler c) %1,25 nanokil katkılı numuneler d) %1,75 nanokil katkılı numuneler.....	116
Şekil 7.58 a) %0.75 bor karbür katkılı numuneler b) %1.25bor karbür katkılı numuneler c) %1.75 bor karbür katkılı numuneler.....	117
Şekil 7.59 %1.75 Bor karbür katkılı hibrit numune görselleri a) 30 J b) 50 J c) 70 J	118
Şekil 7.60 30 J darbe enerjisi altında katkısız nanokil katkılı ve bor karbür katkılı numuneler.....	119
Şekil 7.61 50 J darbe enerjisi altında katkısız nanokil katkılı ve bor karbür katkılı numuneler.....	120
Şekil 7.62 70 J darbe enerjisi altında katkısız nanokil katkılı ve bor karbür katkılı numuneler.....	120
Şekil 7.63 %0.75 Bor karbür katkılı numunenin hasar görüntüsü a) Numunenin üst yüzeyi b) Numunenin alt yüzeyi	122
Şekil 7.64 a) 50 J darbe enerjisinde katkısız numunenin alt yüzeyi fotoğrafı b) 50 J darbe enerjisinde %1,25 nanokil katkılı numunenin alt yüzeyinin fotoğrafı c) 50 J darbe enerjisinde %1,75 nanokil katkılı numunenin alt yüzeyinin fotoğrafı.....	123

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 6.1 Kullanılan matris Malzeme ve Özellikleri.....	63
Tablo 6.2 Kullanılan malzeme ve nanokatki miktarları.....	64
Tablo 7.1 Enerji seviyelerine göre kullanılan kütle ve hız değerleri	74



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge	Açıklama
%	Yüzde
°C	Santigrat
δ	Çökme/yer değiştirme
Γ	Gamma
g	Yerçekimi ivmesi
g	Gram
GPa	Gigapascal
J	Joul
kg	Kilogram
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
N	Nevton
nm	Nanometre
ν	Poisson oranı
ρ	Yoğunluk
Σt	Tabaka kalınlıklarının toplamı
Θ	Fiber takviye açısı
μm	Mikrometre

Kısaltma	Açıklama
A/CFHRP	Aramid/karbon hibrit takviyeli kompozitler
B ₄ C	Bor karbür
BA	Borik asit
BNNP	Bor nitrür nanoplaka
CAI	Darbeden sonrası sıkıştırma testi
CFRP	Karbon fiber-epoksi kompozit

CNT	Karbon nanotüp
DSC	Differential Scanning Calorimetry (Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi)
EDS	Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi)
FLXC	Nanodolgu katkılı keten/karbon fiber
FLXG	Nanodolgu katkılı keten/cam fiber
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
GFRE	Cam fiber takviyeli epoksi kompozit
GFRP	Cam fiber-epoksi kompozit
H3BO3	Borik asit
HCl	Hidroklorik asit
HLU	Elle Yatırma Yöntemi
KFRE	Kevlar fiber takviyeli epoksi kompozit
LVI	Düşük Hızlı Darbe
MOORA	Oran analizine dayalı çok amaçlı optimizasyon
MWCNT	Multi-Walled Carbon Nanotube
NC	Nanokil
PP	Polipropilen
SEM	Scanning Electron Microscopy
SiC	Silisyum karbür
TGA	Thermogravimetric Analysis (Termogravimetrik Analiz)
TOPSIS	İdeal çözüme benzerliğe göre tercih sıralaması
Tg	Camsı geçiş sıcaklığı
UHMWPE	Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen
VARTM	Vakum destekli reçine transfer kalıplama
XRD	X-Ray Diffraction
ZnO	Çinko Oksit
ZrP	Zirkonyum Fosfat

ÖZET

NANO KATKILI KOMPOZİTLERDE DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI

ALTUNDAL, Esra

Yüksek Lisans, Makine mühendisliği Bölümü

Danışman: Doç. Dr. Gurbet ÖRÇEN

Haziran 2025, 161 sayfa

Son yıllarda ileri mühendislik uygulamalarında kullanılan kompozit malzemelerin darbe dayanımını artırmak amacıyla nano takviyeler sıklıkla tercih edilmektedir. Bu çalışmada, nanokil ve bor karbür (B₄C) katkılı hibrit kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Kullanılan kompozitler; cam ve karbon fiber takviyeli olup, 4 Cam+2 Karbon+4 Cam diziliminde yerleştirilmiş, toplamda 10 tabakalı olarak hazırlanmıştır. Farklı oranlarda (ağırlıkça %0,75, %1,25 ve %1,75) nanokil ve bor karbür içeren kompozit levhalar ile katkısız hibrit levhalar olmak üzere üç farklı hibrit kompozit levhalar ayrı ayrı üretilmiştir. Üretilen levhalar daha sonra 100 mm x 100 mm ölçülerinde kesilerek, düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Düşük hızlı darbe testleri 30 J, 50 J ve 70 J enerji aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen verilerle, Kuvvet-çökme, kuvvet-zaman, enerji -zaman grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen veriler kendi aralarında ve katkısız numuneler ile karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda hibrid numunelerin hasar tipleri de elde edilmiştir.

Bu deneysel çalışmada; nanokil katkılı, bor karbür katkılı ve katkısız hibrit numunelerde, 30 J, 50 J ve 70 J enerji aralıklarından elde edilen kuvvet değerleri incelendiğinde, en iyi sonuç nanokil katkılı hibrit numunelerden elde edilmiştir. Nanokil oranlarının artmasıyla, her üç darbe aralığında, elde edilen darbe kuvvetlerindeki artış hem katkısız hem de bor karbür katkılı numunelerden elde edilen değerlerden daha yüksek elde edilmiştir. En iyi sonuç 50 J aralığında %1,75 oranına sahip nanokil katkılı hibrit numuneden elde edilmiş olup, aynı enerji aralığında katkısız numuneden elde edilen değere göre %49,93 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ancak bor karbür katkılı hibrit kompozitlerden elde edilen kuvvet değerlerinin, katkısız numunelerden elde edilen değerlere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın sonunda, düşük hızlı darbe yüklemelerine karşı dirençli, daha hafif ve mekanik olarak daha dayanıklı kompozit malzemelerin geliştirilmesinde, uygulama alanlarına göre nanokil ve bor karbür gibi nano katkı maddelerinin kullanılmasında elde edilen değerler benzer alanda yapılacak araştırmalar için bilimsel bir referans niteliği taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Nanokil, Bor karbür, Hibrit nanokompozit, Düşük hızlı darbe

ABSTRACT

INVESTIGATION OF LOW SPEED IMPACT BEHAVIOR IN NANO-ADDED COMPOSITES

ALTUNDAL, Esra

Master of Science in Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gurbet ÖRÇEN

June 2025, 161 pages

In recent years, nanofillers have been widely preferred to enhance the impact resistance of composite materials used in advanced engineering applications. In this study, the low-velocity impact behavior of hybrid composites reinforced with nanoclay and boron carbide (B_4C) was experimentally investigated. The composites used in the study were reinforced with glass and carbon fibers, arranged in a 4 Glass + 2 Carbon + 4 Glass stacking sequence, resulting in a total of 10 layers. Three different types of hybrid composite plates were fabricated: nanoclay-reinforced, boron carbide-reinforced, and unreinforced (neat) hybrid composites, each with varying filler contents (0.75 wt%, 1.25 wt%, and 1.75 wt%). The fabricated composite plates were cut into 100 mm $\times$ 100 mm specimens, and low-velocity impact tests were conducted.

The impact tests were performed at three energy levels: 30 J, 50 J, and 70 J. From the test results, force–displacement, force–time, and energy–time graphs were obtained. The data were compared both among themselves and with those from unreinforced specimens. In addition, the damage types of the hybrid specimens were also determined.

In this experimental study, the analysis of the force values obtained from the nanoclay-reinforced, boron carbide-reinforced, and unreinforced hybrid specimens under 30 J, 50 J, and 70 J energy levels revealed that the best performance was exhibited by the nanoclay-reinforced hybrid composites. As the nanoclay content increased, the impact force values obtained at all three energy levels were significantly higher compared to those of both the unreinforced and boron carbide-reinforced specimens. The highest performance was observed in the specimen with 1.75 wt% nanoclay under 50 J impact energy, showing a 49.93% increase in force compared to the unreinforced specimen at the same energy level. However, the force values obtained from boron carbide-reinforced hybrid composites were found to be lower than those of the unreinforced specimens.

In conclusion, the results of this study provide scientific reference data for the development of lightweight, mechanically enhanced composite materials resistant to low-velocity impacts. The findings highlight the potential of using nanofillers such as nanoclay and boron carbide in accordance with the application requirements.

Keywords: Nanoclay, Borcarbide, Hybrid nanocomposite, Low velocity impact

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ve mühendislik ihtiyaçları doğrultusunda, malzeme biliminde yüksek dayanım, hafiflik ve üstün mekanik özellikler gibi kriterleri bir arada sunabilen kompozit malzemelere olan ilgi giderek artmaktadır. Özellikle havacılık, otomotiv, savunma sanayi ve yapı mühendisliği gibi alanlarda kullanılan kompozit malzemeler, darbe gibi ani ve yüksek enerjili yüklemelere karşı dirençli olmalıdır. Ancak geleneksel kompozit yapıların, darbe altındaki davranışları sınırlı enerji emilimi ve hasarın yayılması gibi nedenlerle yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda kompozit malzemelerin darbe dayanımını artırmak amacıyla nano boyutlu katkı maddelerinin kullanımı büyük bir araştırma konusu haline gelmiştir.

Nanoteknolojinin sunduğu olanaklarla geliştirilen nanokompozit malzemeler, hem matris-fiber arayüzey etkileşimini güçlendirerek yapısal dayanımı artırmakta hem de çatlak ilerlemesini engelleyerek darbe hasarını sınırlandırmaktadır. Bu bağlamda, nanokil ve bor esaslı nanopartiküller, epoksi matrisli kompozit malzemelerde sıklıkla tercih edilen katkı maddeleri olarak öne çıkmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar, bu tür nano katkıların, kompozitlerin pik darbe kuvveti, enerji emme kapasitesi, yer değiştirme ve darbe süresi gibi parametrelerinde anlamlı iyileşmelere yol açtığını göstermektedir.

Bu tez çalışması, nanokil ve bor karbür katkılı hibrit cam fiber/karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışlarını deneysel olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, farklı oranlarda nanokil ve bokarbür katkısı içeren 10 tabakalı hibrit kompozit (4cam+2karbon+4 cam) numuneler üretilmiş ve düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen test verileri doğrultusunda, nano katkıların malzemenin mekanik performansına olan etkisi değerlendirilmiş; darbe sonrası oluşan hasarlar görsel olarak analiz edilmiştir.

Bu çalışma, nanoteknolojik katkıların kompozit yapıların dayanıklılığını artırmada etkili bir yöntem olduğunu göstererek, darbeye duyarlı uygulamalarda kullanılabilecek ileri düzey kompozit malzeme tasarımına bilimsel bir temel sağlamaktadır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kompozit malzemeler, hafiflik ve yüksek mukavemet gibi özellikleriyle savunma, havacılık, otomotiv ve yapı mühendisliği gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalarda, özellikle darbe yüklerine karşı dayanıklılık önemli bir performans kriteri olup, darbe altında oluşabilecek hasarın en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Tabakalı yapıya sahip kompozit malzemelerin darbe performansını artırmak amacıyla son yıllarda nano ölçekte katkı maddeleri kullanılmaya başlanmıştır. Bu katkılar, hem matris-fiber etkileşimini güçlendirmekte hem de darbe sonrası hasarın yayılmasını sınırlandırarak malzemenin enerji sönmleme kapasitesini artırmaktadır. Özellikle nanokil, bor karbür ve borik asit gibi katkıların kullanımıyla kompozit yapıların mekanik ve termal dayanımlarında anlamlı iyileşmeler sağlandığı birçok çalışmada rapor edilmiştir. Ayrıca kullanılan tabaka sayıları, çeşitleri ve dizilimleri de farklı çalışmalarda mekanik dayanım açısından ön plana çıkmaktadır. Bu bölümde, literatürde nanokil, bor karbür vb katkılar kullanılarak geliştirilmiş kompozit ve hibrit kompozit malzemelerin kullanılan takviye türleri, tabaka dizilimleri ve üretim yöntemleri gibi kriterler dikkate alınarak yapılan bir takım mekanik testleri, özellikle de düşük hızlı darbe davranışlarını inceleyen seçilmiş çalışmalar özetlenerek mevcut çalışmaların bu çalışmaya olan katkısı değerlendirilmiştir.

Rahman ve arkadaşları [1], kevlar fiber takviyeli epoksi (KE) kompozitlerine eklenen nanokil ve grafen katkılarının düşük hızlı darbe direnci üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, hacimce %70/30 ve 16 katlı KE kompozite, ağırlıkça %10'a kadar nano dolgu maddeleri eklemiştirler. Kompozitleri, 6,27 kg ağırlık ve 32 J potansiyel enerjiyle, düşük hızlı çarpma cihazıyla test etmişlerdir. Yazarlar nanokil katkılı kompozitlerin, darbe direncinde grafen katkılı kompozitlere kıyasla daha etkili olduğunu (%26,9 artışa karşı %7,5 artış) ve darbe enerjisi emiliminde grafenden daha iyi performans gösterdiğini (%15 artışa karşı %11,37 azalma) belirtmişlerdir. Nanokilin hacim oranı arttıkça darbe direncinin arttığını ve %10 nanokil dolgulu epoksi kompozitte enerjinin %24 ' ten daha fazla geri kazanıldığı gözlemlemişlerdir. Nanokilin epoksi matris ile iyi bir şekilde karıştığını kimyasal bağlanma ve azaltılmış gözenekler sağladığını ayrıca yüksek paketleme yoğunluğu sayesinde daha yüksek darbe ve nüfuz direnci ortaya çıkardıklarını belirtmişlerdir.

Alomari ve arkadaşları [2], nanokil kevlar tabakalı kompozitlerin darbe enerjisi direncini incelemişlerdir. Nanokil katkı yüzdesindeki değişimlerin, kompozitin özelliklerini etkilediğini, yüksek oranda nanokil katkı maddesinin enerji emilimindeki artışla birlikte delaminasyon eğilimini artırdığını belirtmişlerdir. Kontrol numuneleri, 250 J enerji seviyesinde tamamen delaminasyona uğrarken, ağırlıkça %4,3 oranında nanokil eklenmiş numunelerin, en düşük delaminasyon direnci gösterdiğini ancak %9,4 ağırlıktaki nanokil katkılı numunelerin delaminasyon alan yüzdesinin yaklaşık olarak % 71 olduğunu belirtmişlerdir.

Dias ve arkadaşları [3], nanokil infüzyonlu kompozitlerin çeşitli endüstrilerde, özellikle otomotiv, savunma, makine, elektronik ve havacılık gibi alanlarda kullanılabileceğini vurgulamışlardır. Yazarlar yaptıkları derlemede, nanokil eklenmiş kompozitlerin, geleneksel metallere ve kompozitlere kıyasla daha dayanıklı ve hafif olduğundan alternatif oluşturabileceğini belirtmişlerdir. Araştırmaların, daha düşük nanokil yüzdelерinin kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkiler yarattığını, ayrıca cam fiber kompozitlerin, doğal fiber kompozitlere göre daha üstün özellikler sergilediğini vurgulamışlardır. VARTM ve El yatırma gibi üretim yöntemlerinin tercih edildiği çalışmalarda, nanokil içeren kompozitlerin gelecekte daha geniş endüstriyel kullanımlar bulabileceğini ifade etmişlerdir.

Rafiq ve arkadaşları [4], cam fiber takviyeli epoksi (GFRE) kompozitlerde yüksek kesme karıştırma yöntemiyle ağırlıkça %1,5 ve %3,0 oranlarında nanokil ekleyerek, elde ettikleri nanokompozit matrisi ve cam efiberleri kullanarak elle yatırma ve sıcak presleme teknikleriyle hibrit kompozit levhalar elde etmişlerdir. Darbe testlerini 10 J ile 50 J arasındaki enerjiler altında yapmışlardır. Test edilen numuneler üzerinde yaptıkları gözlemler sonucunda, nanokil varlığının GFRE'nin pik yükünü ve sertliğini artırdığını saptamışlardır. Özellikle %1,5 nanokil içeren numunelerde, maksimum yükte %23, sertlikte ise %11 oranlarında bir iyileşme olduğunu belirtmişlerdir. Numunelerin fiziksel hasarında da önemli oranda azalma olduğunu, bu olumlu değişimi nanokilin yapıya kazandırdığı ek direnç olarak belirtmişlerdir. Ayrıca yazarlar çalışmalarında ağırlıkça %3,0 oranındaki nanokil yüklemesinde oluşan topaklanmanın darbe dayanımı üzerinde olumsuz etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

Fakhreddini ve arkadaşları [5], nanokil Cloisite 20A katkılı karbon fiber takviyeli polimerlerin (CFRP) 10 J, 15 J ve 20 J enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testlerini yapmışlar ve kil nanopartikülleri, çözelti karıştırma metoduyla epoksi reçinesine dağıtarak, vakum infüzyon yöntemiyle üretmişlerdir. Araştırmacılar ağırlıkça %0,2 oranında Cloisite 20A eklemenin, maksimum darbe kuvvetinde %25,7'ye kadar artışa, emilen enerjide ise %50,25'e kadar azalmaya yol açtığını tespit etmişlerdir. Levhaların kuvvet-zaman tepkisinin, 10 J, 15 J ve 20 J darbe enerjileri altında sırasıyla %25,7, %20,24 ve %20,31 oranlarında arttığını; maksimum yer değiştirmenin ise sırasıyla %20,19, %29,08 ve %15,94 oranlarında azaldığını ayrıca nanokil eklenmesinin darbe enerjisi emilimini de azalttığını belirtmişlerdir. 20 J enerji altında, nanokil içeren levhalarda girintinin %50,25, delaminasyonun ise %54,46 oranında azaldığını ayrıca nanokil dolgulu CFRP levhalarda, delaminasyon mekanizmasındaki azalmanın, düşük hızlı darbe direncinde önemli bir belirleyici olduğunu belirtmişlerdir.

Heydari ve arkadaşları [6], nanokil (ağırlıkça %0, %3, %5 ve %7 oranlarında) ile güçlendirilmiş cam/epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe (LVI) tepkilerini incelemişlerdir. Farklı üretim yöntemlerinin etkisini değerlendirmek için elle yatırma (HLU) ve vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) yöntemlerini kullanmışlardır. Cloisite 30B ile Cloisite 15A türlerindeki nanokillerin etkisini karşılaştırmışlar. Nanokil içerikleri arasında çekme yükünde önemli bir fark bulunmadığını, Cloisite 15A tipi nanokilin, Cloisite 30B'ye göre daha az rijit olduğunu ve daha yüksek bir enerji emme kapasitesine sahip olduğunu tespit etmişler. Nanokil oranı arttıkça delaminasyon alanının küçüldüğünü, özellikle %7 oranında nanokil içeren numunelerde delaminasyon alanının, %3 oranındaki numunelere göre üçte bir oranında daha küçük olduğunu belirtmişlerdir. Nanokil ilavesinin numunelerin darbe dayanımını artırdığını ve özellikle Cloisite 15A ile güçlendirilen kirişlerin daha yüksek enerji emme kapasitesine sahip olduğu bulmuşlardır.

Igbal ve arkadaşları [7], nanokilin karbon fiber-epoksi kompozitlerin (CFRP) darbe hasarı direncine etkisini, düşük hızlı darbe ve darbeden sonra sıkıştırma (CAI) testleri kullanılarak araştırmışlardır. Yazarlar çalışmalarında nanokil içeren epoksi matrislerin, darbe hasarı direncini ve hasar toleransını önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir. Özellikle, ağırlıkça %3 oranında nanokil eklenmesinin, hasar alanını

küçülttüğünü, hasar sonrası sıkıştırma testlerinde ise daha yüksek mukavemet ve daha yüksek eşik enerji seviyeleri sağladıklarını belirtmişlerdir. Nanokilin, matrisin kayma sertliğini artırarak, fiberlerin burkulmaya karşı daha yüksek direnç sağladığını ve nanokil içeren levhaların delaminasyon nedeniyle saf epoksi levhaların ise burkulma nedeniyle başarısız olduklarını belirtmişlerdir. Yazarlar bu bulgular ile nanokil eklemenin CFRP levhaların darbe hasarına karşı dayanıklılığın artırabileceğini gösterdiğini belirtmişlerdir.

Verma ve arkadaşları [8], cam fiber takviyeli kompozitlerde nanokil (Closite 308) kullanarak modifiye edilmiş epoksi matrisleriyle takviye yapmışlardır. 0° , 90° , 0° istifleme sırasına sahip 3 katlı tabakalar, cam tek yönlü fiberler ile nano-kil oranlarını %0,5 ile %4 arasında değiştirerek elle yatırma yöntemiyle üretmişler. Yapılan mekanik testlerde ağırlıkça %3 oranında nanokil ilavesiyle kompozitlerin, çekme dayanımında %27 (107Mpa), eğilme dayanımında ise %37(105,85Mpa) daha yüksek performans gösterdiğini belirtmişler. Vicker sertlik deneyi mikro sertliğin %2 ağırlık oranında nanokil eklenmesiyle saf epoksiye göre %43 oranla (7.535 sertlik değerinde) maksimum seviyeye ulaştığını tespit etmişlerdir.

Gitiara ve arkadaşları [9], elle yatırma yöntemiyle ürettikleri nanokil ve nanosilika katkılı cam fiber takviyeli (GFRP) kompozitleri farklı sürelerde (%0, 1, 3 ay) sülfürik asit çözeltisine daldırılmışlar. Daldırma süresi arttıkça, nanosilika içeren numunelerin daha fazla su emdiğini belirtmişler. Yazarlar, yapılan testlerde nanopartiküllü kompozitlerin saf numunelere kıyasla üstün darbe özelliklerine sahip olduğunu, özellikle nanokil içeren numunelerin düşük hızlı darbe (LVI) testlerinde daha iyi performans gösterdiğini belirtmişler. Ağırlıkça %5 oranında nanokil eklenmesiyle darbe kuvvetinin %15,72 oranında arttığını ve yer değiştirmenin %5,26 oranında azaldığını belirtmişler. Ayrıca, nanokil içeren numunelerin enerji emilim oranının %17,15 azaldığını ve bu durumun hasar oranındaki bir düşüşle ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar nanokil ve nanosilika içeren GFRP kompozitlerin, aşındırıcı ortamlarda darbe dayanımını artırarak daha iyi performans sergileyebileceğini öne sürmüşlerdir.

Ünal ve arkadaşları [10], çekme ve eğilme yüklemeleri altında Cam/Karbon/Cam fiber takviyeli epoksi matris kompozit levhaların mekanik tepkisi üzerinde nanokil

ilavesinin etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında ağırlıkça %0, %0,75 ve %1,25 oranlarında epoksi matrisinde nanokil içeren hibrit kompozit levhaların mekanik davranışlarının olumlu yönde etkilendiğini; çekme dayanımının ağırlıkça %0,75 nanokil oranında en yüksek seviyeye ulaştığını, eğilme dayanımının ise nanokil miktarının artmasıyla yükseldiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca, ağırlıkça %1,25 oranında nanokil ilavesiyle hibrit kompozitlerin eğilme mukavemetinde %12, eğilme modülün de %5 artış sağladığını nanokilin matris ile fiberler arasındaki etkileşimi güçlendirerek kuvvetin matrsten fiberlere aktarıldığını ve numunenin katkısız kompozite kıyasla daha fazla uzama gösterdiğini de belirtmişlerdir.

Örçen ve arkadaşları [11], üç farklı oranda (%0,5, %1 ve %1,5) nanokil (NC) içeren cam fiber takviyeli epoksi kompozitler üretmişlerdir. Mekanik testlerde %1 NC içeren numunelerin saf kompozitlere oranla çekme dayanımının %31,06, basma dayanımının %4,25, kesme dayanımının %14,30 oranlarında; elastite modülü %7,35, kayma modülü %11,94, Poisson oranında ise %12,5 artış sağladığını tespit etmişlerdir. Yazarlar maksimum kayıp modülünü %1,5 NC ilaveli numunelerde, maksimum depolama modülünün ise %0,5 NC ilaveli numunelerde elde ettiklerini, %1,5 NC ilaveli numunelerde ise fiber-matris ara yüzeylerinin daha net ayrıldığını belirtmişlerdir.

Esendemir ve arkadaşları [12], epoksi reçineye üç farklı oranda (%0, %1 ve %3) fonksiyonellendirilmiş nanokil karıştırarak, elle yatırma yöntemiyle 12 tabakalı cam fiber/kevlar-epoksi hibrit kompozit numuneler üretmişlerdir. 30 J altında gerçekleştirilen darbe performanslarını değerlendirerek; %1 oranında nanokil ilavesinin, mekanik özellikler ve darbe direnci açısından en iyi performansı sağladığını tespit etmişlerdir. Bu numunelerde kilin matris fiber ara yüzeylerinde iyi dağılması sonucu; çökme değerlerinde %10 oranında azalma, yük taşıma kapasitesinde ise %22 oranında artma olduğunu tespit etmişlerdir.

Örçen ve arkadaşları [13], nanokil ve borik asit takviyeleri ile güçlendirilmiş cam fiber/epoksi kompozitlerinin düşük hızlı darbe performansını incelemişlerdir. Epoksi reçinesine ağırlıkça %0, %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında nanokil ve borik asit ekleyerek, nanokompozitleri elle yatırma metoduyla üretilmişlerdir. 30 J, 40 J, 50 J ve 60 J enerji seviyelerinde gerçekleştirdikleri düşük hızlı darbe testlerinde nano takviyelerin

kompozitlerin tepki kuvvetini artırdığını, ancak darbe süresi, maksimum yer değiştirme ve emilen enerjiyi azalttığını belirtmişlerdir. Hibrit numunelerin, tek takviyeli numunelere kıyasla daha iyi performans sergilediklerini ve en iyi darbe direncinin %1,5 borik asit takviyesi olan hibrit numuneden elde ettiklerini belirtmişlerdir. %1,5 borik asit takviyesi olan hibrit numunenin darbe direncinde %44 ile %51 oranları arasında bir iyileşme sağladığını ve emilen enerji ile darbe süresinin en düşük seviyelere indiğini tespit etmişlerdir. Yazarlar, nanokil ve borik asit takviyelerinin, özellikle borik asit takviyelerinin, reçine-fiber etkileşimini artırarak, düşük hızlı darbe performansını iyileştirdiğini ve takviye oranının artırılmasının genel performansı artırdığını vurgulamışlardır.

Özakin ve arkadaşları [14], epoksi esaslı reçineye ağırlıkça %0.5, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında hegzagonal bor karbür (B_4C) nanoparçacıkları ekleyerek elde ettikleri nanokompozitlerin çekme mukavemeti, şekil değiştirme kabiliyeti, depolama modülü, camsı geçiş sıcaklığı (T_g), çapraz bağ yoğunluğu, tokluk ve fiyat gibi özelliklerini dikkate alarak MOORA (oran analizine dayalı çok amaçlı optimizasyon) ve TOPSIS (ideal çözüme benzerliğe göre tercih sıralaması) yöntemlerini uygulamışlardır. Araştırmada, MOORA ve TOPSIS sonuçlarına göre her iki yöntemde de ağırlıkça %2 oranında B_4C katkılı epoksi esaslı nanokompozitin maksimum performans ve minimum maliyet açısından optimum malzeme olduğunu daha önce deneysel olarak elde edilen verilerin bu çok kriterli karar verme sonuçlarıyla uyum gösterdiğini ikinci sırada da ağırlıkça %1 B_4C katkılı epoksi esaslı nanokompozitin yer aldığını belirtmişlerdir.

Badawy ve arkadaşları [15], Kevlar ve cam fiber takviyeli epoksi kompozitlere (KFRE ve GFRE) çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT) %0.5 oranında eklemişlerdir. Üretilen altı farklı malzeme üzerinde yapılan düşük hızlı darbe, çekme ve düzlem içi kayma testleri ASTM standartlarına uygun olarak gerçekleştirmişlerdir. Nanokatki olarak kullanılan çok duvarlı karbon nanotüpler, özellikle çekme ve kayma dayanımı ile elastik modüllerinde belirgin iyileştirmeler sağlamıştır. CNT katkılı nanokompozitlerde çekme dayanımı %11, kayma dayanımı %22.2, çekme modülü %68.7 ve kayma modülü %28.9 oranında artmıştır. Darbe testlerinde ise CNT'lerin etkisi sınırlı olmuş; maksimum temas kuvveti %9.5, soğurulan enerji ise %11.4 oranında artmıştır. GFRE/CNT ve KFRE/CNT kompozitlerinde de benzer şekilde

çekme dayanımı ve modülünde yaklaşık %15–20 civarında iyileşmeler gözlemlenirken, darbe dayanımında yalnızca sınırlı bir artış tespit etmişlerdir. Yazarlar CNT'lerin darbe testlerindeki etkisinin sınırlı kalmasının, bu katkıların daha çok statik yük altındaki özellikleri iyileştirdiğini gösterdiğini belirtmişlerdir.

Ünal ve arkadaşları [16], Polipropilen (PP) polimerine sırasıyla ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında borik asit (BA) ilavesiyle ürettikleri kompozitlerin artan BA içeriğiyle çekme modülü, çekme dayanımı ve akma dayanımının azaldığını belirlemişlerdir. %10 BA ilavesiyle 2713 MPa değerinde en düşük çekme modülünü gözledikleri ayrıca, darbe dayanımının %5 BA içeriğinde hafifçe arttığını, ancak %10 ve %15 BA içeriğinde azaldığını tespit etmişlerdir.

Örçen ve arkadaşları [17], yaptıkları çalışmada cam fiber takviyeli epoksi kompozitlere farklı oranlarda (%0, 0,5, 1 ve 1,5) borik asit (H_3BO_3) ekleyerek basınç dayanımı hariç tüm mekanik özelliklerde (çekme dayanımı, kesme dayanımı, elastisite modülü, kesme modülü ve Poisson oranı) belirgin iyileşmeler elde ettiklerini belirtmişlerdir. Özellikle %0,5 BA ilavesinin, çekme dayanımını %24,78 oranında ve elastisite modülünü ise %25 oranında artırdığını belirtmişlerdir. Ancak, tüm BA içerikli numunelerin katmanlar arası delaminasyonunu ve fiber/matris kırılmasını artırdığını, bu nedenle kompozitlerin basınç dayanımının olumsuz etkilendiğini ifade etmişlerdir.

Ulus ve arkadaşları [18], vakum infüzyon tekniğiyle tasarladıkları çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ve bor nitrür nanoplakalardan oluşan (BNNP) epoksi/karbon hibrit kompozitlerin çekme testleriyle mekanik özelliklerini, 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerjileri altında ağırlık düşürme testleriyle değerlendirmişlerdir. Yazarlar epoksi reçinesinin nanopartiküllerle modifikasyonu sonucu elde edilen nanokompozitlerin, hem mukavemet hem de kırılma anındaki yüzde gerinim değerlerini önemli düzeyde artırdığını belirtmişlerdir. Ancak nanokompozitlerdeki bu mekanik iyileşmenin, dinamik darbe tepkisi ve enerji emme kapasitesi açısından beklenen ölçüde tam olarak yansımadığını belirtmişlerdir.

Caymaz [19], vakum destekli reçine infüzyon yöntemi kullanılarak karbon fiberlere ağırlıkça %1, %3, %5 ve %7 oranlarında bor karbür (B_4C) ilave edilerek nanokatlı

kompozit malzemeler üretmiştir. Yapılan analizler sonucunda, B₄C katkı oranı arttıkça kompozitlerin sertlik ve yoğunluk değerlerinde artış olduğunu çekme ve eğilme testlerinde ise %3 katkı oranına kadar mekanik dayanımda iyileşme sağlandığını bu oranın üzerindeki katkı miktarlarında ise dayanımda azalma meydana geldiğini bildirmiştir. Charpy darbe testi sonuçlarına göre, %1 B₄C katkı oranında %11,81'lik artışla 27,55 kJ/mm² en yüksek darbe enerjisinin elde edildiğini bildirmiştir. %3 katkı oranında %4,16 (23,59 kJ/mm²), %5 katkı oranında %8,56 (22,53 kJ/mm²) ve %7 katkı oranında %14 (21,19 kJ/mm²) olacak şekilde darbe dayanımlarının azaldığını bildirmiştir. Yazar %1 B₄C katkısında darbe dayanımının arttığını, daha yüksek oranlarda ise bu değerde kademeli bir düşüş olduğunu bildirmiştir.

Kösedağ ve Ekici [20], Al 6061 matrisine silisyum karbür (SiC), bor karbür (B₄C) ve bunların %25/75, %50/50 ile %75/25 hacimce oranlı hibrit kombinasyonlarını, %5, %10 ve %15 ağırlıkça olmak üzere toplam 16 farklı kompoziti, 20 mm çaplı ve 5,045 kg kütleli yarı küresel çarpıcı uc ile düşük hızlı darbe deneyleri kapsamında incelemişlerdir. Yazarlar aynı zamanda sayısal olarak çalışmayı değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında, takviye oranı yükseldikçe temas kuvvetinin arttığını, temas süresinin kısaldığını belirtmişlerdir. Enerji emme kapasitesinin %5 hibrit gruplarında 45,57 J–46,88 J aralığında olduğunu; %10 ve %15'te benzer artış eğilimleri olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, SiC içeriğinin artışı sertliği belirgin biçimde yükselttiğini, %100 B₄C takviyeli kompozitlerin en yüksek sertliği sergilediğini takviye oranının artışı ise genel olarak sünekliği azaldığını belirtmişlerdir. Özellikle düşük B₄C ya da yüksek SiC oranı çökme mesafesini arttığını bu bulgular ile SiC ile B₄C takviyelerinin dengeli hibritleşmesinin darbe performansını optimize ettiğini belirtmişlerdir.

Goodarz ve arkadaşları [21], elle yatırma yöntemiyle farklı kalınlıklarda (17,5, 35 ve 70 µm) ve çeşitli istifleme konfigürasyonlarında (arka taraf, merkezi, iki taraflı serpiştirme) ürettikleri nano ara katmanlar içeren aramid/epoksi tabakaların düşük hızlı darbe tepkisini yarı statik girinti testleriyle karşılaştırmışlardır. Yazarlar, yarı statik girinti analizinin yalnızca belirli bir darbe enerjisi seviyesine kadar geçerli olduğunu ve en yüksek tokluk değerinin 35 µm kalınlığında elde edildiğini belirtmişlerdir. Nano ara katmanların, kompozitlerin darbe enerjisini emme kapasitesini artırdığını ve bu etkinin, plaka penetrasyonu başlamadan önce olduğunu

gözlemlemişlerdir. Darbe enerjisi 28 J' un üzerine çıktıkça farklı davranışlar sergilediğini, tokluk artışının, tepe kuvvetinin düşmesini sağladığını ve maksimum yer değiştirme parametrelerinin artmasını sağladığını belirtmişlerdir.

Hosur ve arkadaşları [22], vakum destekli reçine infüzyon kalıplama yöntemiyle üretilen karbon kumaş takviyeli hem dikilmiş hem de dikilmemiş tabakalı kompozitlerin 5 J–50 J arasındaki enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testi uygulamışlardır. Tabakaları her biri 6 mm aralıklı iki ortogonal ızgara deseninde dikmek üzere 3 kordonlu Kevlar ipliği kullanılarak hazırlamışlar (biri 25,4 mm, diğeri 12,7 mm ızgaralı). Oluşan hasarı ultrasonik tahribatsız değerlendirme yöntemiyle incelemişler. Yazarlar dikiş uygulamasının hasar boyutunu sınırlamada etkili olduğunu ve özellikle 12,7 mm ızgara dikiş örneklerinin en az hasarı gösterdiğini belirtmişlerdir.

Boukar ve arkadaşları [23], çift eksenli cam fiber takviyeli kompozit numunelere darbe testleri yapmış ve darbe sırasındaki çatlak ilerlemesini görüntülemek için yüksek hızlı(saniyede 83000 fotoğraf karesi yakalama kapasiteli) Phantom V2512 kamera kullanmışlardır. Deneysel verileri hashin 3D hasar modeline göre hesapmışlar ve katmanlar arası delaminasyon, incelemişlerdir. Yazarlar numuneleri 0 ms-2,5ms zaman aralığında 0 J-2,5 J darbe enerjisine maruz bırakarak deneysel ve sayısal sonuçların uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir. $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$ ve $[-45^\circ/+45^\circ]_{3s}$ kompozit tabakalar incelenmiş ve $[-45^\circ/+45^\circ]_{3s}$ plakala ile elde edilen numunelerin , $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$ plaka ile elde edilen numunelere kıyasla daha düşük tepe kuvveti, daha uzun darbe kuvveti süresi ve daha yüksek enerji Emilimi gösterdiği bulmuşlardır. Yüksek hızlı görüntüleme ile hasarın gelişimini izleyerek $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$ numunelerdeki hasarın, yükleme temas noktasında delaminasyon ve matris çatlamasından kaynaklandığını, $[-45^\circ/+45^\circ]_{3s}$ numunelerdeki hasarın ise matris çatlaması ve delaminasyonun öncelikli hasar mekanizmaları olduğu gözlemlemişlerdir.

Soliman ve arkadaşları [24], fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler) ile güçlendirilmiş ince karbon dokuma kumaş kompozitlerinin düşük hızlı darbe tepkisini incelemişlerdir. MWCNT'leri, epoksi ağırlığına göre %0,5, %1,0 ve %1,5 oranlarında yüklemişlerdir. Kompozit plakaları, 15, 24, 30, 60 ve 120 J'luk beş farklı enerji seviyesinde test etmişler. Deneyler sonucunda, işlevselleştirilmiş

MWCNT'lerin, dokuma karbon fiber kompozitlerde darbe tepkisini artırdığını ve hasar boyutunu sınırladığını tespit etmişlerdir. %1,5 oranında MWCNT eklenmesinin, enerji emiliminde %50 oranında artış sağladığını belirtmişlerdir. Penetrasyon sınırının altında, %1,5 COOH-MWCNT'leri kullanıldığında ise, aynı tepe kuvvetiyle birlikte penetrasyon enerjisinde %50 oranında iyileşme gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Yazarlar, genel olarak, işlevselleştirilmiş MWCNT'lerin, darbe altındaki kompozit plakaların düşük hızlı darbe tepkisini önemli ölçüde iyileştirdiğini tespit etmişlerdir.

Rajaneesh ve arkadaşları [25], ASTM D7136 (düşük hızlı darbe, LVI) ve ASTM D7137 (çarpma sonrası sıkıştırma, CAI) standartlarına uygun olarak kompozitlerin darbe ve sıkıştırma testlerini uygulamışlar. 150x100mm² numune malzemesi üzerinde 5 kg'lık darbe elemanı ile 19,3 J, 28,6 J ve 38,6 J enerjilerinde testler yapmışlardır. plakaların kat kalınlığını üç istifleme dizisinde (L1:[(45/0/-45/90)₄]_s, L2:[(45/0/2/-45/90)₂]_s ve L4: [45₄/0₄/-45₄/90₄] dikkate alarak ve arayüz malzemesi özelliklerini incelemek için numuneleri darbe enerjisine maruz bırakmışlar. Yazarlar, sonlu eleman modellerinin, darbe süresi, tepe kuvvetleri, delaminasyon bölgeleri ve kalan basınç dayanımları ile doğru sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Kat kalınlığındaki artışın, delaminasyon boyutunu ve enerji dağılımını artırmakta olduğunu, bunun da katlar tarafından emilen enerjiyi azalttığını belirtmişlerdir.

Öner ve arkadaşları [26], elle yatırma yöntemiyle ürettikleri çeşitli karbon nanotüp (CNT) içerikleri ile güçlendirilmiş düz örgülü cam/epoksi tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe (LVI) tepkisini incelemişlerdir. CNT içeriklerini ağırlıkça %1 ve %1,25 oranlarında kullanarak 20 J, 30 J, 35 J ve 40 J darbe enerjileri ile numunelere düşük hızlı darbe testi uygulamışlardır. Yazarlar, çalışmalarında numunelerin kontrol numunelerine kıyasla daha büyük hasar alanına ve daha fazla penetrasyon eşiklerine sahip olduğunu göstermişlerdir. Özellikle, ağırlıkça %1 CNT içeren plakaların, en yüksek reaksiyon kuvvetine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Farklı CNT yüklemeleriyle yapılan testlerde, en düşük penetrasyon eşik enerjisinin saf numunelerde ve en büyük penetrasyonun ağırlıkça %1 CNT içeren numunelerde görüldüğünü, en yüksek reaksiyon kuvveti ve en düşük yer değiştirmeyi ise ağırlıkça %1 CNT içeren numunelerin gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Arıkan [27], E-cam fiber takviyeli polipropilen ve epoksi matris kompozitleri farklı kalınlıklarda üretmiş ve 30 J enerjili düşük hızlı darbe testlerine tabi tutmuştur. Testlerinde, farklı matris yapılarına sahip kompozitlerde kalınlık değişiminin darbe performansı üzerindeki etkilerini inceleyerek kalınlık değişiminin farklı matris malzemelerine sahip kompozitlerde farklı darbe tepkileri oluşturduğunu göstermiştir. Yazar çalışmasında Cam, karbon ve Kevlar fiber fiberleri en yaygın kullanılan fiber türleri arasında yer aldığını, Karbon fiberler yüksek mukavemetli olup kırılgan bir yapıya sahip olduğunu, cam fiberlerin ise daha düşük mukavemete sahip olsa da daha yüksek gerinim değerlerine ulaşabildiğini ve daha düşük maliyetli olduğunu söylemektedir. Cam fiberlerin birçok uygulama alanında tercih edildiğini, kompozit tasarımında, fiber mimarisinin uygun şekilde tasarlanması gerektiğini, özellikle darbe yüklemesi altındaki kompozitlerin zayıf olduğu enine yöndeki yükler için büyük bir önem taşıdığını belirtmektedir. Düşük hızlı darbe (LVI) yüklemelerinin, matris delaminasyonu (matris çatlağı veya bağ kopması) ve fiber hasarı oluşturduğunu belirtmiştir. Delaminasyonun ise reçine açısından zengin bölgelerde, farklı fiber yönelimlerine sahip alanlarda ve tutarsız bükülme sertliğinin tutarsız olduğu bitişik katmanlar arasında meydana geldiğini belirtmiştir.

Liu çalışmasında [28], düşük hızlı darbeye maruz kalan kompozit plakaların delaminasyon direncini, katmanlar arası mukavemetler (örneğin matris tokluğu ve fiber-matris bağlanma) ile yükleme parametrelerinden kaynaklanan tabakalar arası gerilim seviyelerine bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Delaminasyon alanının tabaka kalınlığı ve bitişik tabakalardaki fiber açısı farkıyla orantılı olduğunu; yüksek açılar ve kalın tabakaların daha büyük delaminasyon alanlarına yol açtığını tespit etmiştir. Yüksek delaminasyon direncinin, tabakalar arası mukavemetler ve düşük gerilim seviyelerine bağlı olduğunu; bu nedenle de tabaka kalınlığı, fiber açısı ve elastik sabit farklarının minimize edilmesinin kompozit plakaların darbe sonrası yapısal bütünlüğünün korunmasında önemli rol oynadığını ortaya koymuştur.

Im ve arkadaşları [29], iki arayüzlü CF/EPOXY ortotropik plakalar ($[0^\circ/90^\circ]$ ve $[0^\circ_4/90^\circ_4]$ ile iki arayüzlü CF/PEEK ortotropik plakalara 60 ile 105 m/s hız aralığında çapı 5mm olan çelik bilye ile 2,6 J darbe enerjisinde düşük hızlı darbe testi uygulamışlar. Darbe hasarlı numunelerde hasar büyümesini taramalı akustik mikroskopi (SAM) gibi tahribatsız değerlendirme yöntemleri ile incelemişler. karbon

fiber-epoksi kompozit (CFRP) tabakaların sıcaklıkları arttıkça darbe kaynaklı hasarların delaminasyon alanlarının azaldığını, aşırı düşük ve yüksek sıcaklıklarda darbe enerjisi ile delaminasyon alanları arasında doğrusal bir ilişki gözlemlendiğini belirtmişler. Kritik delaminasyon enerjisinin ise sıcaklık artışıyla yükseldiğini ayrıca düşük sıcaklıklarda hasarın daha kolay oluştuğunu belirtmişlerdir.

Salehi-Khojin ve arkadaşları [30], -50 °C ile 120 °C arasında dört katmanlı Kevlar/hibrit ve karbon yüzey levhalarından oluşan üretilen dolgu kompozit numunelere, 15 J, 25 J ve 45 J'lık düşük hızlı darbe testleri uygulamışlardır. Sabit 7,25 kg'lık ağırlıkla yapılan bu testlerde darbe enerjisi, düşme yüksekliği değiştirilerek ayarlamışlardır. Araştırmada, arka yüzey hasarı ve enerji emiliminin sıcaklığa bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği belirlenmiştir. -50 °C'de numuneler en büyük hasar ve fiber kırılmasını gösterirken, sıcaklık arttıkça bu etkiler azalmış; 120 °C'de ise C-H kompozitlerde hasarın neredeyse tamamen ortadan kalktığını, düşük sıcaklıklarda enerji emilimi lif kırılmasına bağlıyken, orta enerji seviyelerinde arka yüzey çatlaklarının daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, sıcaklığın malzeme türüne göre darbe davranışını değiştirdiği görülmüştür. Yüksek enerji darbelerinde, sıcaklık arttıkça C-C ve C-K kompozitlerde enerji emilimi artarken, C-H kompozitlerde azalmıştır. Genel olarak, en yüksek ortalama enerji emilimi -50 °C'de, sadece C-H için ise 120 °C'de gözlemlenmiştir.

Aslan ve Karakuzu [31], tabakalı kompozit plakalarda, 1 m/sn, 2 m/sn ve 3 m/sn olmak üzere üç farklı darbe hızında olmak üzere 135 g ile 2600 g iki farklı darbe kütlelerinde, 50x150 mm², 100x150 mm² ve 150x150 mm² üç farklı plaka boyutunda düşük hızlı darbe etkilerini incelemişlerdir. Test edilen kompozit plakalar, 8 tabakalı (0°/0°/90°/90°)s fiber oryantasyonuna sahip, 4,8 mm kalınlığında E-cam fiber/epoksi malzemeden üretilmiştir. Yazarlar darbe kütledeki artışın etkisini incelemek için plakayı 150mmx150mm de sabit tutmuş 3m/sn hızda 135gr ve 2600 gr darbe kütlelerinde yapılan testte kütle artışıyla darbe süresinin uzadığını tespit etmişler. Plakaların boyutunun etkisini değerlendirmek için hızı 3m/sn de ve ağırlığı 2600gr da sabit tutarak en yüksek darbe kuvveti ile en büyük delaminasyon hasarının 100 x 150 mm'lik plakta ölçüldüğünü tespit etmişlerdir. Ayrıca tabakalar arası delaminasyon hasarının özellikle kompozit plakaların alt bölgeleri ile fiber takviye açıları farklı olan tabakalar arasında yoğunlaştığını bildirmişlerdir.

Joshua ve arkadaşları [32], kompozit malzemelerin darbe direnci üzerine yapılan araştırmaları ve gözlemleri inceleyerek yüksek ve düşük hızdaki darbelere dayanıklılığını artırmak için birçok çalışma yapıldığını malzemenin ağırlığından ödün vermeden darbe direncinde iyileştirme amacı ile farklı kompozit malzemelerin darbe direncini tartışmışlar. Yazarlar yapıtları derlemede darbe hasarı modlarının malzemenin darbe direncini anlamada önemli olduğu vurgulamışlardır. Hasar modları, matris tipi, takviye türü, tabaka yapısı, nanopartiküllerin boyutu, darbe hızı ve tipi gibi faktörlerin, malzemenin darbe davranışını tahmin etmek için dikkate alınan unsurlar olduğunu bu araştırmalar ile mekanik özellikleri iyileştirilmiş kompozit malzemelerin tasarlanıp üretilebileceğini belirtmişlerdir.

Subhan ve arkadaşları [33], elle yatırma yöntemi ile hibrit kompozit tabakalar üreterek düşen ağırlık darbe tepkisini incelemişlerdir. Hibridizasyonda e-cam ve kevlar 49 kumaş katmanları epoksi reçine ile istiflemişlerdir. Cam fiberlerin/kevlar'ın $0^\circ/90^\circ$, $45^\circ/45^\circ$ ve $30^\circ/60^\circ$ 'da düzeninde hibrit kompozit plakalar oluşturmuşlardır. Numunelere aletli darbe ve ızod darbe testi uygulamışlardır. $0^\circ/90^\circ$ ve $30^\circ/60^\circ$ 'de e-cam/Kevlar 49, $45^\circ/45^\circ$ 'den daha iyi darbe dayanıklılığı gösterdiğini belirtmişlerdir. SEM görüntülerinde fiber ve matris kırığı gözlemleyerek, epoksi reçinenin kevlar lifleriyle sıkı bir şekilde bağlandığını, cam liflerinin ise tabakalardan çekildiğini belirtmişlerdir. GF $0^\circ/90^\circ$ 'nin ise en düşük değere sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Ancak yüzey ve kırılma çalışması $0^\circ/90^\circ$ yöneliminin diğer yönelimlerden daha iyi kırılma dayanıklılığına sahip olduğunu bu doğrultuda, yapıların $0^\circ/90^\circ$ düzenlemesiyle tasarlanmasının en iyi performansı sağlayabileceği, ancak $45^\circ/45^\circ$ açılı hibrit plakaların özgül dayanıklılık açısından tercih edilmesinin daha uygun olacağını belirtmişlerdir.

Ranjbar ve Feli [34], farklı ağırlık yüzdelerindeki çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT) (% 0, 0,17, 0,34 ve 0,51) mekanik ve düşük hızlı darbe özelliklerini değerlendirmek için elle yatırma yöntemi ile saf epoksi ve epoksi/fiberglas kompozit kırımlar üretmişlerdir. MWCNT'leri, sonikasyon tekniği ile epoksi içerisinde dağıtmışlardır. Düşük hızlı darbe testlerinde, %0,34 ağırlıkça MWCNT'lerin darbe özelliklerinde iyileşme sağladıklarını tespit etmişler ve CNT ağırlık yüzdesine bağlı olarak, darbe özelliklerinde belirli bir artış ve sonra azalma gözlemlemişlerdir.

Reddy ve arkadaşları [35], cam kompozit (E-cam/epoksi) ve ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) (Dyneema) tabakalarına düşük hız için aletli düşürme darbe testi uygulayarak E-cam/epoksi plakaların hasar davranışını elastik deformasyon, delaminasyon ve lif kırılması ile ilişkilendirmişlerdir. Dyneema tabakaların ise plastik deformasyon ve lif gerilmesi ile bozulduğunu belirtmişler. Yazarlar çalışmalarında Dyneema tabakaların E-cam/epoksi tabakalara göre daha fazla enerji emdiğini ve bu farklılığın polimer kompozitlerin gerinim oranı duyarlılığına bağlı olabileceğini ortaya koymuşlardır.

Wang ve arkadaşları [36], cam fiber takviyeli plastik kompozitlerin (GFRP) düşük hızlı darbe davranışlarını ve enerji emilim mekanizmalarını incelemişlerdir. GFRP'ler, ağırlıkça %0, %0,4 ve %0,75 oranlarında çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ile modifiye edilen epoksi reçineler kullanarak, farklı ağırlıklarda önceden gerilmiş kumaşlarla numune üretmişlerdir. MWCNT modifiye edilmiş numunelerin, saf GFRP numunelerine göre darbe direncinde iyileşme gösterdiğini bulmuşlardır. Özellikle 9,16 J ve 22 J darbe enerjileri altında, MWCNT içeren kompozitlerin daha düşük hasar faktörleri ve geliştirilmiş delme eşiği ile daha iyi performans sergilediğini tespit etmişlerdir. Yazarlar, MWCNT modifikasyonunun, GFRP kompozitlerin darbe dayanımını iyileştirdiğini ve yük taşıma kapasitelerini artırdığını belirtmişlerdir.

Sun ve arkadaşları [37], termoplastik ve termoset karbon fiber takviyeli kompozitlerin düşük hızlı darbe hasarlarını hem deneysel hem de sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, darbe enerjilerini 8 J ve 30 J olarak belirlemişler. Her iki malzeme için de üç farklı Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) modeli kullanmışlardır. Bu modelleri, standart model, sürekli hasar mekaniği (CDM) modeli ve ayırık model olarak sıralamışlar ve tüm modellerde kohezif arayüz elemanları ile delaminasyon gözlemlenmiştir. Termoplastik malzemelerin kırılma tokluğunun, termoset malzemelere kıyasla daha düşük seviyelerde kaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca, termoset malzemelerdeki delaminasyon alanlarının, matris çatlaklarıyla güçlü bir etkileşime girdiği ve bu etkileşimin yüksek doğruluklu sayısal tahminler için matris çatlaklarının modellenmesi gerektirdiğini vurgulamışlardır.

Cantwell ve Morton [38], çalışmalarında sürekli fiber takviyeli kompozitlerin darbe direncini etkileyen temel parametreleri ve darbe sonrası yük taşıma kapasitesini belirleyen faktörleri inceleyerek kompozitlerin darbe direncinin, fiberlerin enerji emme kapasitesine, matrisin kırılma tokluğuna, fiber/matris ara fazının gücü ve geometrisi gibi faktörlere bağlı olduğu vurgulamışlardır. Fiber yönelimi ve tabaka yapıları, kompozitlerin darbe direncini büyük ölçüde etkileyebildiğini katmanlar arasındaki uyumsuzluğun, delaminasyon riskini artırabileceğini ayrıca, geometri değişikliklerinin de darbe direncini etkilediğini belirtilmişlerdir. Kompozit malzemelerin darbe direncini artırmak için sürekli fiber kullanımı, matris /özelliklerinin geliştirilmesi ve tasarım parametrelerinin optimize edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Öndürücü ve arkadaşları [39], 8 ve 12 tabakalı cam fiber/epoksi kompozit numunelerin darbe davranışlarını, 10 J, 20 J ve 30 J darbe enerjileri altında deneysel olarak incelemişlerdir. Yapmış oldukları deneylerde, artan darbe enerjisiyle maksimum kuvvet ve çökme miktarlarının arttığını, darbe uygulanmayan alt yüzeydeki deformasyon alanının daha geniş olduğunu, ayrıca tabaka sayısının azalmasıyla kuvvet-çökme eğrilerinin kapalıdan açığa geçtiğini belirlemişlerdir. Darbe uygulanmamış olan alt yüzeyde düşük darbe enerjisinde fiber uzamaları ve fiber ayrılmaları gözlemlediklerini, darbe enerjisinin artırılmasıyla bu yüzeyde oluşan fiber uzamalarının ve hasar bölgesinin daha da genişlediği, dış katmanlardaki matris ve fiberlerin birlikte kırılması sonucu delinme hasarının gerçekleştiğini tespit etmişlerdir.

Türkmen ve Köksal [40], elle yatırma yöntemiyle ürettikleri cam fiber takviyeli polyester matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini ve darbe dayanımını incelemişlerdir. Bunun için ASTM D7136 standartlarında $100 \times 100 \times 2 \text{ mm}^3$, $100 \times 100 \times 2,5 \text{ mm}^3$ ve $100 \times 10 \times 3,5 \text{ mm}^3$ tabaka kalınlıklarında 3 numune türüne 5'er defa sırasıyla 10 J, 15 J, 30 J darbe enerjisinde darbe testi yapmışlar. Darbe testlerinde fiber katman sayısının artışıyla malzemelerin absorbe ettiği enerji değerlerinin (Hasar enerjisinin) neredeyse lineer bir artış gösterdiğini saptamışlardır. Ayrıca yapmış oldukları çekme testlerinde, cam fiber tabaka sayısının artmasıyla çekme dayanımı, elastisite modülü ve özgül mukavemet değerlerinin yükseldiğini, bunların dışında el yatırması üretiminde reçine oranının ayarlanamaması sonucu oluşan yüksek ağırlık ve

çok sayıda hava boşluğunun mekanik dayanım üzerinde olumsuz etki yaptığını raporlamışlardır.

Esendemir ve arkadaşları [41], vakum infüzyon yöntemiyle ürettikleri cam fiber takviyeli epoksi kompozit numunelerin darbe davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Bu amaçla 100x100 mm² boyutlarında ve 8 tabakadan oluşan kompozit numuneler hazırlanmıştır. Numuneler, oda sıcaklığında güneş ışığı almayan kapalı kavanozlarda bulunan farklı derişimlerdeki hidroklorik asit (HCl) çözeltilerinde (%15 ve %25) farklı sürelerde bekletilmiştir. Bekletme işleminin ardından numuneleri, iki farklı darbe enerjisi seviyesinde (20 J ve 30 J) darbe testlerine tabi tutmuşlardır. HCl çözeltilisinde bekletilen numunelerden elde edilen deney sonuçlarını, oda sıcaklığında bekletilen referans numunelerinin sonuçları ile karşılaştırmışlar. Araştırmacılar, darbe enerjisinin artmasının fiber kırılmalarına ve ayrılmalarına yol açtığını belirtmişlerdir. Ayrıca, düşük darbe enerjisinde temel hasar modlarının matris çatlağı ve delaminasyon olduğunu vurgulamışlardır. Tüm test ortamlarında, darbe enerjisi arttıkça maksimum kuvvet ve çökme miktarının da arttığını gözlemlemişler. Numunelerin farklı sürelerde ve farklı derişimlerdeki HCl çözeltilerinde bekletilmesinin, aynı darbe enerjisine maruz kalmaları sonucunda yük taşıma kapasitelerini azalttığını ve maksimum çökme değerlerinde de genel olarak artış meydana geldiği gözlemlemişler.

Aktaş ve arkadaşları [42], tek yönlü cam/epoksi tabakaların darbe davranışlarını, ilişkili yük-sapma eğrileri ve enerji profil diyagramları üzerinden incelemiştir. Çalışmalarında tabakaların 5 J ila 80 J arası darbe enerjileri altında oluşan hasar süreçlerini ve hasar modlarını değerlendirmişlerdir. Testlerde karşılaştırmalı analiz yapmak amacıyla [0°/90°/0°/90°]s ve [0°/90°/+45°/-45°]s olmak üzere iki ayrı istifleme dizisi tercih etmişlerdir. Araştırma sonuçlarında [0°/90°/+45°/-45°]s istifleme dizisinin penetrasyon eşiğinin [0°/90°/0°/90°]s dizisine kıyasla daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, yüksek darbe enerjileri altında temel hasar modunun fiber kırığı olduğunu, daha düşük darbe enerjilerinde ise matris çatlağı ve girinti ile birlikte delaminasyonun gerçekleştiğini ortaya koymuşlardır.

Swolfs ve arkadaşları [43], fiber takviyeli kompozit malzemelerin yapısal uygulamalarda geniş bir kullanım potansiyeline sahip olmasına rağmen, sınırlı tokluk

özelliklerinin bu potansiyeli kısıtladığını belirtmişlerdir. Bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla, iki veya daha fazla fiber türünün bir araya getirilmesiyle oluşturulan hibrit kompozitlerin, hibrit olmayan kompozitlere kıyasla daha dengeli mekanik özellikler sunabileceği ifade etmişlerdir. Ancak, farklı fiber türleri arasındaki sinerjik etkiler nedeniyle bu tür kompozitlerin mekanik performanslarının öngörülmesinin güç olduğu vurgulamışlardır. Yaptıkları derlemede, bazı istisnalar bulunmakla birlikte, genel olarak daha homojen fiber dağılımının (yüksek dispersiyonun) hibrit kompozitlerin performansını artırdığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca, eğilme ve darbe gibi karmaşık yükleme durumlarında, bazı çalışmaların parametrelerin etkisi konusunda çelişkili sonuçlar olduğu bu nedenle, söz konusu yükleme koşullarında hasar mekanizmalarının daha iyi anlaşılması için kapsamlı deneysel araştırmaların ve gelişmiş sayısal modellerin gerekli olduğunu belirtilmiştir.

İsmail ve arkadaşları [44], nanodolgu katkılı keten/karbon fiber (FLXC) ve keten/cam fiber (FLXG) hibrit kompozitlerinin çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT'ler) etkisi ve 5 J ile 20 J arasında uygulanan darbe enerjisi sonrası davranışlarını incelemişlerdir. Yazarlar, FLXG kompozitlerinin cam yüzeye çarptığında daha iyi darbe özellikleri gösterdiğini ve FLXC kompozitlere göre daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu tespit etmişler. FLXG kompozitlerinin iç ve fonksiyonel yüzeyler olarak iyi bir performans sergilediği sonucuna varmışlardır. FLXC ve FLXG kompozitlerinin her iki yüzeyinde ağırlıkça %1 MWCNT'lerle yapılan LVI testinde her iki hibrit biyokompozitin, yer değiştirme-zaman, hız-zaman, kuvvet-zaman ve kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin benzer eğilimler gösterdiğini, çarpmanın keten yüzeye 15 J, karbon ve cam yüzeylerde ise 20 J enerji seviyesinde penetrasyon olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar C-FLX yüzeyinde daha fazla enerji emildiği ve daha ciddi hasar olduğu gözlemlenmiştir. CAI testiyle FLXG'nin CNT'lerin varlığında FLXC'den daha güçlü olduğu sonucuna varmışlardır.

Munoz ve arkadaşları [45], S2 cam (GF), T700 karbon (CF) ve dyneema fiberlerinden yapılan hibrit 3D dokuma kompozitlerin düşük hızdaki darbe davranışını ve enerji emme kapasitesini (94 J ve 162 J darbe enerjisi) incelemişlerdir. Asimetrik bir tabaka yapısına sahip olan kompozitlerin bir tarafında yüksek konsantrasyonda karbon fiber (CF), diğer tarafında ise cam fiber (GF) bulunmaktadır. X-ışını mikroBT ve sonlu elemanlar (FE) analizi gibi değerlendirmeler sonucunda cam katmanların tabakanın

arka yüzüne yerleştirildiğinde darbe enerjisini emme yeteneğinin arttığını belirtmişlerdir. Darbe yüzeyine bağlı olarak karbon fiberin üstte, cam fiberin altta olduğu CF konfigürasyonunun, her iki darbe enerjisi seviyesinde de en iyi performansı sergilediğini belirtmişler. Darbe testleri sonucu cam fiberlerde karbon fiberlerden daha fazla lif kırılması görüldüğünü belirtmişler ayrıca cam fiberlerin alt katmanda yer aldığı tabakaların daha fazla deformasyona dayandığını, hibrit 3D dokuma kompozitlerin darbe enerjisi emilimini iyileştirdiğini ve farklı katman dizilimlerinin darbe performansında önemli farklar yarattığını bulmuşlardır.

Barbaz-İsfahani ve arkadaşları [46], cam fiber takviyeli polimer (GFRP) kompozitlerin düşük hızlı darbe (LVI) tepkisini incelemek üzere, farklı tipteki nano partiküllerin (kil, çok duvarlı karbon nanotüpler-MWCNT, TiO_2 ve CuO) hem tekil hem de hibrit formlarda çeşitli ağırlık yüzdeleriyle takviyesini oluşturmuşlar. Elle yatırma yöntemiyle ürettikleri numunelerde 5 ve 10 cm açıklık boyutlarını kullanarak, 6 kg ve 10 kg yükler altında toplam 14 farklı tipte kompozit numuneye LVI testleri uygulamışlardır. Deneysel sonuçlarında, nanokil veya MWCNT içeren numunelerin saf GFRP örneklerine kıyasla daha düşük maksimum temas kuvveti sergilediğini ve hem 5 cm hem de 10 cm açıklıkta ciddi bir hasar oluşmadığını belirtmişler. Ancak 10 cm açıklık ve 10 kg darbe altında saf GFRP'nin geri tepme davranışı sergilemesine karşın 5 cm açıklıkta penetrasyon meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca 6 kg darbe altında farklı nanopartiküller içeren tüm numunelerde geri tepme davranışının korunduğunu ve 10 cm açıklıktaki örneklerin daha yüksek maksimum kuvveti taşıyabildiğini belirtmişlerdir. Yazarlar MWCNT'nin daha yüksek oranda eklenmesiyle kompozitlerin sertleştiğini ve kırılma dayanımının arttığını gözlemlemişlerdir. MWCNT + Kil veya MWCNT + CuO gibi hibrit nano partikül içeren kompozitlerde 5 cm açıklıkta penetrasyon, 10 cm açıklıkta ise geri tepme yaşandığını belirlemişlerdir. Numunelerin farklı açıklık ve darbe yükleri altında emilen enerjilerini karşılaştıran araştırmacılar, hibrit nano partikül takviyesinin önemli oranda iyileştirici etki sağladığını belirtmişlerdir.

Bunea ve arkadaşları [47], katmanlı dolgulu epoksi matrisli kumaş takviyeli hibrit kompozitlerin düşük hızlı darbe testlerini 90.629 J enerji seviyesinde gerçekleştirerek matris özellikleri, karbon ve aramid katman sayısı ile fiber yöneliminin etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar matris özelliğinin hibrit kompozitlerin kırılma modu

üzerinde etkili olduğunu, hasar alanlarının büyüklüğünün fiber yönelimine bağlı olduğunu, matris çatlaması ve delaminasyon başlangıcının arayüzlerin enine kesme ile kırılmasından kaynaklandığını belirterek kompozitlerin darbe tepkisinin matris özelliklerine bağlı olduğu ortaya konmuşlardır. Fiber yönelimi ve katman sayısının enerji emme kapasitesini etkilediğini en yüksek darbe dayanımı 0° dizilimli hibrit kompozitlerde görüldüğünü, en fazla enerjinin aramid kumaş katmanın fazla olduğu kompozitler tarafından emildiği belirlemişlerdir. Buna karşılık, 0° dizilimli ve karbon kumaş katmanın fazla olduğu kompozitlerde en düşük enerji emilimi gözlemleyerek farklı fiber yönelimlerinde delaminasyon yayılması nedeniyle daha ciddi hasarlar meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Hüssain ve arkadaşları [48], ilk olarak cam/epoksi kompozitleri %5, %10 ve %15 oranlarında ZrP parçacıkları ile yükleyerek alev geciktiricilik ve LVI özelliklerini optimize etmişlerdir. %15- ZrP içeren kompozitlerin, en yüksek enerji emilimi (31, 70 J) ve maksimum darbe kuvveti (1377 N) ile en iyi performansı gösterdiği sonucuna varmışlar. İkinci olarak cam/epoksi kompozitlere %0,5, %1 ve %1,5 ZnO ile yüklemişlerdir. %1,5 ZnO içeren kompozitler, antibakteriyel özellikler açısından ve LVI (29,70 J enerji emilimi) açısından daha iyi sonuç gösterdiğini tespit etmişler. Son olarakta iki en iyi sonuç olan %15 ZrP ve %1,5 ZnO yüzdelelerini kullanarak ürettikleri cam-karbon hibrit takviyeli epoksi kompozitlerin alev geciktiricilik, antibakteriyel özellikler ve LVI tepkisinde %29,70 J enerji emilimi ile yüksek performans sergilediğini tespit etmişlerdir.

Mahdi ve arkadaşları [49], karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) kompozitlerin darbe performansını iyileştirmek için nanopartiküllerin etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, ağırlıkça %0,3 MWCNT katkılı, ağırlıkça %2 nanokil katkılı ve her ikisinin kombinasyonu ile hibrit nanopartiküllü CFRP kompozitler üretmişlerdir. Bu kompozitleri, 30, 40 ve 50 J enerji seviyelerinde darbe testlerine tabi tutmuşlar ve darbe sonrası hasar analizi yapmışlar. Yazarlar, nanokil ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) gibi nanopartiküllerin, kompozitlerin darbe direncini geliştirdiğini belirtmişler. MWCNT ve nanokilin tek başlarına kullanımının darbe özelliklerini iyileştirdiğini, ancak hibrit nanopartiküllü kompozitlerin en iyi performansı sergilediğini belirtmişlerdir. Hibrit nanopartiküllerin, kontrol

numunelerine kıyasla daha yüksek pik yükü ve emilen enerji değerleri sağladığını, ayrıca hasar alanını önemli ölçüde azalttığını özellikle, hibrit modifikasyonun, %80'e kadar hasar alanını küçülttüğünü belirtmişlerdir. Yazarlar bu bulguların, nanopartiküllerin kullanımıyla karbon fiber/epoksi kompozitlerin darbe performansını önemli ölçüde artırılabilceğini gösterdiğini belirtmişler.

Rawat ve Singh [50], çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler) kullanarak karbon fiber plakaların hasar toleransındaki iyileştirmeleri incelemiş ve optimum katkı oranını belirlemişlerdir. MWCNT takviyeli karbon fiber tabakaları (saf, %0,25, %0,50, %0,75 ve %1 reçine ağırlığı) üretmiş ve sekiz katmanlı simetrik bir üretim yapmışlardır. Vakumlu torbalama yöntemiyle üretilen bu tabakaların hasar toleransındaki iyileşmenin, ağırlıkça %0,25 oranında MWCNT katkısında maksimum olduğunu bulmuşlardır. Yazarlar tespit ettikleri bu oranla enerji emiliminin %18,03 arttığını, CFRP tabakalara göre dikdörtgen hasar alanında %23,65 azalma sağlandığını belirtmişler.

Reddy ve arkadaşları [51], farklı hacim oranlarında (75:25, 50:50, 25:75) E camı ve S2 camı içeren hibrit kompozit plakalarda çarpma yüzeyinin performansa etkisini incelemişlerdir. E cam fiberi çarpma yüzeyine sahip tabakaların, S2 cam fiberi yüzeyine sahip olanlara kıyasla daha yüksek tepe kuvveti (7–9 kN), daha uzun temas süresi (7–8 ms), daha fazla yer değiştirme ve daha yüksek enerji emilimi (107 J) gösterdiğini ve darbe enerjisini daha iyi sönümlendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, arka yüzeyde S2 cam fiberinin bulunmasının, yüksek çekme dayanımı ve sünek kırılma davranışı sergileyerek performansı arttırdığını, E cam çarpma yüzeyine ve S2 cam arka yüzeyine sahip hibrit plakaların, darbe dayanımı açısından en başarılı kombinasyon olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar 110 J enerjiyle sadece E 100 ve ES 75-25 tam delinme gösterdiğini, ES 50-50 plakasının 130 J'de delindiğini, ES 25-75 ve S 100 plakasının ise 150 J'de dahi delinmediğini, sonuç olarak, en yüksek enerji emilim kapasitesinin ES 25-75 ve S 100 tabakalarında olduğunu belirtmişlerdir.

Safri ve arkadaşları [52], doğal fiber bazlı polimer kompozitlerin düşük darbe performansları nedeniyle gelişmiş yapısal sistemlerde sınırlı uygulamalara sahip olduğunu ancak bu malzemelerin ürün ağırlığını azaltma, malzeme maliyetini düşürme ve yenilenebilirlik açısından büyük potansiyel taşıdığını belirtmişlerdir. Sentetik-

sentetik, doğal-sentetik ve doğal-doğal fiber kompozit malzemelerin darbe performansı ve penetrasyon davranışı üzerine yapılan araştırmaları değerlendirerek sentetik-sentetik fiber hibrit kompozitlerin, metalik malzemelere kıyasla yüksek özgül malzeme özelliklerine sahip olduğunu belirtmişler. Doğal-doğal fiber hibrit kompozitlerin çevre kaynaklarını korurken mükemmel özellikler sunduğu ve daha fazla uygulama belirlemek için daha fazla araştırma yapılması gerektiği vurgulamışlar.

Shaari ve arkadaşları [53], Kevlar/cam fiber hibrit kompozit tabakaların darbe davranışını, ağırlık düşürme darbe testi (ASTM D7136) ile incelemişlerdir. Kompozit tabakalar, kevlar dokuma fiber ve düz cam dokuma fiber ile güçlendirilmiş bir epoksi matris kullanılarak vakum torbalama yöntemiyle üretmişler. Çalışmada, kevlar/cam fiber oranlarının (0:100, 20:80, 50:50 ve 100:0) darbe hasarı üzerindeki etkisini 43 J nominal darbe enerjisinde değerlendirmişlerdir. Kevlar fiberin cam fibere hibridizasyonunun, kompozit tabakaların yük taşıma kapasitesini, emilen enerjiyi ve hasar derecesini iyileştirdiğini, ancak sapmada hafif bir azalma gösterdiğini tespit etmişlerdir. Hasar analizinde, cam fiber-epoksi kompozitlerin (GFRP) kevlar fiber takviyeli (KFRP) kompozitlere kıyasla daha büyük hasar alanına sahip olduğunu göstermişler. Bu bulgular ile Kevlar fiberinin cam fiber plakalara hibritlenmesinin, daha fazla enerji emilimi sağladığını ve hasar alanını azalttığını belirtmişlerdir.

Stephen ve arkadaşları [54], düşük hızlı darbeler deneyleri ile hibrit ve hibrit olmayan (Kevlar-K, karbon-C, cam-G) kumaş takviyeli epoksi kompozit tabakalarda enerji emilimini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, sonlu elemanlar analizleriyle karşılaştırıldığında, her iki değerin yaklaşık %6'lık maksimum değişimle uyum gösterdiği bulmuşlardır. Yazarlar en yüksek enerji emilimini (18,67 J) kevlar/epoksi (K/K/K) örneğinin kaydettiğini, (K/G/K) 17,24 J ile ikinci sırada yer aldığını belirtmişlerdir. K/G/K kompozitinin enerji emilimi, K/K/K kompozitinden % 8 düşük olup, %21 daha düşük malzeme maliyeti sağlayarak diğer hibritlere oranla makul darbe direnci, uygun maliyeti ve yüksek enerji emilimi sağlaması nedeniyle LVI uygulamaları için oldukça uygun olduğunu belirtmişlerdir. Cam veya karbonun ortada olduğu kevlar ile yapılan hibritler plakalar (K/C/K) (K/G/K) üç kumaş türünde olduğu tüm hibrit plakalardan (K/C/G (18,38J), G/C/K (16,11J), C/G/K (16,04J)) daha iyi enerji emilimi gösterdiğini tespit etmişler. Düşme ağırlığı testlerinin morfolojik

incelemesinde, ana hasar mekanizmaları olarak delaminasyon, lif kırılması, lif ayrılması ve matris çatlaması tespit etmişler.

Santulli [55], karbon fiberler ve doğal fiberler, özellikle bazalt ve bitkisel liflerin kullanıldığı hibrit kompozit plakaların üretimi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu hibritleri, fiberglasın karbon veya doğal fiberlerle birleşiminden elde etmiştir. Santulli, saf karbon fiber ile oluşan kompozitlerin performans kaybını ve üretim zorluklarını kabul ederken karbon ve doğal fiber kompozitlerin hibridizasyonunun, daha yüksek enerji emilimi, etkili hasar toleransı ve iyileşmiş tokluk gibi avantajlar sağlandığını belirtmektedir. Santulli, düşük hızlı darbe veya balistik darbe gibi kırılmalık ve ani kırılma durumlarında bu hibritlerin dayanıklılığı artırmada etkili olabileceğine dikkat çekmiştir. Ayrıca, hibritlerin davranışları genellikle çekme ve eğilme testlerinde incelenmiş olsa da, katmanlar arası yapışmanın etkisi çoğu zaman göz ardı etmiştir. Farklı istifleme sıralarının, sonuçları önemli ölçüde etkileyebileceğini belirtmiştir.

Sayer [56], 8 tabakalı Cam- fiber/Epoksi, Karbon fiber -Cam fiber/Epoksi ve hibrit (Aramid fiber -Cam fiber/Epoksi ile Aramid fiber-Karbon fiber/Epoksi) kompozit plakaların artan darbe enerjisi altındaki davranışları incelenmiş; karbon fiberin, ($G0^\circ/G90^\circ/G\pm45^\circ/G90^\circ/G0^\circ$) + ($C0^\circ/C90^\circ/C\pm45^\circ$) konfigürasyonunda darbe uygulanan yüzeyde bulunmasının, cam yüzeye kıyasla delinme sınırını yaklaşık %30 artırdığı tespit etmiş, ayrıca karbon tabaka sayısının 4'ten 8'e çıkarılmasının delinme sınır değerine sadece %4 katkı sağladığı belirlemiştir. Cam- fiber/Epoksi ve hibrit kompozitlerde, darbe enerjisinin artmasıyla temas kuvveti, çökme miktarı ve temas süresinin yükseldiği, delinme öncesinde en yüksek temas süresinin elde edildiği ve delinme sonrası hasar karakteristiklerinin sabit kaldığını ortaya koymuştur. Hibrit kompozitlerde, farklı takviye açıları kullanılarak en yüksek kuvvet ve delinme sınır değerlerinin elde edildiğini gözlemlemişler. Son olarak, darbe enerjisinin artmasıyla, ilk aşamada ezilme izi ve matriks çatlağı şeklinde başlayan hasar modunun, fiber kırılması ve delaminasyona evrildiğini tespit etmiştir. Yazar çalışmasında, karbon fiberin hibrit ve cam- fiber kompozitlerde delinme sınırını artırıcı etkisi vurgulanırken, hibrit kompozitlerde takviye açılarının doğru seçilmesinin darbe davranışında kritik rol oynadığı gözlemlemiştir.

Nayak ve arkadaşları [57], elle yatırma yöntemiyle ürettikleri asimetrik karbon/cam (C_2G_8) hibrit kompozitlere farklı oranlarda (ağırlıkça %0, 1, 3, 5 ve 7) ekledikleri nanokilin mekanik, tribolojik ve düşük hızlı darbe (LVI) davranışlarına etkisini araştırmışlardır. Numunelere yapılan testlerde, %5 ağırlıkça nanokil eklenmiş C_2G_8 hibrit kompozitin maksimum sertlik (35 HV), eğilme dayanımı (494 MPa), darbe dayanımı (Izod: $119.022 \text{ kJ m}^{-2}$, Charpy: $563.922 \text{ kJ m}^{-2}$) ve en düşük özgül aşınma oranını ($19.6 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-1}$) sağladığını tespit etmişlerdir. LVI test sonuçlarına göre de bu hibrit nanokompozitin, saf C_2G_8 hibrit kompozite kıyasla daha yüksek enerji emilimi (112.46 J) sergilediğini belirtmişlerdir. Yazarlar, geliştirdikleri hibrit nanokompozitin, yüksek performans gerektiren çeşitli otomotiv uygulamalarında kullanılabilecek bir malzeme olabileceği sonucuna varmışlardır.

Awla çalışmasında [58], farklı oranlardaki epoksi, tek yönlü karbon fiber ve fiberglas içeren kompozit malzemelerin mekanik özellikleri; çekme, darbe ve eğilme testleriyle hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelemiştir. ASTM standartlarına uygun olarak hazırladığı numunelerle gerçekleştirdiği testlerde, özellikle tek yönlü karbon fiber katmanlarının sayısının artmasıyla malzemenin mukavemetinde belirgin bir artış gözlemlemiştir. Ayrıca, en iyi epoksi reçinesi oranlarının tek yönlü karbon fiber için %15, fiberglas için ise %5,5 olduğunu belirtmiştir. Yazar ayrıca cam fiber takviyeli dokunmuş karbon, epoksi reçineli dokunmuş karbon, epoksi reçineli fiberglas ve yalnızca epoksi reçine olmak üzere dört farklı kompozit tipi kullanmıştır. Bu kompozitler üzerinde yapılan çekme ve darbe testleri sonucunda, belirli oranlarda epoksi reçinesiyle (%3 fiberglas, %1,5 veya %3 UDC) yapılan takviyelerin malzeme mukavemetini artırdığını tespit etmiştir. Genel olarak, üçlü bileşenli (örneğin epoksi + fiberglas + karbon fiber) kompozit numunelerin, yalnızca iki bileşen içerenlere kıyasla daha iyi mekanik performans sergilediği belirtmiştir. Ayrıca, kullanılan iki farklı takviye fiberi karşılaştırıldığında, dokunmuş karbon fiber takviyeli kompozitlerin daha yüksek mekanik dayanım sağladığı sonucuna ulaşmıştır.

Rajeshkumar ve arkadaşları [59], ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında değişen halloysit (nanokil HNC) katkısının karbon/cam fiber takviyeli hibrit kompozitleri vakum destekli reçine infüzyon yöntemi kullanılarak üretmişlerdir. Yapılan analizlerde, 30°C ile 180°C arasındaki sıcaklık aralığında değerlendirmişlerdir. HNC katkısının kompozitlerin mekanik performansını belirgin şekilde artırdığını özellikle

%3 oranında halloysit içeren kompozitlerin, diğer örneklerle kıyasla üstün özellikler sergilediğini belirtmişlerdir. Bu numunelerde depolama modülü 8826,81 MPa ile 9811,69 MPa arasında artış gösterirken, kayıp modülü de 968,18 MPa'dan 1183,23 MPa seviyesine yükselmiştir. Tribolojik testlerde ise uygulanan yük (10, 20 ve 30 N), kayma hızı (1,5; 3 ve 4,5 m/s) ve kayma mesafesi (500, 1000 ve 1500 m) gibi değişken parametreler kullanarak HNC'nin aşınma oranını azalttığını kompozitlerin sertliğini ve termal kararlılığını geliştirdiğini tespit etmişlerdir. Yazarlar, %3 halloysit nanokil içeren karbon/cam fiber hibrit kompozitlerin, yüksek aşınma direncinin kritik olduğu uygulamalar için uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Bozkurt [60], karbon fiber ve cam fiber kullanarak iki farklı dizilimde hibrit kompozit malzeme üretmiş ve düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirmiştir. İlk dizilimde (C1) karbon fiber tabakalar dış yüzeyde, cam fiber tabakalar iç kısımdadır. İkinci dizilimde (C2) ise cam fiberler dış yüzeyde, karbon fiberler iç kısımda yer almıştır. Her iki dizilimde de 90x25 mm² ebatlarında, 4 mm kalınlığında ve 18 tabakalı olarak hazırlanmıştır. Darbe testlerinde ankastre ve basit mesnet şeklinde 2 m/s (10,98 J), 2.5 m/s (17,57 J) ve 3 m/s (25,25 J) hızlarda. 12 mm yarıçaplı yarı küresel uçlu 5,6 kg kütleli bir vurucu ile 1 metre yükseklikten serbest düşme ile darbeler uygulamıştır. Yazar, C1 dizilimli numunelerin daha rijit olduğu ve darbe altında daha az çökme gösterdiği tespit etmiştir. Bu durumu, karbon fiberin dış yüzeyde yer almasının levhanın sertliğini artırmasıyla açıklamıştır. C2 diziliminde ise darbe kuvvetinin daha düşük kaldığı belirtmiştir. Darbe hızı arttıkça, malzeme ile darbe arasındaki etkileşim süresinin uzadığını ve ani kuvvet düşüşlerinin daha şiddetli olduğu belirlemiştir. Düşük hızlarda matris çatlağı ile sınırlı kalan hasarın, yüksek hızlarda delaminasyon ve fiber kırılması gibi daha ciddi hasarlara dönüştüğü ifade etmiştir. Hasar sürecinin matris çatlağıyla başlayarak, enerji seviyesine bağlı olarak delaminasyon, fiber sıyrılması ve kopması gibi mekanizmalarla ilerlediğini belirtmiştir.

Liu ve arkadaşları [61], karbon ve cam fibere takviye edilmiş hibrit kompozit plakaların düşük hızlı darbeler altındaki ezilme ve kırılma davranışlarını incelemişlerdir. Farklı fiber oranlarının darbe direnci üzerindeki etkilerini değerlendirmişler. Cam fiberin, karbon fibere göre daha düşük sertliğe sahip olmasına rağmen, yüksek deformasyon kabiliyeti sayesinde darbe enerjisini daha etkili biçimde absorbe ettiği, çatlak yayılımını geciktirdiğini ve delaminasyon direncini artırdığını

belirtilmişler. Karbon fiberin ise yüksek rijitlik nedeniyle daha kırılğan bir davranış sergilediğini, kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde daha dik bir profil gösterdiğini ifade etmişlerdir. Hibrit yapılarda cam ve karbon fiberlerin uygun oranlarda birleştirilmesiyle, yüksek enerji emilimi ve kontrollü hasar gelişimi sağlanabileceğini, ancak cam fiber oranının aşırı artırılması durumunda bu etkinin sınırlanabileceği sonucuna varmışlardır.

Pheysey ve arkadaşları [62], cam, karbon ve hibrit fiber takviyeli SMC kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışlarını incelemişlerdir. %57,5–60 fiber hacmine sahip numuneleri 150 x 100 x 4 mm³ boyutlarında hazırlamış ve 16 mm yarım küresel uçlu darbe çubuğu ile 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerinde test etmişlerdir. Cam fiber takviyeli SMC'lerin düşük darbe enerjilerinde en yüksek hasar toleransını gösterdiğini, karbon takviyeli SMC'lerde artan enerjiyle birlikte ciddi hasar ve mukavemet kaybı tespit ettiklerini belirtmişlerdir. Hibrit SMC'lerin ise düşük ve orta enerji düzeylerinde sünek ve rijit davranışları dengeleyerek dengeli bir darbe performansı sergilediğini belirtmişlerdir. Görsel incelemelerde, cam ve hibrit yapıların daha kontrollü çatlaklar ürettiğini, karbon fiberli numunelerde ise ani ve yoğun çatlaklar oluştuğu belirtmişler. Hibrit yapıların, camın sünekliği ile karbonun rijitliğini birleştirerek darbe enerjisini daha dengeli absorbe ettiği ve hasar toleransını artırdığı sonucuna varmışlardır.

Dong [63], sonlu elemanlar analizleriyle karbon ve cam fiber takviyeli hibrit kompozitlerin eğilme davranışını incelemiştir. Üç noktalı eğme koşullarında dokuz farklı hibrit yapıyı analiz etmiş ve cam fiber katmanlarını basınç yüzeyine yerleştirerek delaminasyon ve mikro burkulma oluşumlarını değerlendirmiştir. Karbon/cam arayüzlerinde özellikle basınç bölgesinde yüksek kesme gerilmeleri nedeniyle delaminasyon riskinin arttığını gözlemlemiştir. Cam fiber oranının düşük olduğu yapıların delaminasyona karşı daha hassas olduğunu, bu nedenle istifleme sırası ve hibrit oranının dikkatle optimize edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca, cam ve karbon katmanlarının etkileşiminden kaynaklanan arayüz davranışlarının yapısal bütünlük üzerinde belirleyici etkiler oluşturduğunu vurgulamıştır.

Lin ve arkadaşları [64], iç basınç altındaki karbon/cam hibrit örgülü kompozit boruların 2 J, 5 J ve 8 J darbe enerjilerinde düşük hızlı darbe davranışlarını

incelemişlerdir. Farklı hibritleşme aralıklarına sahip numuneleri, aynı fiber oranına sahip saf karbon ve saf cam fiberli örneklerle karşılaştırmışlardır. İntralaminar (katman içi) hibridizasyonun, cam fiberlerin sünekliği ve karbon fiberlerin kırılgenliğini dengeleyerek darbe dayanımını artırdığı belirtmişlerdir. Yazarlar Cam fiber katkısının, karbon fiber kaynaklı lif kırıklarının sınırlandırdığını, darbe enerjisinin daha dengeli dağılmasını sağladığını, daha sık hibrit aralığına sahip numunelerin darbe dayanımında daha etkin performans gösterdiği ve hibrit sertleştirme etkisinden daha fazla yarar sağladığını belirtmişlerdir.

Lv ve arkadaşları [65], karbon, cam, kevlar ve bazalt fiber takviyeli kompozitlerin çok açılı düşük hızlı darbe altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Farklı eğik darbe açılarında yapılan testlerde ($30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$), darbe açısı arttıkça tepe kuvveti, darbe süresi, yer değiştirme ve enerji emiliminde önemli değişiklikler gözlemlemişlerdir. Numune takviyeleri ve darbe açısına göre değişken aralıklarda (12,04 J, 16,14 J aralığında) enerji emilim değerleri bulmuşlardır. Yazarlar düzlem içi özelliklerin darbe tepkileri üzerinde %50'nin üzerinde etkili olduğunu, özellikle tepe kuvveti ve enerji emiliminde belirleyici rol oynadığını belirtmişlerdir. Yüksek açılı darbelerde konik iç hasar ve artan delaminasyon, düşük açılarda ise daha fazla düzlem içi hasar tespit etmişlerdir. Ayrıca, farklı fiber türlerine bağlı olarak yüzey çatlak desenlerinin karakteristik şekilde değiştiğini ve bu desenlerin malzemenin sertlik ve tokluk özellikleriyle ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Ni ve arkadaşları [66], cam ve karbon fiber takviyeli üç farklı hibrit kompozit yapı tasarlamışlar ve bu yapılar üzerinde farklı darbe enerjileriyle düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar 5,7 kg kütleli ve 20 mm çapında yarı dairesel bir vurucu kullanarak serbest düşme ile 5 J, 10 J, 15 J, 20 J, 25 J ve 30 J darbe enerjileri uygulamışlardır. Karbon fiber katmanının ilk sırada yer almasının deformasyon direnci ve artık mukavemeti artırdığını, orta katmanda yer almasının ise hasar alanını en aza indirerek darbe enerjisinin dengeli dağılmasını sağladığı belirtmişlerdir. Tüm karbon/cam hibrit yapılarda, karbon fiberin yüksek mukavemet özelliği sayesinde darbe direncinin önemli ölçüde arttığını ayrıca, karbon fiberin konumunun mekanik davranış üzerinde belirleyici olduğunu ve sandviç etkisi ile hasar kontrolünün sağlandığını belirtmişlerdir.

Anuse ve arkadaşları [67], karbon ve cam fiber takviyeli hibrit kompozit plakaların darbe sonrası hasar yayılımını incelemişlerdir. 15 J, 20 J ve 25 J enerji seviyelerinde 150x100x5,4 mm³ ölçülerindeki numunelere düşük hızlı darbe testleri ve ardından uygulanan basma testleri sonucunda, merkezi katmanda +45°/-45° cam fiberi kullanılan numunenin, 0°/90° cam fiberi kullanılan numuneye göre daha yüksek darbe direnci gösterdiğini belirtmişlerdir. Hasar toleransı değerlerinin her iki numunede de artan darbe enerjisiyle azaldığını, ancak ikinci numunede bu azalmanın daha sınırlı kaldığını belirtmişlerdir. Tahribatsız muayene sonuçlarına göre, hasarın temel olarak fiber kopması, matris çatlağı ve arka yüzeyde delaminasyon şeklinde olduğu belirtmişlerdir. Ayrıca, alt plakadaki burkulma ve katman ayrılmasının, darbe sonrası taşıma kapasitesini sınırlayan önemli faktörler olduğu ifade etmişlerdir.

Liu ve arkadaşları [68], tek yönlü karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerin darbe dayanımını artırmak amacıyla aramid/karbon hibrit takviyeli kompozitler (A/CFHRP) geliştirmişlerdir. 10 J ve 50 J darbe enerjileri altında yapılan testlerde, A/CFHRP numunelerin CFRP'ye göre sırasıyla %81,2 ve %37,4 daha yüksek darbe sonrası mukavemet koruma oranı gösterdiğini belirtmişlerdir. Yazarlar aramid fiberlerinin, CFRP'in kırılma kırılma davranışını delaminasyon ve arayüz ayrılması gibi daha kontrollü hasar türlerine dönüştürdüğünü ve yapısal bütünlüğü iyileştirdiğini ayrıca, aramid fiberinin basınç dayanımını azaltsa da darbe sonrası yük taşıma kapasitesini artırdığını belirtmişlerdir.

Cheng ve arkadaşları [69], cam fiber ve alüminyum katmanlardan oluşan fiber metal lamine (FML) plakaların düşük hızlı darbe altındaki hasar davranışını ve darbe sonrası basma performansını incelemişlerdir. 2/1 ve 3/2 katman dizilimli numunelere 35 J ve 65 J darbe enerjileri uygulamış, ardından basma testleri gerçekleştirmişlerdir. Basma dayanımlarının %40–61 oranında azaldığını tespit etmişlerdir. 2/1 dizilimli plakaların lif yönelimine bağlı olarak çeşitli hasar biçimleri ve burkulma davranışları sergilediğini, buna karşılık 3/2 dizilimli yapıların daha stabil tepkiler gösterdiğini belirtmişlerdir. Yazarlar darbe enerjisi arttıkça malzeme içindeki gerilmenin yükseldiğini ve hasarın daha geniş bir alana yayıldığını, ayrıca, fiber yönelimi ve katman yapısının darbe dayanımı üzerinde belirleyici olduğu vurgulamışlardır.

Cheng ve arkadaşları [69], düşük hızlı darbe etkisi altında fiber metal plakaların (FML) hasar davranışını ve sonrasında uygulanan basma yükleri altındaki performansını incelemiştir. Araştırmada, cam fiberi ve alüminyum katmanlardan oluşan FML numuneleri kullanmışlardır. İncelemeler sırasında fiber ve metal katman sayısına göre 2/1 ve 3/2 dizilimde olmak üzere iki farklı plaka yapısı tercih etmişlerdir. Numunelere 35 J ve 65 J enerji aralığında düşük hızlı darbeler uygulanmış ve ardından bu darbenin değerlendirmek amacıyla basma testleri gerçekleştirmişlerdir. Basma dayanımlarının %40 ila %61 oranında azalma gösterdiğini bildirmişlerdir. Test sürecinde malzemenin şekil değiştirme davranışı, hasarın olduğu bölgeler ve bu hasarın ilerleyişini analiz etmişlerdir. Yazarlar, fiber yönelimi, darbe enerjisi ve katman yapısı, malzemenin darbeye karşı gösterdiği dayanımı doğrudan etkilediğini bildirmişler. 2/1 dizilimli FML yapılar, farklı fiber yönelimlerine bağlı olarak farklı hasar biçimleri sergilemiş ve basma testi sırasında çeşitlenen burkulma davranışları göstermiştir. Buna karşılık, 3/2 konfigürasyonuna sahip yapılar daha stabil bir davranış sergilemiş ve hasar bölgesinde genellikle tek bir burkulma hattı oluşmuştur. Darbe enerjisi arttıkça malzeme içindeki gerilmelerin büyüdüğü ve hasarın daha yaygın hale geldiğini gözlemlemişler.

Luo ve arkadaşları [70], karbon ve aramid fiber takviyeli hibrit kompozitlerin düşük hızlı darbe ve darbe sonrası basma dayanımlarını 25 J, 30 J ve 40 J'lik darbe enerjileriyle incelemiştir. Yazarlar, simetrik 16 katmandan oluşan ve 150×100 mm² boyutlarında tasarlanan dört farklı numune üretmişlerdir. H1 numunesinde aramid fiber katmanları karbon fiber katmanlarının arasına yerleştirilmişken, H2 numunesinde aramid ve karbon fiberleri ardışık olarak dizilmiştir. Kontrol numunelerinden C1, H1 ve H2 ile aynı yerleşim düzenine sahipken, C2 ise $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_2$ ile tasarlamışlardır. Hibrit yapıların, saf karbon fiber kompozitlere göre daha az hasar gösterdiğini ve darbe sonrası daha fazla dayanım koruduğunu belirtmişlerdir. Özellikle 40 J'lik darbeye saf CFRP numunelerde %58,55 oranında dayanım kaybı tespit etmişlerdir. Aramid fiberlerin karbon fiberlerle birlikte kullanılmasının, darbe esnekliğini artırdığını ve hasar toleransını iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Yazarlar ultrasonik incelemelerde, hibrit numunelerde daha az matris çatlağı, fiber kırığı ve delaminasyon olduğunu, hibrit plakaların daha fazla geri tepme

enerjisi sergilediğini ve darbe enerjisini elastik olarak daha iyi yönettiği ifade etmişlerdir.

Luo ve arkadaşları [70], hibrit kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe dayanımını ve darbe sonrası basma dayanımını araştırmışlardır. Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ile aramid fiber (HAFRP) birleştirilerek hibrit kompozitler üretmişlerdir. Bu hibrit yapıların, karbon fiberin zayıf darbe dayanımını geliştirmesini hedeflemişlerdir. Yazarlar, simetrik 16 katmandan oluşan ve $150 \times 100 \text{ mm}^2$ boyutlarında tasarlanan dört farklı numune üretmişlerdir. H1 numunesinde aramid fiber katmanları karbon fiber katmanlarının arasına yerleştirilmişken, H2 numunesinde aramid ve karbon fiberleri ardışık olarak dizilmiştir. Kontrol numunelerinden C1, H1 ve H2 ile aynı yerleşim düzenine sahipken, C2 ise kuazi-izotropik dizilim olan $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_2S$ ile tasarlanmıştır. Bu numuneleri 25 J, 30 J ve 40 J'lik darbe enerjileriyle test etmişlerdir. Yazarlar darbe enerjisi arttıkça hibrit kompozitlerin performansının daha belirgin hale geldiğini gözlemlemişlerdir. Aynı darbe enerjisinde hibrit CFRP/HAFRP plakaların daha az enerji emdiğini ve daha fazla geri tepme enerjisi gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu durumun, hibrit yapıların darbe elastikiyetinin yüksek ve hasar direncinin güçlü olduğunu gösterdiğini ifade etmişlerdir. Görsel ve ultrasonik incelemelerde, saf CFRP numunelerde daha ciddi hasarlar tespit etmişlerdir. Bunlar arasında matris çatlakları, fiber kırıkları ve fiber kopmaları yer almıştır. Buna karşılık, hibrit numunelerde bu hasarların çok daha az olduğunu belirtmişlerdir. Özellikle CFRP C2 numunelerinde iç delaminasyonun neredeyse tüm alanı kapladığını raporlamışlardır. Son olarak, hibrit numunelerin darbe sonrası daha fazla dayanım koruduğunu saptamışlardır. CFRP numunelerinde darbe sonrası basma dayanım kaybının, hibrit numunelere göre 2–4 kat daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. 40 J'lik darbede CFRP C2 numunesinde %58,55 oranında dayanım kaybı ölçtüklerini ifade etmişlerdir.

Wang ve arkadaşları [71], düşük hızlı darbelere maruz kalan üç boyutlu (3D) dokuma karbon/heterosiklik aramid fiber hibrit kompozitlerin dinamik hasar direncini incelemişlerdir. Saf karbon fiberli kompozitler, bağlayıcı iplik olarak heterosiklik aramid fiber kullanılan kompozitler, katmanlar arası hibrit ve katman içi hibrit olmak üzere dört farklı kompozit türü kullanmışlardır. Numunelere 12.5 J ile 62.5 J arasında değişen enerji seviyelerinde düşen ağırlık darbe testi uygulamışlardır. Test sonuçlarına göre, fiberlerin hibritlenme biçiminin darbe tepkisi üzerinde önemli etkiler

oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Özellikle katman içi hibrit yapıların, hem yüksek darbe dayanımı hem de sabit sertlik özellikleriyle en iyi genel performansı gösterdiğini belirtmişlerdir. Darbe testleri sırasında kompozit yapıların tepkilerini geri sekme ve delme olarak sınıflandırmışlardır. 3D dokuma kompozitlerin, düşük hızlı darbelere karşı yüksek delaminasyon direnci sergilediğini ve hasarların genellikle katman içi çatlaklar ile lif-matris kırıkları şeklinde yayıldığını raporlamışlardır. Katmanlar arası ve katman içi hibrit yapıların her ikisinin de darbe direncine katkıda bulunduğunu, fakat özellikle katman içi hibrit yapıların daha yüksek bükülme sertliği ile daha üstün performans sağladığını vurgulamışlardır.

Demirci ve Şahin [72], bazalt ve cam fiber takviyeli hibrit kompozit boruların darbe altındaki davranışını incelemişlerdir. içi boş (yağsız), 0 bar basınçta yağ ile doldurulmuş ve 5 bar basınçta yağ ile doldurulmuş borular için 15 J, 20 J ve 25 J'lik darbe enerjileri uygulanmış ve boruların dinamik tepkileri değerlendirmişler. Bu borular üzerinde yapılan testlerde, darbe enerjisi arttıkça emilen enerji, maksimum kuvvet ve temas süresinin arttığı belirlenmiştir. Boş boruların en fazla enerjiyi emdiğini, ancak en düşük rijitliği gösterdiğini, Buna karşılık, 5 bar basınçla yağ doldurulan borular en yüksek rijitlik ve darbe direnci gösterdiğini belirtmişlerdir. Yağın viskoz yapısının hasar oluşumunu azalttığı, lif kırılmalarını önlediği ve boruların elastik davranışını artırdığı ifade etmişlerdir. İç dolgunun türünün ve basınç seviyesinin darbe dayanımında belirleyici bir etken olduğunu belirtmişlerdir.

Ahamed ve arkadaşları [73], karbon/bazalt fiber katmanlı hibrit kompozitler için düşük hızlı darbe simülasyonları gerçekleştirmişler. 20 J ve 30 J kullanılarak yapıtları testlerde, hibrit plakaların fiziksel testleri ile simülasyon sonuçlarını karşılaştırarak maksimum temas kuvveti, yer değiştirme ve enerji soğurumu değerlerinde simülasyon ile deney arasındaki hata oranlarının %6,1 olduğunu ve hasar alanı boyutundaki hata oranının ise %4,8 civarında olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar aynı zamanda katman dizilimi ve malzeme oranlarının darbe performansı üzerindeki etkileri incelemişler. Özellikle karışım oranı %25 olduğunda, dış katmandaki bazalt fiberinin darbe dayanımını artırdığı belirtmişler. Karbon fiber dışta olduğunda tepe kuvvetinin daha yüksek olduğunu tüm karbon fiber dışta ve tüm bazalt fiber içte olduğunda enerji soğurumu arttığını bildirmişler. Optimizasyon sonucunda en iyi yapı, [CBBC]_{2s} katman dizilimi ve [90°/45°/0°/-45°]_{2s} açılı dizilimiyle elde etmişlerdir. Bu yapının,

darbe kuvveti ile yer değiştirme arasındaki dengeyi en iyi şekilde sağladığı ve önceki yapılarda gözlemlenen istenmeyen performans özelliklerini ortadan kaldırarak darbe dayanımını arttırdığını belirtmişler.

Zhu ve arkadaşları [74], cam ve karbon fiberlerle güçlendirilmiş polipropilen bazlı kompozit malzemeler geliştirmişlerdir. Cam fiberlerini polipropilen tabakalar arasında altı katman halinde yerleştirerek, sıcak presleme yöntemiyle fiberlerin polipropilen matrisi tarafından kaplanmasını sağlamışlardır. Aynı yöntemle karbon fiber takviyeli kompozit levhalar da üretmişlerdir. Elde edilen cam ve karbon fiber verileri ile ABAQUS simülasyonlarında Hashin kriterini kullanarak farklı cam ve karbon fiber kombinasyonlarını değerlendirmişlerdir. En başarılı sonucu, karbon fiberlerin ortada yer aldığı ve katmanların GF-GF-C-C-GF-GF şeklinde dizildiğı yapıda 155,4 MPa'lık en yüksek çekme dayanımını elde ettiklerini belirtmişlerdir. Karbon fiberlerin dış tabakalarda veya orta kısımda yer aldığı dizilimlerde ise sırasıyla 145,7 MPa ve 136 MPa çekme dayanımları ölçmüşlerdir. Bu veri ile merkezde yer alan karbon fiberlerin daha yüksek dayanım sağladığını, ayrıca cam fiber yerine iki kat karbon fiber yerleştirilmesiyle; çekme elastik modülünde %41,6, çekme dayanımında %13,44, basma dayanımında %24,5, eğilme elastikiyetinde %162 ve eğilme dayanımında %133,4 oranında iyileşme sağladıklarını belirtmişlerdir.

Chen ve arkadaşları [75], karbon, bazalt ve cam fiberlerinin farklı istifleme dizilimleriyle oluşturduğu hibrit kompozitlerin darbe davranışını incelemişlerdir. Vakum destekli reçine infüzyon kalıplama yöntemiyle 100 × 100 mm² boyutlarında test numuneleri üretmişlerdir. Örneğin, CBC ve CGC gibi dizilimlerde merkezde sekiz kat bazalt veya cam fiberi bulunurken, dış yüzeylerde dörder kat karbon fiberi yer almıştır. Ayrıca, CBGBC ve BGCGB gibi tüm fiber türlerini içeren hibrit dizilimler de hazırlamışlardır. Plakaları 50J ve 60J darbe enerjileriyle test etmişlerdir. Ayrıca sonlu elemanlar (FE) modelinin doğrulanması amacıyla karbon ve bazalt plakaları 20J ve 70J darbe enerjileriyle test etmişlerdir. Hibrit yapılarda karbon fiberin çekirdek katmanda yer aldığı dizilimlerin, dışta yer aldığı dizilimlere kıyasla daha yüksek darbe dayanımı ve enerji emilimi sağladığını belirtmişlerdir. Ayrıca, cam ve bazalt fiberlerin sünek özellikleri sayesinde karbon fiberin gevrek yapısından kaynaklanan sınırlamaları dengelediğini göstermişlerdir. Üç farklı fiber türünün plaka içerisindeki

yerleşim sırasının, darbe performansında belirleyici bir faktör olduğu sonucuna varmışlardır.

Alshehri ve arkadaşları [75], karbon fiber/epoksi kompozitlere %0,2 ve %0,4 oranlarında helezonik çok katmanlı karbon nanotüpler (HMWCNT) ekleyerek 15 ve 25 J'lük darbe enerjileriyle düşük hızlı darbe (LVI) ve darbe sonrası sıkıştırma (CAI) testleri gerçekleştirmişlerdir. HMWCNT katkısı, darbe dayanımını artırdığını ve hasar alanlarını önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir. Kontrol örnekleri en düşük tepe kuvvete ve en geniş hasar alanına sahipken, %0,4 HMWCNT içeren kompozitler, 25 J darbe altında 9870,25 N'lik maksimum kuvvet ile en iyi performansı sergilemişlerdir. Ayrıca, HMWCNT'lerin deformasyonu sınırlayarak yük taşıyıcı rol üstlendiği ve darbe sonrası yapısal bütünlüğü koruduğu belirmişlerdir.

Wan ve arkadaşları [77], 14 kat karbon fiber takviyeli kompozitlerin ortasına paslanmaz çelik ve alüminyum tel ağlar yerleştirerek düşük hızlı darbe testleri uygulamışlardır. Darbe testlerini, 10 J, 15 J, 20 J ve 25 J darbe enerjilerinde 150mmx100 mm boyutlarında numunelere uygulamışlar. Deneyde, 16 mm uç çapına ve 4.5 kg toplam kütleye sahip darbe cihazının temas kuvveti ve yer değiştirme geçmişini kaydetmişlerdir. Tel ağ takviyesinin, kompozit yapıya süneklik kazandırarak darbe enerjisini daha geniş bir alana yaydığı ve bu sayede darbe performansını artırdığı sonucuna varmışlardır. Alüminyum tel ağ içeren panellerin daha düşük sertlik ve tepe kuvvetine sahip olmalarına rağmen, artan süneklikle darbe enerjisini daha iyi absorbe ettikleri belirtilmiştir. Ayrıca, tel ağın deliklerine epoksi reçine dolmasının, katmanlar arası bağları güçlendirerek darbe dayanımını iyileştirdiği ifade etmişlerdir.

Cengiz ve arkadaşları[78], VARTM yöntemiyle üretilen karbon fiber takviyeli epoksi plakaların ve çelik tel örgü takviyesinin eğilme ve düşük hızlı darbe davranışları üzerindeki etkisini 10 mm uç çapına ve 9.3 kg toplam kütleye sahip çarpma ucuyla 50j enerjide, hazırladıkları numuneye (100×100×2 mm³) uygulamışlardır. Karbon fiberi takviyeli epoksi, aynı yönde [0°/90°] üç katman karbon fiberi kumaşından oluşurken, hibrit metal tel örgü/karbon fiberi takviyeli epoksi plakalardan oluşturulmuştur, yüzeyde çelik tel örgüye taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, karbon fiber ve çelik tellerin epoksi matrisle iyi bir bağ oluşturduğunu gösterdiğini

belirtmişler. Mikro-CT verilerinin, çelik tel örgünün darbe sonucu oluşan konik bölgelerdeki parçalanma ve delaminasyon hasarını azalttığını ve yapısal bütünlüğü koruduğunu ortaya koyduğunu belirtmişlerdir. Hibrit tel örgü/karbon fiber takviyeli epoksi plakaların, darbe dayanımı açısından önemli avantajlar sunduğunu, yapının daha fazla enerji soğurmasını sağlarken iç hasarı azalttığını ve kompozit bütünlüğünü koruduğunu belirtmişlerdir.

Vescovini ve arkadaşları [79], kevlar ve cam fiberli kompozit plakaları farklı kalınlıklarda ve simetrik-asimetrik hibrit dizilimlerle üreterek bu kompozitlerin darbe davranışını 49 J, 86 J ve 115 J enerji seviyelerinde incelemişlerdir. Poliüretan matrisli bu yapıların, epoksi matrisli kompozitlere kıyasla daha yüksek enerji absorpsiyonu sağladığını belirtmişlerdir. Hibrit numunelerin, saf kevlar ve cam fiberli yapılara göre daha dengeli darbe performansı sergilediğini belirtmişlerdir. Kevlar takviyeli örneklerde lif çekilmeleri, cam fiberlilerde ise lif kırılmaları gözlemlenmiştir. Hibrit yapılarda bu etkilerin birlikte ortaya çıktığını ifade etmişlerdir. Ayrıca poliüretan matrisin delaminasyona karşı yüksek dayanım gösterdiği bu sayede bu kompozitlerin koruyucu uygulamalarda avantaj sunduğu sonucuna varmışlardır.

Ishtiaq ve arkadaşları [80], Ishtiaq ve arkadaşları [80], cam, karbon ve Kevlar fiberlerini farklı sıralamalarla dizerek oluşturdukları 11 hibrit kombinasyonu düşük hızlı darbe altında incelemişlerdir. 2 cam, 5 karbon ve 5 Kevlar tabakasından oluşan H9 (G2C5K5) numunesinin, çekme, eğilme ve darbe dayanımı ile termal kararlılık açısından dengeli bir performans sergilediğini belirtmişlerdir. Bu kombinasyonda darbe enerjisi 16,3 J olarak ölçülmüş ve %9,9 sapmayla optimum dayanım elde etmişlerdir. Yazarlar, karbonun çekirdek bölgede konumlandırılmasının mekanik özellikleri artırdığını ve üçlü hibritlerin darbe enerjisi açısından daha iyi sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, hibritleştirilmenin gevrek kırılmaları azalttığı ve mekanik dayanımı genel olarak iyileştirdiği sonucuna varmışlardır.

Wang ve arkadaşları [81], karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerden üretilmiş petek çekirdekli sandviç yapıların düşük hızlı darbelere karşı tepkisini ve hasar davranışını incelemişlerdir. Testler sırasında her darbe seviyesi için üç tekrar yapmışlar ve toplamda dört farklı enerji düzeyinde (10 J, 30 J, 50 J ve 70 J) testler uygulamışlardır. Darbe testleri sonucunda yapıda dört temel hasar durumu

gözlemlemişlerdir. Bunların belirgin hasar olmaması, üst yüzey ve çekirdekte hasar, alt yüzeyde hasar ve tamamen delinme şeklinde olduğunu belirtmişlerdir. Yüzeyde genellikle delaminasyon ve kırılma meydana geldiğini, çekirdek hücrelerinin duvarlarının ise kırılan yüzeyin etkisiyle dışa doğru bükülmüş veya ezilmiş olduğunu belirtmişlerdir. Darbe sürecinde enerjinin büyük bir kısmının başlangıçta üst yüzey tabakası tarafından emildiğini, yapının delinmesinden sonra ise bu görevi alt yüzey tabakasının üstlendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, çekirdek duvar kalınlığının ikinci tepe yükünü, hücre kenar uzunluğunun ise her iki tepe yükünü etkilediğini ortaya koymuşlardır. Daha kısa hücre kenar uzunluğunun, yapının darbe dayanımını artırmada etkili bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır. Enerji absorpsiyonu ve deformasyon sürecinin darbe enerjisine göre farklılık gösterdiğini, darbe enerjisi arttıkça çekirdekteki hasarın hem şiddetinin hem de yayılımının arttığını tespit etmişlerdir.

Gao ve arkadaşları [82], karbon nanotüpler (CNT'ler) ve alumina ile güçlendirilmiş termoset polimer bazlı nanokompozitler üzerinde yaptıkları çalışmalarla, nanoparçacıklar ve mikro fiberlerin enerji emme kapasitesini artırdığını göstermişlerdir. Nanoparçacıkların, nanokompozitlerin elastik enerji emme özelliklerini atomik düzeyde önemli ölçüde geliştirdiğini ortaya koymuşlardır. 12×12 cm² boyutlarındaki standart numunelere, 15 J enerji seviyesinde düşük hızda darbe (LVI) testleri uygulamışlardır. Yazarlar, nanoparçacıklar ve mikro fiberlerin eklenmesiyle dört fazlı kompozitin enerji emme kapasitesinin belirgin şekilde arttığını belirtmişlerdir. Nanoparçacıkların polimer ve liflerle birlikte kullanılmasının, elastik modülü %163'e kadar artırdığını belirterek çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler) ve alumina nanoparçacıkları ile kompozitlerin mekanik özelliklerinin geliştirildiği tespit etmişlerdir. Nanoparçacıkların doğru oranlarda kullanılmasının, daha dayanıklı ve özel performans özelliklerine sahip kompozit malzemelerin geliştirilmesine katkı sağlayacağını, enerji emici malzemelerle yapılan yapıların tasarımında kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Hinzmann ve arkadaşları [83], Keten fiber kumaşları, %0.3 oranında nanoelmas süspansiyonu kullanılarak ultrasonik daldırma yöntemiyle üretmişlerdir. Bu işlemin, fiber yüzeyini kaplayan nanoelmaslar sayesinde daha iyi matris bağlantısı sağlandığını ve aynı zamanda hidrofobiklik özelliğinin arttığını belirtmişlerdir. Fiber-matris

arayüzündeki bu gelişimin, darbe enerjisinin daha verimli şekilde yayılmasına olanak tanıdığını, çatlak oluşumunu geciktirdiğini belirtmişlerdir. FFND kompozitlerin, cam fiber kompozitlere göre 17 kat daha fazla darbeye dayanabildiğini ve %74 daha az kütle kaybı gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, nanoelmas katkısının fiber -matris bağına güçlendirerek yapısal dayanıklılığı artırdığını, çatlak ilerlemesini ve erozyonu önemli ölçüde azalttığını belirtilmiştir. Bu yönüyle çalışma, nano katkıların doğal fiber bazlı kompozitlerde darbe dayanımını anlamlı biçimde iyileştirdiğini göstermiştir.

Üzümcü [84], karbon nanotüplerin (CNT) kullanarak kompozit levhaların darbe davranışları üzerindeki etkileri araştırmıştır. Kompozit levhalar, E-camı woven dokuma örgülü kumaşlar ve epoksi kullanarak üretmiştir. CNT katkısını epoksi matrisine %0,5, %1 ve %2 oranlarında ilave etmiştir. Darbe testleri sonucunda, karbon nanotüp katkısının düşük enerji seviyelerinde kompozit levhaların yük taşıma kapasitesini artırdığı ve eğilme rijitliğini iyileştirdiği tespit etmiştir. 21 J enerji altında CNT katkılı numunelerin daha iyi performans gösterdiğini, 21 J üzerinde ise katkısız numunelerin daha dayanıklı olduğu tespit etmiştir. Ayrıca, düşük enerji seviyelerinde CNT katkılı numunelerin daha küçük delaminasyon alanı ve iz çapı oluşturduğu, buna karşın yüksek enerji seviyelerinde katkısız numunelerin daha iyi yük taşıdığı belirlemiştir. Yazar, karbon nanotüplerin kompozit malzemenin darbe dayanımını belirli koşullarda artırdığını, ancak yapıyı aynı zamanda gevreklettiğini belirtmiştir.

Lei ve arkadaşları [85], dimi dokuma karbon fiber, cam fiber ve karbon fiber/cam fiber hibrit takviyeli kompozit plakaların 10–30 J aralığındaki darbe enerjileri altında düşük hızlı darbe (LVI) ve darbeli basma sonrası (CAI) davranışlarını incelemişlerdir. Alev geciktirici epoksi reçine ile genel epoksi reçine kullanarak ürettikleri dokuma karbon fiber kompozit plakaların performanslarını değerlendirmişlerdir. Alev geciktirici epoksi reçinelerin, genel epoksi reçinelerine kıyasla daha düşük darbe dayanımı ve daha geniş hasar alanı oluşturduğunu, ilk tepe kuvveti ve yer değiştirme değerlerinin ise sırasıyla %26 ve %25 oranında düşük gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Cam fiber ilavesi, darbe hasar modunu değiştirerek daha yayılı bir hasar deseni oluşturduğunu ve darbe ile CAI dayanımında belirgin iyileşmeler sağladığını belirtmişlerdir. Hibrit plakaların, %12 daha yüksek maksimum temas kuvveti ve CAI dayanımında yaklaşık %9–16 oranında iyileşme olduğunu belirtmişlerdir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, farklı fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip iki ya da daha fazla malzemenin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Bu malzemeler, kendilerini oluşturan bileşenlere kıyasla daha yüksek dayanım, rijitlik, kırılma tokluğu ve sıcaklığa direnç gibi avantajlar sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde kompozitler; havacılık, otomotiv, savunma, inşaat ve spor gibi birçok sektörde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Modern kullanım alanları günümüzde artsa da, yapı inşasında dayanımı artırmak amacıyla kerpiç yapımında saman gibi doğal takviyelerin kullanılması, kompozitlerin geçmişinin antik dönemlere uzandığını göstermektedir. Kompozitler, temel olarak matris ve takviye fazı olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. Matris, yapının bütünlüğünü korurken malzemeye uygulanan dış kuvvetleri takviye fazına aktarmaktadır. Takviye fazı ise yüksek dayanımı sayesinde malzemeye kopma dayanımı, kırılma dayanımı gibi mekanik özellikler kazandırmaktadır [86].

3.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, kısaca belirtmek gerekirse, mekanik dayanımı sağlayan farklı geometrik bileşenlerden (ör. fiberler) ve bu bileşenleri bir arada tutan polimer, metal ya da seramik bazlı malzemelerden oluşmaktadır. Yapılarında birçok farklı malzeme barındıran bu kompozitler, çeşitli şekillerde sınıflandırılabilmektedir. Ancak en yaygın sınıflandırma yöntemi, kompozitin yapısında bulunan matris ve takviye elemanlarına göre yapılmaktadır [87].

3.1.1 Matris malzemesine göre sınıflandırılması

Matris malzemeler, kompozit malzemenin kullanım amacı ve üretim yöntemi doğrultusunda metal, seramik ya da polimer bazlı olarak sınıflandırmaktadır.

3.1.1.1 Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozit malzemeler, genellikle bir metal veya metal alaşımından oluşan matris ile bu yapıya dayanım kazandıran takviye elemanlarının birleşiminden meydana gelmektedir. Bu tür kompozitlerde, matris olarak genellikle alüminyum, titanyum, magnezyum ve bakır gibi hafif ve dayanıklı metaller tercih edilmektedir. Metal matrisli kompozitlerde takviye elemanları ise genellikle partikül formunda bulunmakta ve kompozit yapıya sertlik, aşınma direnci, yüksek sıcaklık dayanımı gibi özellikler kazandırmaktadır. Bu takviye fazları çoğunlukla seramik kökenli olmaktadır. Metal nitrürler (örneğin silisyum nitrür, titanyum nitrür, tantal nitrür, zirkonyum nitrür), metal karbürler (örneğin silisyum karbür, bor karbür, tungsten karbür) ve metal oksitler (örneğin alümina, silika, zirkonya) bu amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır [88].

3.1.1.2 Seramik matrisli kompozitler

Seramikler, tarih boyunca insan eliyle üretilen ilk malzemelerden biri olmanın yanı sıra; yüksek sertlik, dayanıklılık, kimyasal kararlılık, termal genleşme direnci ile oksidasyon ve korozyon gibi zorlu koşullara karşı üstün direnç gösterme özelliklerine sahip bulunmaktadır. Bu özellikler, seramik matrisli kompozitlerin mühendislik alanında, özellikle aşırı sıcaklıkların ve termal şokların söz konusu olduğu ortamlarda yaygın şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Seramik matrisli kompozitler, metallere kıyasla daha düşük yoğunlukları ve yüksek oksidasyon dirençleri sayesinde önemli avantajlar sunmaktadır [89].

3.1.1.3 Polimer matrisli kompozitler

Polimerler, monomer adı verilen küçük moleküllerin bir araya gelerek oluşturduğu, yüksek molekül ağırlıklı büyük yapılardan oluşturmaktadırlar. Düşük maliyetle üretilibilmeleri, kolay şekillendirilebilmeleri ve amaca uygun tasarlanabilmeleri sayesinde birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. PVC (Polivinil Klorür) ve Teflon (Politetrafloroetilen – PTFE) bu malzemelere örnek olarak verilmektedir [90]. Polimer matrisli kompozitler, iki ana gruba ayrılmaktadır: termoset ve termoplastik matrisler. Termoset matrisler, fiber takviyeli kompozit üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Başlangıçta sıvı halde bulunmakta, katılaştırıcı ilavesiyle önce jel kıvamına gelmekte, ardından sertleşmektedirler. Termoplastik matrisler ise sünek

yapılı olmaktadır. Isıtıldıklarında eritilip, soğutulduklarında yeniden katılaşabilmektedirler. Bu özellik, onlara tekrar şekillendirilebilme yeteneği kazandırmaktadır [87].

3.1.1.4 Karbon matrisli kompozitler

Karbon-Karbon kompozitler, son derece yüksek mekanik ve termal performans sergilemektedirler. Seramik ve metal matrisli kompozitlerle karşılaştırıldığında, çok daha yüksek sıcaklıklara dayanabilmekte ve bu koşullarda mekanik dayanımları artış göstermektedir. Yoğunluk değerlerinin 1,6–2,2 g/cm³ aralığında olması, bu kompozitlere önemli bir avantaj kazandırmaktadır. Ayrıca, yüksek tokluk ve yük altında düşük kırılma eğilimi özellikleri, Karbon-Karbon kompozitleri, monolitik ve fiber takviyeli kompozitler gibi kırılma eğilimi gösteren malzemelere kıyasla daha üstün hale getirmektedir. Düşük yoğunlukları sayesinde, hava ve savunma sanayisinde tercih edilebilecek malzemeler arasında yer almaktadırlar [91].

3.1.1.5 Hibrit kompozitler

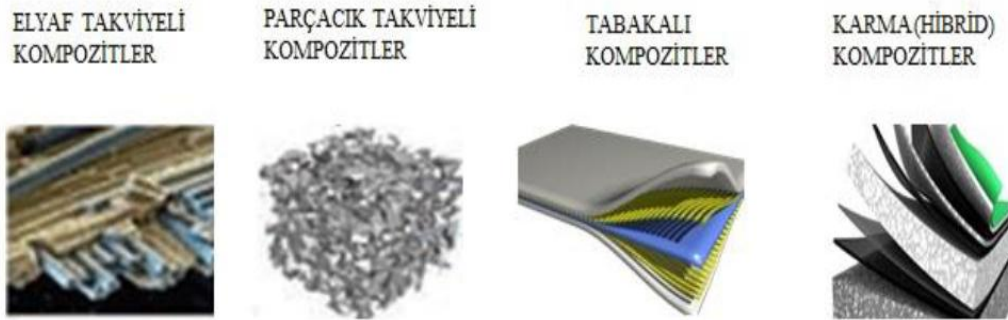
Kompozitler, genel hatlarıyla makro boyutta bir matris ve bir takviye fazının bütünleşmesi sonucunda ortaya çıkan malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Bu yapıda, kompozit malzemenin karakteristik özelliklerini belirleyen temel unsur, takviye fazı olarak kullanılan fiberlerdir. Takviye fazındaki fiberlerin sahip olduğu farklı nitelikler, kompozitin özelliklerini şekillendirmekte ve bu sayede çeşitli kullanım amaçları için farklı gereksinimlerin karşılanması mümkün olabilmektedir.

Bu noktada amaç, farklı fiber türlerinin sağlayacağı avantajları tek bir kompozit malzemeyle birleştirmektir. Hibrit kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla farklı fiberin bir matrisle bütünleştirilmesi sayesinde, söz konusu fiberlerin birbirinden farklı özelliklerini tek bir yapıda toplayabilme özelliğine sahip olmaktadır. Örneğin, aramid fiber, karbon fiberle oranla daha düşük maliyetli olmakla birlikte, basma mukavemeti bakımından oldukça sınırlı kalmaktadır. Karbon fiber ise daha yüksek basma mukavemeti değerlerine sahip olmakla beraber daha pahalıdır. Bu iki fiberin aynı hibrit kompozitte birlikte kullanılması, hem maliyet açısından avantaj sağlamak hem de daha yüksek basma mukavemeti sunan bir malzemenin elde edilmesine imkân vermektedir [56].

Hibrit kompozitler için dört farklı hibridizasyon yöntemi tanımlanmaktadır. İlk yöntem, aynı katmanda iki veya daha fazla fiber türünün bir arada kullanıldığı kat içi hibritleri kapsamaktadır. İkinci yöntem, plakanın her katının yalnızca tek tip fiber içermesini esas alan katlar arası hibritlerden oluşmaktadır. Üçüncü yöntem ise, tek çeşit fiberi çekirdek olarak kullanmakta ve bu çekirdeğin, farklı bir fiber türünden oluşan iki katman arasına yerleştirilmesiyle elde edilen sandviç hibritleri ifade etmektedir. Son olarak, farklı fiber türlerine ek olarak farklı matris malzemelerinin de birlikte kullanıldığı süper hibritler, dördüncü hibridizasyon yöntemini oluşturmaktadır [92].

3.1.2 Takviye malzemesine göre sınıflandırılması

Kompozit malzemelerde yük taşıma görevi genellikle takviye elemanına ait olmaktadır; matris ise dayanım ve rijitliği artırarak destek sağlamaktadır. Takviye elemanları fiber, parçacık, tabakalı veya karma olarak sınıflandırılmaktadır. Kompozitlerin performansı ise takviye elemanlarının türüne, uzunluğuna, geometrisine, yönüne ve bileşimine bağlı olarak değişmektedir. Şekil 3.1’de takviye şekline göre kompozit türleri görülmektedir [93].



Şekil 3.1 Takviye şekline göre kompozitler [93]

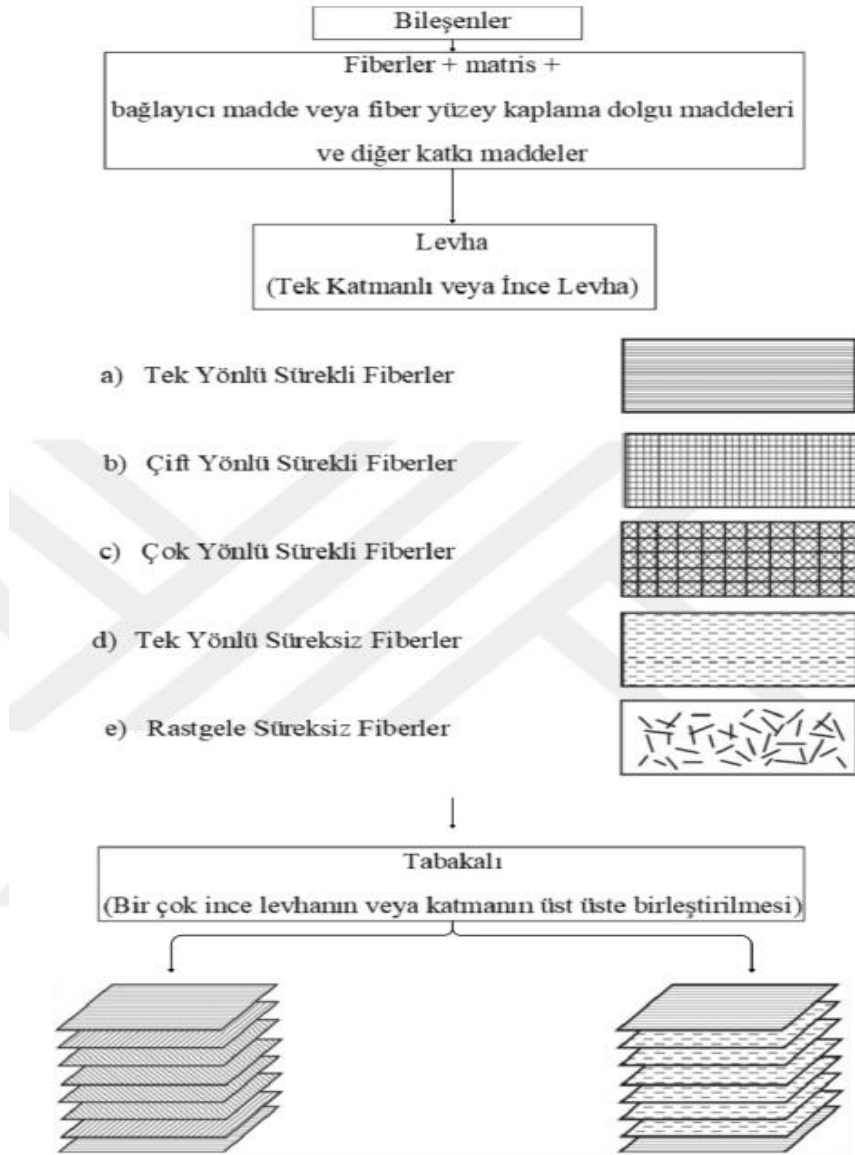
3.1.2.1 Partikül takviyeli kompozitler

Takviye elemanlarının mikro veya nanopartikül formunda bulunduğu kompozit malzemelerdirler. Bu tür kompozitlerde, eklenen partiküller malzemenin homojen yapısını korurken aynı zamanda mekanik dayanımını artırmaktadır. Alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC) ve karbon nanopartikülleri gibi malzemeler bu kompozit türlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kompozitler, özellikle aşınma direnci, sertlik ve termal kararlılık gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Nanopartikül takviyesi, kompozit malzemelerin çatlama ve deformasyon gibi mekanik zayıflıklarını önlemede önemli bir rol oynamakta ve genel yapısal dayanımı artırmaktadır [94].

3.1.2.2 Fiber takviyeli kompozitler (FTK)

Dayanıklılık ve esneklik gerektiren uygulamalar için geliştirilmiş, yüksek mukavemetli liflerle güçlendirilmiş malzemelerdir. Bu kompozitlerde yaygın olarak cam fiberi, karbon fiber ve aramid fiberler (ör. kevlar) kullanılmaktadır. Liflerin belirli bir yönde hizalanması, kompozit malzemenin o yönde daha yüksek mukavemet kazanmasını sağlamaktadır. Cam fiberi, hafifliği ve esnekliği ile öne çıkmakta, karbon fiber ise yüksek mukavemet ve sertlik sunmaktadır. Aramid fiberler ise özellikle balistik koruma ve darbe dayanımı gerektiren özel uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu özellikleri sayesinde fiber takviyeli kompozitler; otomotiv, denizcilik, inşaat ve spor malzemeleri gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hem dayanıklılık hem de hafiflik sunan bu malzemeler, yüksek performans gerektiren çeşitli uygulamalarda önemli avantajlar sağlamaktadır [95].

Fiber takviyeli kompozit yapıların, belirli bir yük taşıma kapasitesini karşılamak veya belirli bir esneme değerini korumak amacıyla ihtiyaç duyduğu kalınlık, birkaç levhanın belirli bir sıra dahilinde üst üste getirilerek bir tabakalı yapı oluşturulmasıyla elde edilmektedir. Söz konusu tabakadaki çeşitli levhalar, fiberleri tek bir doğrultuda veya farklı yönlerde içerebilmektedir. Ayrıca, farklı fiber türlerinin bir arada kullanılmasıyla farklı kombinasyonlarda hibrit tabakalı yapı oluşturulması da mümkün olmaktadır [96]. Şekil 3.2 de farklı levhalar oluşturulabilecek fiber takviyeli kompozitlerin bileşenleri ve sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 3.2 Fiber takviyeli kompozitlerin temel bileşenleri [97]

Cam fiberler

Cam fiberler, sıradan şişe camından yüksek saflıktaki kuvars camına kadar çeşitli tiplerde üretilmektedir. Amorf ve polimerik yapıda olan cam, üç boyutlu moleküler organizasyonunda bir silisyum atomunun dört oksijen atomuyla çevrili olduğu bir düzene sahip bulunmaktadır. Metalik olmayan ve hafif bir malzeme olan silisyum, doğada genellikle oksijenle birlikte silis (SiO_2) şeklinde bulunmakta ve bu formda kullanılmaktadır. Silis kumu, katkı maddeleriyle birlikte kuru halde yaklaşık 1260°C 'ye kadar ısıtılıp soğumaya bırakıldığında sert bir yapı oluşmaktadır.

Cam fiberlerin başlıca özellikleri şu şekilde sıralanmaktadır: Birim ağırlık başına düşen çekme mukavemeti çelikten yüksek olmaktadır. Isıl dirençleri düşük olduğundan yanmamaktadırlar; ancak yüksek sıcaklıklarda yumuşamaktadırlar. Çeşitli kimyasal malzemelere karşı direnç göstermekte ve nem absorbe etmemektedirler. Ancak, cam fiberli kompozitlerde matris ile fiber arasında nemin etkisiyle çözülme meydana gelebilmektedir; bu durum özel kaplama işlemleriyle önlenmektedir. Elektriksel yalıtımın önemli olduğu uygulamalarda da güvenle kullanılmaktadırlar [98].

Karbon fiberler

Karbon fiber, kütlece en az %90 ve en fazla %100 oranında karbon içeren lifleri ifade etmektedir. Bu lifler; poliakrilonitril (PAN), selüloz, zift veya polivinilklorür gibi farklı polimerik öncü malzemelerden elde edilebilmektedir. Üretim aşamasında, öncül polimerler yüksek sıcaklık ve gerdirme gibi bir dizi işleminden geçirilerek karbon fiber hâline dönüştürülmektedir. Bu süreçte, polimer bünyesindeki diğer elementler uzaklaştırılmakta veya yeniden düzenlenmekte; böylece yüksek oranda karbon içeriğine sahip, hafif ve aynı zamanda yüksek mukavemetli fiberler elde edilmektedir [99].

Karbon fiberler, 2,268 gr/cm³ yoğunluğa sahip kristal yapıdaki karbon malzemesinden üretilmekte ve cam fiberlerden sonra gelişen önemli bir fiber grubunu oluşturmaktadır. Karbon fiberler, düşük yoğunluklarının yanı sıra yüksek mukavemet, tokluk, iyi sürünme ve yorulma dirençleriyle dikkat çekmektedir; nemden etkilenmemekte ve yüksek aşınma direnci sergilemektedirler. Bu nitelikleri nedeniyle askeri ve sivil uçak yapılarında geniş kullanım alanı bulmaktadırlar. Genellikle epoksi reçineler gibi plastik matrislerde, ayrıca alüminyum ve magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılabilirler [100].

Aramid fiberler

Aramid fiber, en az %85'i doğrudan aromatik halkalara bağlı amit bağlarından oluşan sentetik polimerlere verilen ad olarak tanımlanmaktadır. Aramid fiberler, olağanüstü çekme modülü ve mukavemetlerinin yanı sıra doğal olarak ısıya ve aleve karşı üstün dayanıklılık sergilemektedir. Eşit ağırlıktaki çelik veya cam fiberle kıyaslandığında

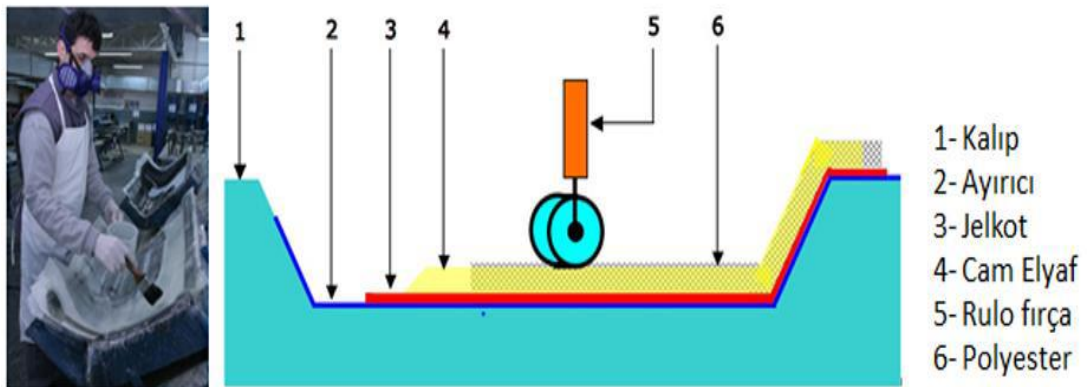
daha üstün mekanik özellikler sunmakta ve yüksek sıcaklıklarda da performansını korumaktadır. 1960’larda üretilen Nomex, aramid ailesindeki ilk ürün olarak bilinmektedir. Sonraki yıllarda geliştirilen Kevlar ise, daha yüksek mukavemet ve termal kararlılık sağladığından yaygın bir kullanım alanına sahip bulunmaktadır [101].

3.2 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemeler kullanım alanlarına ve amaçlarına göre farklı üretim teknikleri ile elde edilebilmektedirler. Bunların bir kısmı aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

3.2.1 Elle yatırma yöntemi

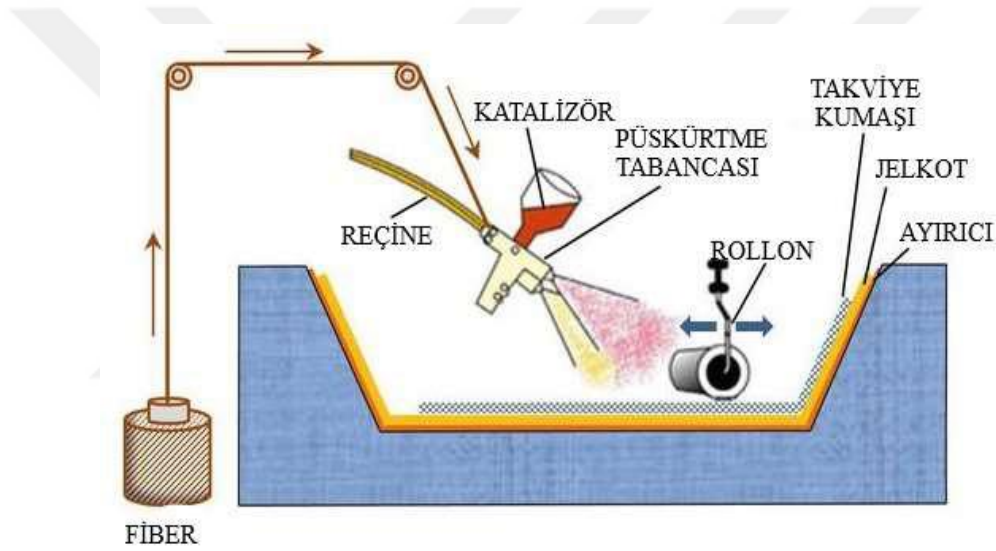
Elle yatırma yöntemi, kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan en eski ve en basit tekniklerden biri olarak kabul edilmektedir. Şekil 3.3 te takviye fiberler kalıp yüzeyine manuel olarak yerleştirilmekte ve ardından reçine, fırça veya rulo yardımıyla uygulanmaktadır. Fiberlerin tamamen reçineyle ıslanması sağlanmakta, böylece katmanlar arasında hava kabarcığı oluşumu önlenmektedir. Her katman elle sıkıştırılmakta ve işlem, istenilen kalınlığa ulaşıncaya kadar tekrarlanmaktadır. Bu yöntemin en büyük avantajı, düşük maliyetli ekipmanla kolayca uygulanabilmesi ve tasarım değişikliklerine hızlı bir şekilde uyum sağlayabilmesidir. Genellikle düşük hacimli üretimlerde ve büyük boyutlu parçaların imalatında tercih edilmektedir. Ancak üretim kalitesi, büyük ölçüde operatörün deneyimine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir [102].



Şekil 3.3 Elle yatırma yöntemi [103]

3.2.2 Püskürtme yöntemi

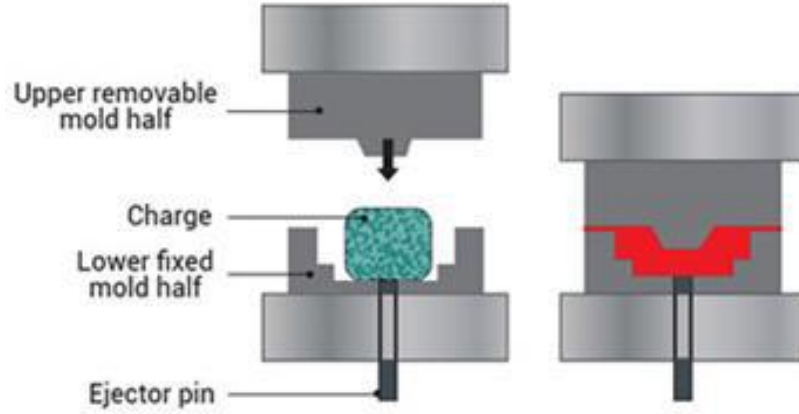
Püskürtme yöntemi, elle yatırma yönteminin aletli bir versiyonu olarak kullanılan bir kompozit üretim tekniği olarak bilinmektedir. Şekil 3.4 te gösterilen bu yöntemde, özel bir tabanca yardımıyla kırılmış fiberler ve sertleştirici eklenmiş reçine, kalıp yüzeyine püskürtülmektedir. Fiber, tabanca üzerinde yer alan ve otomatik çalışan bir kırıcı ile kesilmektedir. Püskürtme işlemi tamamlandıktan sonra yüzey düzgünleştirilmekte ve ürün son haline getirilmektedir. Özellikle karmaşık şekillere sahip parçaların üretiminde, hızlı uygulama, düşük maliyet ve homojen kaplama gibi avantajlara sahip olduğundan, seri üretim ve büyük boyutlu parçaların imalatında tercih edilmektedir [104].



Şekil 3.4 Püskürtme yöntemi [105]

3.2.3 Sıcak presleme yöntemi

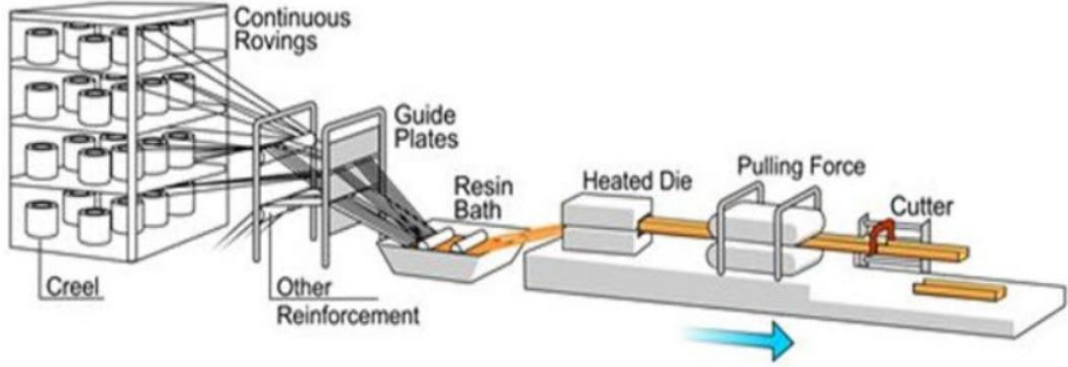
Sıcak presleme yöntemi, fiber ve matris malzemelerinin bir kalıba yerleştirilerek yüksek sıcaklık ve basınç altında kürlenmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3.5 te gösterilen bu yöntem, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmekte ve yüksek hassasiyetle üretim yapılmasını sağlamaktadır. Özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde, yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Ayrıca, karmaşık geometrilere sahip parçaların hassas bir şekilde üretilmesine olanak tanınması, sıcak preslemeyi önemli ve yaygın bir üretim yöntemi haline getirmektedir [106].



Şekil 3.5 Sıcak presleme yöntemi [107]

3.2.4 Pultrüzyon yöntemi

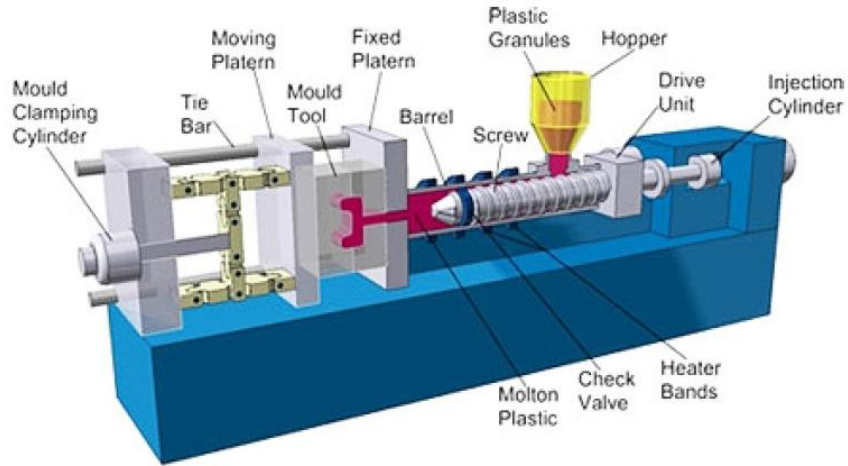
Profil çekme yöntemi olarak da bilinen Pultrüzyon işlemi, düşük maliyetli seri üretim için kullanılan ve sürekli, sabit kesitli kompozit profillerin üretilmesini sağlayan bir yöntem olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3.6 da gösterilen bu yöntemde, sürekli bir takviye malzemesi (genellikle fiber) reçine banyosundan geçirilerek beslenmekte, ardından ısıtılmış bir şekillendirme kalıbından geçirilip sertleştirilmektedir. Pultrüzyon, sürekli fiber kullanımı sayesinde takviye yönünde yüksek mekanik mukavemet sağlamaktadır. Ancak, enine yüklere karşı direnç sağlamak için özel dokuma takviyeleri gerekebilmektedir. Bu yöntem, özellikle seri üretim gerektiren uygulamalarda tercih edilmekte ve profil şeklindeki ürünlerin üretiminde maliyet açısından avantajlı olmaktadır [104].



Şekil 3.6 Pultrüzyon yöntemi [108]

3.2.5 Enjeksiyon kalıplama yöntemi

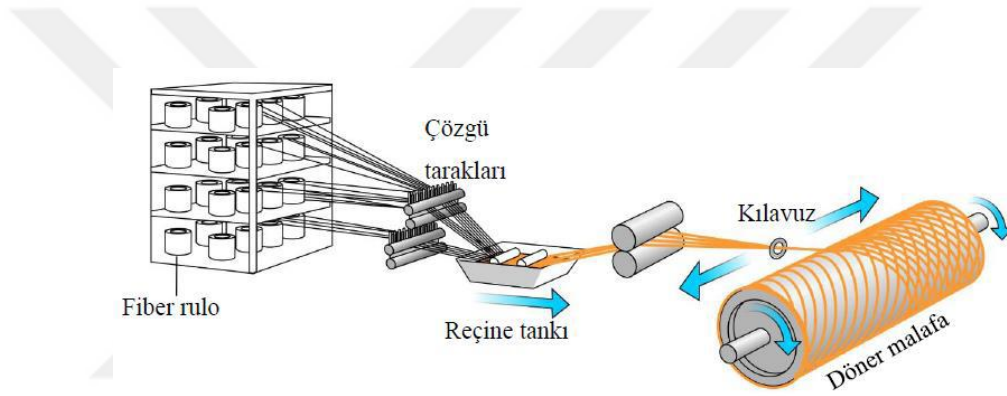
Enjeksiyon kalıplama, plastik malzemelerin belirli bir sıcaklıkta eritilerek, yüksek basınç altında bir kalıp boşluğuna enjekte edilmesiyle şekillendirilmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır. Bu süreç, plastik malzemenin kalıp içine enjekte edilmesinin ardından soğuyarak katılaşmakta ve son ürünün oluşmasını sağlamaktadır. Şekil 3.7’de görülen bu yöntemde, kalıp içinde soğuyarak sertleşen plastik, kullanıma hazır hale gelmektedir [109].



Şekil 3.7 Enjeksiyon kalıplama yöntemi [110]

3.2.6 Flament sarma yöntemi

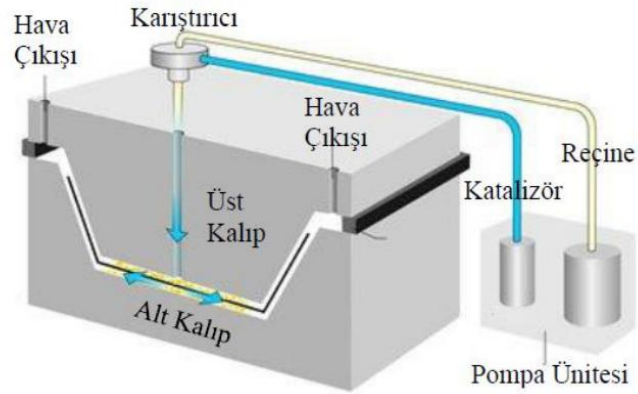
Fiber sarma yöntemi, kompozit malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılan ve özellikle özel tasarıma sahip ürünlerin seri üretiminde tercih edilen bir teknik olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3.8 de gösterilen bu yöntemde, sürekli fiberler reçine ile ıslatıldıktan sonra makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılmaktadır. Fiberler, farklı açılarda sarılarak kompozit malzemenin mukavemet, rijitlik ve dayanıklılık gibi mekanik özelliklerinin istenen düzeyde optimize edilmesini sağlamaktadır. Genellikle silindirik veya tüp şeklindeki parçaların üretiminde tercih edilen bu yöntem, fiberlerin kalıp üzerinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlamaktadır [104].



Şekil 3.8 Flament sarma yöntemi [111]

3.2.7 Reçine transfer kalıplama yöntemi

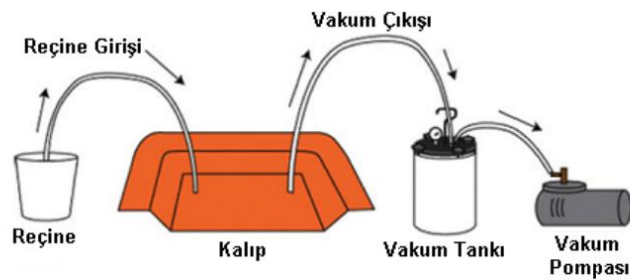
Reçine transfer kalıplama yöntemi (RTM), özellikle karmaşık şekillerdeki, kesintisiz fiberlerle güçlendirilmiş yapısal kompozit malzemelerin üretimi için kullanılan gelişmiş bir teknik olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3.9 da gösterilen RTM, şekil açısından karmaşık yapıya sahip, üstün mekanik özelliklere sahip ve hafif parçaların üretimi için ideal bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Bu süreçte, reçine kalıp içerisine enjekte edilerek malzemenin şekillendirilmesi sağlanmaktadır. RTM'nin en büyük avantajlarından biri, ürün kalitesindeki olası değişkenliklerin, diğer kompozit üretim yöntemlerine kıyasla çok daha iyi bir şekilde kontrol edilebilmesidir [112].



Şekil 3.9 Reçine transfer kalıplama yöntemi [111]

3.2.8 Vakum torbalama tekniği yöntemi

Vakum altında reçinenin ilerlemesi esasına dayanan bu yöntemde, üretim süreci el değmeden gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.10 da gösterilen vakum torbalama tekniği genellikle karmaşık yapılar sahip kompozit parçaların üretiminde tercih edilmekte ve kullanılan reçinenin viskozitesi önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Dar alanlarda ve uzun akış yollarında, reçinenin kısa sürede fiberlere emdirilmesi gerekmektedir. Yöntem, dört ana bileşenden oluşmaktadır: vakum pompası, vakum tankı, kalıp ve reçine kovası. Bağlantılar farklılık gösterebilse de, sistemin çalışma prensibi aynı kalmaktadır [110].

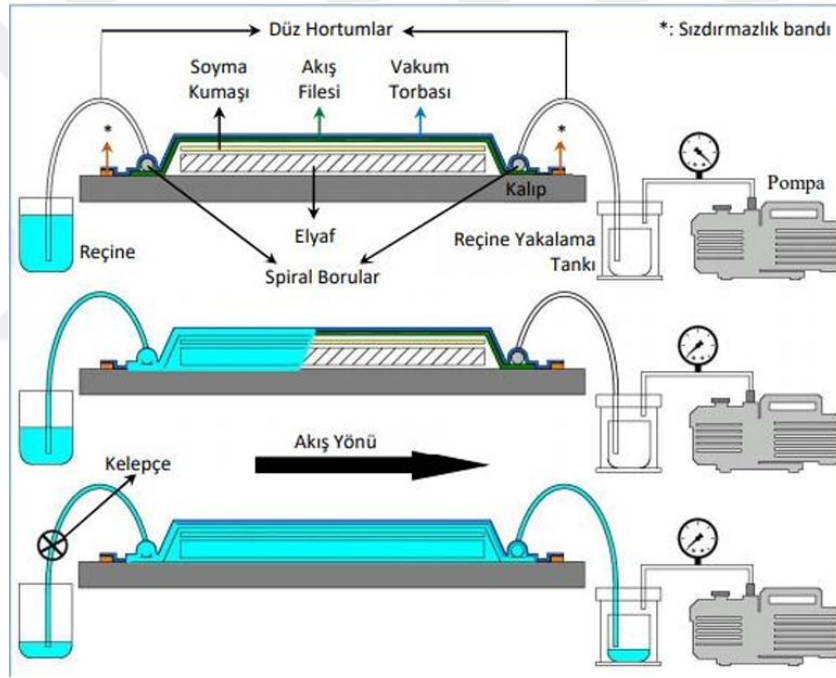


Şekil 3.10 Vakum torbalama tekniği [113]

3.2.9 Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi

Büyük parçaların düşük maliyetle ve yüksek kalitede üretimini sağlayan kapalı bir üretim yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3.11 de gösterilen bu yöntem RTK ve

diğer sıvı kalıplama yöntemlerine benzer olmakla birlikte, tek parça kalıp kullanımı ve reçinenin vakumla uygulanmasıyla ayrılmaktadır. Temizlenmiş kalıba yapışmayı önlemek için kalıp ayırıcı kumaş serilmekte, ardından takviye malzemesi olarak kuru fiber yerleştirilmektedir. Fiberlerin üzerine kumaş örtülmekte ve sistem vakum torbasıyla kapatılarak kenarları sızdırmazlık bandıyla kapatılmaktadır. Reçine, vakum hattı sayesinde sisteme emdirilirken, hava ve nem uzaklaştırılmaktadır. Malzeme uygun sıcaklıkta kürlenmeye bırakılmaktadır. VARTM yönteminde şeffaf vakum torbalarının kullanımı; kuru noktaların tespiti, karmaşık yapı üretimi, esnek malzeme ve kalıp seçimi ile düşük maliyet gibi avantajlar sunmaktadır [19].



Şekil 3.11 Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi [76]

4. NANOKOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, fiziksel ve mekanik özellikleri farklı en az iki malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulan insan yapımı malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Nanokompozit malzemeler ise, nano ölçekli bileşenler içeren kompozit malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Nano ölçü birimi, metrenin milyarda biri olup ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), bu ölçek mühendislik ve teknoloji alanlarında önemli bir yer tutmaktadır. Nanoteknoloji; malzeme bilimi, elektronik, tıp, havacılık, enerji gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, bileşenlerinin en iyi özelliklerini barındırmakta ve farklı ara yüzeylere sahip olmaktadır [114].

4.1 Nanokompozitlerin Avantajları

Nanokompozit malzemeler genellikle oluşturdukları iyileştirilmiş arayüzeyler sayesinde kompozit endüstrisinde yer almaktadırlar. Organik ve inorganik bileşenlerin dolgu malzemelerinde uyumlaştırıcı özellikleriyle takviye edilmeleri, birçok mekanik ve fiziksel özelliği iyileştirmektedir. Nanokompozitlerin belirgin avantajları; saf polimerlere göre daha yüksek bariyer özellikleri göstermek, Yüksek sıcaklık ve ısıya karşı dayanıklılık sağlamak, termal ve genleşme katsayıları düşüklüğü, bozunma sıcaklıklarının yüksek seviyelere ulaşması, gaz geçirgenlikleri düşük olması şeklinde sıralanmaktadır [115].

Yüksek termal stabilite, nanokompozitlerin ısıya karşı olağanüstü bir direnç göstermesini mümkün kılmaktadır. Matris içinde homojen biçimde dağılan nanopartiküller, ısı transferini iyileştirerek bu malzemelerin yüksek sıcaklık koşullarında tercih edilmesine katkı sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, grafen ve karbon nanotüpler gibi iletken nano malzemelerle zenginleştirilen kompozitlerin elektriksel ve termal iletkenliği kayda değer ölçüde artmaktadır; bu durum, elektronik ekipmanlar, algılayıcılar ve enerji depolama teknolojileri dâhil olmak üzere birçok alanda kullanım imkânlarını genişletmektedir. Öte yandan, nanokil ve benzeri katmanlı nano yapılardan yararlanılarak üretilen kompozitlerde gaz ve sıvı difüzyonu önemli ölçüde engellenmektedir [116].

Nanokompozitler, son derece yüksek mukavemet ve sertlik değerleriyle dikkat çekmektedirler. Darbe direnci ile aşınma dayanımı gibi temel mekanik özelliklerin gelişmesine katkı sunmaktadırlar. Ayrıca fiber takviyeli kompozitlerde arayüzü güçlendirerek genel mekanik performansta belirgin bir artış sağladığı ifade edilmektedir [115].

Hafif yapıları sayesinde yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip nanokompozitler, özellikle havacılık ve otomotiv gibi sektörlerde ağırlığın azaltılmasıyla yakıt tasarrufu sağlamak ve emisyonların azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Bunun yanı sıra, bu yapılar aynı anda birden fazla özelliği bünyesinde barındırma potansiyeline sahip olmaktadır; örneğin, mekanik olarak güçlü, elektriksel olarak iletken ve termal olarak kararlı bir yapı elde edilebilmektedir. Ayrıca, tasarım mühendisleri açısından farklı çalışma koşullarına yönelik çok yönlü performans özellikleri tek bir malzeme ile karşılanabilmektedir [117].

4.2 Nanokompozitlerin Sınıflandırılması

Nanokompozitler, matris tipine göre seramik (SMNK), polimer (PMNK) ve metal (MMNK) olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Saf ya da geleneksel kompozitlere kıyasla; üstün termal ve mekanik özellikleri, yanma geciktirici etkileri ve solvent direnci sayesinde yoğun ilgi görmektedir. Partikül boyutu ve dağılımı, yüzey özellikleri ile geometrik şekil gibi etmenlerin performans üzerinde belirgin etkileri olduğu bilinmektedir. Nanopartiküllerin ticari olarak erişilebilir olması, özellikle polimer tabanlı nanokompozitlere olan yönelimi artırmaktadır. Bu yapılarda; mekanik mukavemet, geçirgenlik, ısıl kararlılık, kimyasal direnç ve alev geciktiricilik gibi birçok özellik önemli ölçüde iyileşmektedir [118].

4.2.1 Uygulama alanlarına göre sınıflandırma

Uygulama alanlarına göre nanokompozitler yapısal ve fonksiyonel olarak değerlendirilebilmektedir. Yapısal nanokompozitler, yüksek mekanik mukavemet ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir; fonksiyonel nanokompozitler ise daha çok elektriksel, optik veya manyetik özellikleri geliştirmeyi hedefleyen tasarımlarda kullanılmaktadır. Sensör ve enerji depolama sistemleri,

fonksiyonel nanokompozitlerin yaygın kullanım alanları arasında yer almaktadır [119].

4.2.2 Matris Fazının Türüne Göre

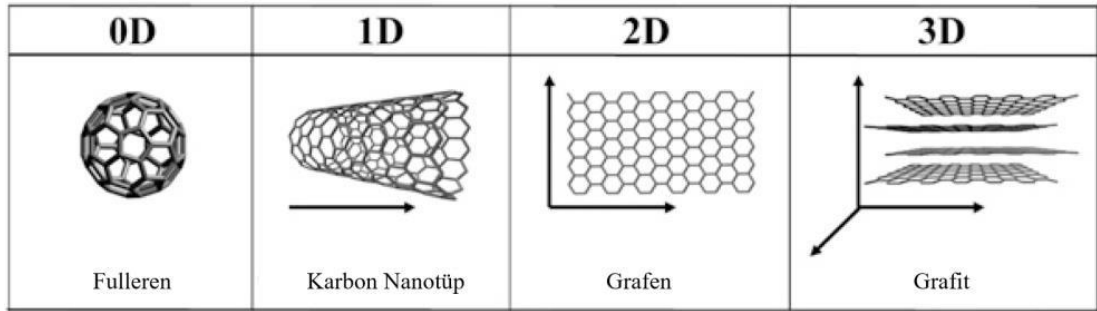
Seramiklerin doğal kırılğan yapısı, çatlak yayılmasıyla birlikte kolay kırılmalarına neden olmaktadır. Ancak matris içine sünek metal fazlar veya farklı bir seramik bileşenin eklenmesi, bu malzemelerin mühendislik uygulamalarında kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Faz sınırlarında oluşan etkileşim, sertlik ve kırılma tokluğu gibi temel mekanik özelliklerin iyileşmesini sağlamaktadır. Özellikle seramik matrisli nanokompozitlerde (SMNK), takviye malzemelerinin yüzey/hacim oranı, yapı ile özellik arasındaki ilişkinin anlaşılmasında önemli bir etkiye sahip olmaktadır. SMNK'lerde, monolitik yapı veya mikroyapı eşdeğerlerine oranla kırılma dayanımı ve toklukta belirgin artış gözlenmekte; yüksek sıcaklıklarda mukavemet ve sürünme direnci de kayda değer ölçüde yükselmektedir. [120].

Polimer matrisli nanokompozitler (PMNK), günümüzde en sık tercih edilen nanomalzemeler arasında yer almaktadır. Farklı konsantrasyon, boyut ve şekil özellikleri, bu malzemelerin atık su arıtımından doku mühendisliğine, elektrokimyasal sensörlerden ilaç dağıtımına, gıda işleme süreçlerinden yüksek şeffaflık gerektiren uygulamalara kadar geniş bir kullanım alanına sahip olmasını sağlamaktadır. Ayrıca polimer matrisinin geniş yüzey alanı, serbest absorpsiyon bölgeleri, yüksek arayüzey reaktivitesi ve üstün fiziksel-mekanik özellikleri, bu tür nanokompozitleri çok yönlü ve tercih edilir kılmaktadır [121].

Metal matrisli nanokompozitler (MMNK), sanayi ve endüstrideki potansiyel uygulama alanlarının fazlalığı sayesinde umut vadeden bir malzeme grubu olarak öne çıkmaktadır. Bu yapılar, matris metali ve takviye fazlarından meydana gelmektedir. Metal matris, kompozitin sünekliğini ve yük aktarımını sağlamaktadır. MMNK'lerde genellikle alüminyum (Al), demir (Fe), magnezyum (Mg) veya bakır (Cu) alaşımları matris olarak tercih edilmektedir. Metal matrisin tercih edilme nedenleri; ağırlığı azaltırken yüksek mukavemet sunması, aşınma ve yorulma direncini iyileştirmesi ve yüksek sıcaklıklarda kararlılığını koruması olarak sıralanmaktadır. Bu grupta özellikle Al tabanlı matris, en yaygın kullanım alanına sahip bulunmaktadır [122].

4.2.3 Takviye Edici Fazın Geometrisine Göre

Nanopartiküller, boyutsal özellikleri esas alınarak dört ayrı kategoriye ayrılmaktadır: sıfır boyutlu (0D), tek boyutlu (1D), iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) nanoyapılar. Sıfır boyutlu yapılar, tüm boyutları nanometre ölçeğinde kabul edilen nanopartiküller veya yeterince ayrıştırılmış nanotozlar şeklinde tanımlanmaktadır. Tek boyutlu yapılarda, iki boyut nanometre ölçeğinde kalmakta, üçüncü boyut ise daha büyük olmaktadır; nanotüpler ve çubuk benzeri formlar buna örnek olarak gösterilmektedir. İki boyutlu yapılarda yalnızca bir boyut nanometre ölçeğinde bulunmakta, diğer iki boyut ise daha geniş kalmaktadır; nanofilmler, nanokaplamalar ve benzeri düzlemsel katmanlar bu gruba dahil edilmektedir. Üç boyutlu yapılarda ise boyutların tamamı nanometre sınırının dışında kalabilmektedir; bu kategori altında, nanoteller, farklı biçimlerdeki nanotüpler ve değişik nanopartikül dağılımlarına rastlanmaktadır. [123]. Şekil 4.1 de karbon nanopartikül örnekleri görülmektedir.



Şekil 4.1 0D, 1D, 2D, 3D karbon nanoyapılara örnek [97]

4.2.4 Matris-Takviye Etkileşimine Göre

Fiziksel olarak takviyeli nanokompozitler, takviye edici fazın matris içinde yalnızca fiziksel kuvvetlerle (örneğin van der Waals etkileşimleri veya mekanik kenetlenme) tutulduğu yapılar olarak tanımlanmaktadır. Bu tür kompozitlerde, takviye fazı ile matris arasında herhangi bir kimyasal bağ bulunmamakta, dolayısıyla mukavemet artışı ve ısı dayanımı gibi özellikler daha çok fiziksel temasın kalitesiyle sınırlı kalmaktadır. Öte yandan, kimyasal olarak takviyeli nanokompozitler ise matris ile takviye edici faz arasında güçlü kimyasal bağların (örneğin kovalent veya iyonik bağlar) olduğu yapılar olarak değerlendirilmektedir. Bu sayede kompozit, mekanik ve termal dayanım gibi özelliklerde kayda değer bir iyileşme göstermektedir [119].

4.3 Nanomalzemelerde Katkı Malzemeleri

Nanokompozitlerin temel nitelikleri ve performansları, büyük ölçüde takviye malzemelerinin türü ile bu malzemelerin matris içindeki yerleşimine bağlı olarak değişmektedir. Bu takviye unsurları, söz konusu kompozitlerin mekanik, termal, elektriksel ve diğer fonksiyonel özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır [124].

Bu bölümde, özellikle bor ve kil gibi sıkça tercih edilen takviye malzemelerinin nanokompozitlere kazandırdığı avantajlar ele alınacaktır

4.3.1 Nanokil

Kil, farklı kristal yapıya sahip birçok mineralin birleşiminden oluşan genel bir mineral karışımı olarak tanımlanmaktadır. Doğada bol miktarda bulunmasına karşın, saf haline son derece ender rastlanmaktadır. Kil minerallerinin yanı sıra, yapısında çoğunlukla kalker, silis, mika ve demir oksit bulunmaktadır. Nanokil ise, en az bir boyutu nanometre ölçeğinde olan ve oldukça yüksek boy-en oranıyla dikkat çeken partiküller olarak tanımlanmaktadır. Tabakalı yapısı ve zengin iç kimyası, kolay elde edilebilir olmasıyla birleştiğinde, hafif ve yüksek performanslı nanokompozitlerin üretimi için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Bu sayede nanokil, çeşitli sektörlerde yüksek performanslı nanokompozit malzemelerin yeni nesil bileşeni olarak öne çıkmaktadır [125].

4.3.2 Bor karbür

Bor karbür (B_4C), kübik bornitrür ve elmaştan sonra bilinen en sert malzeme olarak tanımlanmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda yapısal kararlılığını koruyabilen en kararlı bileşiklerden biri olarak değerlendirilmektedir. İlk kez 19. yüzyılın başlarında keşfedilmiş olup, bor karbür ile ilgili araştırmalar 1930'lu yıllarda artmaya başlamaktadır. Yüksek elastik modülü, üstün termal ve elektriksel iletkenliği, düşük sıcaklıklarda sinterlenebilme özelliği, yüksek dayanımı ve nötron absorpsiyon yeteneği sayesinde; savunma sanayi, nükleer enerji, havacılık, uzay teknolojileri ve tıbbi uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahip bulunmaktadır. Sertliği sayesinde serbest aşındırıcı olarak veya elmas kaplama takımların destek malzemesi olarak tercih

edilmektedir. Bor karbür; 2,52 g/cm³ yoğunluğa, 2450 °C ergime noktasına, 2800 kg/mm² Knoop sertliğine (100 gr), 13,8 GPa çekme dayanımına ve 180 GPa kayma modülüne sahiptir [19]. Bor karbür (B₄C), yüksek sertlik, düşük yoğunluk ve kırılma dayanıklılığı gibi üstün fizikokimyasal özellikleriyle askeri ve savunma sektöründe, özellikle araç ve vücut zırh sistemlerinde kullanılan gelişmiş bir seramik malzeme olarak öne çıkmaktadır. [126].

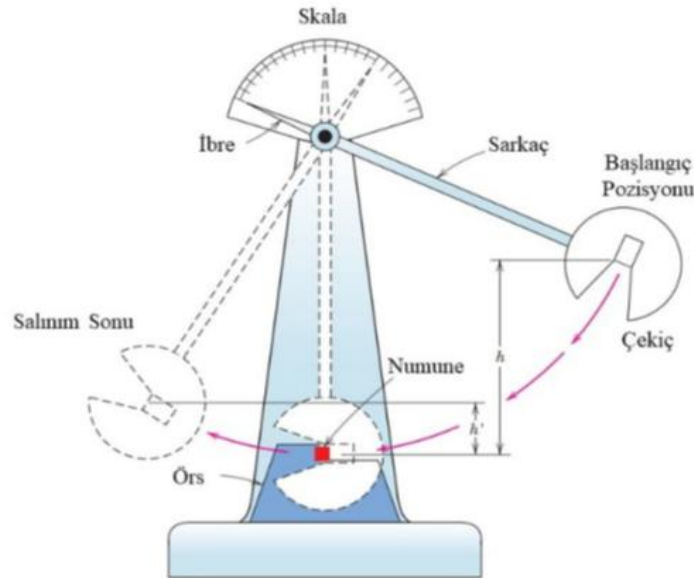


5. DARBENİN TANIMI

Darbe testleri, malzemelerin ya da parçaların hızlı yük altında ve değişken sıcaklıklardaki kırılma davranışları ile ilgili bilgi veren uygulamalar olarak tanımlanmaktadır. Bir malzemenin; numunenin hemen deforme olmasına, kırılmasına veya tamamen kopmasına neden olan bir şok yüklemesi yaşadığında göstereceği mekanik davranışı gözlemlemek amacıyla darbe testi uygulanmaktadır. Uygulanan darbeler, düşen ağırlıklı ya da yüksek hızlı (balistik) olarak sınıflandırılmaktadır. 1–10 m/s arası darbeler düşen ağırlıklı; 10–50 m/s arası darbeler orta hızlı; 50–1000 m/s yüksek hızlı; 2–5 km/s arası darbeler ise balistik darbe olarak tanımlanmaktadır. [127].

5.1 Sarkaç Darbe Testleri

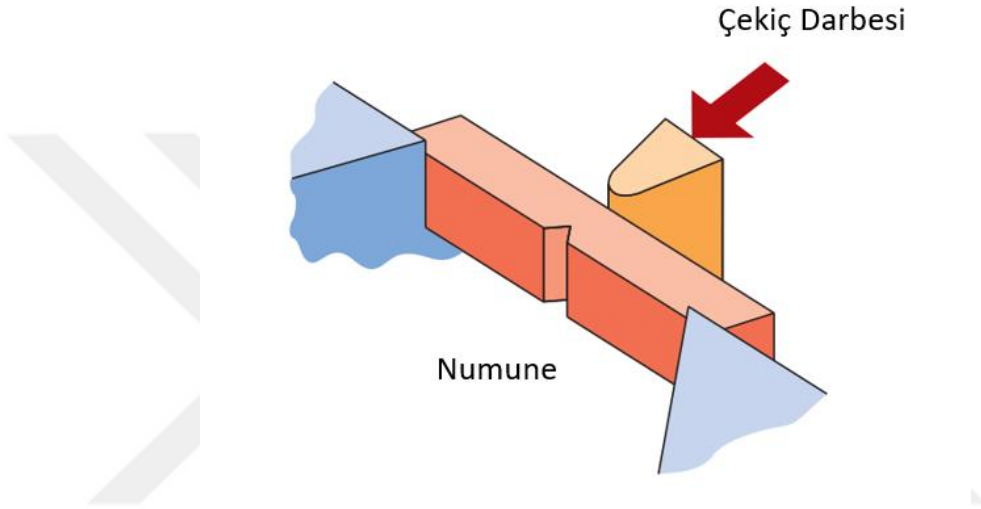
Yapısal malzemelerin kırılma tokluğunu belirlemek amacıyla farklı standartlar oluşturulmaktadır. Bu amaç doğrultusunda Charpy ve Izod darbe testleri geliştirilmiş ve standart hale getirilmiştir. Malzemelerin test edilmesi için ISO, ASTM ve EN gibi çeşitli standartlar mevcut bulunmaktadır. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi, hem Charpy hem de Izod deneylerinde kullanılan numuneler kare kesitli çubuklar olup, bunların üzerinde çentikler açılarak sarkaç şeklindeki test cihazına bağlanmakta ve numuneye darbe uygulanmaktadır [128].



Şekil 5.1 Charpy ve izod darbe testlerinde test cihazının şematik gösterimi [129]

5.1.1 Charpy testi

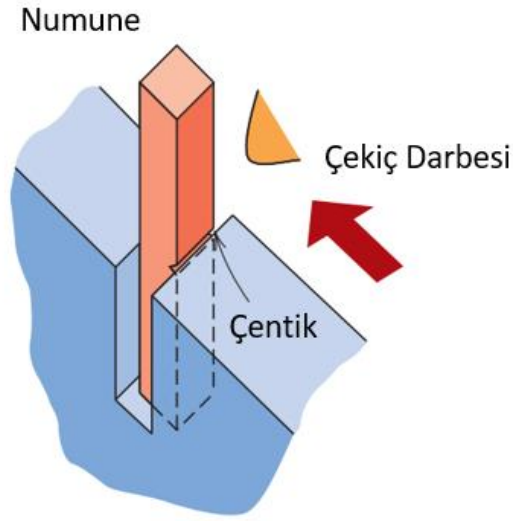
Charpy testinde, iki mesnet üzerine yatay şekilde yerleştirilmiş bir kiriş biçimindeki numunenin çentik tabanına, sarkaç ucundaki çekiçle darbe uygulanmakta ve çentik bölgesinde oluşan çok eksenli gerilmenin etkisiyle numunenin kırılması sırasında harcanan enerji hesaplanmaktadır. Charpy testinde test numunesi, çeneler arasına, Şekil 5.2’de görüldüğü gibi yatık olarak yerleştirilmektedir. [128]



Şekil 5.2 Charpy darbe testinde numunenin cihaza yerleştirilmesi [129]

5.1.2 İzod testi

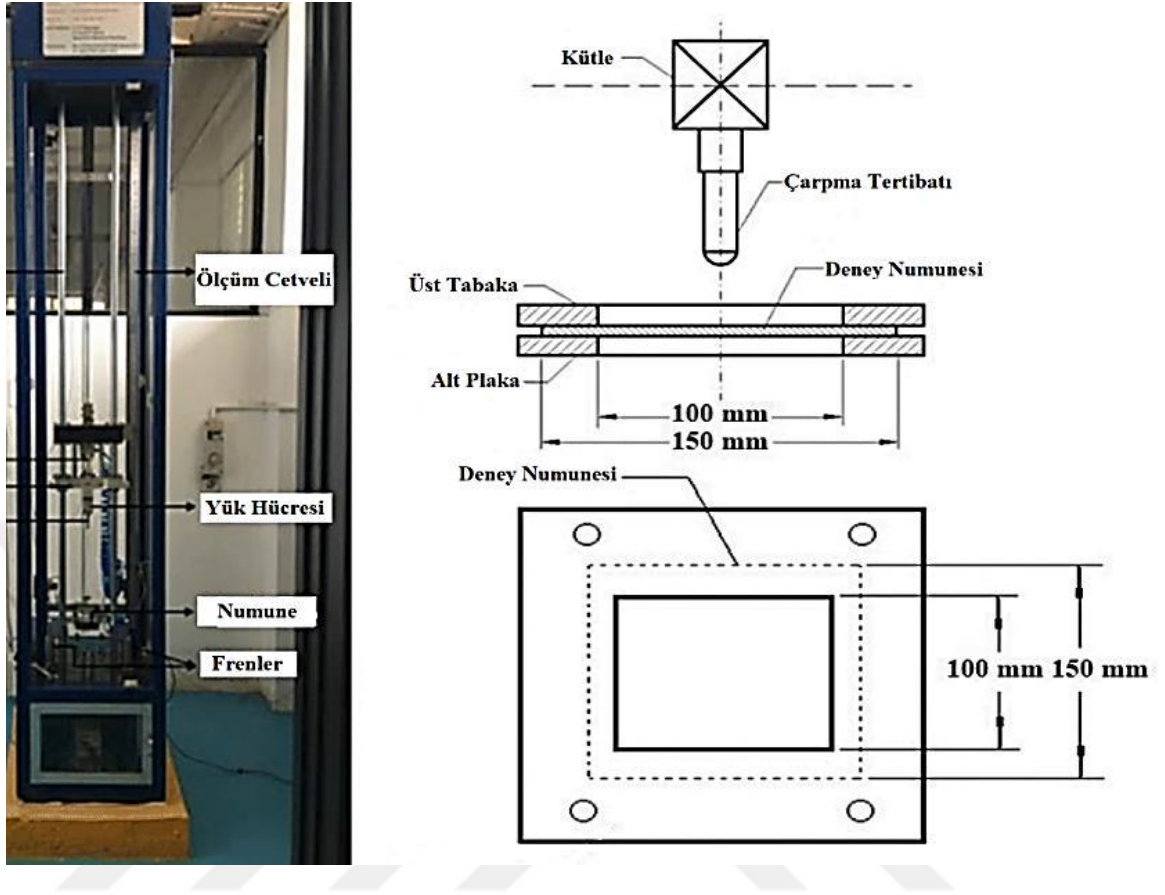
İzod darbe testinde, dikey konumda bir kavrama çenesine kiriş olarak bağlanmış numunenin yüzeyine, kavrama noktasından belirli bir yükseklikte bulunan sarkaç ucundaki çekiçle darbe uygulanmaktadır. Çentik tabanında oluşan çok eksenli gerilmeler nedeniyle numunenin kırılması için harcanan enerji belirlenmektedir. Numune, Şekil 5.3'te görüldüğü gibi test cihazına dikey olarak yerleştirilmektedir. [128].



Şekil 5.3 izod darbe testinde numune yerleşimi [129]

5.2 Düşen Ağırlık Testleri

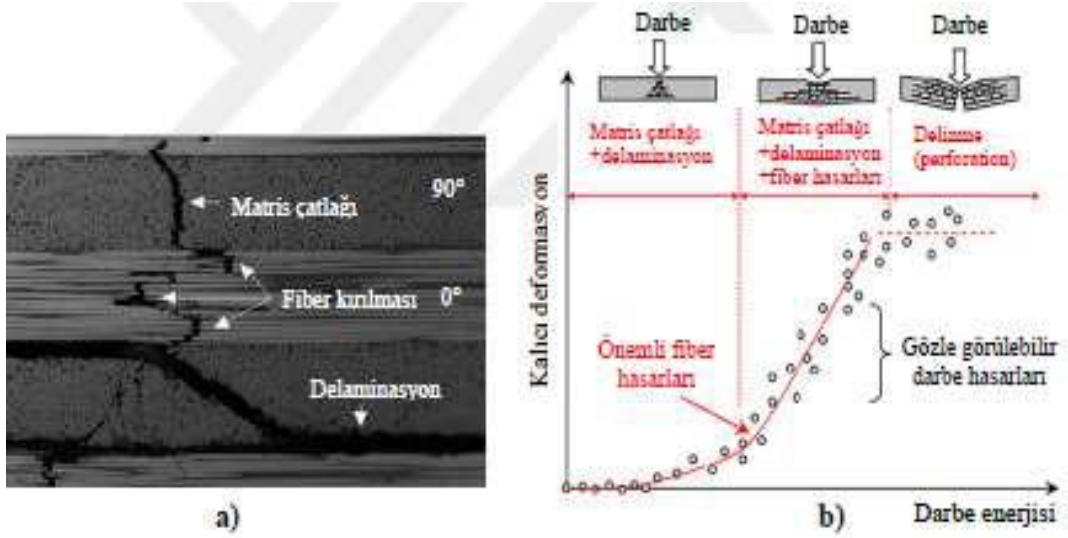
Düşük hızlı darbe testleri, malzemenin özellikleri, mermi kütlesi ve sertliğe bağlı olarak 1–10 m/s aralığında gerçekleşebilecek çarpma olaylarını ifade etmektedir. Düşük hızlıdaki çarpma olaylarını analiz etmek amacıyla Charpy, Izod ve ağırlık düşürme testleri gibi yöntemler standartlaştırılmıştır. Düşen ağırlık darbe test ünitesi, gerçek yaşamda yaşanabilecek darbe ve çarpma koşullarını simüle ederek detaylı performans verileri elde etmektedir. Bu testin Charpy ve Izod yöntemlerine göre avantajı, daha geniş bir test geometrisi yelpazesi sunarak daha karmaşık bileşenlerin incelenmesine imkan tanımasıdır. Tabakalı kompozitlerin darbe dayanımını ölçmek için düşük hızlı darbe testi uygulanmaktadır. Şekil 5.4 te gösterilen bu test düzeneği sayesinde ivmelenme, yer değiştirme ve yük gibi parametreler kaydedilmektedir. Elde edilen bu veriler, darbe yükünü zaman veya darbe enerjisi cinsinden ifade edecek şekilde dönüştürülmektedir. Absorbe edilen enerji miktarı ise, numunede gözlemlenen hasarla genellikle doğru orantılı bir sonuç vermektedir [130].



Şekil 5.4 Düşük hızlı darbe deney düzeneği [130].

5.3 Düşük hızlı darbe sonrası oluşan hasar türleri

Düşük hızlı darbeye, hasar türü ve enerji emilimi; yapının boyutuna, rijitliğine ve sınır koşullarına bağlıdır. Aynı darbeler sonucu ortaya çıkan mikro çatlaklar, fiberin kırılması ve delaminasyon, emilen enerji miktarını etkileyen önemli unsurlardır [131]. Şekil 5.6 da fiber takviyeli kompozitlerde darbe sonrası oluşan hasar tipleri ve kalıcı deformasyon oluşum evreleri görülmektedir [132].



Şekil 5.6 a) Darbe sonrası fiber takviyeli kompozitlerde oluşabilen hasar tipleri b) Darbe enerjisi ile kalıcı deformasyon oluşumu [127]

5.3.1 Matris çatlağı

Darbe testlerinde, düşen ağırlık ilk olarak matris yüzeyinde çatlamaya neden olmaktadır. Genellikle çekme ve kayma çatlağı olmak üzere iki tip matris çatlağı oluşmaktadır. Kalın tabakalı kompozitlerde, çarpma etkisiyle düşen ağırlığın temas ettiği bölgede, ilk matris çatlakları bölgesel gerilmeler nedeniyle üst yüzey katmanında meydana gelmektedir. İnce tabakalı kompozitlerde ise çarpma etkisi sonucunda plakta oluşan eğilme gerilmeleri, alt yüzey katmanında matris çatlaklarının oluşmasına yol açmaktadır [132].

5.3.2 Delaminasyon

Matrisin devamı niteliğinde olup darbe sonrası çatlağın bitişik kompozit plakalar arasında ayrışma meydana getirmesi ile devam eder. Tabaka kalınlığı fiber katmanların sıralama düzeni ve malzeme özellikleri delaminasyon hasarının üzerinde oldukça etkili faktörlerdir [132]. Fiber yönelmelerinden dolayı tabakalar arasındaki eğilme rijitlikleri farkı ve eğilme kaynaklı kayma gerilmeleri delaminasyonun en önemli sebepleri arasındadır [133].

5.3.3 Fiber kırılması

Darbe, kompozit malzemelerde delaminasyona neden olmaktadır ve bu durum fiber hasarına yol açmaktadır. Fiber kırılması meydana gelmekte ve kalıcı hasarla sonuçlanmaktadır. Yük taşıyıcı unsur olan fiberler, daha yüksek enerji seviyelerinde gerçekleşen bu hasar nedeniyle malzemenin mukavemetinin önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır [127].

Fiber türleri, kompozit malzemelerin darbe davranışı ve oluşan hasarlar üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Darbe sonrasında meydana gelen mukavemet kaybının, rijitlik kaybından daha belirgin olduğu belirtilmektedir. Fiber tipi, fiber dizilim açısı ve darbe hızı, kompozit malzemelerin mukavemetini ve özellikle fiber kırılmasını etkileyen temel faktörler arasında yer almaktadır. Uygun şekilde seçilen matriks malzemesi ve doğru dokuma şekilleri ile tabakalı kompozitlerin mukavemet özellikleri artırılabilir [130].

5.3.4 Penetrasyon

Darbe anında düşen ağırlığın numuneye saplanması nüfuz etmesi ile sonuçlanan aşamadır. Fiber yönelimi matris malzemesi ve kumaşların dokuma tipi penetrasyonu etkileyen faktörlerdir [132].

6. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada, nanokil ve bor karbür katkılı, cam fiber ve karbon fiber takviyeli epoksi kompozitten oluşan, 10 tabakalı hibrit kompozit levhalar üretilmiştir. Levhaların dizilimleri 4 adet Cam+2 adet Karbon+4 adet Cam fiber takviyeli epoksi kompozitten oluşmuştur. Kompozitlerin üretim süreci, İzmir/ Türkiye’ deki Fibermak Composites fabrikasında gerçekleştirilmiştir.

6.1 Üretimde Kullanılan Malzemeler

Üretim aşamasında kullanılan nanokil (partikül boyutu: <20µm, Esan1-140, ESAN Eczacıbaşı), bor karbür (partikül boyutu: 3,093 µm, Boroptik Mühendislik, Ar-Ge, İmalat ve Ticaret A.Ş.) ve kumaş ölçülerine uygun oranlarda epoksi ve solvent kullanılmıştır. Üretimde kullanılan epoksi reçine, sertleştirici, cam fiber ve karbon fiber kumaşlar Fibermak firmasından, temin edilmiştir. Takviye malzemesi olarak twill dokuma tipi cam fiber kumaş ve karbon fiber kumaş tercih edilmiştir. Üretilen kompozit levhalar, on tabaka şeklinde tasarlanmış olup, epoksi reçine içerisine nano takviye olarak ağırlıkça %0,75, %1,25 ve %1,75 oranlarında nanokil ayrıca %0,75, %1,25 ve %1,75 oranlarında bor karbür ilaveleri yapılmış her katkı oranından 1 adet olmak üzere 6 adet katkılı levha üretilmiştir. Karşılaştırma yapmak içinde 1 adet katkısız levha üretilmiştir. Kompozit malzemenin düşük hızlı darbe testi açısından mekanik özelliklerini belirlemek ve iyileştirmek için üretilen katkılı kompozitlerin düşük hızlı darbe özellikleri, katkısız olarak üretilen kompozitlerle kıyaslanarak, nanokil ve bor karbürün mekanik davranışlar üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan reçine, takviye, solvent ve nanopartiküllerin teknik özelliklerine ilişkin bilgiler Tablo 6.1’de sunulmuştur.

Tablo 6.1 Kullanılan matris malzeme ve özellikleri

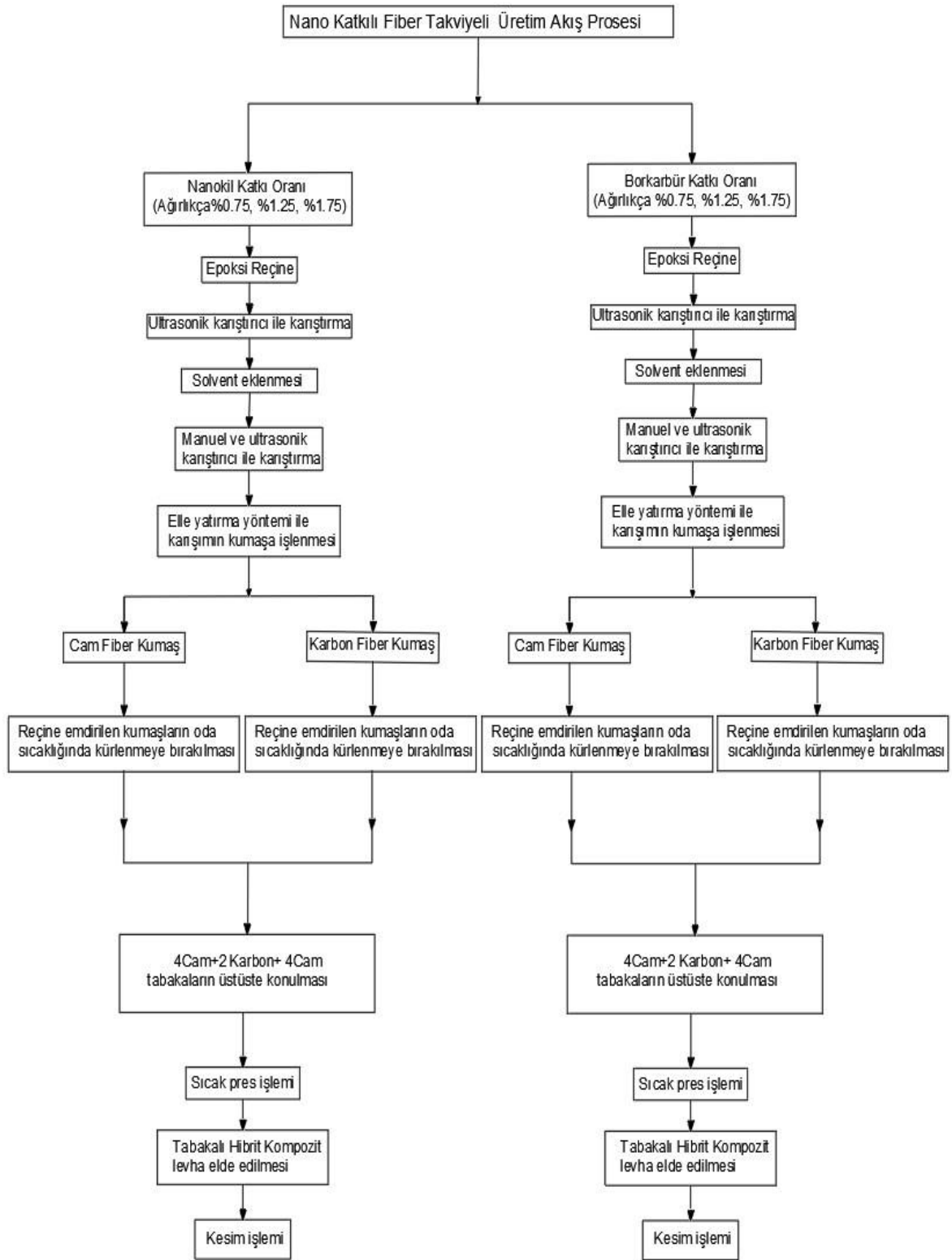
Malzeme Türü	Reçine	Sertleştirici	Karbon fiber	Cam fiber	Nanokil	Borkarbür
Ticari Adı	F-1564	F-3487	-	-	Esan1-140	B ₄ C
Yoğunluk/Boyut	1.15gr/cm ³	1 gr/cm ³	245 gr/m ²	390 gr/m ²	partikül boyutu:<20µm	partikül boyutu:3,093µm

Katkı maddelerinin epoksi reçine içine homojen dağılımını sağlamak için kullanılan epoksi reçine miktarının %30'u oranında solvent ilavesi yapılmıştır. Tablo 6.2'de belirtilen miktarlarda malzeme kullanılmıştır.

Tablo 6.2 Kullanılan malzeme ve nanokatki miktarları

Nano katkı türü ve takviye oranları	Cam elyaf (1000x1000 mm ²) Reçine 500 gr Solvent 150 gr	Karbon elyaf (1000x500 mm ²) Reçine 200 gr Solvent 60 gr
%0.75 Nanokil (gr)	3,75	1,5
%1.25 Nanokil (gr)	6,25	2,5
%1.75 Nanokil (gr)	8,75	3,5
%0.75 B ₄ C (gr)	3,75	1,5
%1.25 B ₄ C (gr)	6,25	2,5
%1.75 B ₄ C (gr)	8,75	3,5

Üretim sırasında takip edilen aşama malzeme hazırlığından başlayarak reçine karışımı, manuel ve ultrasonik karıştırma yöntemleri ile tabakaların hazırlanması ve sonrasında 4 adet cam+2 adet karbon+4 adet cam fiber takviyeli plaka oluşturma işlemlerini kapsamaktadır. Bu üretim sürecinde izlenen aşama Şekil 6.1 ' de verilmiştir.



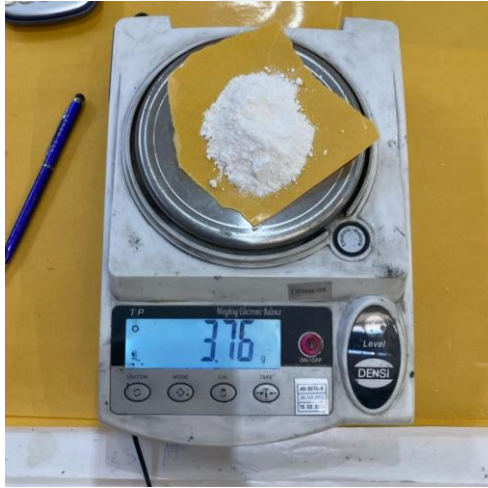
Şekil 6.1 Nano katkılı kompozit levha üretim akış şeması

6.2 Plakaların Üretimi

Plakalar hazırlanırken matris malzemesi ve fiberlerin (karbon fiber, cam fiber) hazırlanması olarak iki aşama izlenmiştir.

6.2.1 Matris malzemesinin hazırlanışı

Epoksi reçine ağırlığına göre bor karbür ve nanokil katkı oranları belirlenmiştir. Üretimde kullanılan epoksi reçinesine, ağırlıkça sırasıyla %0,75, %1,25 ve %1,75 oranlarında ayrı ayrı bor karbür ve nanokil eklenmiştir. Ayrıca reçine miktarının %30' u oranında solvent kullanılmıştır. Hazırlanan karışımlar, 1000 x 1000 mm² ölçülerindeki, 390 gr/m² yoğunluklu twill cam fiber ve 500 x 1000 mm² 245 gr/m² twill karbon fiberlere sürülmüştür. Bor karbür ve nanokil miktarları 0,01 gram hassasiyetindeki hassas teraziyle ölçülmüştür (Şekil 6.2).



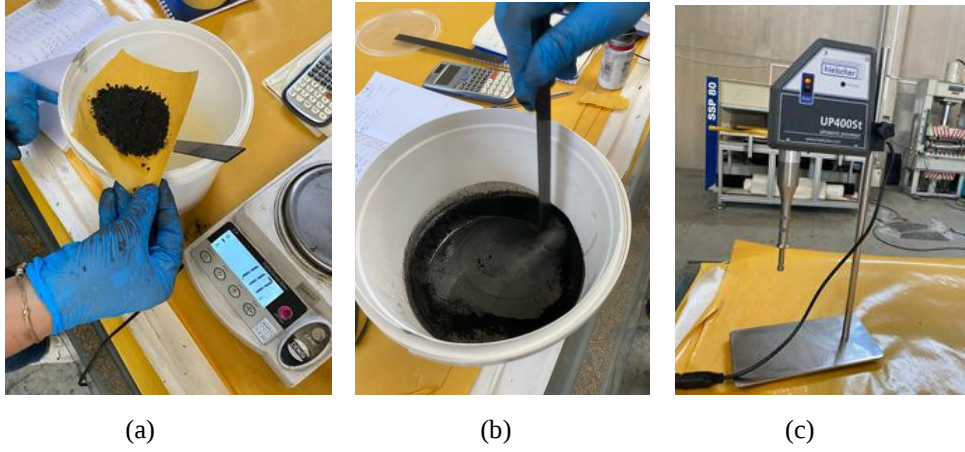
(a)



(b)

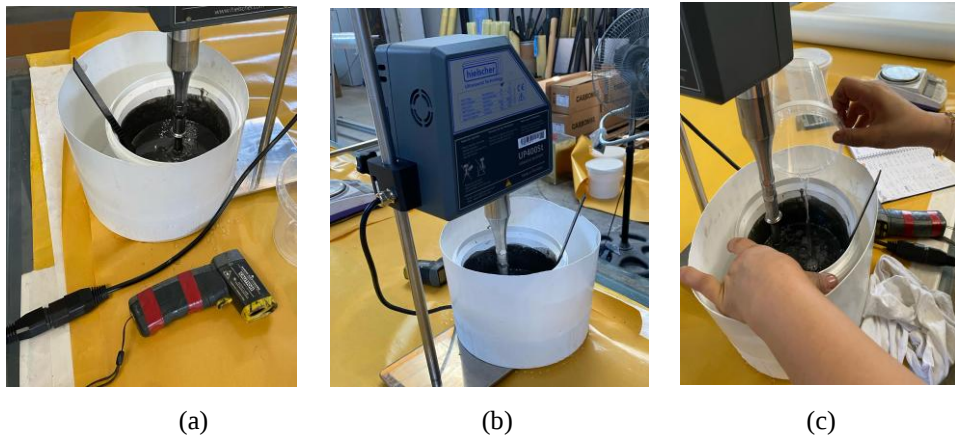
Şekil 6.2 Nano malzemenin hassas terazi ile miktarının belirlenmesi (a) Nanokil, (b) Bor karbür

Karışımın homojen hale gelmesi için ilk aşamada hassas terazi ile ölçümü yapılan nanomalzeme reçineye eklenmiştir (Şekil 6.3a). Bor karbür ve nanokil önce Şekil 6.3b' de gösterildiği gibi manuel olarak bir tahta çubuk yardımıyla karıştırılmıştır. Daha sonra homojen bir karışım elde etmek için karıştırma işlemi Şekil 6.3c' de görüldüğü gibi ultrasonik karıştırma cihazı (Hielsher UP-400S) ile gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik cihaz, yüksek frekanslı ses dalgalarını kullanarak nanomalzemelerin epoksi reçine içerisinde eşit ve homojen bir şekilde dağılmasını sağlamaktadır.



Şekil 6.3 Nano katkılı reçinenin hazırlanma aşamaları (a) Nano katkının reçineye eklenmesi (b) Manuel karıştırma (c) Ultrasonik karıştırma

Karıştırma işlemleri sırasında sıcaklığın artışı kontrol altında tutmak amacıyla, soğutucu buz kalıpları kullanılarak karışım sıcaklığı takip edilmiştir. Sıcaklığın; karışımın sıcaklığını etkilememesi için karıştırma kabı buz parçaları ile dolu başka bir kabın içerisine yerleştirilmiştir ve her üç dakikada bir dijital termometre ile ölçümler yapılarak, sıcaklığın 50 °C'yi geçmemesine dikkat edilmiştir (Şekil 6.4a ve Şekil 6.4b). Kullanılan ağırlık oranları; bor karbür ve nanokil için %0,75, %1,25 ve %1,75 şeklinde belirlenmiştir. Böylece iki farklı malzemeden üç farklı oran kullanılarak toplam altı farklı nanomalzeme içeriği hazırlanmıştır. Karıştırma işleminin sonuna doğru nano+reçine karışımına solvent eklenmiş ve bir süre daha karıştırma işlemi yapılmıştır (Şekil 6.4c).



Şekil 6.4 (a) Sıcaklık ölçümü (b) Buz kalıbıyla dolu kap içinde reçinenin karıştırılması (c) Solvent eklenmesi

Her oran için ayrı ayrı gerçekleştirilen bu işlemlerde, her bir oran için karıştırma süresi 45 dakika ile 1 saat arasında değişmiştir. Süre sonunda hazırlanan bu karışım, kumaşlara uygulanmaya hazır hale getirilmiştir.

6.2.2 Takviye malzemesinin hazırlanışı

Mevcut çalışmada hibrit kompozit malzeme elde etmek amacıyla cam fiber takviyeli ve karbon fiber takviyeli olmak üzere iki fiber türü kullanılarak kompozit plakalar oluşturulmuştur.

6.2.2.1 Cam fiber takviyeli nanokompozit tabakaların hazırlanışı

Üretimde twill cam fiber takviyeli kumaşlar kullanılmıştır. Bu kumaşlar, 1000 x 1000 mm² ölçülerinde kesilmiştir (Şekil 6.5).



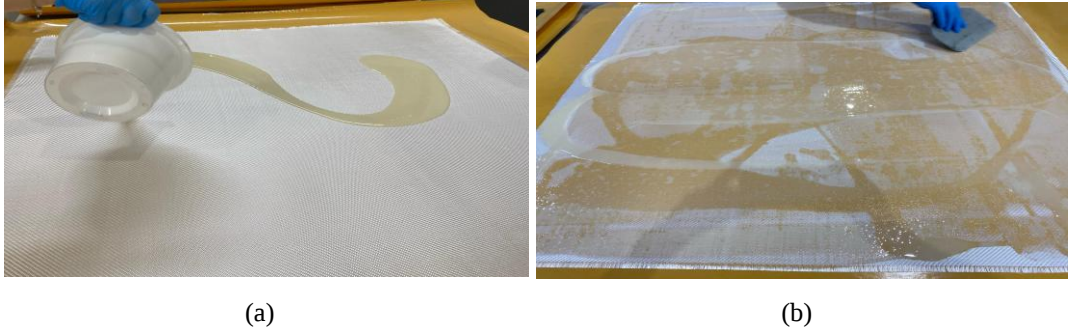
(a)



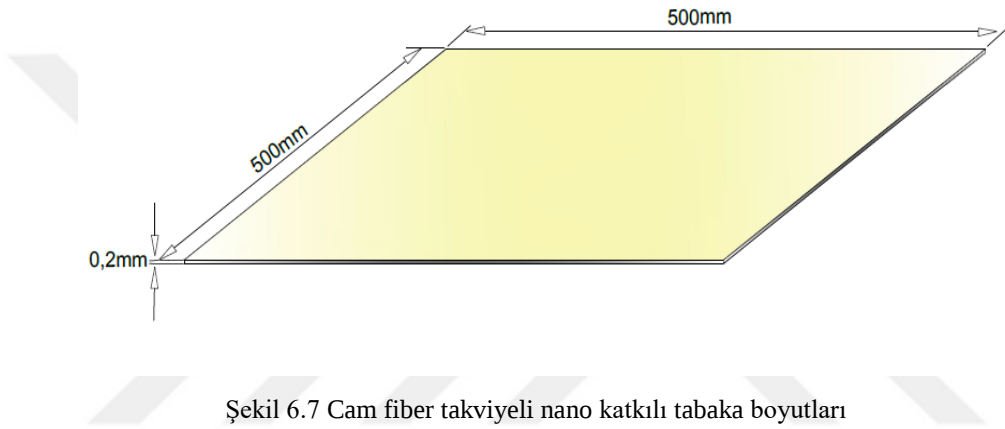
(b)

Şekil 6.5 (a) Twill örgülü cam fiber (b) Kesimi yapılan cam fiber

Nano kil/bor karbür + reçine karışımı, cam fiber takviyeli kumaşa elle yatırma yöntemi kullanılarak (ağırlık oranlarınca hazırlanan) sürülmüştür. Bu işlem sırasında reçinenin kumaş tarafından tam olarak emilmesi ve hava kabarcıklarının oluşmaması için elle sürme işlemi dikkatlice yapılmıştır. (Şekil 6.6) Reçinenin uygulama sürecinde homojen dağılımının sağlanmasına ve kumaşların tüm yüzeylerine eşit şekilde dağıtımına önem verilmiştir. Daha sonra reçine emdirilmiş kumaşlar oda sıcaklığında 15 gün süreyle kürlenmeye bırakılmıştır. Kürlenme sonucunda Şekil 6.7 de görüldüğü üzere 500 x 500 mm² tabakalar elde edilmiştir.



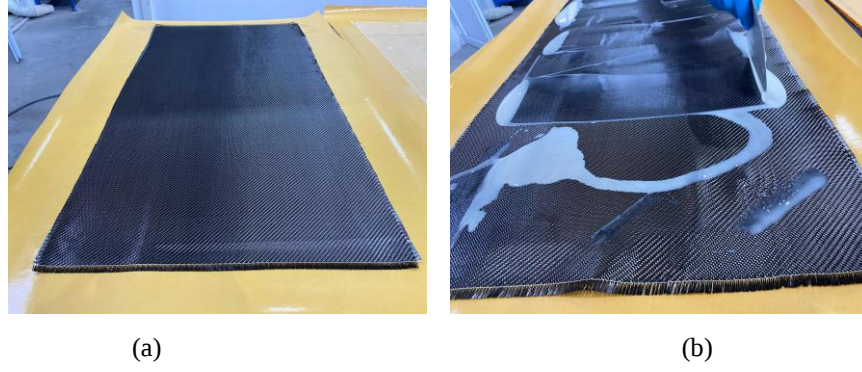
Şekil 6.6 (a) Nano katkılı reçinenin fibere dökülmesi (b) Reçinenin fibere nüfuz ettirilmesi



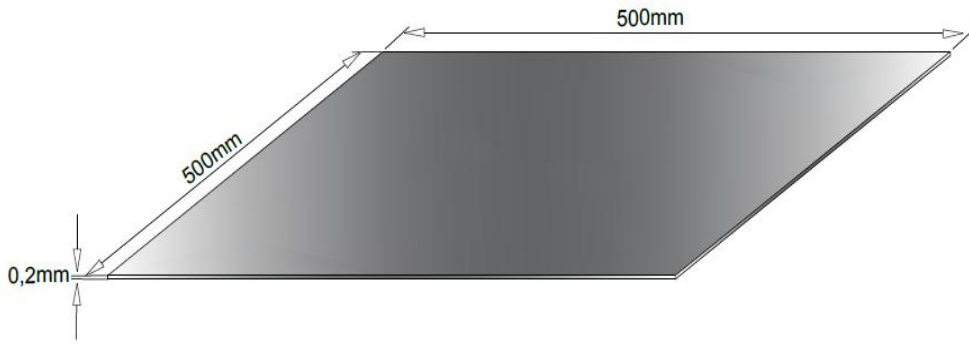
Şekil 6.7 Cam fiber takviyeli nano katkılı tabaka boyutları

6.2.2.2 Karbon fiber takviyeli nanokompozit tabakaların hazırlanışı

Karbon fiber plakaların üretiminde 245 gr/m^2 yoğunluklu karbon twil kumaş kullanılmıştır. $500 \times 1000 \text{ mm}^2$ ölçülerinde kesimler yapılmıştır (Şekil 6.8a). Nanokil/bor karbür + reçine karışımı, karbon fiber takviyeli kumaşa elle yatırma yöntemi kullanılarak (ağırlık oranlarınca hazırlanan) sürülmüştür. Bu işlem sırasında reçinenin kumaş tarafından tam olarak emilmesi ve hava kabarcıklarının oluşmaması için elle sürme işlemi dikkatlice yapılmıştır (Şekil 6.8b). Reçinenin uygulama sürecinde homojen dağılımı ve kumaşların tüm yüzeylerine eşit şekilde dağıtımı sağlanmıştır. Reçine ile kaplanmış kumaşlar oda sıcaklığında 15 gün süreyle küremeye bırakıldıktan sonra $500 \times 500 \text{ mm}^2$ ebatlarında iki eşit parçaya ayrılmıştır (Şekil 6.9). Böylelikle çalışma için uygun özelliklere sahip karbon fiber takviyeli nanokompozit plakalar hazır hale gelmiştir.



Şekil 6.8 (a) Karbon fiberin düz zemine yatırılması (b) Nanokatkılı reçinenin karbon fibere nüfuz etmesi için emdirilme işlemi



Şekil 6.9 Karbon fiber takviyeli nano katkılı tabaka boyutları

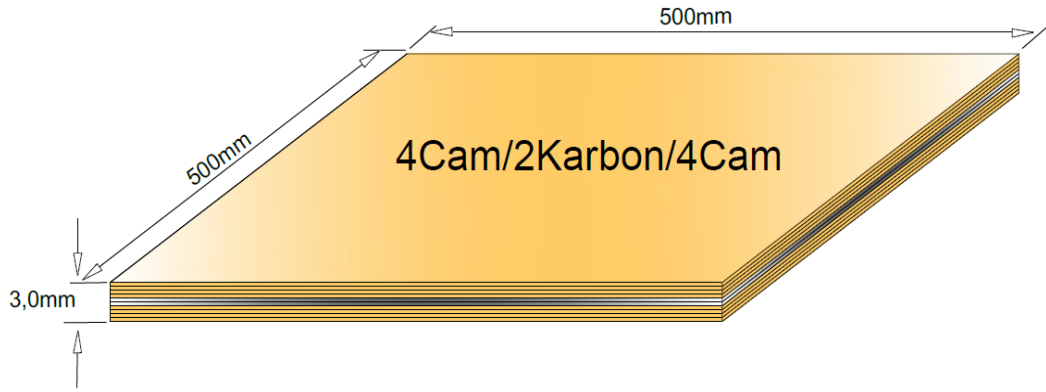
6.2.3 Tabakaların Birleştirilmesi

Bu aşamada tümü ağırlıkça %0,75, %1,25 ve %1,75 katkı oranlarıyla hazırlanan dört tabaka cam fiber ($500 \times 500 \text{ mm}^2$), iki tabaka karbon fiber ($500 \times 500 \text{ mm}^2$) ve dört tabaka cam fiber ($500 \times 500 \text{ mm}^2$), olmak üzere toplam on katmanlı kompozit levhalar birleştirilmek üzere presleme işlemi uygulanmıştır.

6.2.4 Presleme işlemi

Presleme işlemine geçilmeden önce tüm plakalar yanmaz jelatinle kaplanmıştır. Bu yöntemle presleme sırasında reçinenin dışarıya sızması engellenmiş ve levhaların düzgün yüzey kalitesine sahip olması hedeflenmiştir. Hazırlanan levhalar pres makinasına yerleştirilmiştir. Presleme sürecinde, levhalar oda sıcaklığından (24°C) başlayıp aşamalı olarak 120°C 'ye kadar yükselen sıcaklık ile beraber 200 bar basınçta 2 saat süreyle bekletilmiştir. Süre sonunda kendiliğinde oda sıcaklığına gelinceye kadar beklenmiş ve levhalar prestan çıkarılmıştır. Bu şekilde $500 \times 500 \text{ mm}^2$

ölçülerinde bir adet katkısız hibrit kompozit levha ve altı adet nano katkılı (ağırlıkça %0,75 , %1,25 ve %1,75 oranlarında nanokil ve ağırlıkça %0,75, %1,25 ve %1,75 oranlarında bor karbür) levha elde edilmiştir. Presleme işlemi sonucunda hibrit nanokompozit levhalar Şekil 6.10'da gösterildiği gibi 500 x 500 mm² ölçülerinde ve 3,0 mm kalınlığında, toplamda 10 tabakalı olarak elde edilmiştir. Son olarak kesim için hazır hale getirilerek paketlenmiştir (Şekil 6.11).



Şekil 6.10 Hibrit nano kompozit plakaların ebatları



Şekil 6.11 Kesime hazır hibrit nano kompozit plakalar

6. 3 Kesim İşlemi

Hazırlanan hibrit nanokompozit levhalar düşük hızlı darbe testlerine uygun olacak şekilde kesilmiştir. Bu aşamada, ağırlıkça %0,75, %1,25 ve %1,75 oranlarında ayrı ayrı üretilmiş olan bor karbür ve nanokil katkılı kompozit levhalar, bilgisayar kontrollü CNC kesim tezgâhında Şekil 6.12 de gösterildiği üzere 100 x 100 mm² standart boyutlarda kesilmiştir.

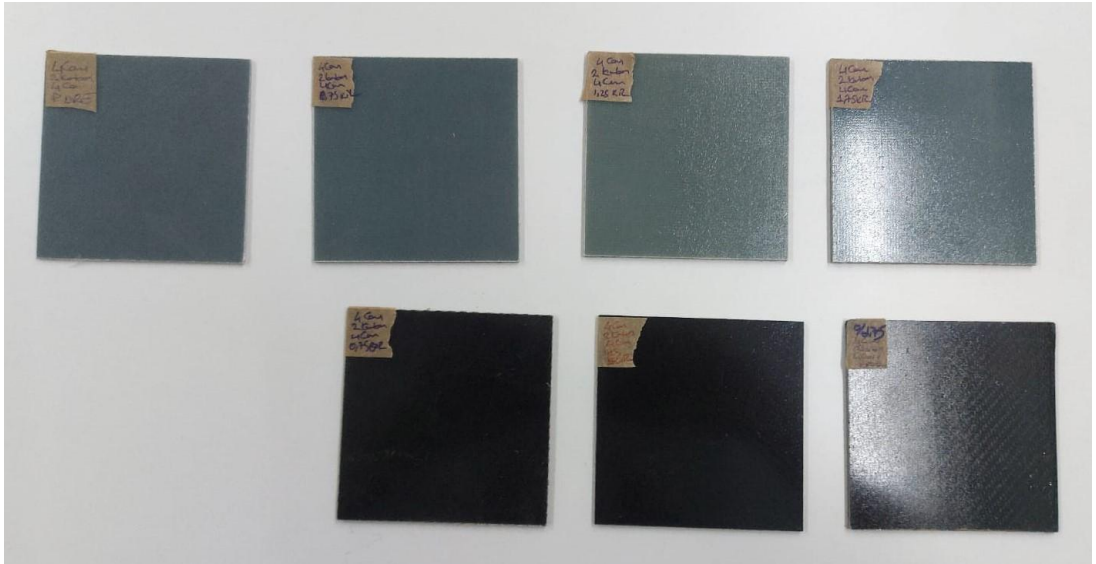


(a)

(b)

Şekil 6.12 (a) 100 x 100 mm² kesimi yapılan nanokil katkılı hibrit levha, (b) 100 x 100 mm² kesimi yapılan bor karbür katkılı hibrit levha

Kesim işleminin ardından, numuneler Şekil 6.13 te görüldüğü üzere kullanılan nanomalzeme türüne ve katkı oranlarına göre etiketlenmiştir. Etiketleme işlemi tamamlanan numuneler, test aşaması için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 6.13 Katkı oranlarına göre etiketlenmiş katkısız, nanokil ve bor karbür katkılı hibrit numune örnekleri

7. DÜŞÜK HIZLI DARBE DENEYİ

Bu bölümde, cam/karbon/cam hibrit yapıya sahip kompozit numuneler, katkısız, ağırlıkça %0,75, %1,25 ve %1,75 oranlarında nanokil ve bor karbür katkı maddeleri ile hazırlanarak, sırasıyla 30J, 50J ve 70 J enerji aralıklarında düşük hızlı darbe testlerine mazruz bırakılmıştır.

7.1 Düşük Hızlı Darbe Testi Cihazı

Bu çalışmadaki düşük hızlı darbe testleri, Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi Test ve Analiz Birimi'nde yapılmıştır. Deneyler bu birimde Şekil 7.1'de gösterilen Instron Ceast 9350 darbe test cihazında gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, yere sabitlenmiş ve serbest düşme prensibiyle çalışan, kontrollü bir darbe test sistemidir.



Şekil 7.1 Instron Ceast 9350 darbe test cihazı

Düşük hızlı darbe deneylerinde 20 mm' lik yarı küresel uç kullanılmıştır. Deneylerde enerji seviyelerine göre kullanılan kütle ve hız değerleri tablo 7.1'de belirtilmiştir.

Tablo 7.1 Enerji seviyelerine göre kullanılan kütle ve hız değerleri

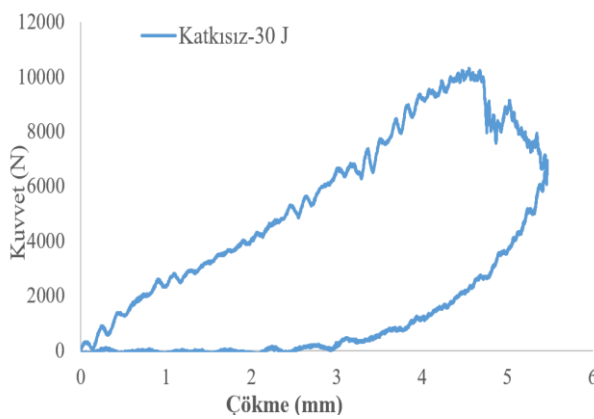
Enerji seviyesi (J)	Eklenen kütle (kg)	Toplam kütle (kg)	Hız (m/s)	Düşme yüksekliği (mm)
30 J	4,5	10	2,45	306
50J	4,5	10	3,16	510
70J	4,5	10	3,74	714

7.2 Kuvvet-Çökme Grafikleri

Darbe enerjisi ile birlikte uygulanan kuvvetin numunedeki çökme (yer değiştirme) davranışını gösteren grafiklerdir. Bu grafikler aşağıda katkısız, nanokil ve bor karbür katkılı numunelere göre ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

7.2.1 Katkısız numunelerin kuvvet-çökme grafikleri

30 J darbe enerjisinde elde edilen Şekil 7.2a'daki katkısız numune kuvvet-çökme grafiği incelendiğinde, numunenin 10306,8 N maximum kuvvet taşıdığı görülmektedir. Bu da yapının nispeten rijit olduğunu göstermektedir. Şekil 7.2b'deki numunenin ön yüz fotoğrafında ise hasar izlerinin sınırlı alanda kaldığı görülmektedir



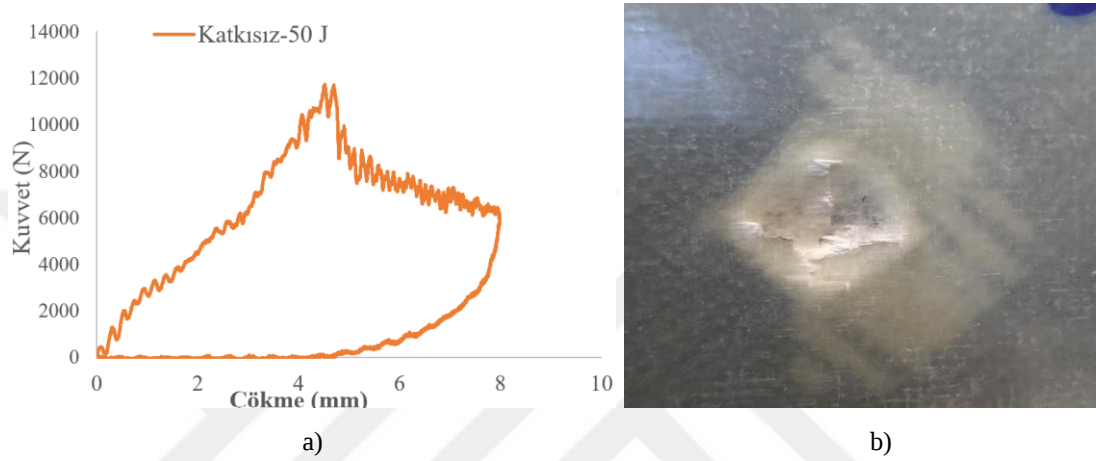
a)



b)

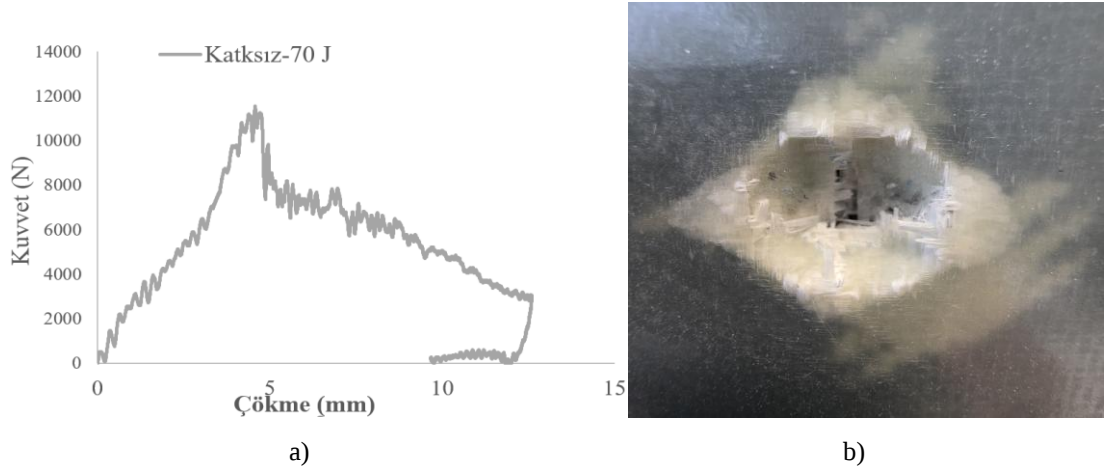
Şekil 7.2 a) 30 J darbe enerjisinde katkısız hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı

50 J darbe enerjisine ait Şekil 7.3a'daki grafik, 11725 N maksimum kuvvet değerine ve ardından ani bir düşüşe sahiptir. Bu, numunenin darbe anında hızlıca maksimum dayanımına ulaşip kırılma ya da delaminasyon gibi hasar mekanizmalarının devreye girdiğini göstermektedir. 7000 N değerinde grafiğin yatay doğrultuda genişlemesi, hibrit kompozitin ortada bulunan karbon fiberin dayanımı ile ilişkilendirilmiştir. Şekil 7.3b'de, numune ön yüzü görselinde daha geniş ve belirgin hasar izleri görülmektedir.



Şekil 7.3 a) 50 J darbe enerjisinde katkısız hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı

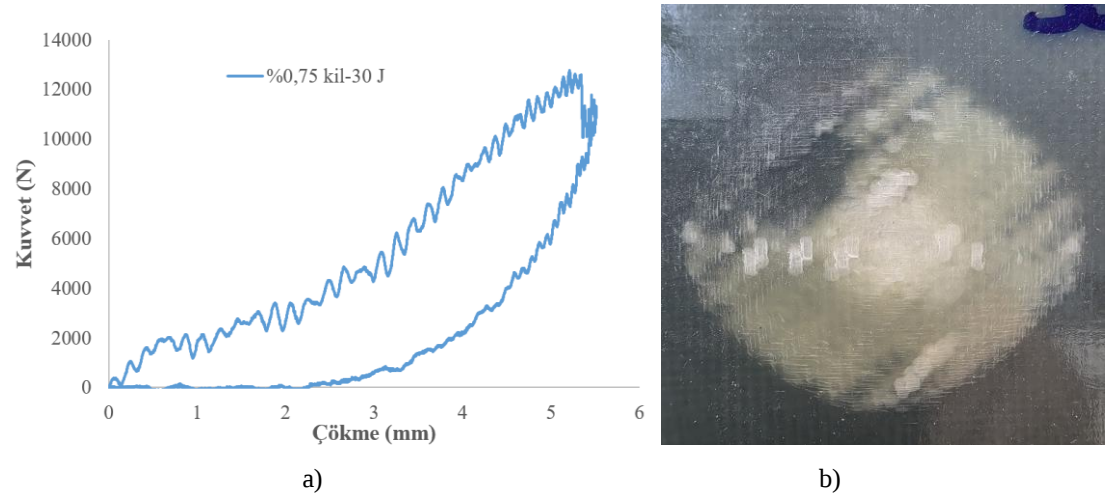
70 J darbe enerjisine ait Şekil 7.4a grafiği, 11549,9 N maksimum kuvvet ile en yüksek deformasyon seviyesini (12 mm) göstermiştir. Kuvvet değerleri hızla artarak tepe noktasına ulaştıktan sonra dalgalı bir şekilde azalmaktadır. Bu durum, cam fiber–karbon fiber–cam fiber katmanlı hibrit yapının çoklu hasar mekanizmalarına (matris çatlağı, fiber kırılması, delaminasyon) maruz kaldığını göstermektedir. Şekil 7.4b'de, numunenin ön yüz fotoğrafında penetrasyon (vurucu ucun numuneye saplanması) görülmektedir.



Şekil 7.4 a) 70 J darbe enerjisinde katkısız hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı

7.2.2 % 0.75 Nanokil katkılı numunelerin kuvvet-çökme grafikleri

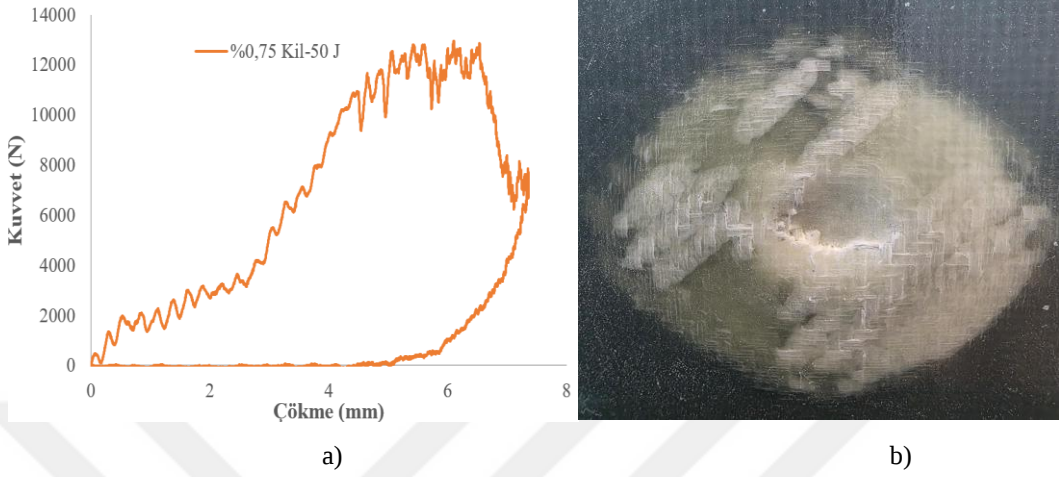
Şekil 7.5a'daki grafikte, kuvvetin yer değiştirme ile birlikte arttığı ve 12781,4 N seviyesinde bir tepe noktasına ulaştığı görülmektedir. Deformasyon miktarı önceki numunelere göre düşüktür. Bu durum, yapının darbe enerjisini absorbe ederek hasarın sınırlı kaldığını göstermektedir. Şekil 7.5b'de ise numune görselinde darbe alanının sınırlı, dairesel ve yüzeysel kaldığı görülmektedir.



Şekil 7.5 a) 30 J darbe enerjisinde % 0,75 nanokil katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı

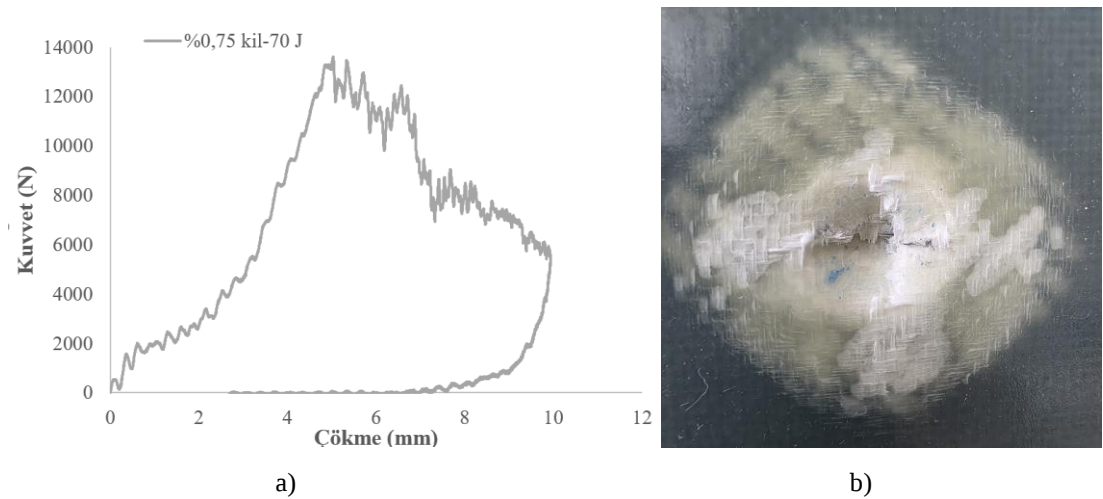
Şekil 7.6a'da çökme değeri 5,1 mm ve 12944,8 N bir tepe kuvvet değeri elde edilmiştir. Şekil 7.6b'deki hasar izi genişlemiş, merkezden çevreye doğru yayılmıştır. Bu da enerji

absorpsiyonunun daha yoğun gerçekleştiğini ve yapısal hasar olduğunu göstermektedir.



Şekil 7.6 a) 50 J darbe enerjisinde % 0,75 nanokil katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı

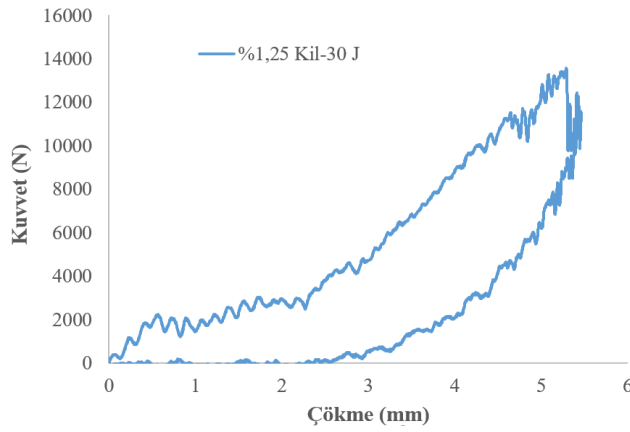
Şekil 7.7a yüksek bir tepe kuvvetine (13616 N) ulaşıldıktan sonra kuvvetin kademeli ve dalgalı şekilde azaldığını göstermektedir. Çökme değerinin 7,6 mm olduğu yani malzemenin deformasyona uğradığı ve darbe enerjisinin büyük kısmını plastisite ve hasar yoluyla absorbe edildiği Şekil 7.7b'de numune ön yüzü görselinde matris kırılması ve delaminasyon alanlarının olduğu görülmektedir.



Şekil 7.7 a) 70 J darbe enerjisinde % 0,75 nanokil katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğraf

7.2.3 % 1.25 Nanokil katkılı numunelerin kuvvet-çökme grafikleri

Şekil 7.8a'da kuvvetin yer değiştirme ile birlikte istikrarlı şekilde arttığı, 13500 N gibi yüksek bir kuvvete ulaşıldığı ve bu noktadan sonra kuvvetin ani şekilde düştüğü gözlemlenmektedir. 2,6 mm'lik çökme değeri ile, malzemenin bu enerji seviyesinde hem yüksek yük taşıma kapasitesine hem de kırılma öncesi sert bir davranışa sahip olduğu görülmektedir. %1,25 katkı oranı ile yapının rijitliğinin ve darbe absorpsiyon kapasitesinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Şekil 7.8b'deki numune hasar görselinde çökme izinin azaldığı görülmektedir.



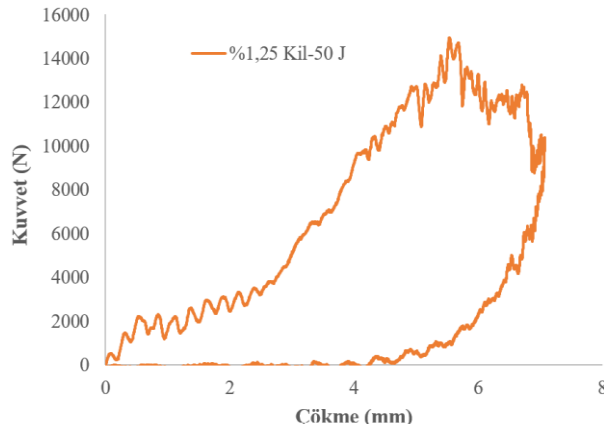
a)



b)

Şekil 7.8 a) 30 J darbe enerjisinde % 1,25 nanokil katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı

Şekil 7.9 a'da kuvvet değeri 14946,6 N'e ulaşmakta ve ardından düşüş yaşanmaktadır. Çökme değeri 4,6 mm seviyelerine ulaşmıştır. Bu, darbenin yapı üzerinde hasar olduğunu, ancak malzemenin yine de yüksek enerjiye karşı iyi dayanım gösterdiğini ortaya koymaktadır (Şekil 7.9b). Kuvvetin bu seviyelere kadar çıkabilmesi, katkı oranının bu enerji seviyesinde darbe dayanımını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir.



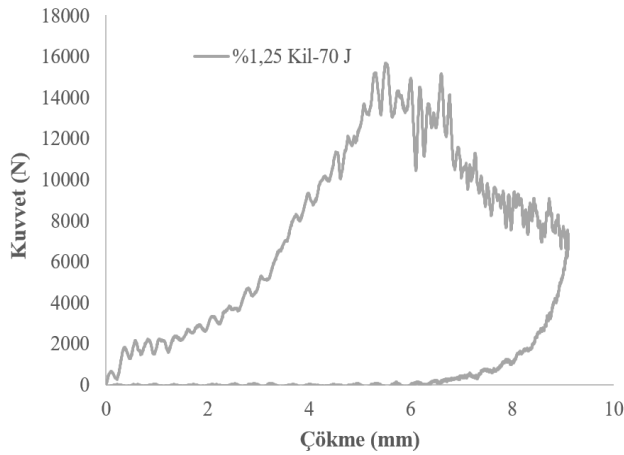
a)



b)

Şekil 7.9 a) 50 J darbe enerjisinde % 1,25 nanokil katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı

Şekil 7.10a'da 1670,3 N kuvvet değeri elde edilmiştir. Ancak bu tepe noktasından sonra kuvvet, dalgalı ve kararsız bir şekilde düşmektedir. Bu durum, matris çatlağı, fiber kırılması, delaminasyon vb. hasar mekanizmalarının devreye girdiğini göstermektedir. Şekil 7.10b'de numun ön yüzünde oluşan hasarlar görülmektedir. Çökmenin artması (6.6 mm) malzemenin büyük ölçüde enerji emdiğini ve sünek davranış gösterdiğini göstermektedir.



a)

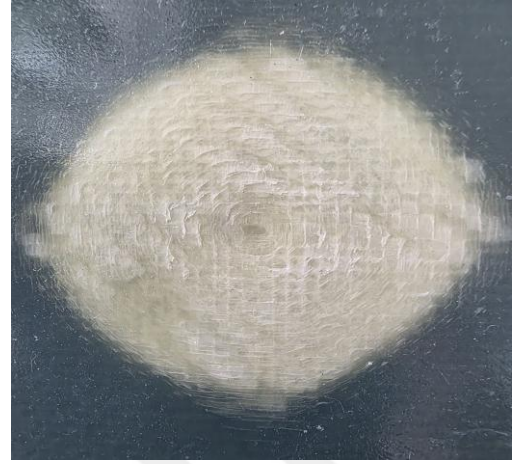
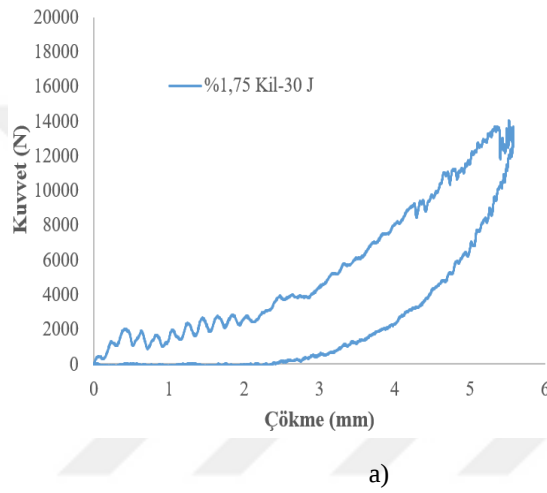


b)

Şekil 7.10 a) 70 J darbe enerjisinde % 1,25 nanokil katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı

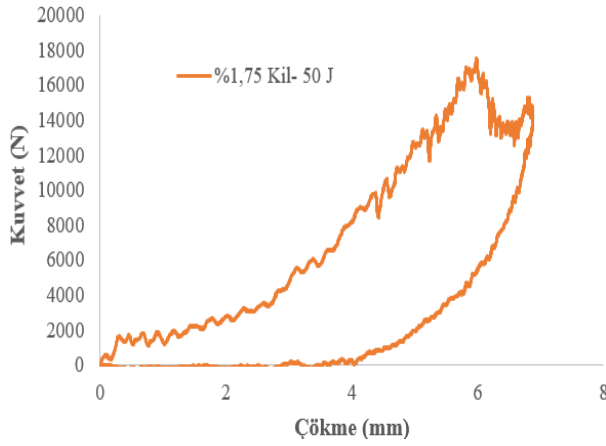
7.2.4 % 1.75 Nanokil katkılı numunelerin kuvvet-çökme grafikleri

Şekil 7.11a'da kuvvetin düzenli bir şekilde arttığı, 14053,7 N'a ulaşıldığı ve ardından düşüş yaşandığı görülmektedir. Bu, malzemenin darbe enerjisini iyi bir şekilde absorbe ettiğini fakat kırılmanın keskin ve ani olduğunu göstermektedir. Yüksek katkı oranının malzemeye sertlik kazandırarak rijitliğini artırdığını ancak sünekliği sınırladığını görülmektedir. Şekil 7.11b'de numune görselinde darbe izi çapının küçüldüğü görülmektedir.

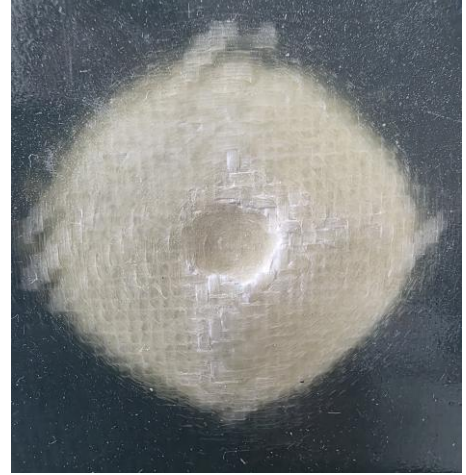


Şekil 7.11 a) 30 J darbe enerjisinde % 1,75 nanokil katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzünün fotoğrafı

Şekil 7.12a'da kuvvetin 17578,8 N'a kadar ulaştığı ardından nispeten dalgalı bir düşüş eğilimi ile malzemede 4 mm'lik çökme değerinin oluştuğu görülmektedir. Bu durum, malzemenin yapısal olarak yüksek enerji altında daha kontrollü bir kırılma yaşadığını göstermektedir. %1,75 katkı oranı bu aşamada hem yük taşıma hem de enerji emme performansını artırmıştır. Şekil 7.12b'de numunenin ön yüzünde oluşan hasar görülmektedir.



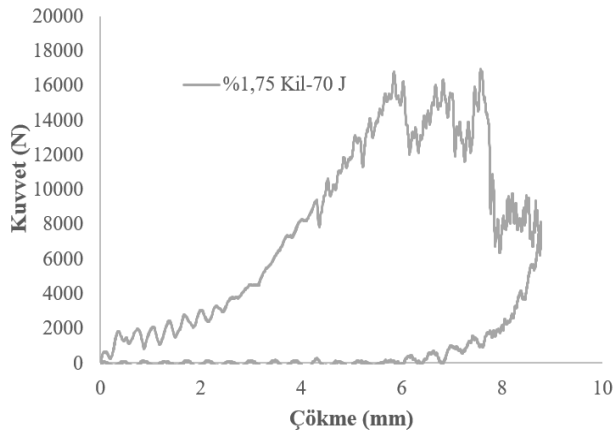
a)



b)

Şekil 7.12 a) 50 J darbe enerjisinde % 1,75 nanokil katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı

Şekil 7.13a'da kuvvet değeri 16966 N olarak görülmektedir. Malzemenin yüksek darbe enerjisi altında çoklu hasar mekanizmaları ile karşılaştığını görülmektedir. Çökme değeri 6,8 mm olup bu da enerjinin büyük kısmının deformasyonla sönmüldüğünü göstermektedir. Şekil 7.13b'de numunenin ön yüzünde oluşan hasar görülmektedir.



a)

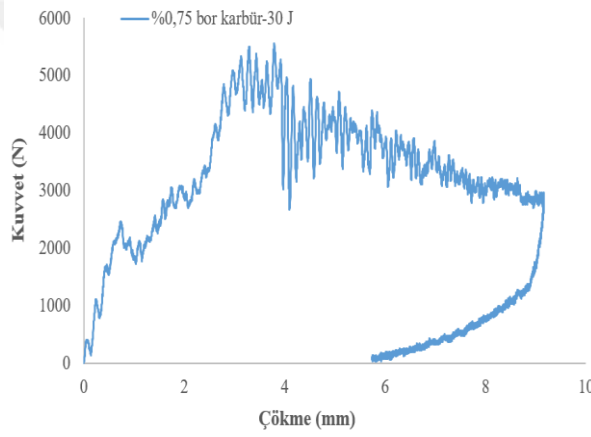


b)

Şekil 7.13 a) 70 J darbe enerjisinde % 1,75 nanokil katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı

7.2.5 % 0.75 Bor karbür katkılı numunelerin kuvvet-çökme grafikleri

Şekil 7.14a'da maksimum kuvvet 5561,9 N seviyesinde olup, 6,1 mm çökme değeri sonrasında kuvvet düşüşüyle hasarın başladığı görülmektedir. Kuvvet eğrisi inişli çıkışlı bir yapı sergileyerek yine 4 cam +2karbon+4 cam fiber hibrit yapı kaynaklı çoklu mikro çatlak ya da delaminasyon gibi hasarların oluştuğuna işaret etmektedir. Şekil 7.14b'de görseldeki hasar da küçük çaplı ancak delikli bir kırılmayı göstermektedir. Bu, bor karbür katkısının rijitliği artırarak darbe sırasında enerjinin keskin ve yoğun bir bölgede toplanmasına yol açtığını göstermektedir.



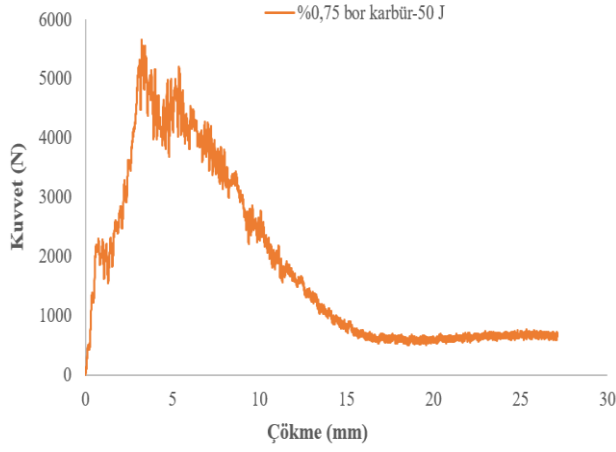
a)



b)

Şekil 7.14 a) 30 J darbe enerjisinde % 0,75 bor karbür katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği
b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı

Şekil 7.15a'da maksimum kuvvet değeri 5655,3 N olup, çökmenin 15.4 mm değerinde olduğu görülmektedir. Kuvvetin düşüş eğrisi, darbenin ardından malzemenin iç yapısında giderek yayılan bir hasar oluştuğunu ortaya koymaktadır. Şekil 7.15b'deki görselde, daha büyük bir delik oluşmuş, malzeme kırılarak parçalanmıştır. Bu durum, yapının delici etkilere karşı zayıf kaldığını göstermektedir.

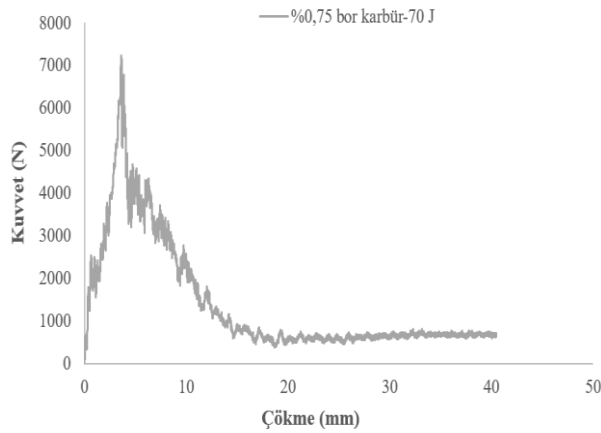


a)

b)

Şekil 7.15 a) 50 J darbe enerjisinde % 0,75 bor karbür katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği
b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı

Şekil 7.16a'da maksimum kuvvetin 7236 N değerinde oldukça kısa bir süreyle elde edildiğini ve ardından kuvvetin hızla düştüğünü göstermektedir. Çökme değerinin 14,6 mm olduğu görülmektedir. Enerji-zaman grafiği ile birlikte yorumlandığında çarpıcı ucun numuneye saplandığını görülmektedir. Kuvvet eğrisinin bu şekilde sert bir düşüşle ilerlemesi, darbenin malzeme tarafından çok sınırlı şekilde absorbe edildiğini ve kısa sürede ciddi hasar oluştuğunu göstermektedir. Bu durum Şekil 7.15b'de numune ön yüzünde oluşan hasar şeklinde görülmektedir.



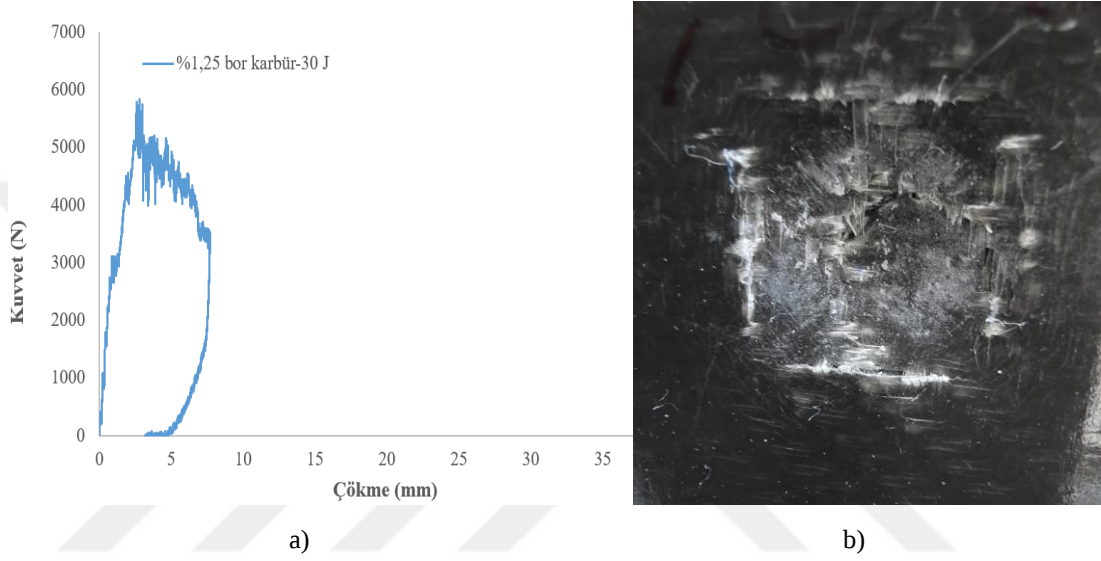
a)

b)

Şekil 7.16 a) 70 J darbe enerjisinde % 0,75 bor karbür katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği
b) Numunenin ön yüzü fotoğrafı

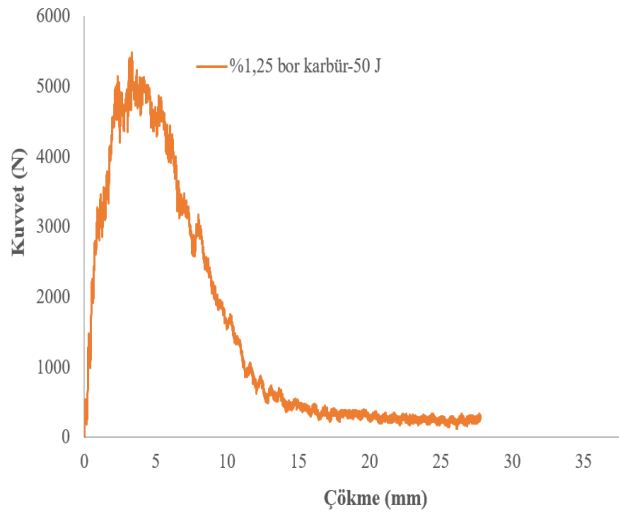
7.2.6 % 1.25 Bor karbür katkılı numunelerin kuvvet-çökme grafikleri

Şekil 7.17a'da, maksimum kuvvet 5830,4 N düzeyinde gerçekleşmiş ve çökme değeri 4,8 mm'de sonlanmıştır. Grafikteki kapalı eğri ile Şekil 7.17b'deki görsel birlikte değerlendirildiğinde, enerjinin bir kısmının deformasyon yoluyla sönmüldüğü; matris çatlağı ve delaminasyon alanlarının ise daha sınırlı kaldığı görülmektedir.



Şekil 7.17 a) 30 J darbe enerjisinde % 1,25 bor karbür katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği
b) Numunenin ön yüzünün fotoğrafı

Şekil 7.18a'da 5480,2 N'lik tepe kuvveti ile sonrasında kuvvetin azalarak yayvan bir eğri çizdiği görülmektedir. Çökme değeri ise oldukça fazladır (15,9 mm). Malzeme darbe karşısında sünek bir davranış sergilemiş ve yapısal bütünlük korunmakla birlikte ciddi bir deformasyon gelişmiştir. Şekil 7.18b'de numunenin ön yüzeyindeki hasar görülmektedir.



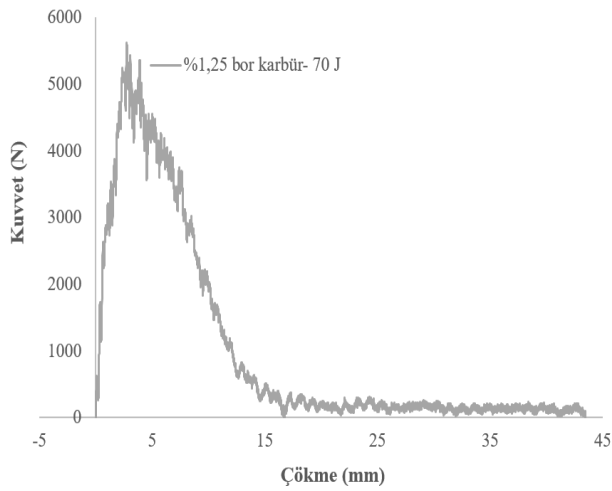
a)



b)

Şekil 7.18 a) 50 J darbe enerjisinde % 1,25 bor karbür katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği
b) Numunenin ön yüzünün fotoğrafı

Şekil 7.19a'da, kuvvet 5626,1 N seviyesine ulaştıktan sonra çok hızlı bir düşüşe geçmiştir. Çökme değeri 16,7 mm'ye ulaşmıştır ve eğri uzun, sönümlenmiş bir kuyruk yapısındadır. Açık eğri oluşmuş olup Şekil 7.19b'de numunede tam delinme gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, darbenin büyük kısmının deformasyonla karşılandığını ve malzemenin artık ciddi şekilde hasar aldığını göstermektedir.



a)

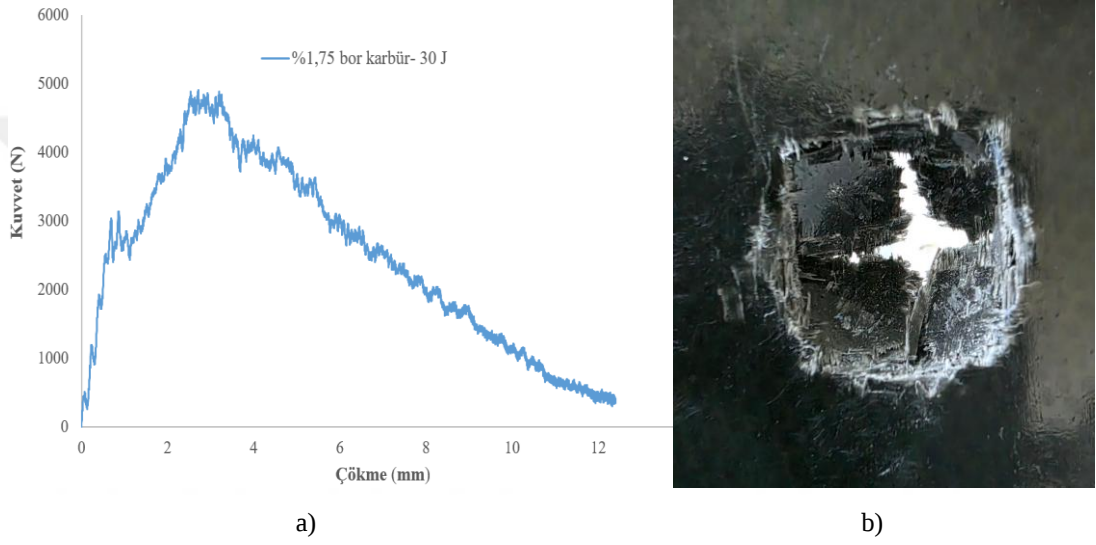


b)

Şekil 7.19 a) 70 J darbe enerjisinde % 1,25 bor karbür katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği
b) Numunenin ön yüzünün fotoğrafı

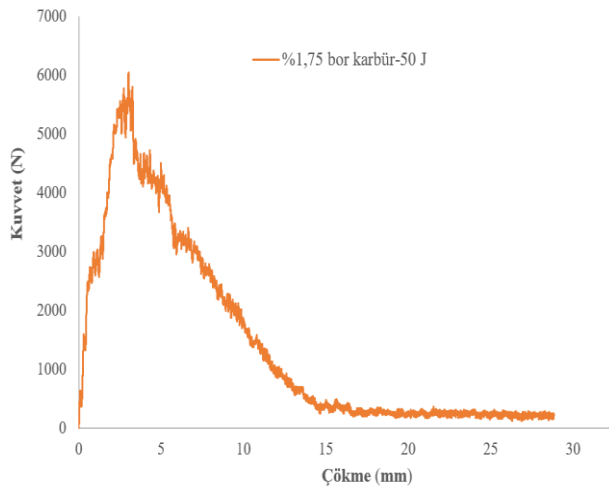
7.2.7 % 1.75 Bor karbür katkılı numunelerin kuvvet-çökme grafikleri

Şekil 7.20a'da maksimum kuvvet 4902,4 N seviyesine ulaşmış, ardından 11,9 mm çökme değeri ile birlikte kademeli olarak azalmıştır. Malzemenin yüksek katkı oranıyla birlikte rijitliğinin arttığı ancak kırılmalık eğiliminin de arttığını görülmektedir. Kuvvet eğrisindeki kademeli düşüş, darbenin hasar mekanizmalarıyla yayıldığını ve ani kırılma yerine kontrollü bir şekilde sönümlendiğini göstermektedir. Şekil 7.20b'de numunenin ön yüzünün hasar görüntüsü görülmektedir.



Şekil 7.20 a) 30 J darbe enerjisinde % 1,75 bor karbür katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği
b) Numunenin ön yüzünün fotoğrafı

Şekil 7.21a'da maksimum kuvvet 6040,5 N civarında bir pik değere ulaşmış, ardından hızlı ve sürekli bir düşüş göstermiştir. Çökme 14,7 mm civarına kadar çıkmıştır. Kuvvetin bu kadar hızlı düşmesi, yapının yüksek enerji altında daha erken kırılma yaşadığını açık grafik oluşturarak tam delinme yaşadığını Şekil 7.21b'de ki görsellede görebilmekteyiz.

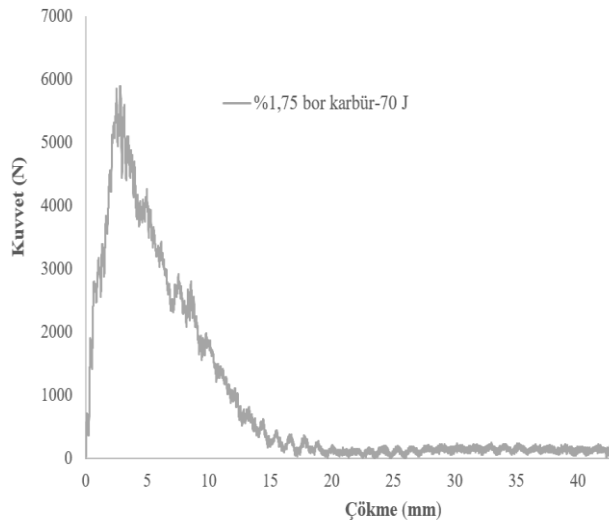


a)

b)

Şekil 7.21 a) 50 J darbe enerjisinde % 1,75 bor karbür katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği
b) Numunenin ön yüzünün fotoğrafı

Şekil 7.22a'da maksimum kuvvet 5888,8 N olup, hemen ardından çok hızlı bir düşüş meydana gelmiştir. Çökme 19 mm'nin üzerine çıkmıştır. Bu durum, malzemenin yüksek enerjiyi absorbe ederken büyük ölçüde deformasyona uğradığını ve taşıma kapasitesini hızla kaybettiğini göstermektedir. Şekil 7.22b'de numune ön yüzünde meydana gelen hasar görülmektedir.



a)

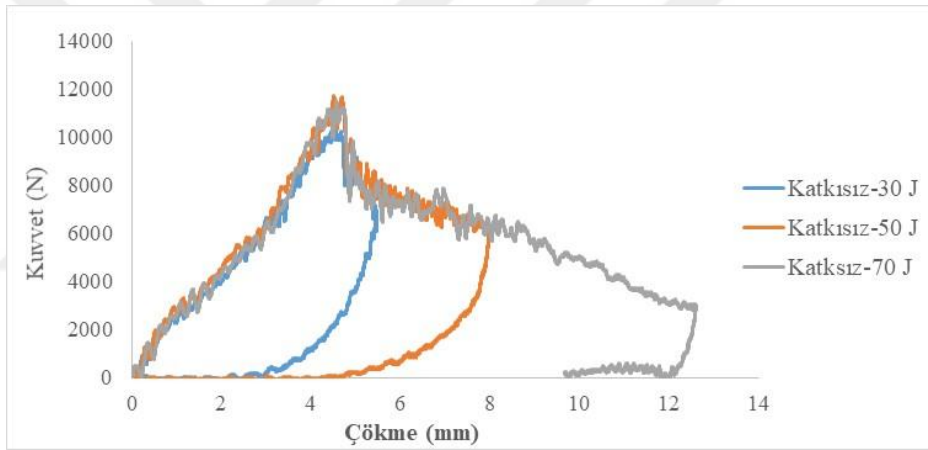
b)

Şekil 7.22 a) 70 J darbe enerjisinde % 1,75 bor karbür katkılı hibrit numunenin kuvvet-çökme grafiği
b) Numunenin ön yüzünün fotoğrafı

7.3 Enerji Seviyelerinden Elde Edilen Kuvvet-Çökme Grafiklerinin Karşılaştırılması

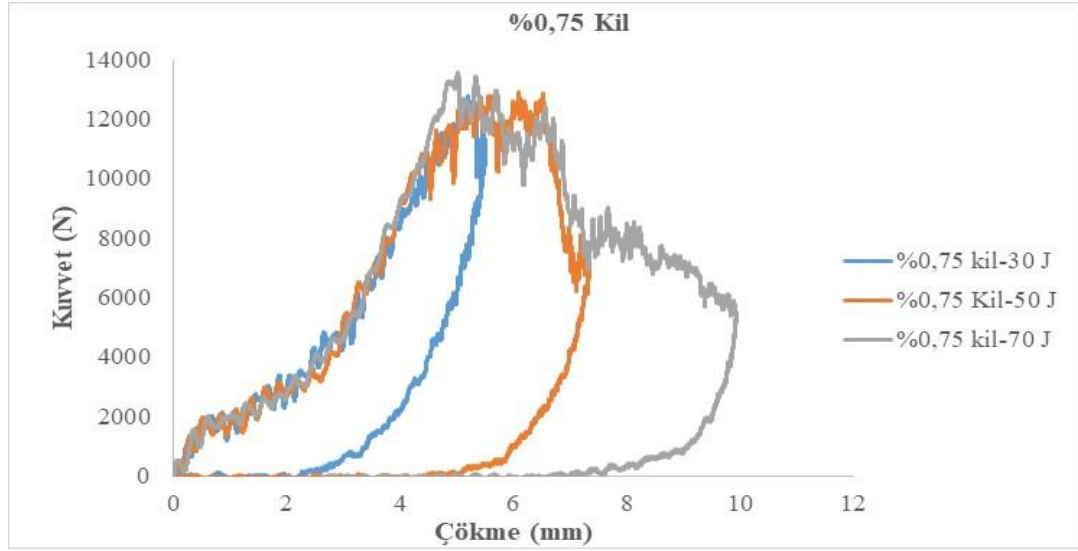
30 J, 50 J ve 70 J darbe enerjisi seviyelerinde uygulanan kuvvetle birlikte numunelerde meydana gelen çökme davranışları, katkısız, nanokil katkılı ve bor karbür katkılı örnekler olmak üzere, her bir katkı türü için ağırlıkça farklı katkı oranlarına göre ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Şekil 7.23'te Katkısız numuneler de 30 J ve 50 J enerjilerde rijit, ani kırılma eğilimli ve kısa sürede yüksek kuvvete ulaşan bir profil sergilerken, 70 J enerjide bu rijitliğin yerini daha uzun süreli deformasyon ve enerji yutumu almaktadır. Darbe enerjisi arttıkça grafiğin pozitif yönde genişlediği yüksek darbe enerjisi ile çökmenin arttığı görülmektedir.



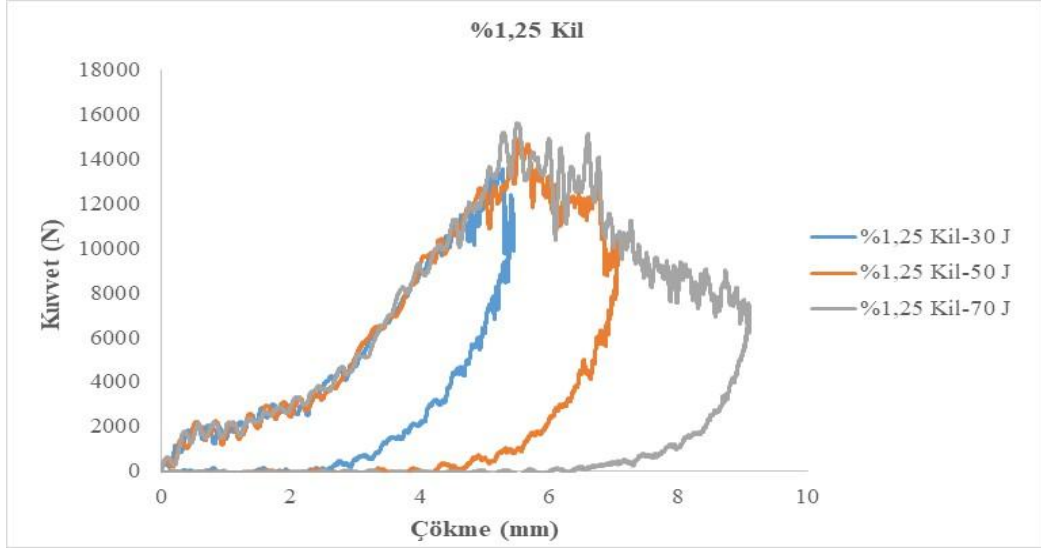
Şekil 7.23 Katkısız hibrit numunelerin 3 enerji seviyesinde kuvvet-çökme karşılaştırılması

Şekil 7.24'te, %0,75 nanokil katkılı cam/karbon/cam hibrit kompozit numunelerin 30 J, 50 J ve 70 J darbe enerjileri altındaki kuvvet-çökme davranışları gösterilmektedir. 30 J ve 50 J enerjili darbe testlerinde elde edilen kapalı eğriler, darbe ucunun numune yüzeyine çarpıp geri sekerek enerjinin bir kısmını sönümlediğini ve numunenin delinmeden enerjiyi absorbe ettiğini göstermektedir. Bu durum, katkının darbe enerjisini dağıtarak hasarı sınırladığını ve malzemenin rijitliğini artırdığını ifade etmektedir. Özellikle 50 J darbesinde, 12944,8 N'lik yüksek bir kuvvet değeri elde edilmiş ve numune yapısal bütünlüğünü koruyarak darbe ucunu geri püskürtmüştür. Buna karşılık, 70 J'lik artan darbe enerjisi ile grafik pozitif yönde genişlemiş ve çökme derinliği artmıştır.



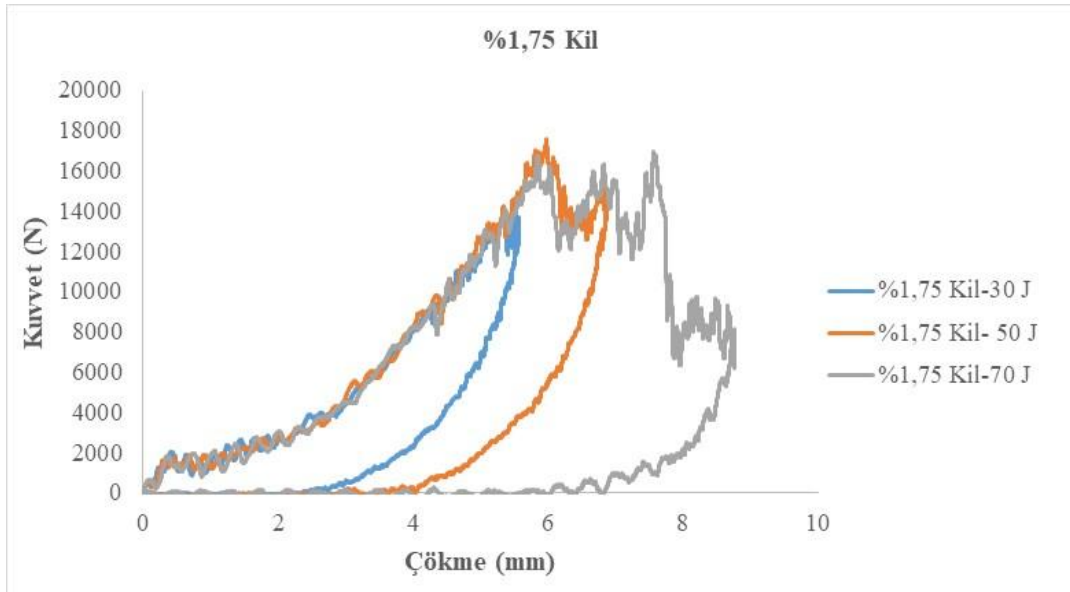
Şekil 7.24 %0.75 Nanokil katkılı hibrit numunelerin 3 enerji seviyesinde kuvvet-çökme karşılaştırılması

Şekil 7.25'te %1,25 nanokil katkılı kompozit numunelerin 30 J, 50 J ve 70 J darbe enerjileri altındaki kuvvet-çökme davranışları gösterilmektedir. %0,75 nanokil katkılı numunelere benzer şekilde eğrilerin kapalı formda olması, darbe ucunun numuneyi delmeden geri sekerek enerjinin önemli bir kısmının sönümlendiğini göstermektedir. Bu durum, nanokil katkısının yapıya rijitlik kazandırdığını, matrisi güçlendirdiğini ve darbe enerjisinin kontrollü bir şekilde absorbe edildiğini ifade eder. Her iki durumda da maksimum kuvvet değerleri (sırayla 13563,4 N, 14946,6 N) oldukça yüksektir, bu da yapının kuvvet taşıma kapasitesinin arttığını ortaya koymaktadır. 70 J seviyesinde ise yüksek enerjiye rağmen darbe sönümleme yeteneğini koruyarak dengeli bir hasar davranışı sergilemektedir. %1,25 katkı oranının kompozit numunenin sünekliğini koruyarak yüksek enerji altında direnç gösterdiğini, enerji sönümleme kapasitesini arttırdığı ve darbe dayanımını arttırdığı görülmektedir.



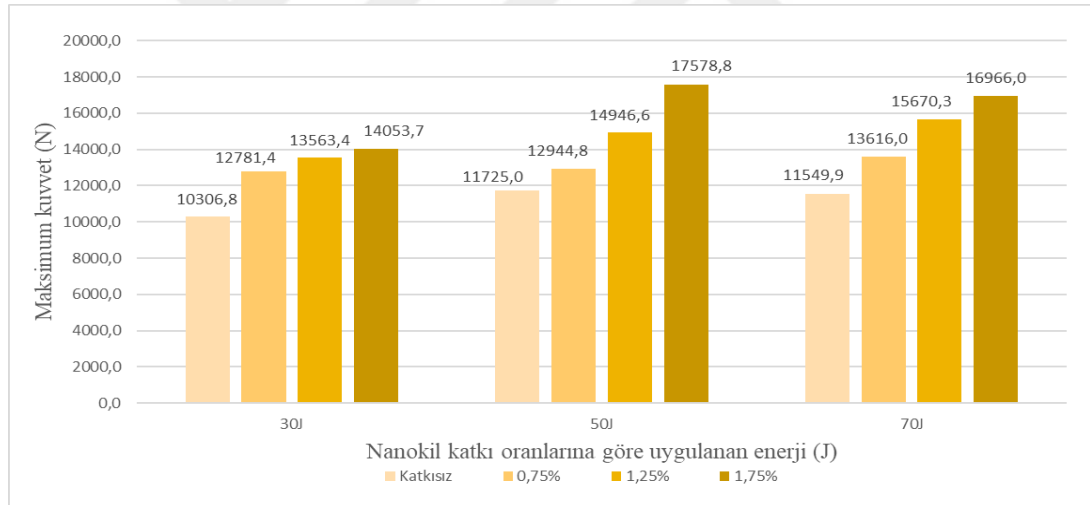
Şekil 7.25 %1,25 Nanokil katkılı hibrit numunelerin 3 enerji seviyesinde kuvvet-çökme karşılaştırması

Şekil 7.26'da %1,75 nanokil katkılı kompozit numunelerin 30 J, 50 J ve 70 J darbe enerjileri altındaki kuvvet-çökme davranışları görülmektedir. 30 J (14053,7 N) ve 50 J (17578,8 N) yüksek tepe kuvvetlerine ulaşmıştır. Kapalı eğriden anlaşılabacağı üzere darbe ucunun numuneyi delmeden geri sekerek enerjinin önemli bir kısmının malzeme tarafından absorbe edildiğini ve katkı oranının rijitliği ciddi ölçüde artırdığını göstermektedir. 70 J darbesine ait eğri de yine kapalı formda olup, çökme mesafesi genişlemiştir.



Şekil 7.26 %1,75 Nanokil katkılı hibrit numunelerin 3 enerji seviyesinde kuvvet- çökme karşılaştırması

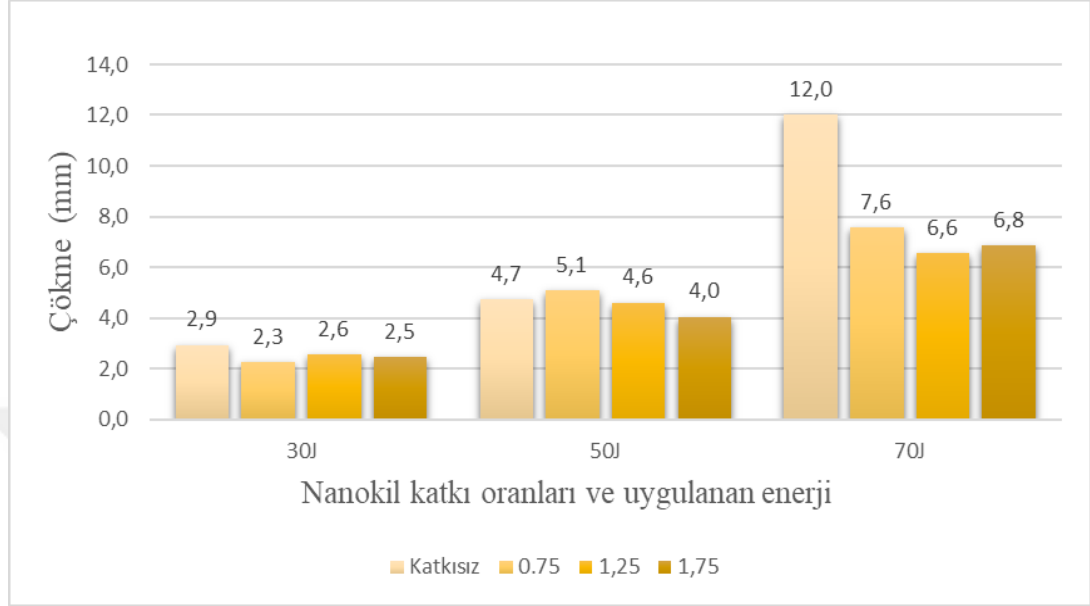
Şekil 7.27’de verilen “Nanokil Katkı Oranı – Uygulanan Enerji – Kuvvet” sütun grafiğinde, farklı darbe enerjileri altında nanokil katkı oranlarının kompozitlerin maksimum kuvvet taşıma kapasitesine etkisini açıkça göstermektedir. Tüm enerji seviyelerinde katkısız numunelere kıyasla nanokil katkısı yapılan numunelerin daha yüksek maksimum kuvvet değerlerine ulaştığı görülmektedir. Özellikle ağırlıkça %1,75 oranında, 30 J, 50 J ve 70 J darbe enerjilerinde sırasıyla 14053,7 N, 1578,8 N ve 16.966 N ile yüksek dayanımı sergilemiştir. Bu durum, katkı oranı arttıkça malzemenin rijitliğinin ve darbe dayanımının da belirgin biçimde iyileştiğini göstermektedir. Ancak artışın en belirgin olduğu seviye 50 J’de olup, bu enerji düzeyinde %1,75 katkı malzemenin darbe performansını zirveye taşımıştır. Bu tablo genel olarak, nanokil katkısının kompozitlerin darbe dayanımını artırmada etkili bir takviye mekanizması olduğunu ve optimum katkı oranının %1,25 ile %1,75 arasında olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 7.27 Nanokil Katkı Oranı – Uygulanan Enerji – Kuvvet sütun grafiği

Şekil 7.28’te “Nanokil Katkı Oranı – Uygulanan Enerji –Çökme Miktarı” sütun grafiğinde kompozit numunelerin darbe sonrası deformasyon seviyelerini göstermektedir. Tüm enerji düzeylerinde nanokil katkısının yer değiştirme miktarını genellikle azalttığı şekilde görülmektedir. Katkısız numunelerde özellikle 70 J gibi yüksek darbe darbe enerjisinde 12,0 mm ile en yüksek çökme değerine ulaşırken, katkı oranı arttıkça bu değer önemli ölçüde azalmıştır. Benzer şekilde 30 J ve 50 J’de de katkıyla beraber deformasyon azalmıştır. Bu durum, nanokil katkısının kompozit yapıya sertlik ve direnç kazandırarak darbe sonrası oluşan plastisitenin önüne geçtiğini

ve yapının bütünlüğünü daha iyi koruduğunu göstermektedir. Özellikle yüksek enerjili darbelere karşı %1,25 ve %1,75 katkı oranlarının malzemenin çökme direncini artırmada etkili olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 7.28 Nanokil Katkı Oranı – Uygulanan Enerji –Çökme Miktarı stün grafiği

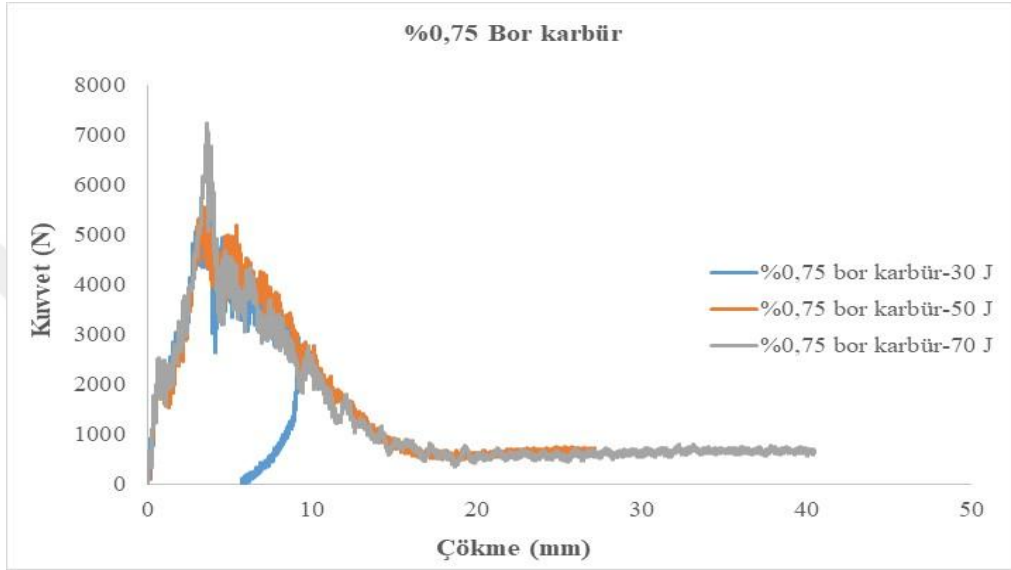
30 J darbe enerjisinde katkısız numunenin çökmesi 2,9 mm iken, %0,75, %1,25 ve %1,75 katkı oranında sırasıyla %20,7, %10,3 ve %13,8 azalış göstermiştir.

50 J darbe enerjisinde katkısız numunede çökme değeri 4,7 mm ölçülürken, % 0,75 katkı oranında % 8,5 değerinde artış, %1,25 ve %1,75 katkı oranında sırayla % 2,1 % 14,9 azalış elde edilmiştir.

70 J darbe enerjisinde ise katkısız numunenin 12,0 mm'lik çökme değerine karşılık %0,75, %1,25 ve %1,75 katkı oranlarında sırasıyla %36,7, %45,0 ve %43,3 çökme oranında azalma görülmüştür.

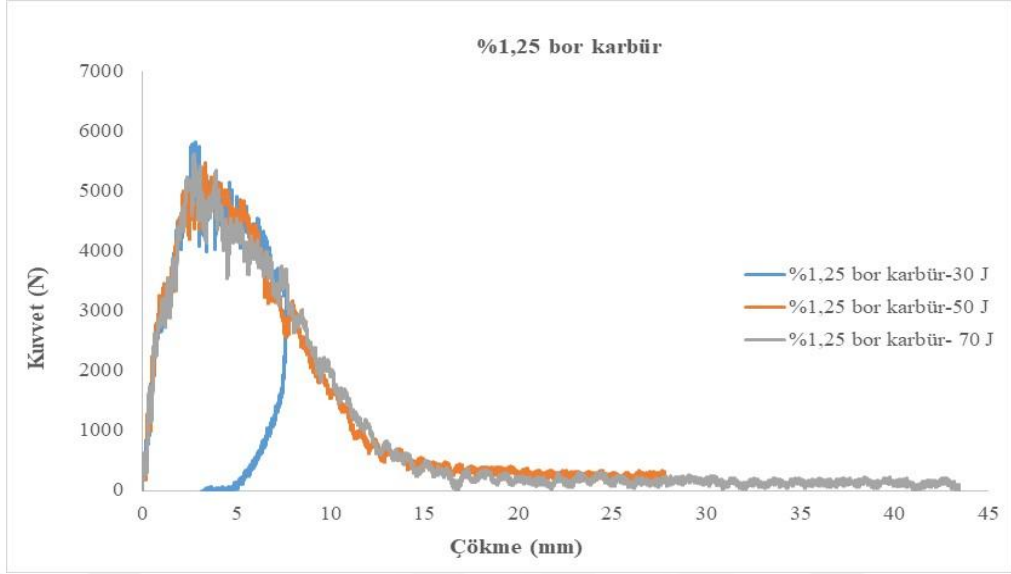
Şekil 7.29'da %0,75 oranında bor karbür katkısı içeren kompozit numunelerin 30 J, 50 J ve 70 J darbe enerjileri altındaki kuvvet-çökme davranışları görülmektedir. 30 J enerjisinde katkısız numunede elde edilen 10306,8 N olan maksimum kuvvetin %0,75 bor katkısı ile 5.561,9 N ' a düştüğü görülmektedir. 50 J' de katkısız numunede elde edilen 11725 N dan 5655,3 N ' a ve 70 J darbe enerjilerinde katkısız numunede elde edilen 11549,9 N dan 7236,9 N değerine düştüğü görülmektedir. 30 J darbe enerjisinde

kapalı eğri de görüldüğü üzere kısmen sönümlleme sağlansada 50 J ve 70 J darbelerinde eğriler açık formda olup, darbe ucunun numuneyi delerek geçtiğini ve enerjinin büyük kısmının yapının kırılmasıyla sönümlendiğini göstermektedir. Maksimum kuvvet değerleri sırayla 5655,3 N, 7236,9 N sınırlı kalmış, bu da katkının kuvvet taşıma kapasitesine katkısının zayıf olduğunu göstermektedir.



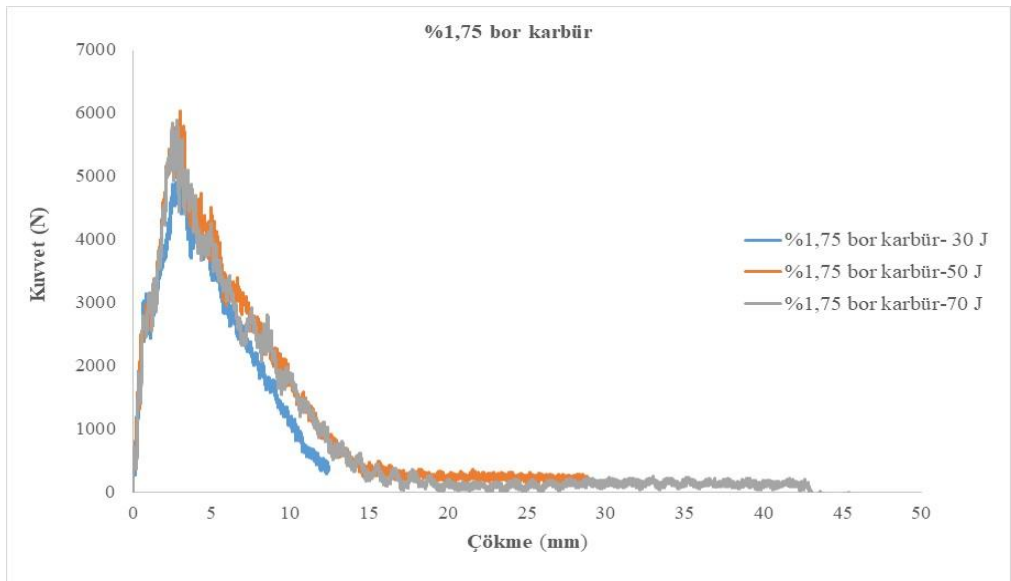
Şekil 7.29 %0,75 Bor karbür katkıli hibrit numunelerin 3 enerji seviyesinde kuvvet-çökme karşılaştırılması

Şekil 7.30'da %1,25 bor karbür katkıli kompozit numunelerin 30 J, 50 J ve 70 J darbe enerjileri altındaki kuvvet-çökme davranışları gösterilmektedir. Tüm darbe seviyelerinde eğrilerin açık formda olması, darbe ucunun numuneyi deldiğini ve enerjinin büyük ölçüde yapının kırılması yoluyla sönümlendiğini göstermektedir. Katkisız numunelerde 30 J (10306,8 N), 50 J (11725 N) ve 70 J (11549,9N) maksimum kuvvet değerleri sırayla 5830,4 N, 5480,2 N, 5626,1 N seviyelerinde sınırlı kalmaktadır. Sonuç olarak, %1,25 bor karbür katkısı numunenin delinmesini engelleyecek düzeyde koruma sağlayamamıştır.



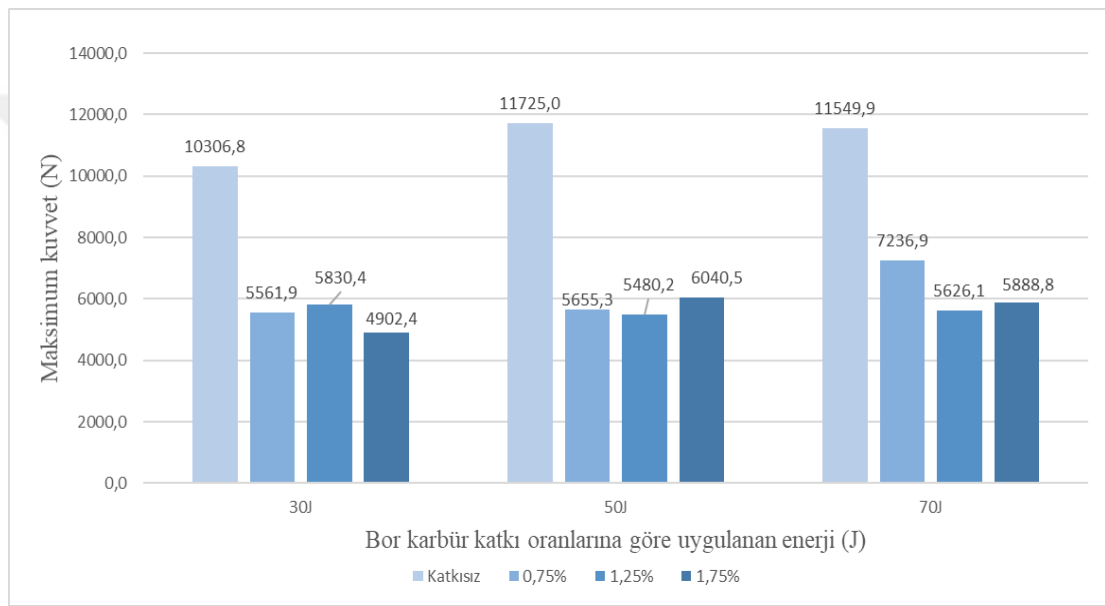
Şekil 7.30 %1,25 Bor karbür katkılı hibrit numunelerin 3 enerji seviyesinde kuvvet-çökme karşılaştırılması

Şekil 7.31'de %1,75 oranında bor karbür katkısı içeren kompozit numunelerin 30 J (4902,4 N), 50 J (6040,5 N) ve 70 J (5888,8 N) darbe enerjileri altındaki kuvvet-çökme davranışları yer almaktadır. Üç darbe seviyesinde de eğrilerin açık formda olması, darbe ucunun numuneyi deldiğini ve enerjinin büyük ölçüde kırılma yoluyla sönmüldüğünü göstermektedir. Maksimum kuvvet değerleri sırayla 4902,4 N, 6040,5 N ve 5888,8 N' a düşmüş olup katkının kuvvet taşıma kapasitesini düşürdüğü anlaşılmaktadır.



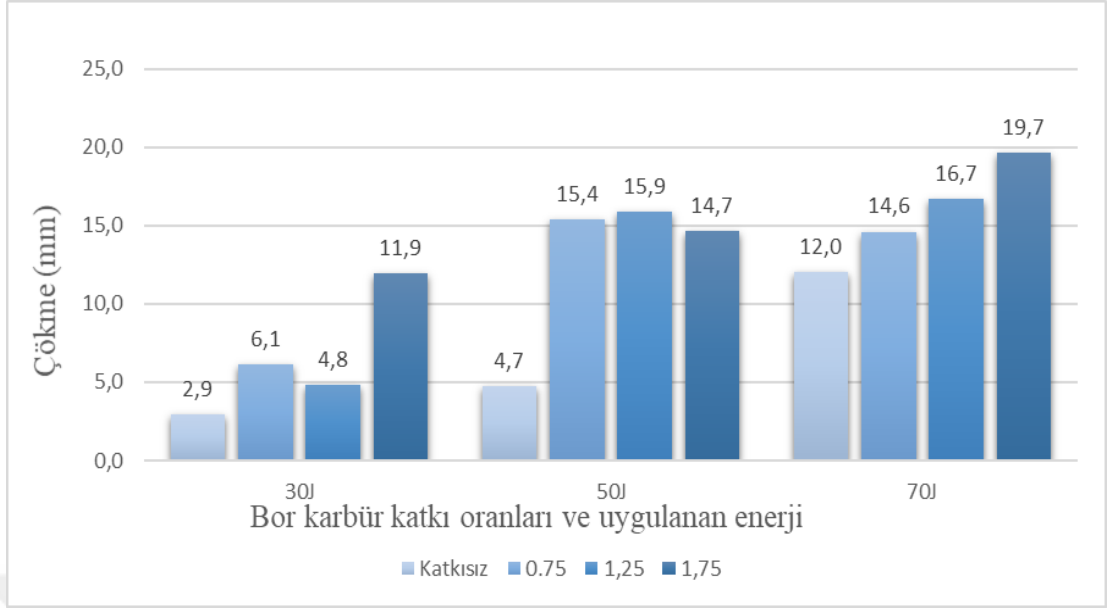
Şekil 7.31 %1,75 Bor karbür katkılı hibrit numunelerin 3 enerji seviyesinde kuvvet-çökme karşılaştırılması

Şekil 7.32'de “Bor karbür Katkı Oranı-Uygulanan enerji-Kuvvet” stün grafiğinde, farklı bor karbür katkı oranlarının kompozit malzemelerin maksimum darbe dayanımına etkisini göstermektedir. Tüm enerji seviyelerinde katkısız numuneler en yüksek maksimum kuvvet değerlerine ulaşırken, katkı oranı arttıkça maksimum kuvvet değerlerinde belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Bu tablo, bor karbür katkısının darbe dayanımını düşürdüğü yapının kırılma kapasitesine neden olduğunu göstermektedir. Özellikle yüksek oranlarda katkı, darbe anında ani hasar oluşumuna ve kuvvet taşıma kapasitesinin düşmesine yol açmaktadır.



Tablo 7.32 Bor karbür Katkı Oranı-Uygulanan enerji-Kuvvet Stün Grafiği

Şekil 7.33'de “Bor karbür Katkı Oranı-Uygulanan Enerji-Çökme Miktarı” sütun grafiğinde, kompozit malzemelerin darbe sonrası deformasyon miktarlarının katkı oranına bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir. Katkısız numuneler, her enerji seviyesinde en düşük yer değiştirme değerlerine sahipken; katkı oranı arttıkça yer değiştirme miktarlarında belirgin bir artış gözlenmiştir. Özellikle %1,75 katkı oranında, 70 J darbe enerjisi altında çökme 19,7 mm'ye kadar ulaşmıştır ki bu, malzemenin enerjiyi büyük ölçüde deformasyon yoluyla sönümlediğini gösterir. 30 J (11,9mm) ve 50 J'de (14,7 mm) de benzer şekilde çökme artmış, bu da bor karbür katkısının malzemeyi daha sünek hale getirdiğini ancak deformasyon kapasitesini artırdığını göstermektedir.



Şekil 7.33 Bor karbür Katkı Oranı-Uygulanan Enerji-Çökme Miktarı sütun grafiği

30 J darbe enerjisinde katkısız numunenin çökme değeri 2,9 mm iken, %0,75, %1,25 ve %1,75 oranında bor karbür katkılı numunelerde bu değerler, sırasıyla % 110,3, % 65,5 ve % 310,3 oranlarında artış göstermiştir.

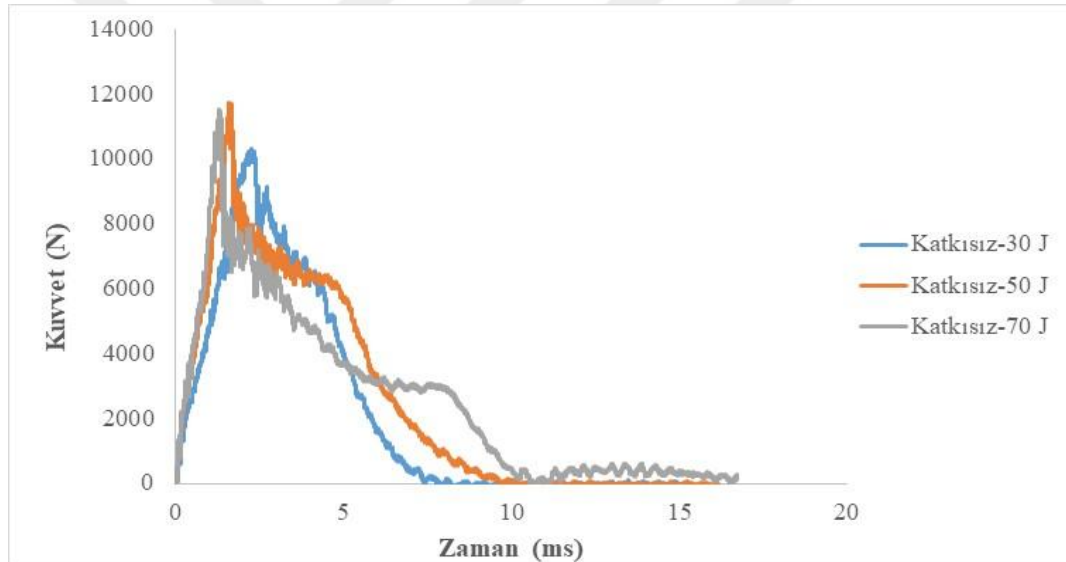
50 J darbe enerjisinde katkısız numunenin çökme değeri 4,7 mm iken, % 0,75, %1,25 ve %1,75 katkı oranlarında sırayla % 228,0, % 238,3 ve % 212,8 oranlarında artış göstermiştir.

70 J darbe enerjisinde katkısız numunenin çökme değeri 12,0 mm iken, % 0,75, %1,25 ve %1,75 katkı oranlarında bu değerler sırasıyla % 21,7, % 39,2 ve % 64,2 oranlarında artış göstermiştir.

7.4 Kuvvet-Zaman Grafikleri

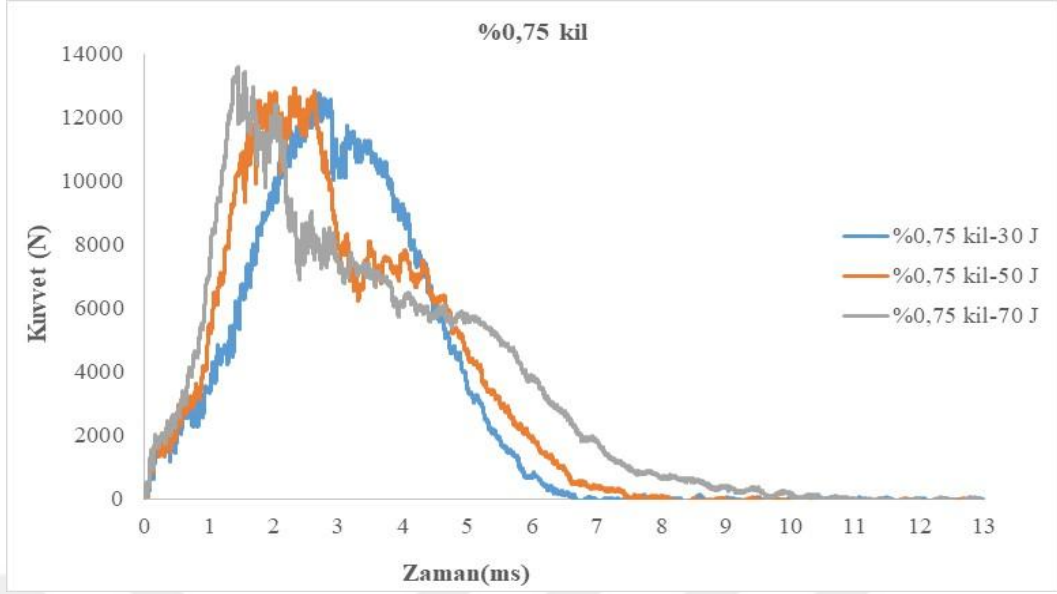
Düşük hızlı darbe deneylerinde elde edilen kuvvet–zaman eğrileri, darbe boyunca numune ile çarpıcı arasındaki etkileşimin zamana bağlı değişiminin grafiklerini vermektedir. Bu grafikler aşağıda katkısız, nanokil ve bor karbür katkılı numunelere göre ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Şekil 7.34'de görüldüğü üzere, 30 J darbe enerjisinde numunenin parabolik bir düşüş gösterdiği vurucu ucun geri sekme davranışı gösterdiği anlaşılmaktadır. 50 J ve 70 J darbe enerjisinde ise kuvvet düşüşünün kademeli azaldığı görülmektedir. Bu durum, yüksek enerjiyle birlikte malzemenin daha sünek bir davranış gösterdiğini, daha fazla deformasyona maruz kaldığını ve enerji emme sürecinin uzadığını işaret etmektedir. Ayrıca bu durum vurucu ucun numuneye saplandığını tarif etmektedir.



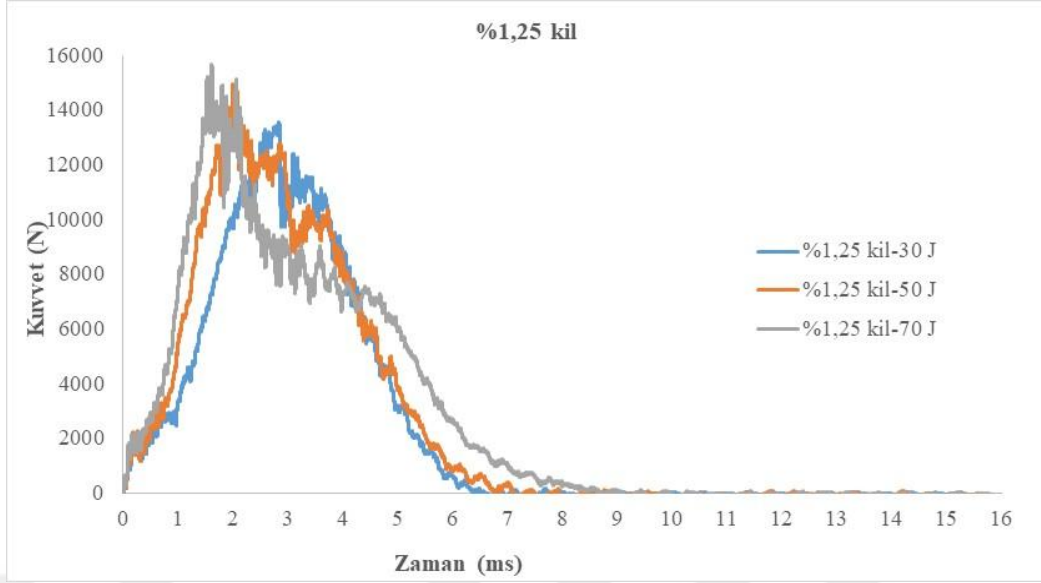
Şekil 7.34 Katkısız hibrit kompozit numune kuvvet-zaman grafiği

Şekil 7.35'de %0,75 nanokil katkılı numunelere ait kuvvet–zaman grafiği incelendiğinde, katkısız numunelere göre daha yüksek kuvvet değerlerine ve kısa sürede enerji sönmemesine ulaşıldığı görülmektedir. 30 J darbelerinde hızla artan kuvvet, ardından 4–6 ms arasında düşüşle geri sektiği görülmektedir. 50 J ve 70 J darbe enerjilerinde ara kademelerde pozitif yönde sabite yakın davranış görülmektedir. Numune hasarına bakıldığında bu bölgede saplama olduğu görülmektedir.



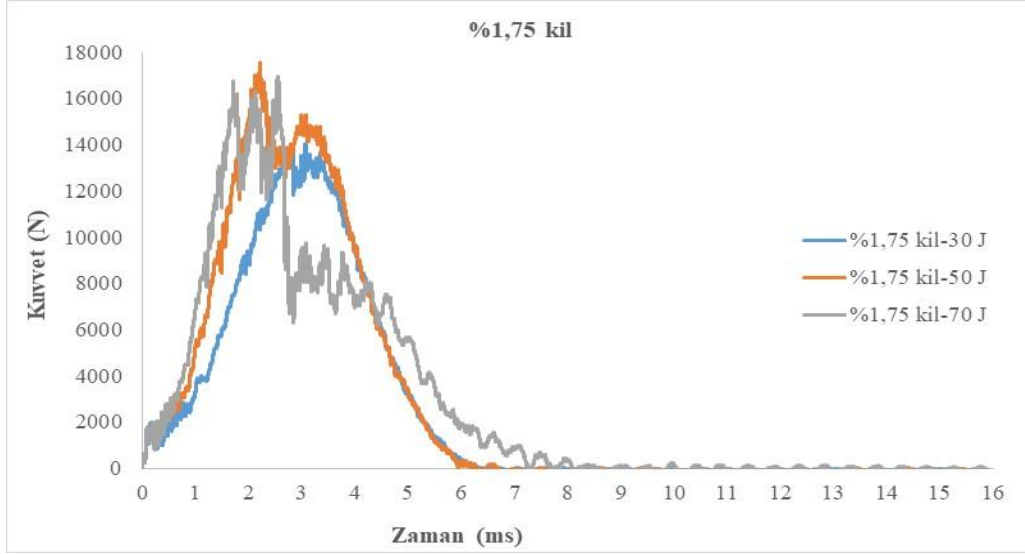
Şekil 7.35 % 0,75 Nanokil katkılı hibrit kompozit numune kuvvet-zaman grafiği

Şekil 7.36'da %1,25 nanokil katkılı numunelere ait kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde, tüm darbe enerjilerinde malzemenin yüksek kuvvet taşıma kapasitesine ve dengeli enerji sönmüleme yeteneğine sahip olduğu görülmektedir. 30 J darbe enerjisinde parabolik düşüşle numunenin geri sektği 50 J ve 70 J darbe enerjisi altında malzemenin zaman ekseninde daha uzun sürede sönmülendiği ve saplama davranışı gösterdiği görülmektedir. Bu, enerjinin hem yüksek seviyede karşılandığını hem de malzemenin sünek davranış sergilediğini ortaya koymaktadır. Genel olarak %1,25 nanokil katkı oranı, hem dayanımı hem de darbe enerjisini absorbe etme kapasitesi açısından optimum katkı oranı olarak öne çıkmakta, malzemenin hem rijitliğini hem de sünekliğini dengeli biçimde artırmaktadır.



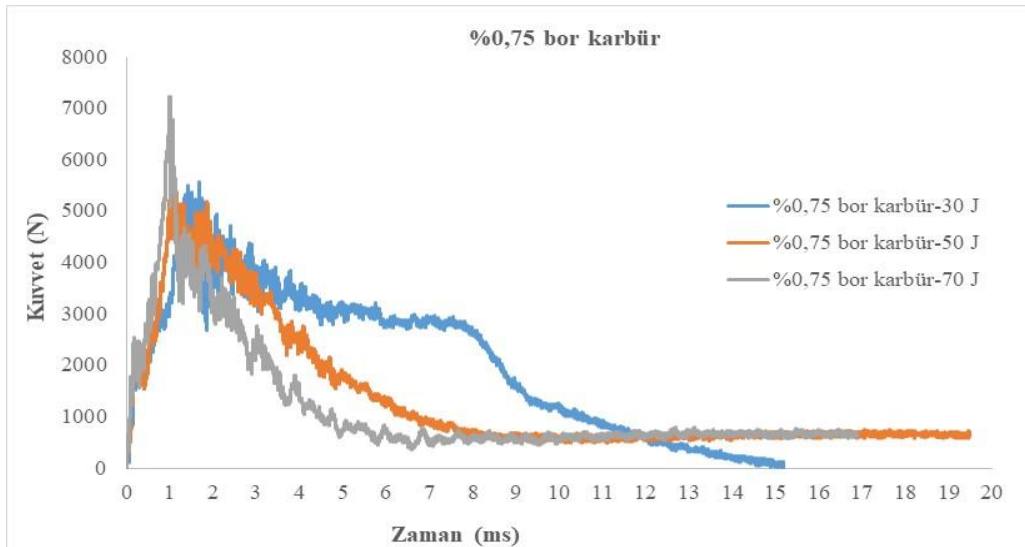
Şekil 7.36 %1,25 Nanokil katkılı hibrit kompozit numune kuvvet-zaman grafiği

Şekil 7.37'de %1,75 nanokil katkılı numunelere ait kuvvet–zaman grafiği, katkı oranının artmasıyla birlikte malzemenin darbe anındaki sertliğinin belirgin şekilde yükseldiğini, ancak bu durumun süneklik üzerinde sınırlayıcı bir etki yarattığını göstermektedir. 30 J ve 50 J darbe enerjilerinde kuvvet yüksek seviyelere ulaşmış, vurucu uç geri sekmiştir. 70 J darbe enerjisinde pozitif yönde grafik ara kuvvet değerlerinde sabite yakın bir değer göstermiştir. Vurucu uç numuneye saplanmıştır. Bu durum, yüksek enerji altında malzemenin çatlama ve kırılma davranışının daha baskın hale geldiğini düşündürmektedir. Genel olarak %1,75 katkı oranı, malzemeye çok yüksek kuvvet taşıma kapasitesi kazandırsa da enerji yayılımı daha kısa sürede ve ani gerçekleştiğinden dolayı darbe sonrası hasar davranışı daha gevrek bir yapıya kayma eğilimi göstermiştir.



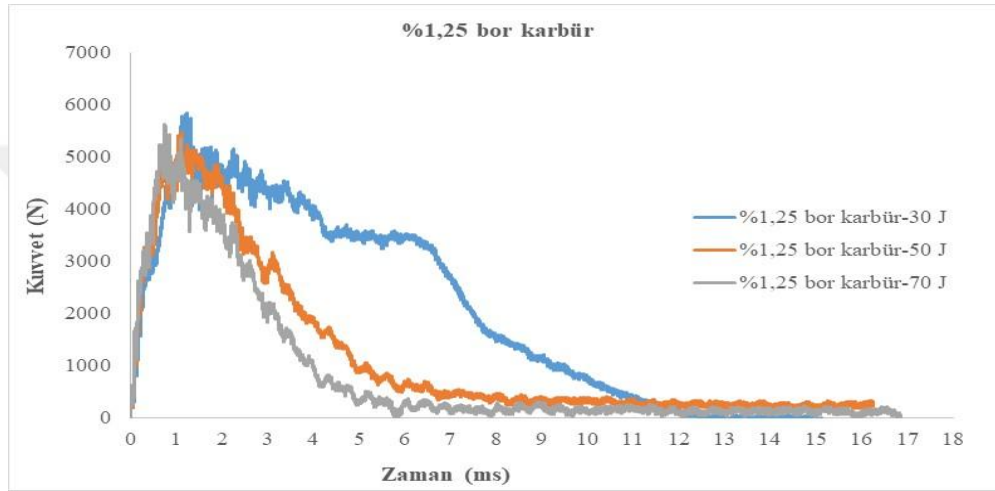
Şekil 7.37 %1,75 Nanokil katkıli hibrit kompozit numune kuvvet-zaman grafiği

Şekil 7.38'de %0,75 bor karbür katkıli numunelere ait kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde, 30 J darbe enerjisinde darbe ucunun numuneye saplandığını, 50 J ve 70 J darbe enerjisinde ise darbe dayanımının düşerek vurucu ucun numuneyi deldiği numune görsellerinden anlaşılmaktadır. Aynı zamanda vurucu uç ile numune arasında sürtünme meydana geldiğinden eğri yatay eksen doğrultusunda devam etmektedir. Bu grafikler, %0,75 bor karbür katkısının malzemeye darbe enerjisini zamana yayarak sönümleme yeteneği kazandırdığını, ancak kuvvet dayanımını düşürdüğünü göstermektedir. Ayrıca 70 J darbesinde yapının daha erken ve belirgin şekilde kuvvetin dayanımının zayıfladığı gözlemlenmiştir.



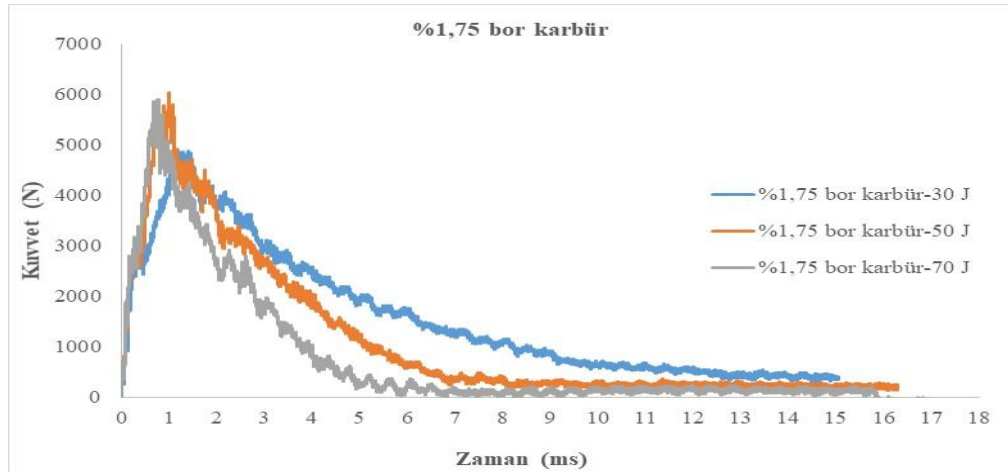
Şekil 7.38 %0,75 Bor karbür katkıli hibrit kompozit numune kuvvet-zaman grafiği

Şekil 7.39'da %1,25 bor karbür katkılı numunelere ait kuvvet–zaman grafiği incelendiğinde, 30 J darbe enerjisinde 5830,4 N bir kuvvet elde edilmiş ve bu kuvvet yatay ekseninde pozitif yönde genişlemiştir. Karbon fiber ile karşılaşmada numunenin saplama davranışı gösterdiği ve kuvvetin bir süre sonra düştüğü görülmektedir. 50 J ve 70 J darbe enerjilerinde yatay ekseninde numune ile vurucu uç arasında sürtünme meydana geldiğinden grafik yatay doğrultuda uzamış olduğu görülmektedir.



Şekil 7.39 %1,25 Bor karbür katkılı hibrit kompozit numune kuvvet-zaman grafiği

Şekil 7.40'ta %1,75 bor karbür katkılı numunelere ait kuvvet–zaman grafiği, katkı oranının artmasıyla birlikte her üç enerji seviyesinde de numune delinme (perforasyon) meydana geldiği görülmektedir. Enerji seviyesi yükseldikçe daha kısa sürede numunenin hasar gördüğü görülmektedir.



Şekil 7.40 %1,75 Bor karbür katkılı hibrit kompozit numune kuvvet-zaman grafiği

7.5 Enerji -Zaman Grafikleri

Düşük hızlı darbe deneylerinde enerji, kuvvet ve çökme (yer değiştirme) ilişkisiyle elde edilmektedir. Aşağıdaki temel bağıntı kullanılmaktadır [56].

$$E(t) = \int_0^{\delta(t)} F(\delta) d\delta \quad (7.1)$$

Bu formülde:

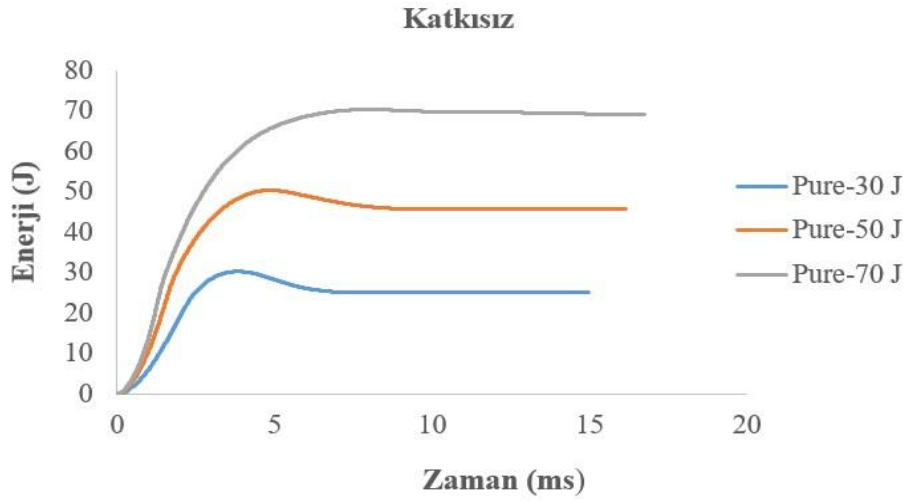
$E(t)$: Zamanla değişen absorbe edilen enerji (Joule),

$F(\delta)$: Yer değiştirmeye (çökmeye) bağlı kuvvet (Newton),

$\delta(t)$: Zamanla değişen yer değiştirme (mm veya m).

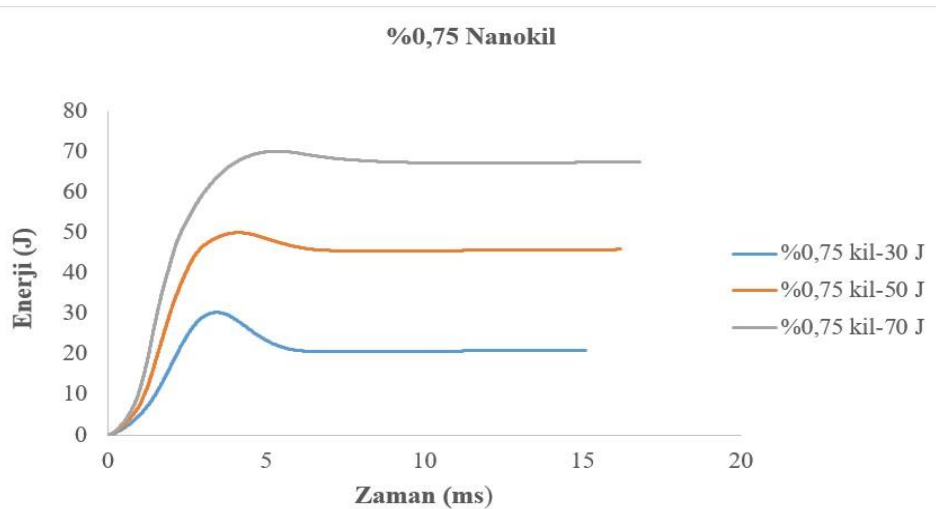
Kuvvet çökme eğrisi altında kalan alanın büyüklüğü ile enerji zaman grafikleri hesaplanmaktadır. Bu grafikler aşağıda katkısız, nanokil ve bor karbür katkılı numunelere göre ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Şekil 7.41'de katkısız kompozit numunelere ait enerji–zaman grafiği, uygulanan darbe enerjisinin malzeme tarafından nasıl absorbe edildiğini ve zaman içinde nasıl sönümlendiğini göstermektedir. 30 J, 50 J ve 70 J'lik darbelerde enerjinin hızlı bir şekilde arttığı ve kısa sürede doygunluğa ulaştığı görülmektedir. 30 J ve 50 J' de enerji ygeri sekme davranışı göstermiştir. 70 J vurucu ucun numuneye saplandığını grafiğin sabit bir enerji seviyesi gösterdiğinden anlaşılmaktadır. Genel olarak katkısız numuneler, enerji sönümlemesini hızlı ve ani şekilde gerçekleştirirken; bu davranış malzemenin daha kırılğan ve sınırlı deformasyon kapasitesine sahip olduğunu işaret etmektedir.



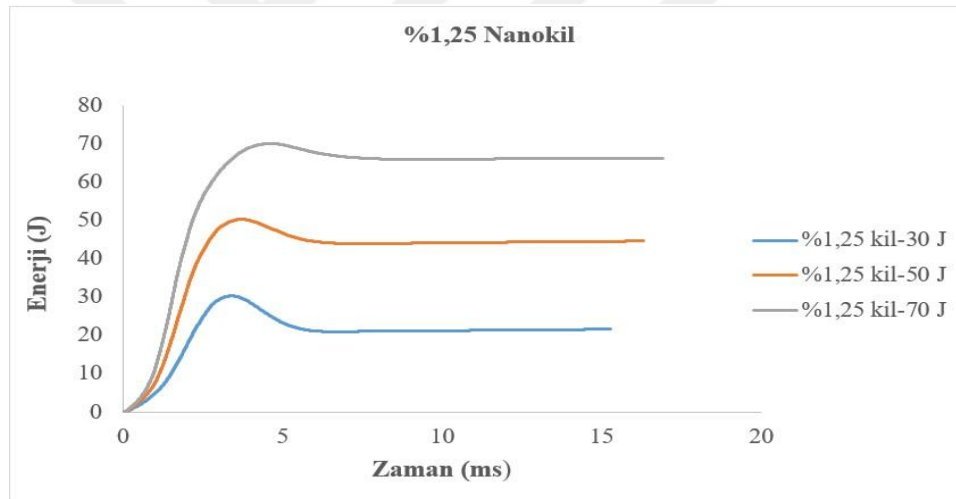
Şekil 7.41 Katkısız hibrit numunelerde enerji-zaman grafiği

Şekil 7.42'de %0,75 nanokil katkılı numunelere ait enerji-zaman grafiği, katkısız yapıya kıyasla darbe enerjisinin daha kontrollü ve verimli bir şekilde absorbe edildiğini göstermektedir. Her üç darbe enerjisi seviyesinde de (30 J, 50 J, 70 J) enerji artışı hızlı başlamış ve 4-5 ms içinde doygunluğa ulaşmıştır. Bu değerler, katkısız numunelere kıyasla daha yüksek enerji absorpsiyonu anlamına gelmektedir. Ayrıca eğrilerin daha yumuşak geçişlerle doygunluğa ulaşması, malzemenin darbe yükünü daha dengeli yaydığını ve ani kırılma yerine kademeli enerji sönmleme sağladığını göstermektedir. Bu grafik, %0,75 nanokil katkısının enerji emme kapasitesini iyileştirerek darbe dayanımını artırdığını, aynı zamanda yapıya daha sünek bir davranış kazandırdığını ortaya koymaktadır.



Şekil 7.42 %0,75 Nanokil katkılı hibrit kompozit numunelerdeki enerji zaman grafiği

Şekil 7.43'te %1,25 nanokil katkılı numunelere ait enerji–zaman grafiği, bu katkı oranının darbe enerjisini hem hızlı hem de etkili bir şekilde absorbe ettiğini göstermektedir. 30 J, 50 J ve 70 J darbe enerjilerinde enerji eğrileri yaklaşık 4 ms içinde hızlı bir şekilde yükselerek sırasıyla 31 J, 50 J ve 70 J civarında doygunluğa ulaşmıştır. Bu durum, malzemenin maksimum enerji emme kapasitesine oldukça yakın değerler elde ettiğini ve enerjiyi büyük oranda sönümleyebildiğini ortaya koymaktadır. Eğrilerin daha dengeli ve yumuşak geçişlerle doygunluğa ulaşması, enerjinin malzeme içerisinde homojen dağıldığını ve ani kırılma yerine kontrollü deformasyon geliştiğini göstermektedir. Bu grafikler, %1,25 nanokil katkısının enerji absorpsiyon performansında etkili olduğunu ve bu oranın darbe dayanımı açısından en uygun katkı seviyelerinden biri olabileceğini desteklemektedir.



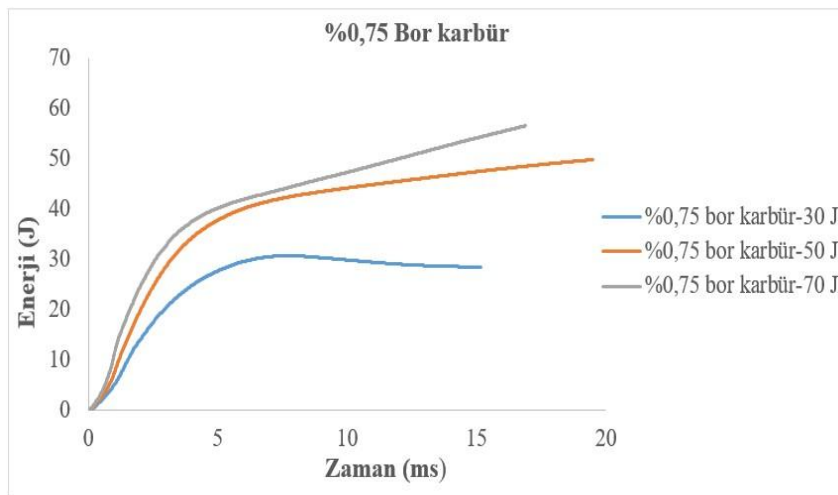
Şekil 7.43 %1,25 Nanokil katkılı hibrit kompozit numunelerde enerji-zaman grafiği

Şekil 7.44'te %1,75 nanokil katkılı numunelere ait enerji–zaman grafiği, bu katkı oranının yüksek darbe enerjilerine karşı etkili bir enerji absorpsiyon kapasitesi sunduğunu, ancak belirli bir katkı sınırının ötesinde performansın sabitlendiğini göstermektedir. Enerjinin büyük oranda malzeme tarafından absorbe edildiğini görülmektedir. Eğrilerin yatayda hızlı doygunluğa ulaşması, enerjinin ani değil daha dengeli bir yayılım ile sönümlendiğini göstermektedir. Ancak, %1,25 katkı oranına kıyasla enerji emilimindeki artışın sınırlı kaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, katkı oranı arttıkça malzemenin rijitliğinin yükseldiğini, ancak enerji absorpsiyon performansının belirli bir seviyeden sonra doygunluğa ulaştığını göstermektedir.



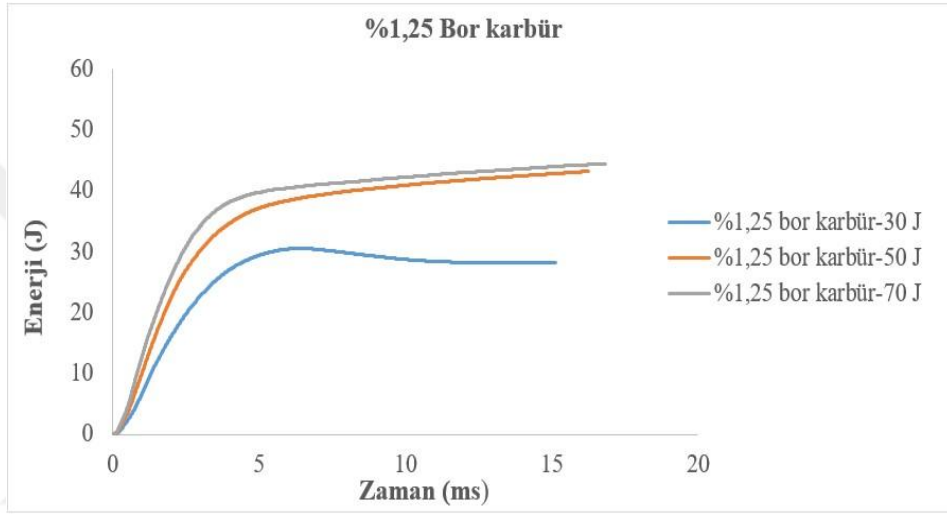
Şekil 7.44 %1,75 nanokil katkılı hibrit kompozit numunelerde enerji-zaman grafiği

Şekil 7.45'te %0,75 bor karbür katkılı numunelere ait enerji-zaman grafiği, bu katkı oranının darbe enerjisinin absorpsiyonu konusunda sınırlı bir performans sergilediğini göstermektedir. 30 J, 50 J ve 70 J darbe enerjilerinde enerji eğrileri yükselmekte ancak diğer katkı türlerine kıyasla daha yavaş ve düşük seviyelerde doygunluğa ulaşmaktadır. Özellikle 30 J darbesinde enerji yaklaşık 30 J seviyesinde sabitlenmiş ve erken bir plato oluşturarak sönümlleme kapasitesinin tamamlandığını numunenin saplanma davranışı göstermiştir 50 J ve 70 J numune grafiklerinin doğrultuları yukarı doğru bir yönelim göstererek numune delinmiştir.



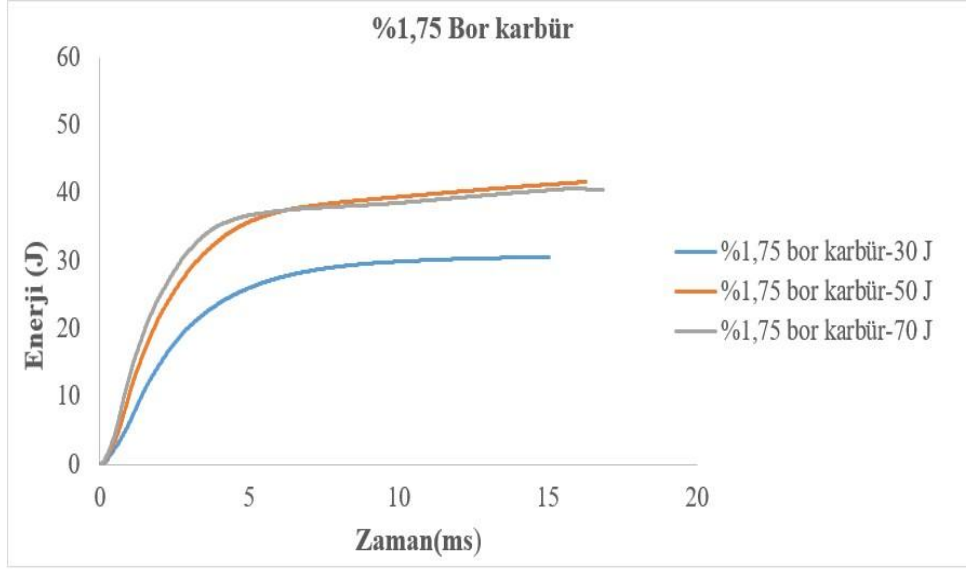
Şekil 7.45 %0,75 Bor karbür katkılı hibrit kompozit numunelerde enerji-zaman grafiği

Şekil 7.46'da %1,25 bor karbür katkılı numunelere ait enerji–zaman grafiği, bu katkı oranının enerji absorpsiyon kabiliyeti açısından %0,75 oranına göre daha dengeli ve etkili bir performans sunduğunu göstermektedir. 30 J darbe enerjisinde enerji, 30 J seviyesinde doygunluğa ulaşmış, eğri bu noktada sabitlenerek malzemenin enerjiyi kararlı bir şekilde sönümlendiğini ortaya koymuştur. 50 J ve 70 darbe enerjilerinde ise eğriler daha dik bir artış göstererek kısa sürede doygunluğa ulaşmış ve enerjinin daha etkin biçimde absorbe edildiğini ortaya koymuştur.



Şekil 7.46 %1,25 Bor karbür katkılı hibrit kompozit numunelerde enerji-zaman grafiği

Şekil 7.47'de %1,75 bor karbür katkılı numunelere ait enerji–zaman grafiği, bu katkı oranının enerji emilim değerlerinde iyileşme sağlamadığını görülmektedir. Her üç seviyede de numunede grafik eğrileri yukarı doğru bir doğrultu izlemiştir. Bu durum numunelerin delindiğini tarif etmektedir. Genel olarak %1,75 bor karbür katkısı, enerji absorpsiyon süresini uzatmış, sertliğe odaklı bir malzeme oluşturmuştur.

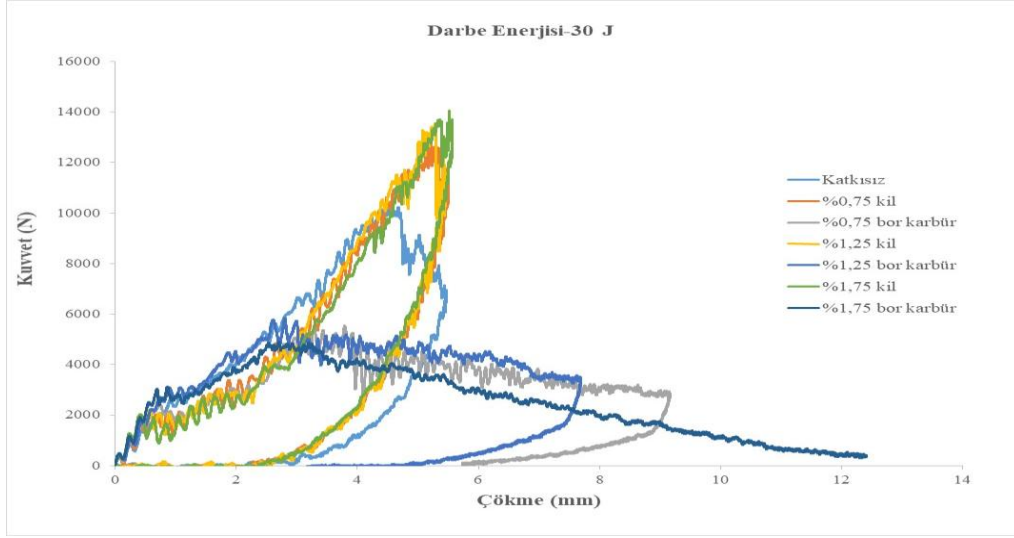


Şekil 7.47 %1,75 Bor karbür katkılı hibrit kompozit numunelerde enerji-zaman grafiği

7.6 Tüm Verilerin Karşılaştırılması

Yapılan çalışmada katkısız ve katkı oranlarına göre nanokil katkılı ve bor karbür katkılı numunelerin 30 J 50 J ve 70 J darbe enerjilerinde karşılaştırmaları kuvvet-çökme, kuvvet-zaman ve enerji-zaman olacak şekilde ayrı ayrı verilmiştir.

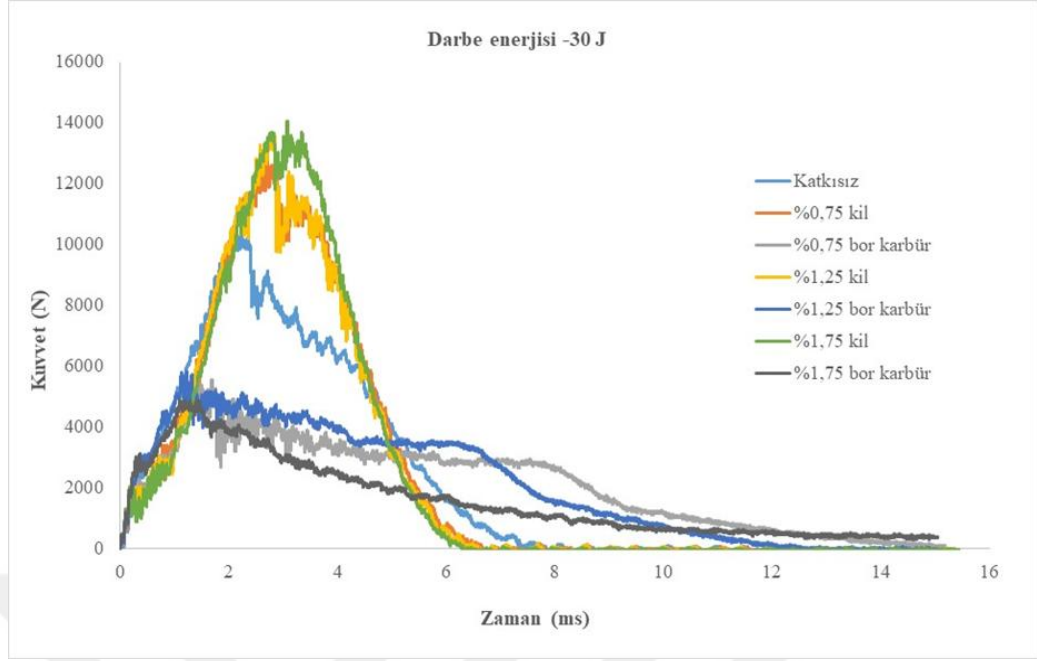
Şekil 7.48'de 30 J darbe enerjisi altında katkısız, nanokil ve bor karbür katkılı kompozit numunelerden elde edilen kuvvet-çökme grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Katkısız numunenin 10306,8 N tepe kuvvet ile karakterize olup, yapının darbe karşısında sünek davrandığını ancak düşük enerji absorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Nanokil katkılı numuneler özellikle %1,25 ve %1,75 oranları, sırayla 13563,4 N, 14053,7 N'lik tepe kuvvetlerine ulaşarak iyi performansı göstermektedir. Bu numunelerde çökme miktarları sınırlı kalmakta eğrilerin kapalı formda olması ise darbe ucunun geri sekerek enerjinin elastik deformasyonla sönmüldüğünü göstermektedir. Bu durum, nanokilin matris-fiber bağlarını güçlendirerek darbe dayanımını ve rijitliği artırdığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık bor karbür katkılı numuneler, genellikle daha düşük tepe kuvvetleri (sırayla 5561,9 N, 5830,4 N, 4902,4 N) ve yüksek çökme değerleri sergileyerek daha zayıf bir performans göstermektedir. Eğrilerin açık formda olması, numunelerin delindiğini ve enerjinin kırılma yoluyla sönmüldüğünü göstermektedir. Bu da bor karbürün katkı oranı arttıkça malzemeye gevrek bir davranış kazandırdığını ve sünekliği azalttığını göstermektedir.



Şekil 7.48 30 J Darbe enerjisinde tüm numunelerin kuvvet-çökme grafiklerinin karşılaştırılması

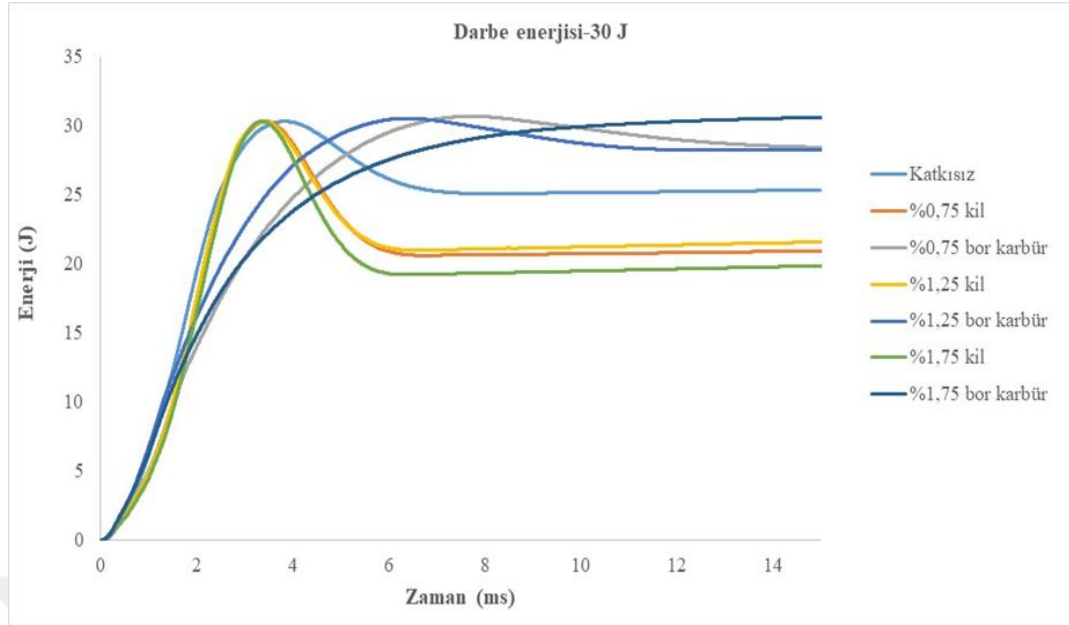
Sonuç olarak, bu grafikte nanokil katkılı kompozitlerin darbe dayanımı açısından katkısız ve bor karbür katkılı numunelere kıyasla daha üstün performans sergilediği açıkça görülmektedir. Özellikle %1,25 ve %1,75 nanokil oranları, hem yüksek kuvvet taşıma kapasitesi hem de kontrollü deformasyon ile öne çıkmaktadır.

Şekil 7.49'da 30 J darbe enerjisi altında katkısız, nanokil ve bor karbür katkılı kompozit numunelerden elde edilen kuvvet-zaman grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Görüldüğü üzere %1,25 ve % 1.75 nanokil katkılı numuneler yüksek tepe değerlerine ulaşmış bu da bu katkı oranının darbe dayanımı açısından başarılı sonuç verdiğini göstermektedir. Bor karbür katkılı numuneler ise tüm katkı oranlarında düşük tepe kuvvetlerine ulaşmış ve daha erken kuvvet kaybı göstermiştir. Bu da bor karbür katkısının darbe direncini artırmaktan çok enerjiyi daha uzun sürede sönmleme yönünde etkili olduğunu, ancak dayanımı sınırladığını ortaya koymaktadır.



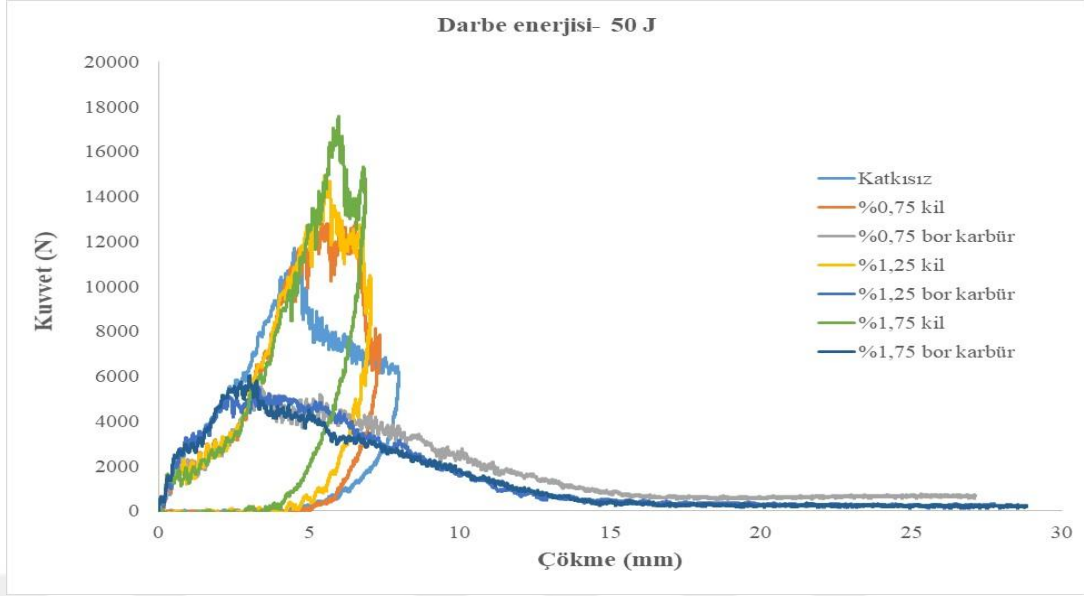
Şekil 7.49 30 J Darbe enerjisinde kuvvet-zaman grafiklerinin karşılaştırılması

Şekil 7.50'de 30 J darbe enerjisi altında katkısız, nanokil ve bor karbür katkılı kompozit numunelerin enerji-zaman davranışlarını karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Grafikte en yüksek enerji absorpsiyonu %1,25 nanokil katkılı numuneye aittir; bu numune yaklaşık 30 J enerjiye ulaşarak darbe enerjisinin tamamına yakını sönümleyebilmiştir. Bunu %1,75 nanokil ve katkısız numune takip etmektedir. Özellikle nanokil katkılı numuneler, hem hızlı enerji emilimi hem de yüksek enerji kapasitesiyle öne çıkmaktadır. Bor karbürün darbe enerjisini daha sınırlı ölçüde sönümlediğini, nanokil katkısının ise hem daha yüksek hem de daha verimli enerji absorpsiyonu sağladığı görülmektedir.



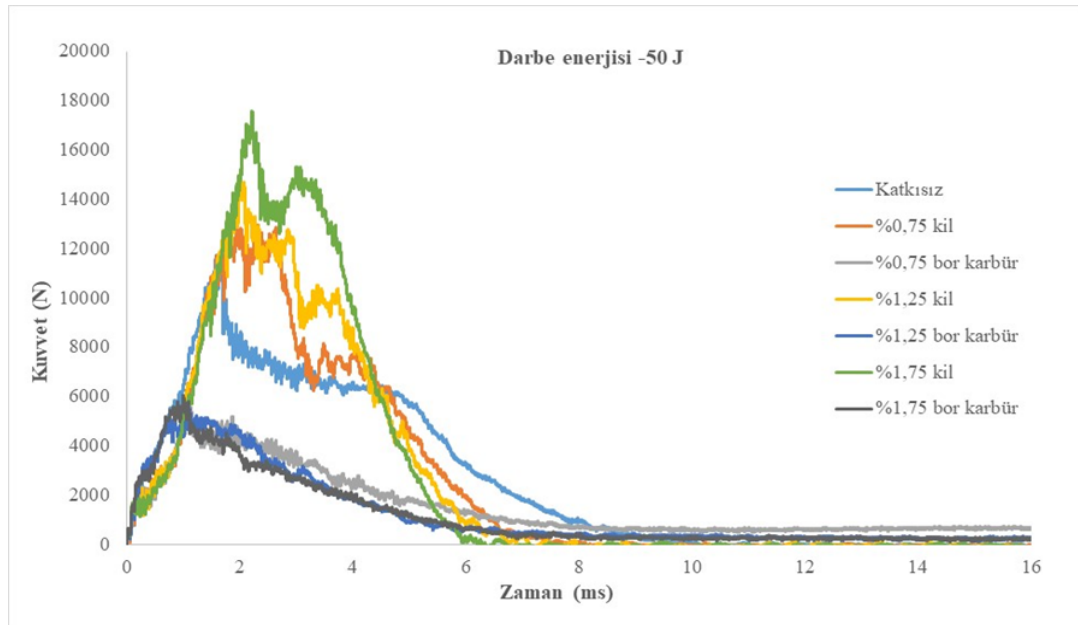
Şekil 7.50 30 J Darbe enerjisinde enerji-zaman grafiklerinin karşılaştırılması

Şekil 7.49'da 50 J darbe enerjisi altında katkısız, nanokil ve bor karbür katkılı kompozit numunelerin kuvvet-çökme davranışları karşılaştırılmaktadır. Katkısız numune 11725 N'lik tepe kuvvetine ulaştığı görülmektedir. Nanokil katkılı numuneler (%0,75, %1,25 ve %1,75), özellikle %1,75 katkısında 17578,8 N'a ulaşan tepe kuvvetleri ile dikkat çekmektedir. Bu numunelerin çökme değerleri sınırlı (sırayla 5,1 mm, 4,6 mm ve 4 mm) kalmakta ve eğriler kapalı formda olduğundan darbe ucunun yüzeyde kalıp geri sektiği anlaşılmaktadır. Bu durum, nanokilin yapının rijitliğini ve darbe direncini artırdığını; enerjinin etkin biçimde absorbe edilerek hasarın sınırlandığını göstermektedir. Bor karbür katkılı numuneler ise daha düşük tepe kuvvetleri (sırayla 5655,3 N, 5480,2 N ve 6040,5 N) sergilemekte ve açık eğrileriyle dikkat çekmektedir. Genel olarak 50 J enerji altında en yüksek darbe dayanımı %1,75 nanokil katkılı kompozitte görülmektedir.



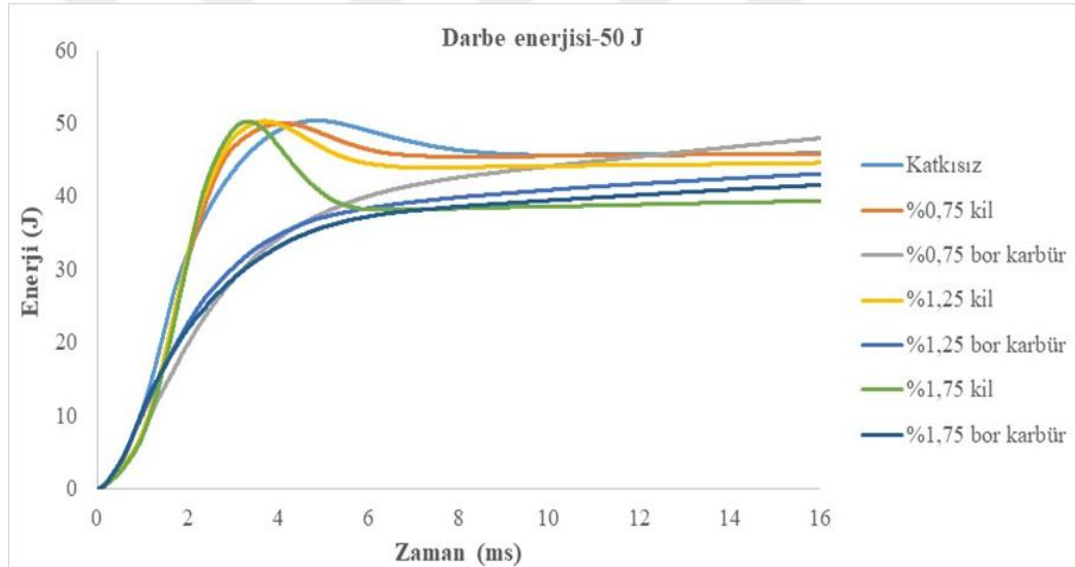
Şekil 7.51 50 J darbe enerjisinde tüm numunelerin kuvvet-çökme grafiklerinin karşılaştırılması

Şekil 7.52'de, 50 J darbe enerjisi altında nanokil ve bor karbür oranlarına sahip hibrit kompozit numunelerin kuvvet-zaman grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Nanokil katkısı, malzemenin kuvvet taşıma kapasitesini artırmış, darbe yükünü daha rijit ve dayanıklı bir şekilde karşılamasını sağlamıştır. Öte yandan bor karbür katkılı numuneler ise özellikle %1,25 (5480,2 N) ve %1,75 (6040,5 N) oranlarında tepe kuvvetler belirgin biçimde düşük kaldığı, bor karbür katkısının malzemede mekanik dayanımı düşürdüğünü görülmektedir.



Şekil 7.52 50 J darbe enerjisinde kuvvet-zaman grafiklerinin karşılaştırılması

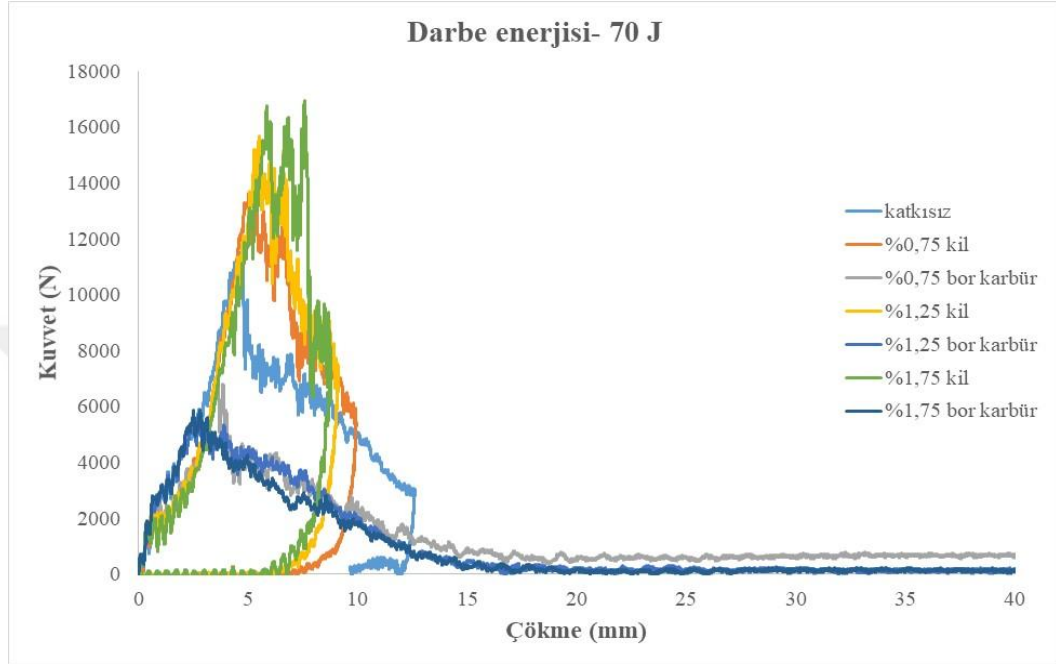
Şekil 7.53'te, 50 J darbe enerjisi altında katkısız, nanokil ve bor karbür katkılı kompozit numunelerden elde edilen enerji–zaman grafikleri karşılaştırmaktadır. En yüksek enerji absorpsiyonu katkısız ve %1,25 nanokil katkılı numunelerde gerçekleşmiş, her ikisi de yaklaşık 50 J enerji seviyesinde doygunluğa ulaşmıştır. Bu durum, bu iki numunenin uygulanan enerjinin neredeyse tamamını absorbe edebildiğini göstermektedir. Özellikle nanokil katkısı, enerjiyi daha hızlı emerek erken doygunluğa ulaşmakta, bu da enerjinin etkin biçimde sönmüldüğünü ortaya koymaktadır. Öte yandan, bor karbür katkılı numuneler daha düşük enerji emilim değerlerinde kalmış; özellikle %1,25 ve %1,75 oranlarında eğriler daha yavaş yükseldiği görülmektedir. Bor karbür katkısı enerji absorpsiyon kapasitesini sınırladığını görülmektedir.



Şekil 7.53 50 J darbe enerjisinde enerji-zaman grafiklerinin karşılaştırılması

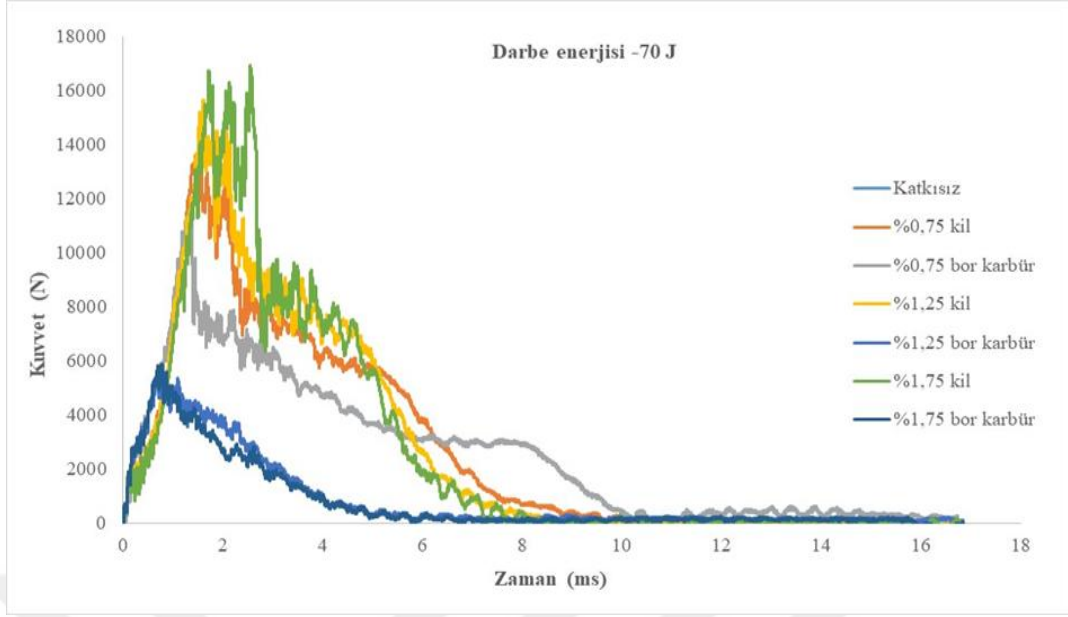
Şekil 7.54'te 70 J darbe enerjisi altında katkısız, nanokil ve bor karbür katkılı kompozit numunelerin kuvvet–çökme davranışları karşılaştırılmaktadır. Katkısız numune yaklaşık 11549,9 N' a kadar kuvvet taşıyabilmiştir. Nanokil katkılı numuneler, özellikle %1,25 katkı oranında 15670,3 N'ye varan tepe kuvvetlerine ulaşarak iyi performans göstermiştir. Bor karbür katkılı numunelerde ise eğriler açık formda olup, tüm katkı oranlarında numunelerin delindiği ve deformasyonun en yüksek seviyelerde olduğu gözlemlenmektedir. Maksimum kuvvet değerleri sırayla 7276,9N, 5626,1 ve 5888,8 N seviyesinde sınırlı kalmış ve darbe sonrası yapılar hızlı şekilde yük taşıma kapasitesini kaybetmiştir. Bu durum, bor karbür katkısının yüksek enerji altında yapıyı

koruyamadığını ve gevrek bir davranış sergilediğini göstermektedir. Bor karbür katkılı numuneler ise enerjiyi kırılma yoluyla karşılamış, bu da yapısal bütünlüğün bozulmasına neden olmuştur.



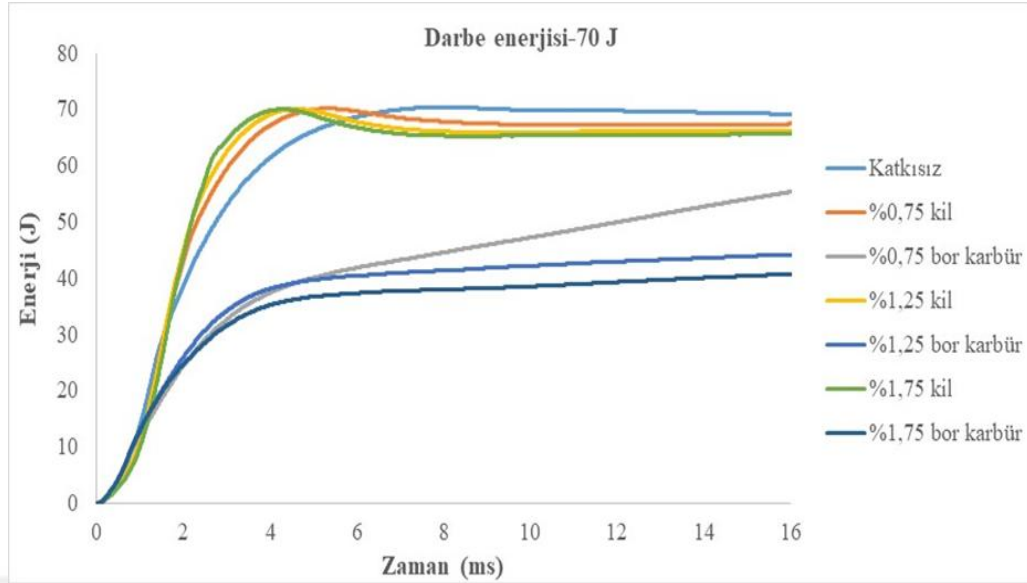
Şekil 7.54 70 J darbe enerjisiinde tüm numunelerin kuvvet-çökme grafiklerinin karşılaştırılması

Şekil 7.55, 70 J darbe enerjisi altında katkısız, nanokil ve bor karbür katkılı kompozit numunelerden elde edilen kuvvet-zaman verilerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. En yüksek tepe kuvveti 16966 N ile %1,75 nanokil katkılı numuneye aittir; bu da bu katkı oranının yüksek enerji altında üstün darbe dayanımı sağladığını göstermektedir. Bunu sırasıyla %1,25 ve %0,75 nano kil katkılı numuneler izlemektedir. Bor karbür katkısı incelendiğinde %0,75 ve %1,25 katkı oranlarında sırayla 7236,9 N ve 5621,1 N, %1,75 oranında ise bu değer 5888,8 N seviyelerinde kalmıştır. Bu durum, bor karbürün yüksek enerji altında darbe dayanımı açısından yetersiz kaldığını, nano kil katkısının ise özellikle %1,75 seviyesinde performansı ciddi şekilde iyileştirdiğini göstermektedir.



Şekil 7.55 70 J darbe enerjisinde kuvve-zaman grafiklerinin karşılaştırılması

Şekil 7.56'da, 70 J darbe enerjisi altında darbe enerjisi altında katkısız, nanokil ve bor karbür katkılı kompozit numunelerden elde edilen enerji-zaman davranışlarını karşılaştırmalı olarak göstermektedir. En yüksek enerji absorpsiyonu yaklaşık 70 J seviyelerinde sabitlenen %1,25 ve %1,75 nanokil katkılı numunelere aittir. Bu numuneler, darbe enerjisinin neredeyse tamamını kısa sürede (4 - 5 ms) absorbe etmiş, bu da hem hızlı hem de verimli bir enerji sönmeme kapasitesi sunduklarını göstermektedir. %0,75 nano kil katkısı da benzer şekilde yüksek performans göstermektedir. Öte yandan, bor karbür katkılı numuneler, özellikle %0,75 ve %1,25 oranlarında daha düşük enerji emilim değerlerine ulaşmış ve bu doygunluğa daha geç sürede varmıştır. %1,75 bor karbür katkılı numune ise en düşük enerji absorpsiyon kapasitesine sahiptir. Katkısız numune de bor karbür katkılılardan daha iyi performans göstermiştir.

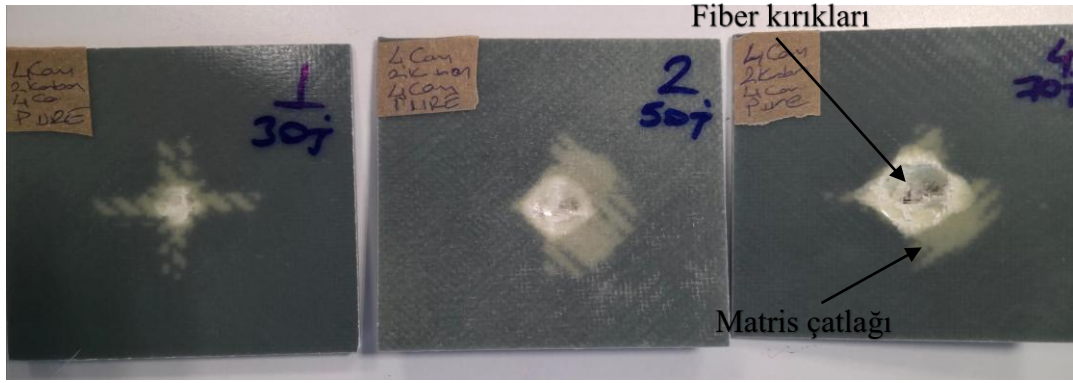


Şekil 7.56 70 J darbe enerjisinde enerji-zaman grafiklerinin karşılaştırılması

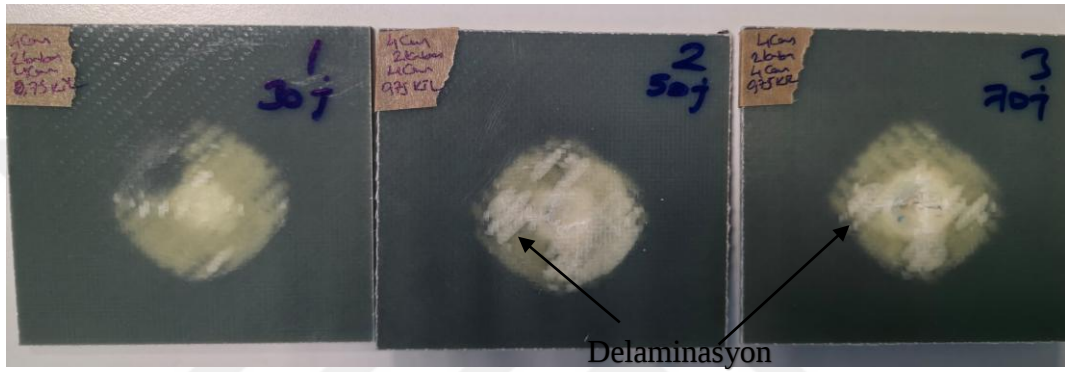
Bu sonuçlar, nanokil katkısının, özellikle %1,25 ve %1,75 oranlarında, yüksek darbe enerjilerinde hem hızlı hem de maksimum enerji emilimi sağlayarak kompozit yapının darbe direncini belirgin şekilde artırdığını; bor karbür katkısının ise enerji sönümleme açısından yetersiz kaldığını göstermektedir.

7.7 Numunelerden Elde Edilen Hasar Tiplerinin Karşılaştırılması

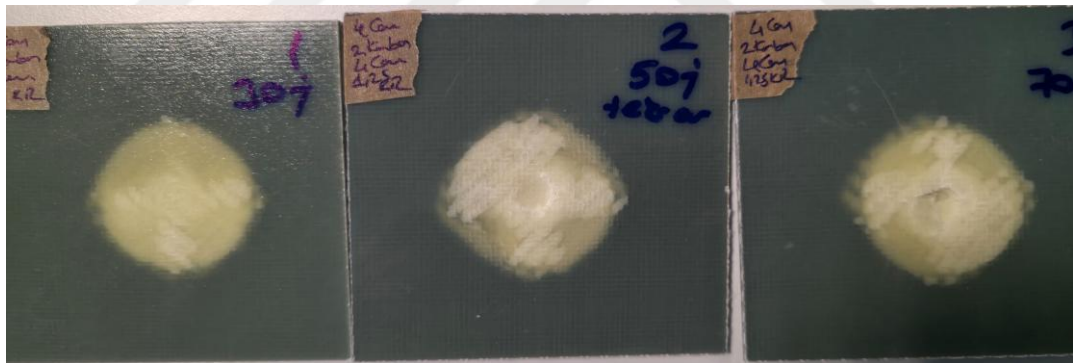
Şekil 7.57'de ağırlıkça %0,75, %1,25 ve %1,75 katkı oranlarındaki nanokil katkılarının katkısız numuneler ile karşılaştırmalı olacak şekilde görselleri verilmiştir. Katkısız numunelerde artan darbe enerjisiyle belirgin fiber kırıkları, geniş matris çatlakları ve ciddi delaminasyon izleri (özellikle 70 J'de) gözlemlenmiştir (Şekil 7.57a). %0,75 katkılı numunelerde (Şekil 7.57b), 30 J ve 50 J'de hasarın daha sınırlı ve matris çatlaklarının lokalize olduğu, fiber bütünlüğünün ise daha iyi korunduğu görülmektedir; ancak 70 J'de yine ciddi hasar izleri mevcuttur. %1,25 katkı oranında (Şekil 7.57c), özellikle 30 J ve 50 J'de küçük hasar alanları olduğu, 70 J'de delinmenin katkısız numunelere kıyasla daha az olduğu görülmektedir. En yüksek katkı oranı olan %1,75'te (Şekil 7.57d) ise hasar tüm enerji seviyelerinde daha homojen dağılmış, delaminasyon ve fiber kırıkları daha az belirgin olduğu görülmektedir. Bu da katkının matris-fiber arayüz dayanımını artırarak enerjiyi daha etkin yaydığını ve çatlak ilerlemesini engellediğini göstermektedir.



a)



b)



c)



d)

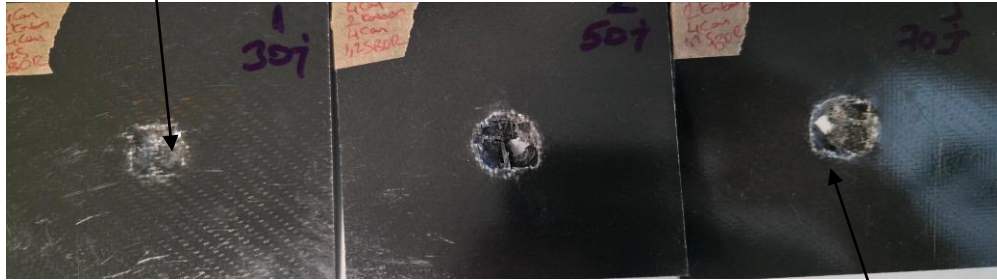
Şekil 7.57 a) Katkısız numunelere b) %0,75 nanokil katkılı numuneler c) %1,25 nanokil katkılı numuneler d) %1,75 nanokil katkılı numuneler

Şekil 7.58'de ağırlıkça %0,75, %1,25 ve %1,75 katkı oranlarındaki bor karbür katkılarındaki numune görselleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. %0,75 katkılı numunelerde, 30 J'de hasarın daha sınırlı kaldığı çarpıcı ucun saplanma (penetrasyon) ile darbeyi karşıladığı; ancak 50 J ve 70 J'de fiber kırıklarının olduğu görülmektedir. Bu katkı oranı yapısal dayanımı düşürdüğü görülmektedir. %1,25 katkılı (Şekil 7.58b) numunelerde ise 30 J'de sınırlı bir hasar gözlemlenirken, 50 J ve 70 J'de delik oluşumu katkısız ve %0,75 katkılı numunelere göre daha belirgin olduğu dikkat çekmektedir. %1,75 katkılı (Şekil 7.58c) numunelerde ise tüm darbe seviyelerinde delinmeler (perforasyon) meydana gelmiştir. Bununla birlikte, katkı oranı arttıkça fiber-matris arayüz dayanımında iyileşme olduğu, bu sayede çatlak yayılımının daha kontrollü olduğu anlaşılmaktadır



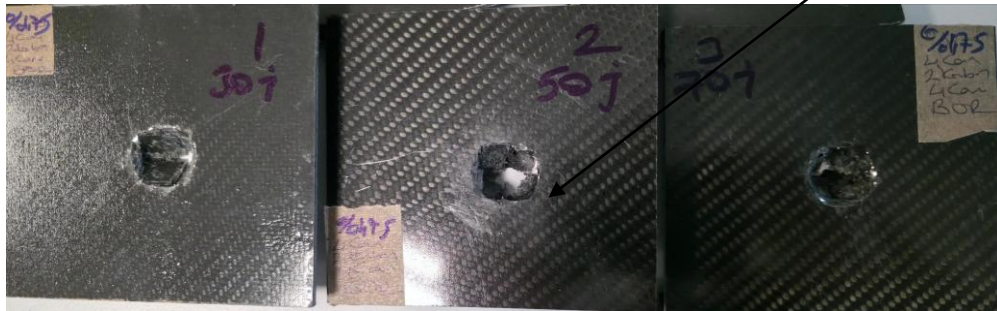
Delinme

a)



b)

Delinme



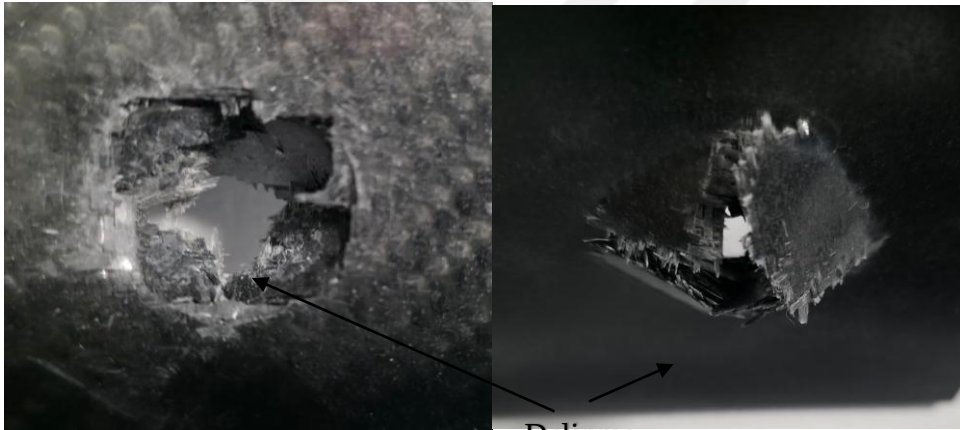
c)

Şekil 7.58 a) %0.75 bor karbür katkılı numuneler b) %1.25 bor karbür katkılı numuneler c) %1.75 bor karbür katkılı numuneler

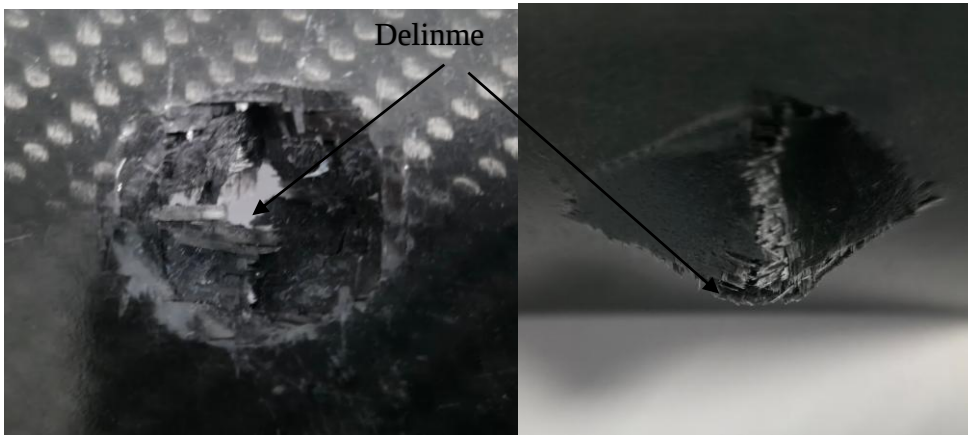
Şekil 7.59'de yer alan %1,75 bor karbür katkılı hibrit kompozit numunelere ait 3 enerji seviyesindeki görseller incelendiğinde, darbe enerjisi arttıkça hem ön hem de arka yüzeylerdeki hasar seviyesinin belirgin şekilde yükseldiği görülmektedir. Malzemede delinme (perforasyon) meydana geldiği görülmektedir.



a) 30 J darbe enerjisinde hibrit numunenin ön ve arka yüzü



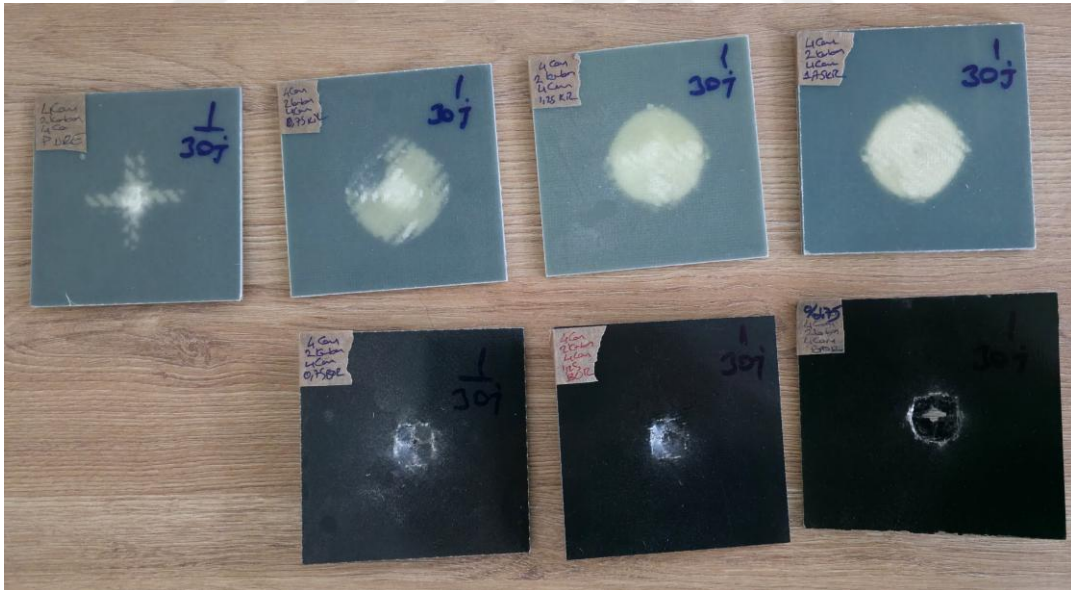
b) 50 J darbe enerjisinde hibrit numunenin ön ve arka yüzü



c) 70 J darbe enerjisinde hibrit numunenin ön ve arka yüzü

Şekil 7.59 %1.75 Bor karbür katkılı hibrit numune görselleri a) 30 J b) 50 J c) 70 J

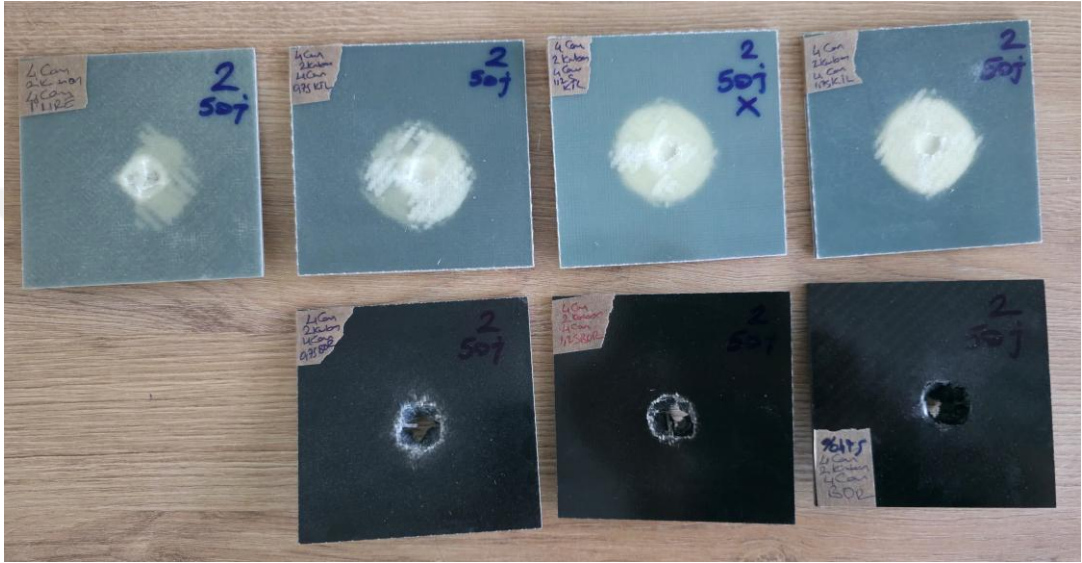
Şekil 7.60'ta, 30 J darbe enerjisi altında, katkısız, nano kil katkılı ve bor karbür katkılı numunelerin hasar davranışları karşılaştırılmıştır. Katkısız ve nano kil katkılı numunelerde hasar çapı ile fiber kırığı ve matris çatlağı boyutları karşılaştırıldığında, katkısız numunede hasarın daha yaygın ve çatlakların daha düzensiz dağıldığı gözlemlenmiştir. %0,75 ve %1,25 nano kil katkılı numunelerde hasarın merkezde olduğu, %1,75 nano kil katkısında ise hasar bölgesi daha simetrik ve yüzeyde dağılmadan sınırlı kalmış, bu da katkının arayüz bağ dayanımını artırarak çatlak yayılımını engellediğini göstermektedir. Alt sıradaki bor karbür katkılı numuneler incelendiğinde ise %0,75 oranında sınırlı bir iyileşme gözlenmiş; ancak %1,25 katkı ile delaminasyonun azaldığı ve hasarın daha odaklı hale geldiği dikkat çekmiştir. %1,75 bor karbür katkılı numunede ise merkezi delik oldukça belirgin olup, çevresel çatlamların nispeten daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Genel olarak, düşük katkı oranlarında nanokil katkısı, bor karbüre kıyasla matris çatlağını kontrol etmede daha etkili olmuştur.



Şekil 7.60 30 J darbe enerjisi altında katkısız nanokil katkılı ve bor karbür katkılı numuneler

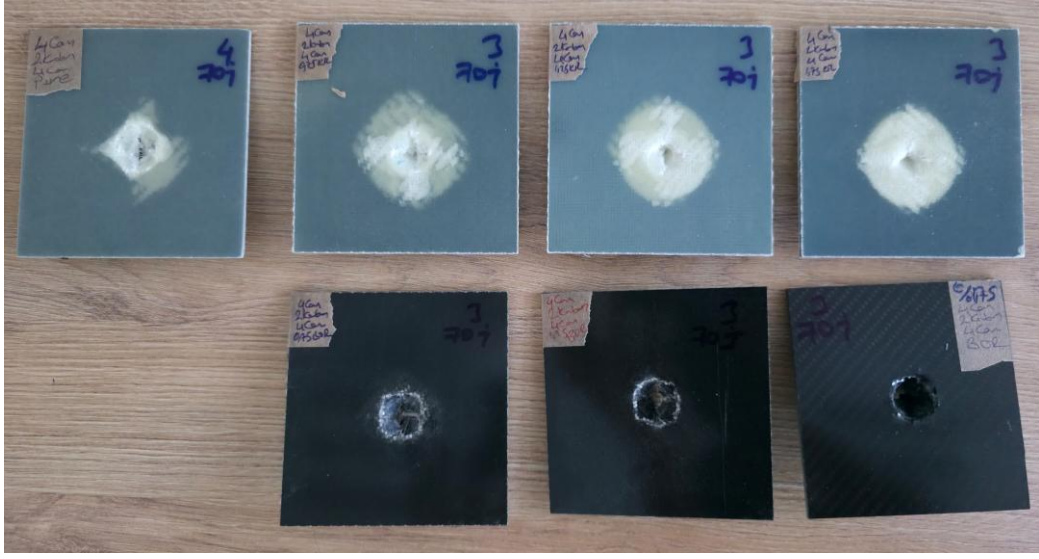
Şekil 7.61'de, 50 J darbe enerjisi uygulanarak üst sırasında katkısız, %0,75, %1,25 ve %1,75 oranlarında nano kil katkılı kompozitler yer almakta; alt sırada ise aynı oranlarda bor karbür katkılı numuneler bulunmaktadır. Katkısız numunede geniş çaplı bir delik, belirgin fiber kırıkları ve düzensiz matris çatlakları gözlemlenmiştir. %0,75 nano kil katkılı numunede hasar alanı bir miktar daralmış, matris çatlakları daha

lokalize olmuştur. %1,25 ve özellikle %1,75 nano kil katkılarında, darbe hasarının daha sınırlı ve simetrik bir yapıya dönüştüğü görülmektedir. Bu durum, nano kil katkısının enerji emme kapasitesini artırarak çatlak yayılımını kontrol altına aldığını göstermektedir. Alt sıradaki bor karbür katkılı numunelerde ise delinme gerçekleşmiş olup %1,25 ve %1,75 katkı oranında delaminasyonun azaldığı ve hasar sınırlarının daha netleştiği görülmektedir.



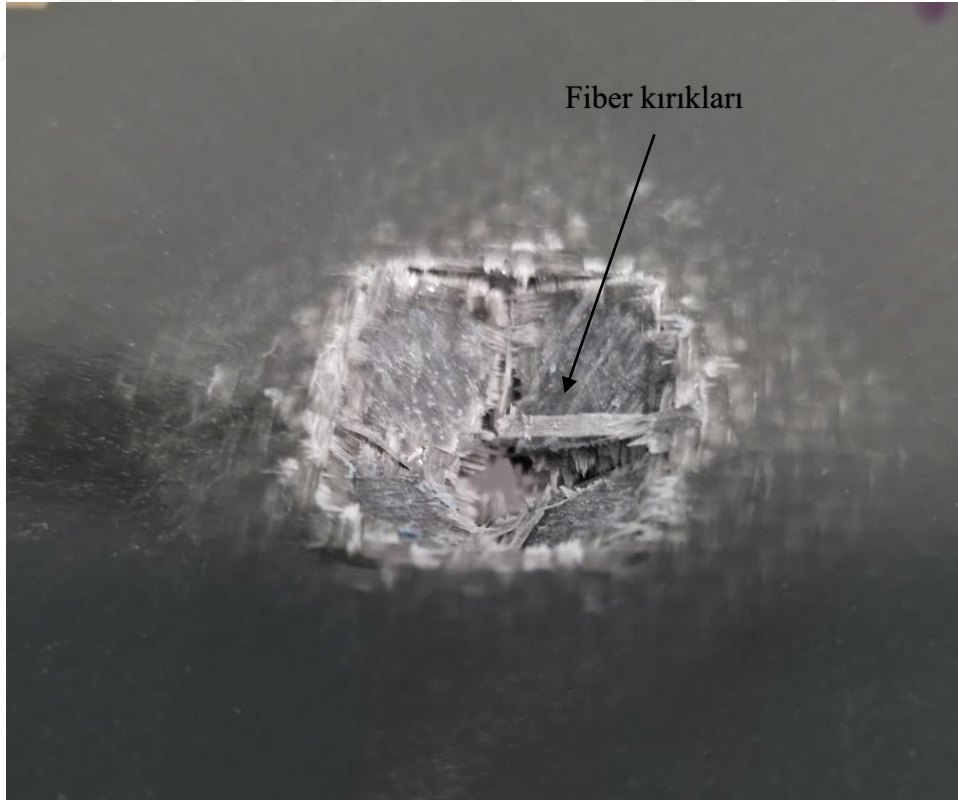
Şekil 7.61 50 J darbe enerjisi altında katkısız nanokil katkılı ve bor karbür katkılı numuneler

Şekil 7.62'de, 70 J gibi yüksek darbe enerjisine maruz bırakılan kompozit numunelerin yüzey hasarları karşılaştırılmıştır. Üst sıradaki katkısız numune ciddi delaminasyon, geniş çaplı delinme ve belirgin fiber ayrışmaları göstermektedir. %0,75 nano kil katkılı numunede hasarın merkezde toplandığı, ancak çatlakların yine de belirgin olduğu görülmektedir. %1,25 katkılı numunede ise delik çapı daha küçülmüş, çatlak yayılımı sınırlanmış ve hasarın daha merkezi hale geldiği gözlemlenmiştir. En yüksek katkı oranı olan %1,75 nano kil katkısında hasarın yüzeyde daha homojen dağıldığı, delaminasyonun minimize olduğu ve çatlakların kontrollü ilerlediği tespit edilmiştir. Alt sırada yer alan bor karbür katkılı numunelerde ise, tüm katkı oranlarında delik oluşumu kaçınılmaz olmuştur. Genel olarak, nanokil katkısının, bor karbüre kıyasla daha etkin bir enerji yayılımı ve hasar kontrolü sağladığı görülmektedir.

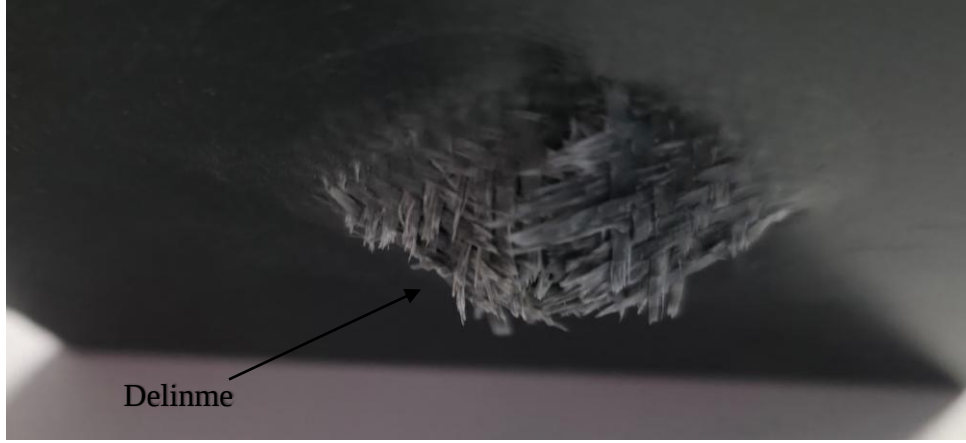


Şekil 7.62 70 J darbe enerjisi altında katkısız nanokil katkılı ve bor karbür katkılı numuneler

Şekil 7.63'te %0.75 Bor karbür katkılı numunenin 70 J darbe enerjisinde ön yüzü ve arka yüzü hasar fotoğrafı yakından görülmektedir. Düşük bor karbür katkı oranında fiber kırıkları ve delinme (perforasyon) görülmektedir.



a)



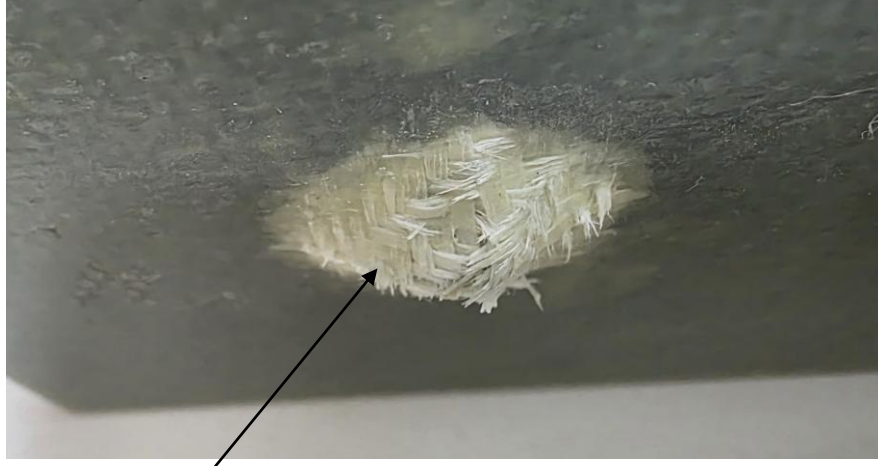
b)

Şekil 7.63 %0.75 Bor karbür katkılı numunenin hasar görüntüsü a) Numunenin üst yüzeyi

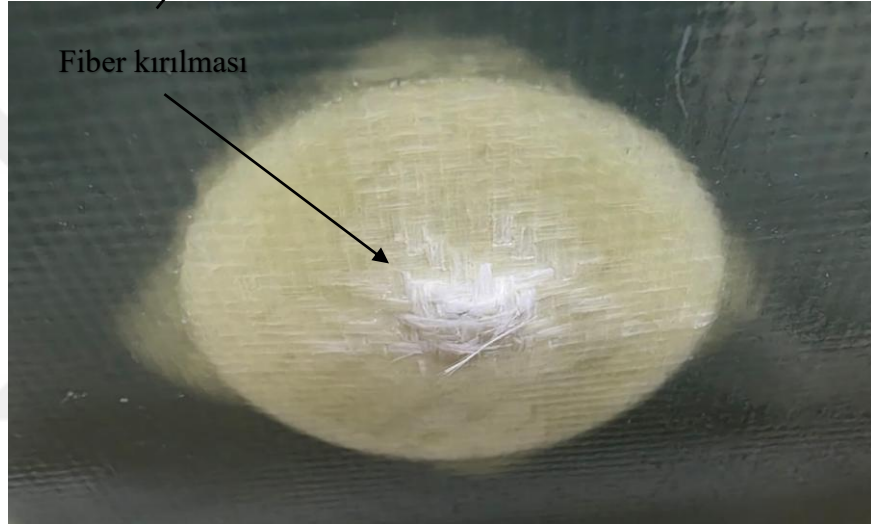
b) Numunenin alt yüzeyi

Yapılan düşük hızlı darbe testleri sonucunda, 4Cam/2Carbon/4Cam fiberden oluşan toplam 10 tabakalı hibrit kompozit plakaların darbe dayanımının hem katkı türüne hem de katkı oranına bağlı olarak anlamlı şekilde değiştiği gözlemlenmiştir. Katkısız numunelerde darbe enerjisi arttıkça ciddi delaminasyon, fiber kırıkları ve geniş çaplı delinmeler meydana gelirken, özellikle %1,25 ve %1,75 oranlarında nanokil katkısı ile bu hasarların belirgin şekilde azaldığı, hasarın daha simetrik ve bölgesel bir yapıya dönüştüğü görülmüştür. Nanokil katkısı, matris-fiber arayüz bağlarını güçlendirerek çatlak ilerlemesini sınırlamış ve enerji emme kapasitesini artırmıştır. Bor karbür katkısı da belirli oranlarda (özellikle %1,25 ve %1,75) hasar alanlarını daraltmakta etkili olmuş; ancak yüksek darbe enerjilerinde delik oluşumunu önleyememiştir.

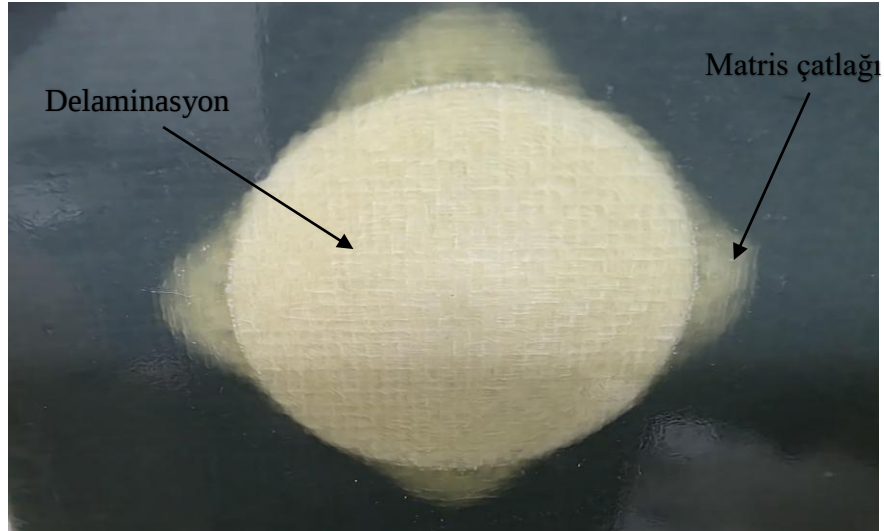
Şekil 7.64'de katkısız numunelerin arka yüzeyi ile 50 J darbe enerjisinde %1.25 nanokil katkılı ve %1,75 nanokil katkılı numunenin arka yüzeyi darbe hasarı açısından karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 7.64a'da katkısız numunenin 50 J darbe enerjisinde fiber kırığı alanı geniş çapta görülürken Şekil 7. 64b'de % 1,25 nanokil katkılı alanda fiber kırığı alanının küçüldüğü Şekil 7.64c'de yerini delaminasyona ve matris çatlağına bıraktığı görülmektedir. Nanokilin katkı oranı arttıkça hasarı daha iyi karşıladığı görülmektedir.



a)



b)



c)

Şekil 7.64 a) 50 J darbe enerjisinde katkısız numunenin alt yüzeyi fotoğrafı b) 50 J darbe enerjisinde %1,25 nanokil katkılı numunenin alt yüzeyinin fotoğrafı c) 50 J darbe enerjisinde %1,75 nanokil katkılı numunenin alt yüzeyinin fotoğrafı

8. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada ağırlıkça %0,75, 1,25 ve %1,75 oranlarında nanokil ve bor karbür katkılı 4Cam/2Karbon/4Cam fiber dizilimli toplam 10 tabakalı hibrit kompozit levhaların darbe davranışları 30 J, 50 J ve 70 J enerjilerinde düşük hızlı darbe testleri ile değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular daha önce yapılmış bazı çalışmalarla karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Nayak ve arkadaşları [57], karbon/cam (C_2G_8) hibrit kompozitlerde %5 nanokil katkısıyla mekanik ve darbe dayanımında belirgin artışlar gözlemlemişlerdir. Her iki çalışmada da cam ve karbon fiber hibritlenerek çok katmanlı yapılar oluşturulmuştur. Nayak'ın çalışmasında asimetrik C_2G_8 düzeni tercih edilirken, bu tezde 4cam/2karbon/4cam şeklinde simetrik bir yerleşim benimsenmiştir. Her iki yapıda da karbon fiber rijitlik ve dayanım sağlarken, cam fiberler süneklik ve darbe emme kapasitesine katkıda bulunmuştur. Bu tezde 50J darb enerjisinde en yüksek değer %1,75 oranındaki nanokil katkısı, darbe dayanımı açısından optimum performansı göstermiştir. Aradaki farklılıklar; kullanılan matris tipi, fiber dizilimi ve deneysel test koşullarından kaynaklanmakla birlikte, her iki çalışma da cam-karbon hibrit yapı ile nanokil katkısının sinerjik etkilerle darbe dayanımını artırdığı görülmektedir. Bu bulgular, Stephen ve arkadaşlarının [54], Ni ve arkadaşlarının [66] ile Ishtiaq ve arkadaşlarının [80] çalışmaları ile birlikte değerlendirildiğinde; hibrit kompozitlerde fiber türü, konumu ve yerleşiminin darbe davranışı üzerindeki belirleyici rolünü görülmektedir. Özellikle karbon fiberlerin çekirdek bölgede, cam fiberlerin ise yüzeyde konumlandırıldığı düzenlemelerin; darbe enerjisinin önce sünek cam tabakalar tarafından absorbe edilmesini, ardından rijit karbon tabakalara yönlendirilerek daha kontrollü ve dengeli bir hasar dağılımı sağladığını göstermektedir [80]. Bu tezde 4 cam/2 karbon/4 cam yapısı da bu yaklaşımı yansıtmaktadır. Ayrıca, bu yapı farklı oranlardaki nanokil ve bor karbür katkılarıyla güçlendirilmiş, ancak nanokil katkısı matrisin rijitliğini artırarak darbe enerjisinin daha etkili bir biçimde sönmelenmesine katkı sağlamıştır. Sayer'in [56] çalışmasında karbonun yüzeyde konumlandırılmasının delinme direncini artırdığı belirtilmiş olsa da, bu yaklaşım daha çok rijitliğin ön planda olduğu uygulamalara yöneliktir. Bu tez çalışmasında ise karbonun çekirdek bölgede yer aldığı hibrit tasarım, nano katkılarla birlikte darbe

direnci ve enerji emilimini optimize ederek daha dengeli ve dayanıklı bir yapı elde edilmesini sağlamıştır.

Rahman ve arkadaşları [1], nanokilin matris içinde homojen dağılmasıyla rijitlik kazandırdığını ve çatlak ilerlemesini engelleyerek başlangıç dayanımını artırdığını bildirmiştir. Bu çalışmada da katkı oranı arttıkça numunelerin darbe anında taşıdığı maksimum kuvvet değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiş, en yüksek kuvvet %1,75 katkı oranında elde edilmiştir. Bu bulgu, nanokilin yapısal sertlik ve dayanım üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, Rafiq ve arkadaşları [4], %1,5 nanokil katkısının cam fiber takviyeli kompozitlerde darbe dayanımını artırdığını ve hasarın yayılımını sınırladığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada da, katkı oranı arttıkça enerji sönümleme kabiliyeti artmış ve katkısız numunelere kıyasla daha kararlı deformasyon davranışı gözlemlenmiştir. Her iki çalışmada da nanokilin, rijitlik kazandırmanın yanı sıra hasar yayılımını kontrol altına aldığı vurgulanmaktadır. Gitiara ve arkadaşlarının [9], Fakhreddini ve arkadaşlarının [5], çalışmalarında ve bu çalışmada nanokilin çatlak ilerlemesini baskılayarak darbe enerjisinin yapıya yayılmadan kontrollü biçimde sönümlenmesini sağladığı ve dolayısıyla hasar alanını sınırladığı görülmüştür. Tüm çalışmalarda katkı oranı arttıkça rijitlik artmış, ancak süneklik azalarak darbe enerjisinin daha küçük bir hacimde sönümlenmesine yol açmış ve kırılma eğilimi belirginleşmiştir. Bu durum, katkı miktarının optimum düzeyde tutulmasının önemini vurgulamaktadır.

Ünal ve arkadaşları [10] ile Örcen ve arkadaşlarının [11] çalışmaları da nanokilin mekanik performans üzerindeki etkilerini desteklemektedir. Ünal ve arkadaşları, %0,75 nanokil katkısıyla en yüksek çekme dayanımına; %1,25 oranında ise en yüksek eğilme dayanımına ulaşırken, bu tez çalışmasında %1,25 katkı ile hem yüksek darbe kuvveti hem de enerji sönümleme başarımları elde edilmiştir. Örcen ve arkadaşlarının çalışmasında ise %1 katkı mekanik dayanımı artırmış, ancak %1,5 katkı ile fiber-matris ara yüzeyinde uyumsuzluk ve yapısal bozulma gözlemlenmiştir. Benzer biçimde, bu çalışmada %1,75 katkı oranında artan rijitliğe rağmen yapının kırılma eğilimi gösterdiği, çökme eğrilerinde dalgalanmalar olduğu ve çoklu hasar mekanizmalarının devreye girdiği belirlenmiştir.

Tüm bu çalışmalarla karşılaştırıldığında, nanokil katkısının belirli bir orana kadar kompozit yapıların darbe dayanımı üzerinde olumlu etkiler sağladığı; ancak aşırı katkının yapının sünekliğini azaltarak kırılma eğilimine neden olabileceği anlaşılmaktadır.

Rajeshkumar ve arkadaşları [59], karbon/cam hibrit kompozitlere %1–%5 oranlarında haloysit nanokil (HNC) eklemiş ve özellikle %3 katkıyla depolama ve kayıp modülünde belirgin artış gözlemlemiştir. Bu çalışma ile katkı türü ve fiber mimarisi açısından benzerlikler bulunmaktadır. Bu çalışmada %0,75, %1,25 ve %1,75 nanokil katkısı, darbe altında maksimum kuvveti artırmış ve enerjinin etkin sönümlenmesini sağlamıştır. Her iki çalışmada da katkı oranı, matris-fiber arayüzeyini güçlendirerek rijitlik ve çatlak durdurma kapasitesini iyileştirmiştir. Sonuç olarak, farklı nanokil türleriyle benzer performans artışları elde edilmiştir.

Caymaz'ın [19] çalışmasında, karbon fiber takviyeli kompozitlere %1–%7 aralığında bor karbür (B₄C) katkısı uygulanmış ve mekanik performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. En yüksek darbe dayanımı %1 katkı oranında elde edilmiş, daha yüksek oranlarda ise mekanik özelliklerde azalma gözlenmiştir. Ancak bu çalışmada da katkı oranı arttıkça deformasyon ve delinme eğilimi artmış, B₄C katkısının matris-fiber etkileşimini zayıflatarak performansı düşürdüğü sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum, optimum katkı oranının dikkatle belirlenmesi gerektiğini göstermektedir.

Özakin ve arkadaşları [14], epoksi matrisli nanokompozitlerde farklı B₄C oranlarını MOORA ve TOPSIS yöntemleriyle değerlendirmişlerdir; bu çalışmada %2 B₄C oranının mekanik performans ve maliyet dengesini en iyi sağladığı, %1'in ise ikinci sırada yer aldığı raporlanmıştır. Köseadağ ve Ekici'nin [20] Al 6061 matrisli kompozitlerde SiC, B₄C ve hibrit takviyelerle yaptıkları düşük hızlı darbe deneylerinde, tek başına B₄C katkılı numunelerin daha rijit, SiC katkılıların ise daha fazla deformasyon gösterdiği; hibrit kompozitlerde ise bu iki malzemenin sinerjik etkisiyle enerji emiliminin arttığı belirtilmiştir. Bu çalışmada da B₄C katkı oranı yükseldikçe sünekliğin azaldığı, yüksek katkı seviyelerinde darbe sonrası deformasyon ve kırılma eğiliminin belirgin şekilde arttığı görülmüştür. Bu bulgular, katkı tipi ve oranının darbe dayanımı ile enerji emme davranışını doğrudan etkilediğini tasarımlarda oranların hassasiyetle belirlenmesi gerektiğini göstermektedir.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

9.1 Sonuçlar

Yapılan düşük hızlı darbe testleri sonucunda, 4Cam/2Karbon/4Cam hibrit yapıya sahip kompozit levhalara üç farklı oranda (ağırlıkça %0,75, %1,25 ve %1,75) nanokil ve bor karbür (B₄C) ilave edilerek düşük hızlı darbe dayanımları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar; 30 J, 50 J ve 70 J enerji seviyelerinde gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler kuvvet-çökme, kuvvet-zaman ve enerji-zaman grafiklerine dayalı olarak analiz edilmiştir.

- 30 J darbe enerjisinde, nanokil katkılı numunelerde ağırlıkça %0,75, %1,25 ve %1,75 oranlarında, katkısız numuneye kıyasla maksimum kuvvet değerlerinde sırasıyla %24,01, %31,80 ve %36,35 oranlarında artış gözlenmiştir. Bor karbür katkılı numunelerde ise aynı katkı oranlarında sırasıyla %46,03, %43,42 ve %52,42 oranlarında azalma görülmüştür.
- 50 J darbe enerjisinde, nanokil katkılı numunelerde ağırlıkça %0,75, %1,25 ve %1,75 katkı oranlarında katkısız numuneye kıyasla maksimum kuvvet değerlerinde sırasıyla %10,40, %27,48 ve %49,93 oranlarında artış görülmüştür. Bor karbür katkılı numunelerde ise aynı katkı oranlarında sırasıyla %51,76, %53,25 ve %48,45 oranlarında azalma görülmüştür.
- 70 J darbe enerjisinde, nanokil katkılı numunelerde ağırlıkça %0,75, %1,25 ve %1,75 oranlarında katkısız numuneye kıyasla maksimum kuvvet değerlerinde sırasıyla %17,89, %35,67 ve %46,89 oranlarında artış görülmüştür. Bor karbür katkılı numunelerde ise aynı katkı oranlarında sırasıyla %37,34, %51,28 ve %49,02 oranlarında azalma görülmüştür.
- Nanokil katkılı numunelerde katkı oranı arttıkça malzemenin rijitliğinde ve darbe sırasında taşıdığı maksimum kuvvet değerlerinde artış gözlenmiştir. En yüksek tepe kuvvete (17578,8 N) ulaşan numune, 50 J darbe enerjisinde %1,75 nanokil katkılı hibrit numune olmuştur.
- Bor karbür katkılı numunelerde ise katkı oranı arttıkça maksimum kuvvette düşüşler ve yer değiştirme miktarlarında artışlar meydana gelmiş, malzemenin daha kırılğan bir yapı sergilediği gözlemlenmiştir. Özellikle 50 J ve 70 J gibi darbe enerjilerinde numunelerde delinme gerçekleşmiştir.
- Enerji-zaman grafiklerinde, %1,25 ve %1,75 nanokil katkılı numunelerin darbe enerjisini çok kısa sürede absorbe ettiği ve enerjinin büyük bölümünü

elastik deformasyonla sönümlendiği tespit edilmiştir. Bu durum, 30 J, 50 J ve 70 J darbe enerjilerinde katkının matris-fiber arayüzeyindeki bağlanmayı kuvvetlendirerek çatlak ilerlemesini sınırlandırdığını göstermektedir.

- Kuvvet-çökme eğrileri incelendiğinde, tüm nanokil katkılı numunelerde kapalı eğri yapıları gözlenmiş, bu da darbe ucunun delme yerine geri sekmesini ve hasarın lokalize kalmasını sağlamıştır. Bor karbür katkılı numunelerde ise açık eğriler elde edilmiş, yüksek yer değiştirme ve tam delinme davranışı ile darbe enerjisinin büyük kısmının kırılma yoluyla sönümlendiğini göstermiştir.
- Numunelerin görsel incelemelerinde, nanokil katkılı numunelerin arka yüzeylerinde daha az fiber ayrılması ve daha sınırlı hasar alanı, ön yüzlerinde ise matris çatlağı ve delaminasyon alanları gözlemlenmiştir. Bor karbür katkılı numunelerde ise daha gevrek bir yapı bununla birlikte matris çatlağı, delaminasyon, fiber kırılması ve tam delinme gibi bir çok hasar tipleri görülmüştür.

9.2 Öneriler

- Farklı darbe uç geometrileri (örneğin düz uç, konik uç, sivri uç) ile benzer deneylerin tekrarlanması, darbe türünün hasar mekanizmalarına etkisini anlamak açısından yararlı olacaktır.
- Mikro yapı karakterizasyonu (SEM, XRD, EDS vb.) ile katkıların matris içindeki dağılımının ve fiber-matris arayüzeylerinin detaylı incelenmesi, elde edilen mekanik sonuçların daha iyi yorumlanmasına katkı sağlayacaktır.
- İlerideki çalışmalarda farklı katkı malzemelerinin darbe dayanımına etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Rahman, A. S., Mathur, V., & Asmatulu, R. (2018). Nanokil ve grafen inklüzyonlarının Kevlar-epoksi lamineli kompozitlerin düşük hızlı darbe direncine etkisi. *Kompozit Yapılar*, 187, 481–488. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.054>
- [2] Alomari, A., Aldajah, S., Hayek, S., Moustafa, K., & Haik, Y. (2013). Experimental investigation of the low speed impact characteristics of nanocomposites. *Materials and Design*, 47, 836–841. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.079>
- [3] Dias, E., Chalse, H., Mutha, Ş., Mundhe, Y., Ambhore, N., Kulkarni, A., & Mache, A. (2023). Nanokil ile doldurulmuş sentetik/doğal elyaf polimer kompozitleri ve mekanik performansları üzerine inceleme. *Materials Today: Proceedings*, 77(3), 916–925. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.059>
- [4] Rafiq, A., Merah, N., Boukhili, R., & Al-Qadhi, M. (2017). Impact resistance of hybrid glass fiber reinforced epoxy/nanoclay composite. *Polymer Testing*, 57, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.11.005>
- [5] Fakhreddini-Najafabadi, S., Torabi, M., & Taheri-Behrooz, F. (2021). An experimental investigation on the low-velocity impact performance of the CFRP filled with nanoclay. *Aerospace Science and Technology*, 116, 106858. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106858>
- [6] Heydari-Meybodi, M., Saber-Samandari, S., & Sadighi, M. (2016). An experimental study on low-velocity impact response of nanocomposite beams reinforced with nanoclay. *Composites Science and Technology*, 133, 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.07.020>
- [7] Iqbal, K., Khan, S.-U., Munir, A., & Kim, J.-K. (2009). Impact damage resistance of CFRP with nanoclay-filled epoxy matrix. *Composites Science and Technology*, 69(11–12), 1949–1957. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.04.016>
- [8] Verma, R., Sharma, B., Singh, M. K., Rathore, S. S., & Kaur, H. d. (2023). Nanokil'in cam elyaf/epoksi laminatların sertlik, çekme ve eğilme özellikleri üzerindeki etkisinin deneysel değerdendirilmesi. *Materials Today: Proceedings*, 79(2), 395–397. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.163>
- [9] Gitiaara, Y., Barbaz-Isfahani, R., & Sadighi, M. (2021). Low-velocity impact behavior of incorporated GFRP composites with nanoclay and nanosilica in a corrosive environment: Experimental and numerical study. *Journal of Composite Materials*, 55(27). <https://doi.org/10.1177/00219983211031644>
- [10] Ünal, H. Y., Öner, G., & Pekbey, Y. (2018). Comparison of the experimental mechanical properties and DMA measurement of nanoclay hybrid composites. *European Mechanical Science*, 2(1), 31–36. <https://doi.org/10.26701/ems.356823>

- [11] Örcen, G., & Bayram, D. (2024). Effect of Nanoclay on the Mechanical and Thermal Properties of Glass Fiber-Reinforced Epoxy Composites. *Journal of Materials Science*, 59, 3467–3487. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09387-w>
- [12] Esendemir, Ü., Şimşek, R., & Saraç, M. F. (2021). The effect of functional nanoclay addition on the mechanical properties and impact behavior of hybrid composites. *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 8(1), 800. <https://doi.org/10.28948/ngmuh.786231>
- [13] Örcen, G., Ünal, H. Y., & Pekbey, Y. (2024). Direct comparison of low velocity impact performance of nanoclay, boric acid and interlayer hybrid composites. *Polymers for Advanced Technologies*. 35(12), e70030.
- [14] Özakın, B., Gültekin, K., & Çelik, İ. (2023). Bor Karbür (B₄C) katkılı epoksi esaslı nanokompozitlerin çok kriterli karar verme yöntemleriyle seçimi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 13(1), 35-41. <https://doi.org/10.7212/karaelmasfen.1149324>
- [15] Badawy, A. A., & Khashaba, E. U. (2020). Impact and mechanical properties of different composite systems modified with multi-walled carbon nanotubes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 0(0), 1–14. <https://doi.org/10.1177/0954406220919445>
- [16] Ünal, H., Yetgin, S. H., & Köse, S. (2023). Determination of mechanical performance of boric acid filled polypropylene based polymer composites. *Journal of Scientific Reports-A*, 55, 185–192. <https://doi.org/10.59313/jsr-a.1354200>
- [17] Örcen, G., & Bayram, D. (2024). Effects of boric acid on laminated composites: An experimental study. *Polymers*, 16(15), 2133. <https://doi.org/10.3390/polym16152133>
- [18] Ulus, H., Üstün, T., Şahin, Ö. S., Karabulut, S. E., Eskizeybek, V., & Avcı, A. (2016). Low-velocity impact behavior of carbon fiber/epoxy multiscale hybrid nanocomposites reinforced with multiwalled carbon nanotubes and boron nitride nanoplates. *Journal of Composite Materials*, 50(6), 761–770. <https://doi.org/10.1177/0021998315580835>
- [19] Caymaz, M. (2021). B₄C katkılı karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi [Yüksek lisans tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- [20] Kosedag, E., & Ekici, R. (2025). Low-velocity impact behaviors of B₄C/SiC hybrid ceramic reinforced Al6061 based composites: An experimental and numerical study. **Journal of Alloys and Compounds*, 1010*, 177525.
- [21] Goodarz, M., Hajir Bahrami, S., Sadighi, M., & Saber-Samandari, S. (2019). Low-velocity impact performance of nanofiber-interlayered aramid/epoxy nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 173, 106975.

- [22] Hosur, M. V., Adya, M., Alexander, J., Jeelani, S., Vaidya, U., & Mayer, A. (2003). Studies on impact damage resistance of affordable stitched woven carbon/epoxy composite laminates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 22, 927. <https://doi.org/10.1177/0731684403022010005>
- [23] Boukar, A., Corn, S., Slangen, P. R. L., & Ienny, P. (2022). Finite element modelling of low velocity impact test applied to biaxial glass fiber reinforced laminate composites. *International Journal of Impact Engineering*, 165, 104218. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104218>
- [24] Soliman, E. M., Sheyka, M. P., & Taha, M. R. (2012). Low-velocity impact of thin woven carbon fabric composites incorporating multi-walled carbon nanotubes. *International Journal of Impact Engineering*, 47, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.03.002>
- [25] Rajaneesh, A., & Bruyneel, M. (2023). Low-velocity impact and compression after impact modeling of composites using modified mesoscale model. *Composite Structures*, 311, 116821. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116821>
- [26] Öner, G., Ünal, H. Y., & Pekbey, Y. (2016). Experimental investigation of low-velocity impact response of plainweave glass/epoxy composites reinforced with carbon nanotubes. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 31(SI 2), SI 87–SI 97.
- [27] Arikan, V., et al. (2023). Comparative study on the impact response of polypropylene and epoxy matrix composites with respect to the plate thickness. *Journal of the Institute of Materials, Minerals and Mining*, 52(6). <https://doi.org/10.1080/14658011.2023.2212314>
- [28] Liu, D. (1990). Delamination resistance in stitched and unstitched composite plates subjected to impact loading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 9, 59. <https://doi.org/10.1177/073168449000900104>
- [29] Im, K.-H., Cha, C.-S., Kim, S.-K., & Yang, I.-Y. (2001). Effects of temperature on impact damages in CFRP composite laminates. *Composites: Part B: Engineering*, 32, 669–682. <http://www.elsevier.com/locate/composites>
- [30] Salehi-Khojin, A., Mahinfalah, M., Bashirzadeh, R., & Freeman, B. (2007). Temperature effects on Kevlar/hybrid and carbon fiber composite sandwiches under impact loading. *Composite Structures*, 78, 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.11.005>
- [31] Aslan, Z., & Karakuzu, R. (2008). Düşük hız darbe yüküne maruz tabakalı kompozit plakların deneysel ve nümerik olarak incelenmesi [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Teorik ve Uygulamalı Mekanik Türk Milli Komitesi. <https://polen.itu.edu.tr/handle/11527/14847>

- [32] Joshua, J. J., Venkatanarayanan, P. S., & Singh, D. (n.d.). A literature review on composite materials filled with and without nanoparticles subjected to high/low velocity impact loads. *Materials Today: Proceedings*, 33(7).
- [33] Subhan Ali Jogi, S. A., Muhammad Moazam Baloch, M. M., Ali Dad Chandio, A. D., Iftikhar Ahmed Memon, I. A., & Ghulam Sarwar Chandio, G. S. (2017). Evaluation of impact strength of epoxy based hybrid composites reinforced with E-Glass/Kevlar 49. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, 36(4), 1009–1016.
- [34] Ranjbar, M., & Feli, S. (2018). Mechanical and low-velocity impact properties of epoxy-composite beams reinforced by MWCNTs. *Journal of Composite Materials*, 53(5), 693–705. <https://doi.org/10.1177/0021998318790049>
- [35] Reddy, T. S., Reddy, P. R. S., & Madhu, V. (2017). Response of E-glass/epoxy and Dyneema® composite laminates subjected to low and high velocity impact. *Procedia Engineering*, 173, 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.014>
- [36] Wang, P., Zhang, X., Lim, G., et al. (2015). Improvement of impact-resistant property of glass fiber-reinforced composites by carbon nanotube-modified epoxy and pre-stretched fiber fabrics. *Journal of Materials Science*, 50(18), 5978–5992. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9145-3>
- [37] Sun, X. C., Kawashita, L. F., Kaddour, A. S., Hiley, M. J., & Hallett, S. R. (2018). Comparison of low velocity impact modelling techniques for thermoplastic and thermoset polymer composites. *Composite Structures*, 203, 659–671. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.054>
- [38] Cantwell, W. J., & Morton, J. (1991). The impact resistance of composite materials-a review. *Composites*, 22(5), 347–362. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(91\)90549-V](https://doi.org/10.1016/0010-4361(91)90549-V)
- [39] Öndürücü, A., & Karacan, A. (2018). Tabakalı cam elyaf/epoksi kompozitlerin darbe davranışının deneysel olarak incelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(3), 435–447. <https://doi.org/10.21923/jesd.363292>
- [40] Türkmen, D., & Köksal, N. S. (2013). Cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozit malzemelerde (CTP) elyaf tabaka sayısına bağlı mekanik özelliklerin ve darbe dayanımının incelenmesi. *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 17–30.
- [41] Esendemir, Ü., & Karaca, H. (2019). Düşük hızlı darbe yüküne maruz kompozit plakalara asidik ortamın etkisi. **Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi (Journal of Engineering Sciences and Design)*, 7(1), 26–33. <https://doi.org/10.21923/jesd.402295>
- [42] Aktaş, M., Ataş, C., İçten, B. M., & Karakuzu, R. (2009). Kompozit laminatların darbe tepkisinin deneysel bir incelemesi. *Kompozit Yapılar*, 87(4), 307–313. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.02.003>

- [43] Swolf'lar, Y., Gorbatikh, L., & Verpoest, I. (2014). Polimer kompozitlerde elyaf hibridizasyonu: Bir inceleme. *Kompozitler Bölüm A: Uygulamalı Bilim ve Üretim*, 67, 181–200. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.08.027>
- [44] Ismail, K. I., Sultan, M. T. H., Shah, A. U. M., Jawaid, M., & Safri, S. N. A. (2019). Low velocity impact and compression after impact properties of hybrid bio-composites modified with multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part B: Engineering*, 163, 455–463. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.026>
- [45] Muñoz, R., Seltzer, R., Sket, F., González, C., & Llorca, J. (2022). Influence of hybridisation on energy absorption of 3D woven composites under low-velocity impact loading: Modelling and experimental validation. *International Journal of Impact Engineering*, 165, 104229. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104229>
- [46] Barbaz-Isfahani, R., Dadras, H., Saber-Samandari, S., Taherzadeh-Fard, A., & Liaghat, G. (2023). A comprehensive investigation of the low-velocity impact response of enhanced GFRP composites with single and hybrid loading of various types of nanoparticles. *Heliyon*, 9(5), e15930. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15930>
- [47] Bunea, M., Cîrciumaru, A., Buciumeanu, M., Bîrsan, I. G., & Silva, F. S. (2019). Low velocity impact response of fabric reinforced hybrid composites with stratified filled epoxy matrix. *Composites Science and Technology*, 169, 242–248. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.11.024>
- [48] Hussain, M., Arif, S., Nawab, Y., Shaker, K., & Umair, M. (2022). Development of functional (flame-retardant and anti-bacterial) and hybrid (carbon-glass/epoxy) composites with improved low velocity impact response. *Polymer Composites*, 43(2), 889–905. <https://doi.org/10.1002/pc.26418>
- [49] Mahdi, T. H., Islam, M. E., Hosur, M. V., & Jeelani, S. (2017). Low-velocity impact performance of carbon fiber-reinforced plastics modified with carbon nanotube, nanoclay and hybrid nanoparticles. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36(9), 696–713. <https://doi.org/10.1177/0731684417693429>
- [50] Rawat, P., & Singh, K. K. (2017). Damage tolerance of carbon fiber woven composite doped with MWCNTs under low-velocity impact. *Procedia Engineering*, 173, 440–446. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.061>
- [51] Reddy, T. S., Reddy, P. R., & Madhu, V. (2016). Influence of hybridization on the performance of glass composites under low and high velocity impact. *Advanced Materials Letters*, 7(6), 491–496. <https://doi.org/10.5185/amlett.2016.6316>
- [52] Safri, S. N. A., Sultan, M. T. H., Cevaid, M., & Jayakrishna, K. (2018). Yapısal uygulamalar için hibrit kompozitlerin darbe davranışı: Bir inceleme. *Composites Part B: Engineering*, 133, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.008>

- [53] Shaari, N., Jumahat, A., & Razif, M. K. M. (2015). Impact resistance properties of Kevlar/Glass fiber hybrid composite laminates. *Jurnal Teknologi*, 76(3), 93–99. <https://doi.org/10.11113/jt.v76.5520>
- [54] Stephen, C., Mourad, A.-H. I., Shivamurthy, B., & Selvam, R. (2021). Energy absorption and damage assessment of non-hybrid and hybrid fabric epoxy composite laminates: Experimental and numerical study. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 3080–3091. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.108>
- [55] Santulli, C. (2019). Mechanical and impact damage analysis on carbon/natural fibers hybrid composites: A review. *Materials*, 12(3), 517. <https://doi.org/10.3390/ma12030517>
- [56] Sayer, M. (2009). Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi [Doktora tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı]. Pamukkale Üniversitesi.
- [57] Nayak, S., Sahoo, B. P., Nayak, R. K., & Panigrahi, I. (2024). Improvement of low-velocity impact and tribo-mechanical properties of unsymmetrical hybrid composites through addition of nanoclay. *Bulletin of Materials Science*, 47, 237. <https://doi.org/10.1007/s12034-024-03294-1>
- [58] Awla, N. J. (2023). An experimental and numerical investigation of mechanical properties of unidirectional fiber epoxy composite [Master's thesis, Erbil Polytechnic University]. Erbil Polytechnic University.
- [59] Rajeshkumar, G., Nagaraja, K. C., Ravikumar, P., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2024). Effect of halloysite addition on the dynamic mechanical and tribological properties of carbon and glass fiber reinforced hybrid composites. *Heliyon*, 10(15), e35554. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35554>
- [60] Bozkurt, L. (2011). Hibrit kompozit levhaların düşük hızlı darbe davranışı (Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [61] Liu, B., Wang, W., & Sutherland, L. (2023). Experimental and numerical response and failure of laterally impacted carbon/glass fibre-reinforced hybrid composite laminates. *International Journal of Impact Engineering*, 179, 104654. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104654>
- [62] Pheysey, J., Del Cuvillo, R., Naya, F., Pernas-Sanchez, J., De Cola, F., & Martinez-Hergueta, F. (2025). Low-velocity impact response of hybrid sheet moulding compound composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 188, 108527. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108527>
- [63] Dong, C. (2025). Carbon and glass fibre-reinforced hybrid composites in flexure. *Hybrid Advances*, 10, 100471.
- [64] Lin, S., Yang, H., Wu, Z., Peng, L., Ni, Q., & Li, Q. (2024). Effect of fiber layout on low-velocity impact response of intralaminar hybrid carbon/glass fiber braided

composite pipes under internal pressure. *Thin-Walled Structures*, 198, 111711. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111711>

[65] Lv, T., Yuan, B., Liu, Y., & Wang, D. (2025). Comparative analysis of damage and energy absorption mechanisms in various plain-weave fiber reinforced composites under multi-angle low-velocity impact. *Thin-Walled Structures*, 210, 113040. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113040>

[66] Ni, K., Chen, Q., Wen, J., Cai, Y., Zhu, Z., & Li, X. (2024). Low-velocity impact and post-impact compression properties of carbon/glass hybrid yacht composite materials. *Ocean Engineering*, 292, 116448. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116448>

[67] Anuse, V. S., K., S., Velmurugan, R., & Ha, S. K. (2023). Compression-After-Impact analysis of carbon/epoxy and glass/epoxy hybrid composite laminate with different ply orientation sequences. *Thin-Walled Structures*, 185, 110608.

[68] Liu, X., Kong, W., Song, S., & Wang, A. (2025). Impact properties and damage assessment of unidirectional aramid/carbon fiber hybrid reinforced polymer composites. *Thin-Walled Structures*, 209, 112898.

[69] Cheng, Z.-Q., Xia, J., Liu, H., Zhu, Z.-W., & Tan, W. (2025). Compressive failure mechanisms of fibre metal laminates with 2/1 and 3/2 configurations after low-velocity impact. *Thin-Walled Structures*, 211, 113112. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.113112>

[70] Luo, Z., Wang, H., Ng, C.-T., Fu, J., Zhang, Z., & Wang, C. (2024). On the low-velocity impact properties of CFRP/HAFRP interlayer hybrid fibre composite laminates. *Engineering Structures*, 315, 118387. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118387>

[71] Wang, C., Su, D., Xie, Z., Zhang, K., Wu, N., Han, M., & Zhou, M. (2021). Low-velocity impact response of 3D woven hybrid epoxy composites with carbon and heterocyclic aramid fibres. *Polymer Testing*, 101, 107314. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107314>

[72] Demirci, M. T., & Şahin, Ö. S. (2022). Effect of oil pressure upon filament wound basalt/glass fibers hybrid polymer based composite pipes subjected to low velocity impact. *Composite Structures*, 288, 115395. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115395>

[73] Ahamed, M. A. M., Dhakal, H. N., Zhang, Z., Barouni, A., Pillai, J. R., & Babaa, S. E. (2025). Low-velocity impact damage characteristics of flax/glass epoxy hybrid laminates on the influence of different temperatures: Experimental and numerical analysis. *Composite Structures*, 353, 118704. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.118704>

[74] Zhu, X., Deng, J., Heidari, A., Jamei, M., & Alizadeh, A. (2025). Mechanical performance evaluation of optimal hybrid composite fabricated with glass and carbon fibers and thermoplastic polypropylene matrix for fencing sports athletes. *International*

Communications in Heat and Mass Transfer, 160, 108346.
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108346>

[75] Chen, D., Luo, Q., Meng, M., Li, Q., & Sun, G. (2019). Low velocity impact behavior of interlayer hybrid composite laminates with carbon/glass/basalt fibres. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107191.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107191>

[76] Alshehri, A. H., Alamry, A., Rahimian Koloor, S. S., Alzahrani, B., & Arockiarajan, A. (2025). Investigating low velocity impact and compression after impact behaviors of carbon fiber/epoxy composites reinforced with helical multiwalled carbon nanotubes. *Journal of Engineering Research*.
<https://doi.org/10.1016/j.jengres.2025.03.005>

[77] Wan, Y., Yao, J., Li, H., Huang, Y., You, P., Xu, Y., & Lei, Z. (2022). Experimental studies of low-velocity impact behavior on hybrid metal wire net/woven carbon-fiber reinforced composite laminates. *Composites Communications*, 32, 101185. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2022.101185>

[78] Cengiz, A., Yildirim, I. M., & Avcu, E. (2024). Flexural and low velocity impact behaviour of hybrid metal wire mesh/carbon-fibre reinforced epoxy laminates. *Composites Communications*, 46, 101844. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2024.101844>

[79] Vescovini, A., Cruz, J. A., Ma, D., Colombo, C., Salerno, A., Bianchi, O., Amico, S. C., & Manes, A. (2024). Experimental investigation on low-velocity impact behavior of glass, Kevlar, and hybrid composites with an elastomeric polyurethane matrix. *Composites Part C: Open Access*, 13, 100426.
<https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100426>

[80] Ishtiaq, S., Saleem, M. Q., Naveed, R., Harris, M., & Khan, S. A. (2024). Glass–Carbon–Kevlar fiber reinforced hybrid polymer composite (HPC): Part (A) mechanical and thermal characterization for high GSM laminates. *Composites Part C: Open Access*, 14, 100468. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100468>

[81] Wang, Y., Wei, X., Li, Z., Gong, C., Xue, P., & Xiong, J. (2024). Low-velocity impact responses and failure of sandwich structure with carbon fiber composite honeycomb cores. *International Journal of Impact Engineering*, 192, 105034.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.105034>

[82] Gao, Y., Guo, W., & Baghaei, Sh. (2024). Ceramic based nanocomposites with alumina-carbon nanotube reinforcement for improved energy absorption in sports-related injuries: Microstructural analysis and low velocity impact. *Ceramics International*, 50, 11129–11137. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.12.456>

[83] Hinzmann, C., Johansen, N. F.-J., Hasager, C. B., & Holst, B. (2024). Towards greener wind power: Nanodiamond-treated flax fiber composites outperform standard glass fiber composites in impact fatigue tests. *Composites: Part A*, 186, 108342.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108342>

- [84] Üzümcü, N. (2017). Nano karbon partikül ile güçlendirilmiş kompozit levha üretimi ve darbe davranışının incelenmesi (Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü) <https://hdl.handle.net/11499/1999>
- [85] Lei, Z. X., Ma, J., Sun, W. K., Yin, B. B., & Liew, K. M. (2023). Low-velocity impact and compression-after-impact behaviors of twill woven carbon fiber/glass fiber hybrid composite laminates with flame retardant epoxy resin. *Composite Structures*, 321, 117253. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117253>
- [86] Ölmez, C., Sever, Z., & Güneş, S. (2023, Haziran). Kompozit malzemelerin mühendislik uygulamaları: Sınıflandırılması, mekanik hesaplamaları, üretim yöntemleri ve kullanım alanları. Ostim Teknik Üniversitesi. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub131.c723>
- [87] Kaya, A.İ. (2016). Kompozit Malzemeler ve Özellikleri. Temmuz Ağustos - Eylül 2016, 38-44.
- [88] Şenel, M. C., Gürbüz, M., & Koç, E. (2018). Toz metalürjisi metoduyla üretilen Al-Si₃N₄ metal matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 59(693), 33–46.
- [89] Şirin, K. (2024). Vasküler kanallı kendi kendini onaran cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu [Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi]. Balıkesir Üniversitesi Tez Arşivi.
- [90] Dokur, M. M. (2009). Karbon fiber esaslı polimerik matrisli kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [91] Sepet, H. (2014). Nano-partikül takviyeli yüksek yoğunluklu polietilen nanokompozitlerin üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması. (Yayınlanmış Yüksek lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [92] Sebaey, T. A., & Wagih, A. (2019). Flexural properties of notched carbon–aramid hybrid composite laminates. *Journal of Composite Materials*, 53(28–30). <https://doi.org/10.1177/0021998319855773>
- [93] Gök, Z. (2022). Prepreg kompozit boruların düşük hızlı darbe cevabına karbon nanotüp takviyesinin etkisinin incelenmesi [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
- [94] Yazıcı, M. (2012). Partikül Takviyeli Polyester Kompozitlerin Eğilme ve Basma Özellikleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(3), 153-15
- [95] Kalemtaş, A. (2014). Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış. *Putech & Composites*, 5(4), 18-28.
- [96] P. K. Mallick, *Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design*, third edition. 2007.

- [97] Ateş, F. (2024). Tabakalı kompozit levhaların balistik performanslarının incelenmesi (Yayınlanmamış yüksek lisans tezi). Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- [98] Bağcı, M. (2010). Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin erozyon aşınma davranışının incelenmesi (Doktora Tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya. 46
- [99] Y. Liu, B. Zwingmann, and M. Schlaich, “Carbon Fiber Reinforced Polymer for Cable Structures—A Review,” *Polymers (Basel)*, vol. 7, pp. 2078–2099, Oct. 2015, doi: 10.3390/polym7101501.
- [100] Bağcı, M. (2010). Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin erozyon aşınma davranışının incelenmesi (Doktora Tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya. 46
- [101] M. Ertekin, “Aramid fibers,” *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*, pp. 153–167, Jan. 2017, doi: 10.1016/B978-0-08-101871-2.00007-2.
- [102] Durgun, İ. (2014). El Yatırma Yöntemi ile Kompozit Parça Üretimi. 7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Ankara.
- [103] Dinkci, H. (2020). Vakum torbalamada basınç değişkeninin karbon elyaf matrisli epoksi yapılarda estetik ve mekanik özelliklere etkisi [Visual and mechanical properties effect of vacuum bag pressure variable on epoxy structures with carbon fiber matrix]. *Uluslararası Bilim, Teknoloji ve Tasarım Dergisi*, 1(1), 1–21. https://uludag.edu.tr/dosyalar/istd/2020-1/vakum_torbasi2.pdf
- [104] Akoğlu, M. (2023). Modüler Kompozit Enerji Direklerinin Tasarım, Analiz ve Üretimi (Yüksek Lisans Tezi). T.C. Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı. Danışman: Prof. Dr. Babür Deliktaş. ORCID: 0000-0002-9606-2294. Bursa.
- [105] Ngo, T. D. (Ed.). (2020). *Composite and Nanocomposite Materials: From Knowledge to Industrial Applications* (Chapter 1: Introduction to Composite Materials by Tri-Dung Ngo). BoD – Books on Demand.
- [106] Nas, E., Gökkaya, H., & Sur, G. (2013). Sıcak presleme yöntemi kullanılarak kompozit malzemelerin üretilebilirliği üzerine bir değerlendirme. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 3(2), 56-65.
- [107] Han, H., Wang, X., & Wu, D. (2012). Preparation, crystallization behaviors, and mechanical properties of biodegradable composites based on poly(L-lactic acid) and recycled carbon fiber. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(11), 1947–1958. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.07.015>
- [108] URL-3<https://www.deangeliprodotti.com/en/articles/how-an-accm-conductor-is-born/> (Haziran,2023)

- [109] Yelkenci, Ş. (2008). Plastik Enjeksiyon Kalıplama Teknikleri ve Özel Uygulamalar. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa
- [110] Ünal, N. (2012). Enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmiş olan seramik kompozitlerin ve sert mıknatısların geliştirilmesi ve karakterizasyonu (Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [111] Bayraktar, Ö. 2016." Ön Gerilimli Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Üretimi İçin Sistem Tasarımı, İmalatı ve Kompozit Malzeme Üretimi Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü S 18-24
- [112] Sas, H. S. (2009). İleri Kompozit Malzemelerin Reçine Transfer Kalıplama Yöntemiyle Üretiminde Kalıp İçi Reçine Akışının Modellenmesi. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/285131641>
- [113] Genç, Ç. & Arıcı, A. A. (2008). Yat imalatında kullanılan CTP malzeme ve imalat yöntemleri bölüm III: İnfüzyon yöntemi. Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi, (178), 16-21.
- [114] Çolak, M. (2019). Nano kompozit ve hibrit kompozitlerin üretim ve deneyleri sırasında insan sağlığını etkileyen riskler ile alınması gereken iş sağlığı ve güvenliği tedbirlerinin araştırılması (Yüksek lisans tezi). Sosyal Bilimler Enstitüsü, Denizli
- [115] Kim, J. K., & Mai, Y. W. (1998). Introduction to Fiber-Matrix Interfaces. In Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites (pp. 1-23). Elsevier.
- [116] Ajayan, P. M., Schadler, L. S., & Braun, P. V. (2003). Nanocomposite Science and Technology. In Nanocomposite Science and Technology (pp. 80-155). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- [117] Friedrich, K., Schulte, K., & Fakirov, S. (2005). Lightweight Applications and Multifunctionality in Nanocomposites. In Polymer Composites: From Nano- to Macro-Scale (pp. 85-135). Springer. <https://doi.org/10.1007/b137162>
- [118] N. H. Al-Mutairi, A. H. Mehdi, and B. J. Kadhim, "Nanocomposites Materials Definitions, Types and Some of Their Applications: A Review," European Journal of Research Development and Sustainability, vol. 3, no. 2, pp. 102–108, 2022.
- [119] <https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/polimer-matris-nanokompozitler-polymer.html>
- [120] Camargo, P. H. C., Satyanarayana, K. G., & Wypych, F. (2009). Nanocomposites: Synthesis, structure, properties and new application opportunities. Materials Research, 12(1), 1–39.
- [121] Kumar, S., Nehra, M., Dilbaghi, N., Tankeshwar, K., & Kim, K. H. (2018). Recent advances and remaining challenges for polymeric nanocomposites in healthcare applications. Progress in Polymer Science, 80, 1–38.

- [122] Martin, S. (2019). Investigation of tribological properties of graphene nanoplatelets reinforced metal matrix nanocomposites (Doctoral dissertation). Izmir Institute of Technology, Turkey.
- [123] Elham, F., & Muhammed, E. (2017). Nanotechnology: Future of environmental air pollution control. *Environmental Management and Sustainable Development*, 6(2), 429. <https://doi.org/10.5296/emsd.v6i2.12047>
- [124] Ateşcan, Y. (2015). Investigation of CNT smart paint for structural health monitoring in advanced and nano-enhanced carbon fiber composites (Master's Thesis). Istanbul Technical University, Graduate School of Science Engineering and Technology
- [125] Dindar, B. (2019). Elyaf takviyeli kompozitlerde nanopartikül katkısının yorulma, burkulma ve darbe davranışına etkisinin deneysel olarak incelenmesi [Experimental investigation of the effect of nanoparticulate additives on fatigue, buckling and impact behavior of fiber reinforced composites] (Doktora tezi). Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli. <https://hdl.handle.net/11499/3471>
- [126] Bilgiç, G., Balıkcıoğlu Güzel, A., & Şahin, M. (2025). Bor karbür: Fizikokimyasal özellikleri, sentez yöntemleri ve savunma teknolojileri alanında uygulamaları. *Khosbd*, 14(1). <https://doi.org/10.17134/khosbd.1403942>
- [127] Koç, i. H. (2024). Darbe yüküne maruz alüminyum kumaş katkılı kompozit plakaların deneysel ve nümerik olarak incelenmesi [yüksek lisans tezi, t.c. kahramanmaraş sütün imam üniversitesi fen bilimleri enstitüsü, makine mühendisliği anabilim dalı]. Kahramanmaraş, türkiye
- [128] Erdemir, F., & Reis, H. A. (2022). Metalik malzemelerin darbe testi deneyi: Laboratuvar föyü. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü.
- [129] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2021). *Materials science and engineering: An introduction*. John Wiley and Sons Australia.
- [130] Demirci, İ. (2023, May). Görüntü işleme ve yapay sinir ağları teknikleri ile uçak kanatlarında kullanılan karbon elyaf/bal peteği sandviç kompozitlerde düşük hızlı darbe davranışları üzerine nano grafenlerin etkilerinin incelenmesi [Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi].
- [131] Abrate, S. (2011). *Impact engineering of composite structures*. (1st ed.) Udine: Springer.
- [132] Albayrak, M. (2022). *Eğri yüzeylere sahip kauçuk takviyeli kompozitlerin darbe davranışlarının araştırılması* [Doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Elâzığ

[133]Gemi, L. (2014). *Düşük hızlı darbe hasarlı filaman sarım hibrid boruların iç basınç altında yorulma davranışı* [Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. DSpace@Selçuk Üniversitesi.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyad, Ad

ALTUNDAL, Esra

Web sayfası

(Research Gate, Academia, vs.)

Eğitim Bilgileri

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Dicle Üniversitesi	
Lisans	Harran Üniversitesi	2015
Lise	Atatürk Lisesi	1997

İş Deneyimi

Dönem (Yıl)	Şirket, Kurum	Görev
2018-2025	İl Sağlık Müdürlüğü	Makine Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1.Altundal, E.,&Örçen, G.(2025). Nano katkılı kompozit ve hibrit kompozit malzemelerde düşük hızlı darbe dayanımlarının araştırılması. Dicle Üniversitesi-3. Uluslararası Fen Bilimleri Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu (DUFEBLAS-2025)

Özel İlgiler

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ BENZERLİK BİLDİRİMİ FORMU

Öğrencinin Adı, Soyadı	Esra ALTUNDAL		
Öğrenci No	22818011		
Ana Bilim Dalı	Makine Mühendisliği		
Program Türü	Proje ☐	Yüksek Lisans ☒	Doktora ☐
Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	Doç. Dr. Gurbet ÖRÇEN		
(Varsa) II. Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)			
Tez Başlığı	Nano Katkılı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Davranışlarının Araştırılması		
RAPOR BİLGİLERİ			
Raporlama Aşaması	Tez Savunma Sınavı Sonrası		
Sayfa Sayısı	161		
Raporlama Tarihi	17.06.2025		
Benzerlik Oranı (%)	7		

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmamın toplam 161 sayfalık kısmına ilişkin, 12/06/2025 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından turnitin isimli intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 7 olarak tespit edilmiştir.

Uygulanan filtrelemeler:

- ☐Başlangıç Bölümleri (Kabul ve Onay sayfası, Teşekkür sayfası, Özet/Abstract) hariç
☒ Kaynaklar hariç
☐ Alıntılar hariç/dâhil
☐ Diğer (Açıklayınız)

Tezimin benzerlik oranı, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İntihal Raporu Uygulama Esaslarında belirtilen üst sınır benzerlik oranını aşmamaktadır. Tez benzerlik oranı üst sınır benzerlik oranının altında olsa dahi aksinin tespit edilmesi durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabul ettiğimi ve hukuki sonuçlarına razı olduğumu bildirir, gereğini arz ederim.

Öğrencinin Adı, Soyadı: Esra ALTUNDAL

Tarih: 17.06.2025

İmza:

Danışman Doç. Dr. Gurbet ÖRÇEN

İmza:

Tarih:

Ana Bilim Dalı Başkanı Prof. Dr.Sedat BİNGÖL

İmza:

Tarih: