

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KATKI MADDELERİNİN POLİMER ESASLI TERMOSET
KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE VE DARBE
DAYANIMINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

FATİH ÖZGÜL

DENİZLİ, OCAK - 2024

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



KATKI MADDELERİNİN POLİMER ESASLI TERMOSET
KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE VE DARBE
DAYANIMINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

FATİH ÖZGÜL

DENİZLİ, OCAK - 2024

**Bu tez alışması PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ BİLİMSEL
ARAŞTIRMA PROJELERİ tarafından 2017FEBE049 nolu proje ile
desteklenmiŐtir.**

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

Fatih ÖZGÜL

ÖZET

**KATKI MADDELERİNİN POLİMER ESASLI TERMOSET
KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE VE DARBE
DAYANIMINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**
DOKTORA TEZİ
FATİH ÖZGÜL
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. YASİN YILMAZ)

DENİZLİ, OCAK - 2024

Kompozit malzemelerin ağırlıklarına oranla üstün mukavemetleri başta havacılık, deniz araçları ve otomotiv sektörü olmak üzere birçok endüstriyel sektörde yaygın olarak kullanımını arttırmıştır. Bununla birlikte kompozit malzemelerin mukavemetlerini arttırmak için matris malzemesine mikro ve nano seviyede çok çeşitli katkı maddeleri ilave edilmektedir.

Bu çalışmada plain dokuma ve iki eksenli kıvrımsız dikişli E-cam takviyeli epoksi reçine kompozitlerine seramik nanokil, poliamid mikro kürecikleri ve karbon nanotüpleri olmak üzere üç farklı katkı maddesi ilave edilmiştir. Organik interkalasyonlu nanokil, küresel toz poliamid nanopartikülleri ve kısa çoğul duvarlı karbon nanotüplerin ayrı ayrı ve birlikte eklenmesiyle Cam Elyaf Takviyeli Epoksi (GFRE) kompozitlerin mekanik özellikleri ve düşük hızlı darbe davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Kompozit plakalardan deney numuneleri hazırlanarak çekme, basma, burkulma ve düşük hız darbe deneyleri yapılmıştır. Karbon nanotüplerin ağırlık oranı %0,3 iken diğer katkı maddelerinin ağırlık oranı, epoksi reçine-sertleştirici sisteminin %2'sine kadardır. Ayrıca, bu katkı maddeleri yine aynı oranlarda birlikte kullanılarak elde edilen karışımlar da kullanılmış ve her birinin etkisi karşılaştırılmıştır. Kompozit plakalar prepreg ve sıcak presleme teknikleri kullanılarak üretilmiştir. Nanopartikül ilavesi ile kompozitlerin çekme dayanımında %27'ye, basma dayanımında %10'a ve burkulma mukavemetinde yaklaşık %5'e kadar iyileşme gözlemlenmiştir.

Plakaların tamamen delinmesine kadar 10 J'den 45 J'e kadar farklı enerji seviyelerinde darbe testleri yapılmıştır. Plakaların hasar özelliklerini değerlendirmek için sonuçlar kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman ve ortaya çıkan fiziksel hasarların gözlemlenmesi açısından yorumlanmıştır. Nanopartiküllerin eklenmesi, GFRE plakaların pik yükünü (%22,6'ya kadar) ve hasar direncini (%40'a kadar) arttırarak, yüksek darbe enerjisi seviyelerinde kompozit malzemenin hasar mekanizmalarını düzlem dışından düzlem içi yöne doğru değiştirmiştir. Sonuç olarak, kullanılan katkı maddeleri ile kompozitlerin mekanik özelliklerinin ve düşük hız darbe dayanımının önemli ölçüde iyileştiği gözlemlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Epoksi, katkı maddeleri, mekanik özellikler, düşük hızlı darbe deneyi, nanokompozitler, GFRE.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF ADDITIVES ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND IMPACT STRENGTH OF POLYMER BASED THERMOSET COMPOSITES

**PH.D THESIS
FATİH ÖZGÜL**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING
(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. YASİN YILMAZ)**

DENİZLİ, JANUARY 2024

The usage of composite materials in various industrial applications, especially in aviation, marine and automotive sectors, is increased widely, due to high strength properties compared to their weights. To increase mechanical properties of a composite material, a variety of micro and nano sized additives are added into the matrix material.

In this study, ceramic nanoclay, polyamide microspheres and carbon nanotubes are used as an additive to plain woven and biaxial non crimp E-glass fabric reinforced epoxy resin composites. Mechanical properties and the low velocity impact behavior of Glass Fiber Reinforced Epoxy (GFRE) composites with the addition of organic intercalated nanoclay, spheroidal powder of polyamide nanoparticles and short multiwalled carbon nanotubes individually and together were investigated experimentally. The specimens are prepared from composite plates for tensile, compression, buckling and low velocity impact tests. The weight ratio of carbon nanotubes was 0.3%, while the weight ratio of the other additives was up to 2% of the epoxy resin-hardener system. In addition to this, these additives are tested when used together with same ratios and the effects of each mixture is compared. Composite laminates were manufactured using prepreg and hot-pressing techniques. With the addition of nanoparticles, an improvement of up to 27% in tensile strength, 10% in compressive strength and approximately 5% in buckling strength of the composites was observed.

Impact tests were carried out at different energy levels from 10 J to 45 J up to complete perforation of the laminates. To evaluate the damage characteristics of the laminates, the results are interpreted in terms of loadtime, load-displacement, energy-time, and observation of the physical damages introduced. Addition of nanoparticles increased the peak load (up to 22.6%) and damage resistance (up to 40%) of the GFRE laminates altering damage mechanisms of the composite material from out of plane to in-plane direction at higher impact energy levels. As a result of these experiments, it is observed that mechanical properties and low velocity impact strength of the composites are improved remarkably with the help of the additive materials.

KEYWORDS: Epoxy, additives, mechanical properties, low velocity impact testing, nanocomposites, GFRE.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
KISALTMALAR LİSTESİ	x
ÖNSÖZ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Genel Bilgiler	1
1.1.1 Elyaf Özellikleri.....	4
1.1.2 Matris Özellikleri.....	11
1.1.3 Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu	16
1.1.4 Kompozit Malzemelerin Özellikleri	19
1.1.4.1 Yüksek Mukavemet	19
1.1.4.2 Hafiflik	21
1.1.4.3 Korozyon Direnci.....	22
1.1.4.4 Tasarım Esnekliği.....	23
1.1.4.5 Dezavantajları	23
1.1.5 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	24
1.1.5.1 Açık Kalıplama	24
1.1.5.2 Kapalı Kalıplama	27
1.1.5.3 Polimer Döküm Kalıplama	35
1.1.6 Matris Malzemesinde Kullanılan Katkı ve Dolgu Maddeleri.....	38
1.2 Literatür Araştırması	45
1.2.1 Nano Partikül İlavesinin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi	46
1.2.2 Nano Partikül İlavesinin Darbe Dayanımına Etkisi.....	51
1.2.3 Kompozitlerle İlgili Diğer Çalışmalar	67
1.3 Amaç ve Kapsam.....	69
2. MATERYAL ve YÖNTEM.....	72
2.1 Malzeme	72
2.2 Kompozit Plaka İmalatı.....	74
2.2.1 Katkı Maddeleri ve Matrisin Hazırlanması	77
2.2.2 Dispersion	78
2.2.3 Prepreg Hazırlama	79
2.2.4 Kompozit Plakaların Kürlenmesi.....	80
2.2.5 Numune Boyutlarına Getirme.....	81
2.3 Deneylerde Kullanılan Cihazlar	82
2.3.1 Statik ve Dinamik Deney Cihazı	82
2.3.2 Ağırlık Düşürmeli Darbe Deney Cihazı	84
2.3.3 SEM İçyapı Görüntüleme	85
2.3.3.1 SEM Öncesi Hazırlık-Au/Pd Kaplama	85
2.3.3.2 FE-SEM Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu.....	87
2.3.3.3 EDX/EDS (Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi).....	87
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve BULGULAR.....	88

3.1	Dokuma Takviyeli Kompozitlerin Deneysel Çalışmaları	88
3.1.1	Çekme Deneyleri	88
3.1.2	Basma Deneyleri	94
3.1.3	Burkulma Deneyleri	98
3.1.4	Darbe Deneyleri	100
3.1.4.1	Kuvvet-Zaman Eğrileri	104
3.1.4.2	Kuvvet-Deplasman Eğrileri	107
3.1.4.3	Enerji-Zaman Eğrileri ve Perforasyon Eşikleri	109
3.1.4.4	Fiziksel Hasarın Karakterizasyonu	111
3.1.5	SEM Görüntüleri	116
3.2	Kıvrımsız Dikişli Takviyeli Kompozitlerin Deneysel Çalışmaları ..	122
3.2.1	Çekme Deneyleri	123
3.2.2	Basma Deneyleri	129
3.2.3	Darbe Deneyleri	135
3.2.3.1	Kuvvet-Zaman Eğrileri	138
3.2.3.2	Kuvvet-Deplasman Eğrileri	141
3.2.3.3	Enerji-Zaman Eğrileri ve Perforasyon Eşikleri	144
3.2.3.4	Fiziksel Hasarın Karakterizasyonu	148
3.2.4	SEM Görüntüleri	151
4.	SONUÇ ve ÖNERİLER	162
4.1	Sonuçlar	162
4.2	Öneriler	167
5.	KAYNAKLAR	168
6.	EKLER	178
EK A	İçyapı Görüntüleme	178
A.1	İLTAM Hakkında Bilgi	178
A.2	FESEM Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu	178
A.2.1	Teknik Özellikleri	179
A.2.2	Dedektör Tipleri	179
A.2.3	Uygulama Alanları	180
EK B	İstatistiksel Analizler	181
7.	ÖZGEÇMİŞ	189

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Kompoziti oluşturan ana ögeler (Acma, 2016).....	3
Şekil 1.2: Fiberlerin boyutlarına göre sınıflandırılması.	5
Şekil 1.3: Ana eksenlerin ve yüklenme eksenlerinin tanımı.	17
Şekil 1.4: Tek yönlü sürekli lif 0° laminanın gerilme uygulamaları a) Boyuna çekme gerilmesi, b) Enine çekme gerilmesi, c) Düzlem içi kayma gerilmesi.	18
Şekil 1.5: El yatırma yöntemi şeması.....	25
Şekil 1.6: Elyaf püskürtme yöntemi şeması.....	26
Şekil 1.7: Elyaf sarma yöntemi şeması.	27
Şekil 1.8: Vakum torbalama yöntemi şeması.....	27
Şekil 1.9: Vakum infüzyon yöntemi şeması.	29
Şekil 1.10: Reçine transfer kalıplama yöntemi şeması.	29
Şekil 1.11: Basınçlı kalıplama yöntemi şeması.....	31
Şekil 1.12: Profil çekme yöntemi şeması.....	32
Şekil 1.13: Enjeksiyon kalıplama yöntemi şeması.....	33
Şekil 1.14: Döndürme kalıplama yöntemi şeması.....	34
Şekil 1.15: Sürekli çekme yöntemi şeması.	35
Şekil 1.16: Döküm kalıplama yöntemi şeması (Blagojević, 2020).....	37
Şekil 1.17: Katı yüzey kalıplama yöntemi şeması (Blagojević, 2020).	38
Şekil 2.1: SEM görüntüleri a) Poliamid, b) Nanokil, c) Karbon nanotüp.....	73
Şekil 2.2: Takviye malzemesi 0°/90° düz (plain) dokuma cam elyaf kumaş. ..	75
Şekil 2.3: Takviye malzemesi 0°/90° kıvrımsız dikişli cam elyaf kumaş.....	76
Şekil 2.4: Katkı maddelerinin hassas terazi ile tartılması.	76
Şekil 2.5: Homojenizasyon a) Sonikatör, b) Soğutma sistemi.....	79
Şekil 2.6: Kumaşa reçine emdirme işlemi.....	79
Şekil 2.7: Prepreg üretimi.	80
Şekil 2.8: Kompozit plakalar hazırlanması a) Prepreglerden katmanların oluşturulması, b) Tabakaların sıcak preste kürlenmesi.	81
Şekil 2.9: Su jeti ile kesim için örnek şablon.	81
Şekil 2.10: Su jeti ile numune boyutlarına kesme.....	82
Şekil 2.11: Instron 8801 Statik ve Dinamik Deney Cihazı.	83
Şekil 2.12: Video ekstansometre ile deneyin yapılışı.	84
Şekil 2.13: Instron-Dynatup 9250 HV darbe deneyi cihazı.	85
Şekil 2.14: Numune kaplama cihazı.....	86
Şekil 2.15: Au/Pd a) Kaplama işlemi, b) Kaplanmış numuneler.	86
Şekil 2.16: ZEISS-Supra 40VP alan emisyon taramalı elektron mikroskobu. .	87
Şekil 3.1: Deney cihazı a) Instron 8801, b) Örnek mekanik deneyi.	89
Şekil 3.2: Çekme deneyi yapılmış %2 nanokil katkılı numune örneği.	89
Şekil 3.3: Çekme cihazına ait örnek ekran görüntüsü.....	90
Şekil 3.4: Elastisite modülü grafiği.....	92
Şekil 3.5: Çekme dayanımı grafiği.....	92
Şekil 3.6: Kopma uzaması grafiği.....	93
Şekil 3.7: Maksimum kuvvet grafiği.....	93
Şekil 3.8: Basma deneyi a) Numune boyutları, b) Numune örneği, c) Deney görseli.	94

Şekil 3.9: Basma modülü grafiği.....	96
Şekil 3.10: Basma dayanımı grafiği.....	96
Şekil 3.11: Basma uzaması grafiği.....	97
Şekil 3.12: Maksimum basma kuvveti grafiği.....	97
Şekil 3.13: Burkulma deneyi uygulanmış numune örneği.....	98
Şekil 3.14: Burkulma modülü grafiği.....	99
Şekil 3.15: Kritik burkulma kuvveti grafiği.....	100
Şekil 3.16: Darbe testi uygulanmış numune örneği.....	101
Şekil 3.17: Kuvvet – zaman eğrileri a) 10 J, b) 20 J, c) 30 J, d) 35 J, e) 40 J, f) 45 J darbe enerjisinde.....	105
Şekil 3.18: Kuvvet – deplasman eğrileri a) 10 J, b) 20 J, c) 30 J, d) 35 J, e) 40 J, f) 45 J darbe enerjisinde.....	108
Şekil 3.19: Enerji – zaman eğrileri a) 10 J, b) 20 J, c) 30 J, d) 35 J, e) 40 J, 45 J darbe enerjisinde.....	110
Şekil 3.20: 20 J enerji seviyesinde darbeye uğramış plakaların ön ve arka yüzlerinin görüntüleri a) Katkısız, b) PA, c) NC, d) PA+NC.....	112
Şekil 3.21: 40 J enerji seviyesinde darbeye uğramış plakaların ön ve arka yüzlerinin görüntüleri a) Katkısız, b) PA, c) NC, d) PA+NC.....	114
Şekil 3.22: Hasar alanı örneği (NC kompozit 20 J).....	116
Şekil 3.23: Nanokompozitlerin SEM görüntüleri a) PA, b) NC, c) PA+NC.....	117
Şekil 3.24: Nanokompozitlerin SEM görüntüleri a) 100X, b) 500X, c) 3000X.....	118
Şekil 3.25: Poliamid ve nanokil katkı maddelerinin ve %2 nano katkılı PA, NC kompozitlerinin EDX analizleri.....	120
Şekil 3.26: %2 NC kompozitinin EDX-MAPPING görüntüleri.....	121
Şekil 3.27: %2 PA kompozitinin EDX-MAPPING görüntüleri.....	122
Şekil 3.28: Numune boyutları a) Fiber yönünde, b) Fibere dik yönde (Sayer 2009).....	124
Şekil 3.29: E-modülü grafiği a) Fiber yönünde, b) Fibere dik yönde.....	126
Şekil 3.30: Çekme dayanımı grafiği a) Fiber yönünde, b) Fibere dik yönde.....	127
Şekil 3.31: Kopma uzaması grafiği a) Fiber yönünde, b) Fibere dik yönde.....	128
Şekil 3.32: Maksimum kuvvet grafiği a) Fiber yönünde, b) Fibere dik yönde.....	129
Şekil 3.33: Modifiye IITRI basma aparatı ve numune boyutları.....	130
Şekil 3.34: Basma deneyleri için hazırlanan örnek numune, a) Deney numunesi, b) Basma aparatı.....	131
Şekil 3.35: Basma modülü grafiği a) Fiber yönünde, b) Fibere dik yönde.....	133
Şekil 3.36: Basma dayanımı grafiği a) Fiber yönünde, b) Fibere dik yönde.....	134
Şekil 3.37: Kuvvet–zaman eğrileri a) 15 J, b) 20 J, c) 25 J, d) 30 J, e) 35 J darbe enerjisinde.....	138
Şekil 3.38: Kuvvet–deplasman eğrileri a) 15 J, b) 20 J, c) 25 J, d) 30 J, e) 35 J darbe enerjisinde.....	142
Şekil 3.39: Enerji–zaman eğrileri a) 15 J, b) 20 J, c) 25 J, d) 30 J, e) 35 J darbe enerjisinde.....	146
Şekil 3.40: 20 J enerji seviyesinde darbeye uğramış kompozit plakaların ön ve arka yüzlerinin görüntüleri a) Katkısız, b) Poliamid, c) Nanokil, d) Karbon nanotüp katkılı.....	149
Şekil 3.41: 35 J enerji seviyesinde darbeye uğramış kompozit plakaların ön ve arka yüzlerinin görüntüleri a) Katkısız, b) Poliamid, c) Nanokil, (d) Karbon nanotüp katkılı.....	150
Şekil 3.42: SEM görüntüleri a) Karbon nanotüp, b) Nanokil, c) Poliamid partikülleri.....	151

Şekil 3.43: Karbon nanotüp parçacıklarının EDX analizi.....	152
Şekil 3.44: Nanokompozitlerin SEM görüntüleri a) 100X, b) 500X, c) 3000X büyütmede.	153
Şekil 3.45: Bisfenol-A diglisidil eter (DGEBA) epoksi reçinesinin kimyasal sentezi.....	154
Şekil 3.46: Katkısız deney numunesinin EDX analizi.	155
Şekil 3.47: KNT numunesinin EDX analizi.....	156
Şekil 3.48: NC numunesinin EDX analizi.	157
Şekil 3.49: PA numunesinin EDX analizi.....	158
Şekil 3.50: NC+KNT numunesinin EDX analizi.....	159
Şekil 3.51: PA+KNT numunesinin EDX analizi.	160
Şekil 3.52: NC+PA+KNT numunesinin EDX analizi.	161

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Yaygın olarak kullanılan liflerin özellikleri.	9
Tablo 1.2: Kompozit malzemenin avantajları.	19
Tablo 1.3: Kompozit malzemenin dezavantajları.	23
Tablo 2.1: Takviye elemanı ve matris malzemelerinin mekanik özellikleri.	72
Tablo 2.2: Katkı maddelerinin fiziksel özellikleri.	74
Tablo 2.3: Araştırılan dokuma kumaş takviyeli kompozit plakalar.	77
Tablo 2.4: Araştırılan iki eksenli kumaş takviyeli kompozit plakalar.	78
Tablo 3.1: Çekme deneyi sonuçları.	91
Tablo 3.2: Basma deneyi sonuçları.	95
Tablo 3.3: Burkulma deneyi sonuçları.	99
Tablo 3.4: Darbe deneyi sonuçları.	103
Tablo 3.5: Hasar alanlarının karşılaştırılması.	115
Tablo 3.6: Çekme deneyi sonuçları.	125
Tablo 3.7: Basma numunesinin boyutları.	130
Tablo 3.8: Basma deneyi sonuçları.	132
Tablo 3.9: Darbe deneyi sonuçları.	136
Tablo B.1: Dokuma takviyeli kompozitler (Maks. Kuvvet).	181
Tablo B.2: Dokuma takviyeli kompozitler (Çekme Dayanımı).	181
Tablo B.3: Dokuma takviyeli kompozitler (Kopma Uzaması).	182
Tablo B.4: Dokuma takviyeli kompozitler (Elastisite Modülü).	182
Tablo B.5: Dokuma takviyeli kompozitler (Maks. Basma Kuvveti).	183
Tablo B.6: Dokuma takviyeli kompozitler (Basma Dayanımı).	183
Tablo B.7: Dokuma takviyeli kompozitler (Basma Uzaması).	184
Tablo B.8: Dokuma takviyeli kompozitler (Basma Modülü).	184
Tablo B.9: Dokuma takviyeli kompozitler (Kritik Burkulma Kuvveti).	185
Tablo B.10: Dokuma takviyeli kompozitler (Burkulma Modülü).	185
Tablo B.11: Kıvrımsız dikişli takviyeli kompozitler (Maks. Kuvvet).	186
Tablo B.12: Kıvrımsız dikişli takviyeli kompozitler (Çekme Dayanımı).	186
Tablo B.13: Kıvrımsız dikişli takviyeli kompozitler (Kopma Uzaması).	187
Tablo B.14: Kıvrımsız dikişli takviyeli kompozitler (Elastisite Modülü).	187
Tablo B.15: Kıvrımsız dikişli takviyeli kompozitler (Basma Dayanımı).	188
Tablo B.16: Kıvrımsız dikişli takviyeli kompozitler (Basma Modülü).	188

SEMBOL LİSTESİ

E_{11}	:	Boyuna Young Modülü
V_f	:	Fiberin Hacim Oranı
V_m	:	Matrisin Hacim Oranı
E_f	:	Fiberin Modülü
E_m	:	Matrisin Modülü
E_{22}	:	Enine (Transvers) Young Modülü
G_{12}	:	Düzlem İçi Kayma Modülü
ν_{12}	:	Poisson Oranı
X^T	:	Fiber Yönündeki Çekme Mukavemeti
E_1^T	:	Fiber Yönündeki Elastisite Modülü
Y^T	:	Fiber Yönüne Dik Doğrultudaki Çekme Mukavemeti
E_2^T	:	Fiber Yönüne Dik Doğrultudaki Elastisite Modülü
E_1^C	:	Fiber Yönündeki Basma Modülü
E_2^C	:	Fiber Yönüne Dik Doğrultudaki Basma Modülü
X^C	:	Fiber Yönündeki Basma Mukavemeti
Y^C	:	Fiber Yönüne Dik Doğrultudaki Basma Mukavemeti
ϵ_1^C	:	Fiber Yönündeki Basma Gerinimi
ϵ_2^C	:	Fiber Yönüne Dik Doğrultudaki Basma Gerinimi

KISALTMALAR LİSTESİ

ACMA	:	Amerikan Kompozit Üreticileri Birliği
Al₂O₃	:	Alümina
AR	:	Alkali Dirençli
AsB	:	Açı Duyarlı Geri Saçılımlı Dedektör
ASTM	:	Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
ATH	:	Alümina Trihidrat
Au	:	Altın
BA	:	İki Eksenli
BFR	:	Bazalt Elyaf Takviyeli
BMC	:	Yığın Kalıplama
BNNP	:	Bor Nitrat Nanoplatelet
BPA	:	Bisfenol-A
BSE	:	Geri Saçılan Elektronlar
C	:	Karbon
CAI	:	Darbe Sonrası Bası Testi
CaO	:	Kalsiyum Oksit
CFRP	:	Karbon Fiber Takviyeli Plastik
CI	:	Güven Aralığı
CNF	:	Karbon Nanofiber
CSP	:	Çekirdek Kabuk Polimer
CV	:	Varyasyon Katsayısı
DCPD	:	Disiklopentadien
DGEBA	:	Diglisidil Eter Bisfenol-A
DMA	:	Dimetil Anilin
DWCNT	:	Çift Duvarlı Karbon Nanotüp
EDS	:	Enerji Dağılımlı Spektroskopi
EDX	:	Enerji Dağılımlı X-Işını Analizi
FE-SEM	:	Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu
FR	:	Yanma Geciktirici
FRP	:	Elyaf Takviyeli Plastik
GFRE	:	Cam Elyaf Takviyeli Epoksi
GnP	:	Grafit Nanoplatelet
GP	:	Genel Amaçlı
HANR	:	Hidroksiapatit Nanorod
HCF	:	Yüksek Çevrim Yorulma
HLU	:	El Yatırma Yöntemi
HV	:	Yüksek Vakum
İLTAM	:	İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
KNT	:	Karbon Nanotüp
LCF	:	Düşük Çevrim Yorulma
LVI	:	Düşük Hızlı Darbe
MEKP	:	Metiletilketon Peroksit
MMT	:	Montmorillonit
MWCNT	:	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
NC	:	Nanokil
PA	:	Poliamid
PAN	:	Poliakrilonitril

PAP	:	Polikaproamid
PBA	:	Polibütül Akrilat
Pd	:	Paladyum
PET	:	Poletilen Teraftalat
PLA	:	Polilaktik Asit
PMMA	:	Polimetil Metakrilat
PP	:	Polipropilen
PVA	:	Polivinil Alkol
PVC	:	Polivinil Klorür
RRIM	:	Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi
RTM	:	Reçine Transfer Kalıplama
SE	:	İkincil Elektronlar
SEM	:	Taramalı Elektron Mikroskobu
SiC	:	Silisyum Karbür
SiO₂	:	Silika
SMC	:	Levha Kalıplama
SMC	:	Levha Kalıplama
S-MW	:	Kısa Çoğul Duvarlı
SRIM	:	Yapısal Tepkimeli Enjeksiyon Kalıplama
SS	:	Standart Sapma
SWCNT	:	Tek Duvarlı Karbon Nanotüp
TBC	:	Tersiyer Bütül Katekol
TMC	:	Kalın Kalıplama
TPE	:	Termoplastik Elastomer
UD	:	Tek Eksenli
UPR	:	Doymamış Polyester Reçineler
UV	:	Ultraviyole
VARTM	:	Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama
VIP	:	Vakum İnfüzyon Yöntemi
VP	:	Değişken Basınç

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yapılabilmesi için her konuda destek olan ve yol gösteren değerli danışman hocam Doç. Dr. Yasin YILMAZ'a, yardımını hiç esirgemeyen Arş. Gör. İnan AĞIR'a, varlığını ve rehberliğini hep yanımda hissettiğim Prof. Dr. Numan Behlül BEKTAŞ'a (merhum), gösterdiği sabırdan ötürü aileme teşekkürü bir borç bilirim.

1. GİRİŞ

Malzeme teknolojisindeki araştırmalar, yüksek mukavemet, hafiflik, hasar direnci ve optimize maliyet gibi birçok gelişmiş özelliğe aynı zamanda sahip olan çok fonksiyonlu mühendislik malzemelerine odaklanmıştır. Kompozit malzeme, heterojen karışım halinde en az iki maddenin bir araya gelmesi olarak tanımlanır. İstenen mekanik özellikleri elde etmek için iki veya daha fazla malzemenin makroskopik ölçekte belirli bir şekilde birleştirilmesidir. Çok geniş kullanım alanına sahip olan kompozit malzemelerde, yüksek mukavemet ve hafifliğin yanı sıra darbe yüklerine karşı uygun cevabı vermesi istenir. Kompozitler dayanıklı ve hafiftir. Kompozitlerle üretilen ürünler hava koşullarından ve kimyasallardan kaynaklanan korozyona karşı dayanıklıdır ve uzun ömürlüdür. Kompozitler esnek ve karmaşık şekillerde kalıplanabilir ve tasarımcılara neredeyse her şekli veya formu oluşturma özgürlüğü verir.

Termoset polimerlerin en önemli sınıfı olan epoksi reçineler ve elyaf takviyeli epoksi reçine kompozitler; üstün mekanik, termal ve elektriksel özelliklerinden dolayı yapısal uygulamalarda; özellikle otomotiv, savunma ve havacılık endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte epoksi reçinelerin oldukça kırılgan bir yapıda ve çatlak ilerlemesine karşı zayıf bir dirence sahip olması çoğu uygulamada kullanımını sınırlamaktadır. Nanometre boyutundaki katkı ve dolgu maddelerinin polimer matrislerle kombinasyonu neticesinde polimerin malzeme özelliklerini iyileştirme çabalarının yoğunlaştığı görülmektedir (Lin, 2006, Njuguna, 2008 ve Azeez, 2013). Nanoparçacık katkılı polimerler katkısız polimerler ile karşılaştırıldığında benzersiz mekanik, optik, elektriksel ve manyetik özellikler gösteren uygulamalar olarak günümüzde yükselen bir trenddir.

1.1 Genel Bilgiler

Yapısal elemanlar dört ana kategoriye -metaller, seramik malzemeler, polimerler, kompozitler- ayrılabilir. Modern teknolojiler, geleneksel metal alaşımlar,

seramikler ve polimerik malzemeler tarafından karşılanamayan özellikler kombinasyonuna sahip malzemelere gereksinim duymaktadır. Sertlik, tokluk ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi benzersiz özellikler üretmek için metaller, seramikler, camlar, polimerler ve çimento kombine edilebilir. Kompozit, iki veya daha fazla farklı malzemedan yapılan ve birleştirildiklerinde tek başlarına bu malzemelerden daha dayanıklı olan bir malzemedir. Kompozit malzemeleri en genel halde, şekil ve malzeme kompozisyonu bakımından birbirinden farklı birbirine göre üstün ve zayıf yönleri olan ve birbiri içerisinde çözünmeyen farklı fiziksel veya kimyasal özelliklere sahip en az iki veya daha fazla malzemenin, kullanım yerindeki aranan özellikleri karşılayabilecek daha uygun bir malzeme oluşturabilmek için makro düzeyde bir araya getirilmesiyle tek başlarına birleştirildikleri malzemelerden daha dayanıklı olan yeni bir malzeme elde edilmesi olarak tanımlayabiliriz. Bu şekilde, her biri belli bir özelliği ile iyi olan malzemeler kompozitin bir fazını oluşturacak şekilde bir araya getirilip, birbirlerinin zayıf kalan yönlerini iyileştirmek ve istenilen yönde daha üstün özellik sağlamak amaçlanmaktadır. Basitçe ifade etmek gerekirse, kompozitler bileşenlerin bir kombinasyonudur. Sektörde kompozitler, farklı fiziksel ve/veya kimyasal özelliklerde bir araya gelerek daha mukavim olan iki veya daha fazla doğal veya yapay elementin birleştirilmesiyle yapılan malzemelerdir. Bileşen malzemeler tamamen karışmaz veya bireysel özelliklerini kaybetmez; sonucu veya nihai ürünü iyileştirmek için en yararlı özelliklerini birleştirir ve katkıda bulunurlar. Kompozitler genellikle daha fazla dayanım, verimlilik veya kalıcılık gibi belirli bir kullanım ihtiyaçları göz önünde bulundurularak tasarlanır. Üreticiler, tasarımcılar ve mühendisler kompozit malzemelerin yüksek kaliteli, dayanıklı ve uygun maliyetli ürünler üretme kabiliyetini sektördeki ihtiyaçlara cevap vermesini sağlar. Kompozitler sayesinde sorunları çözer, üretimin performans seviyelerini yükseltir ve yeni inovasyonların geliştirilmesini sağlar.

Elyaf takviyeli polimer (FRP) kompozitler olarak da bilinen kompozit malzemeler; cam, karbon veya aramid elyaf gibi mühendislik ürünü, insan yapımı veya doğal lif ya da başka bir takviye malzemesinin ve bir polimer matrisin bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Kompozit malzemeler Şekil 1.1'de gösterildiği gibi iki aşamadan oluşur; biri yükü taşıyan, takviye malzemesi olarak görev yapan elyaf olarak adlandırılır, diğeri ise sürekli olan ve diğeri fazı çevreleyen, genellikle dağınık faz olarak adlandırılan matris olarak adlandırılır. Fiber takviyeli kompozit

malzemelerde, dayanıklı ancak kırılabilir olan elyaf matrisi takviye etmek için yükü taşıyıp mukavemet ve rijitlik sağlar, çatlaklara ve kırılmalara direnmesine yardımcı olur. Genel olarak cam, karbon, aramid, bazalt ve doğal lifler kullanılmaktadır. Esnek matris, şekil verir, yükü lifler arasında aktarır, fiberleri çevresel ve harici hasarlardan korur ve kompozitin tokluğunu sağlar. Genel olarak matrisler; polimer termoset ve termoplastik, metal ve seramik esaslı matris olarak sınıflandırılmaktadır. Kompozit, bileşen malzemelerin her birinin en iyi özelliklerinin kombinasyonunu sergileyecek şekilde tasarlanmıştır. Yaygın olarak kullanılan kompozit malzemeler, yüksek mukavemetli ve yüksek sertlikte liflerden yapılır ve bir matris tarafından bir arada tutulur. Kompozitlerin performansları, liflerin mekanik özelliklerine, yönüne, uzunluğuna, şekline ve bileşimine; reçinenin mekanik özelliklerine, lifler ile matris arasındaki bağa bağlıdır. Üretim kolaylığı, yüksek kırılma enerjisi ve düşük maliyet potansiyeli kompozit malzemelerin tercih sebebi olarak öne çıkan ana özellikleridir. Pek çok durumda daha sert ve daha yüksek mukavemetli liflerle uyumlu bir matriste bir takviye fazı ve bir bağlayıcı faz kullanılır. Önce cam elyafları ile başlamış, ardından daha yeni yüksek performanslı elyaflar takip etmiştir. Cam, aramid ve karbon gibi sürekli fiberler, fiberleri bir arada tutan ve aralarında yükü aktaran termoset reçine matrisine (polyester, vinil ester veya epoksi) gömülmüştür. Tipik bir örnek olarak karbon fiber kompozitlerin genel olarak havacılık ve spor malzemeleri uygulamalarında kullanımı gösterilebilir.



Şekil 1.1: Kompoziti oluşturan ana öğeler (Acma, 2016).

Polimer esaslı kompozitlerde E-camı, S-camı, karbon elyaf (fiber) ve aramid elyaf gibi takviye malzemeleri kullanımı yanında matris olarak da en çok epoksi, polyester ve vinilester gibi reçineler kullanılır. Kolay şekil verilebilir olmaları, yüksek mukavemet, rijitlik, metallere oranla düşük yoğunlukta olmaları, üstün yüzey kalitesi ve korozyona karşı direnci elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerin kullanımının yaygın

olarak tercih edilmesindeki en önemli nedenleridir. FRP kompozitler ayrıca nihai ürünün üretim sürecini, görünümünü ve performansını iyileştirmek için tasarlanmış dolgu maddeleri, katkı maddeleri, çekirdek malzemeler veya yüzey kaplamaları içerebilir.

Fiberler oldukça farklı mukavemet ve sertlik özelliklerine sahiptir ve fiberin bir matris ile birlikte kullanılacağı düşünülmelidir. Polimerik matrisli bir kompozitte matris, fibere kıyasla neredeyse ihmal edilebilir bir mukavemete ve rijitliğe sahiptir. Toplam kompozit hacmindeki elyaf hacmi (fiber hacim oranı) yaklaşık olarak %60 olacağından, mukavemet ve rijitlik benzer bir yüzde ile seyretililecektir, yani %40'lık bir rijitlik ve mukavemet kaybı meydana gelecektir. Ek olarak, yükler kesinlikle bir yönde değilse, liflerin bir kısmının ana yük yönünden farklı olarak hizalanması gerekecektir. Bu, herhangi bir yöndeki dayanımı ve rijitliği daha da azaltır. Bununla birlikte, deneyimler anlamlı yapısal avantajların elde edilebileceğini göstermiştir. Şu anda, uçaklardaki kompozit uygulamalar genellikle ağırlıkta yaklaşık %30 azalma sağlamaktadır.

Kompozit malzemeler takviye elemanının tipine göre üç tipe ayrılır; lifli kompozitler, parçacıklı kompozitler, lamine kompozitler. Lifli kompozitler, bir malzemenin matris malzemesi içindeki liflerinden oluşur. Parçacıklı kompozitler, bir materyalin matrisindeki makro boyutlu partiküllerinden oluşur. İlk iki tip kompozitler dahil olmak üzere farklı malzemelerin katmanlarından oluşan kompozit türü lamine kompozitlerdir (Reddy, 2004).

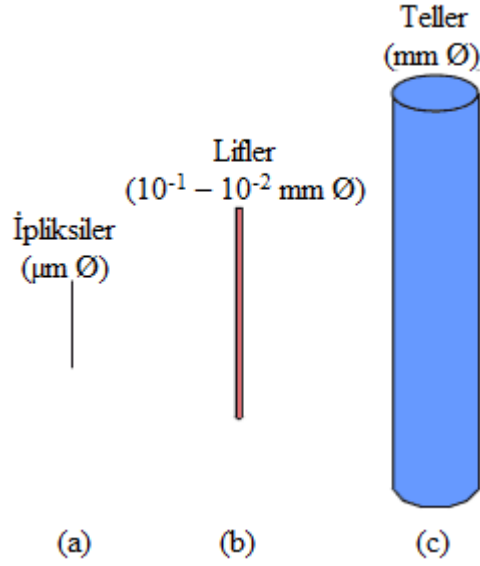
1.1.1 Elyaf Özellikleri

FRP kompozitlerinin mekanik özellikleri, belirli bir hizmet için seçilen elyafın türüne, miktarına ve yönüne bağlıdır. Elyaf takviyeleri, bir yönde mukavemet ve sertlik sağlamak için elyafın uzunluğu boyunca yük taşır. Takviyeler, son ürüne uygulanan yükler doğrultusunda spesifik özellikler sağlamak üzere yönlendirilebilir. Birçok malzeme polimerleri takviye edebilir. Ahşapta bulunan selüloz gibi bazı malzemeler doğal olarak oluşan ürünlerdir. Ancak ticari takviyelerin çoğu sentetik ürünlerdir. Kullanıcının tasarım gereksinimlerini karşılamak için ticari olarak mevcut birçok takviye formu vardır.

Fiberler, kompozit malzemedeki temel yükü taşıyan en büyük hacim oranına sahip ana bileşendir. Özgül ağırlık, çekme mukavemeti ve modülü, basma mukavemeti ve modülü, yorulma mukavemeti, elektriksel, termal iletkenlikler ve maliyet gibi kompozit malzemelerin özelliklerini etkilediğinden, liflerin tipi, miktarı ve yönünün doğru seçimi çok önemlidir.

Lifler çap ve karaktere göre üç farklı sınıfa ayrılır (Şekil 1.2):

- a) İplikçiler,
- b) Lifler,
- c) Teller.



Şekil 1.2: Fiberlerin boyutlarına göre sınıflandırılması.

İplikçiler: Son derece büyük uzunluk-çap oranlarına sahip çok ince tek kristallerdir. Küçük boyutları nedeniyle, yüksek derecede kristalize mükemmelliğe sahip olmaları ve neredeyse kusursuz olmaları olağanüstü yüksek mukavemetini açıklar. İplikçiler, bu yüksek mukavemetlerine rağmen takviye malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmamaktadır. Çünkü olağanüstü pahalıdırlar. Ayrıca, iplikçileri bir matrise dahil etmek zordur ve çoğu zaman pratik değildir. İplikçi malzemeleri grafit, silisyum karbür, silisyum nitrür ve alüminyum oksit içerir.

Lifler: Ya polikristal ya da amorf bir yapıdadır. Lifli malzemeler küçük çaplara sahiptir. Genellikle ya polimerler ya da seramikler lifli malzemelerdir (Örneğin,

polimer aramidler, cam, karbon, bor, alüminyum oksit ve silisyum karbür). Genel olarak, fiberler tek yönlü veya dokuma kumaş halindedir.

İnce teller: Nispeten büyük çaplara sahiptir, tipik malzemeler arasında çelik, molibden ve tungsten bulunur. Otomobil lastiklerinde, filament sargılı roket kasalarında ve tel sargılı yüksek basınç hortumlarında radyal çelik takviyesi olarak kullanılmaktadır.

Kompozitlerde takviye olarak birçok elyaf formu kullanılsa da cam elyaflar üretimi ucuz olduğu ve nispeten iyi mukavemet-ağırlık oranına sahip olduğu için takviyeli plastiklerde kullanılan elyafların yüzde 90'ından fazlasını oluşturmaktadır. Halihazırda kullanımda olan çeşitli elyaf türleri, cam elyafı, aramid elyafı, karbon elyafı, bor elyafı, silisyum karbür elyafı ve diğer elyaflardır. Mukavemet, rijitlik ve dayanıklılık dahil olmak üzere çok çeşitli yapısal özellikler sergilerler.

Cam elyaflar: Alümina-kireç-borosilikat bileşimine dayalı olarak üretilen "E" veya "E-CR" cam elyaflar, yüksek elektrik yalıtım özellikleri, neme karşı düşük hassasiyetleri ve yüksek mekanik özellikleri nedeniyle polimer matrisli kompozitler için baskın takviyeler olarak kabul edilir. E-CR camı ayrıca üstün korozyon direnci özellikleriyle E-camından ayrılır. Diğer ticari bileşimler arasında daha yüksek mukavemet, ısı direnci ve modüle sahip "S" camı, daha yüksek modüle sahip H-camı ve mükemmel korozyon direncine sahip AR camı (alkali dirençli) bulunmaktadır. Cam genellikle darbeye dayanıklı iyi bir elyaftır ancak karbon veya aramidden daha ağırdır. Cam elyaflar mükemmel mekanik özelliklere sahiptir ve belirli formlarda çelikten daha güçlüdür. Düşük modül, sertliğin kritik olduğu yerlerde özel tasarım işlemi gerektirir. Cam elyaflar radyo frekansını geçirgendir ve radar anteni uygulamalarında kullanılır. Tüm fiber malzemeler arasında, cam fiberler kompozitler için en yaygın olarak kullanılan takviyedir. Bunun nedeni, spesifik özelliklerinin nispeten iyi bilinmesi ve nispeten düşük maliyetle üretilebilmesidir. Polimerik matrisli cam elyaf kompozitler borular, tanklar, tekneler ve spor malzemeleri gibi çeşitli ticari ürünlerde kullanılmaktadır. Düşük maliyet, korozyon direnci ve çok çeşitli yöntemlerle kolay üretim potansiyelinin birleşimi etkenleri ile cam, açık ara en yaygın kullanılan elyaftır. Cam elyaf kompozitler, diğer kompozitlere göre düşük sertlik, yüksek uzama, orta düzey mukavemet/ağırlık ve genellikle daha düşük maliyet gösterir. Kimya endüstrisi tesisatları ve denizcilik uygulamaları gibi korozyon direncinin önemli olduğu yerlerde

yaygın olarak kullanılmaktadır. Kimyasal çözeltilere direnci çok yüksek olan C-camı olarak bilinen başka bir tip, asitlere karşı daha fazla korozyon direnci gerektiren uygulamalarda kullanılır (Mallick, 2008).

Aramid elyaflar (poliamidler): En yaygın sentetik elyaf aramiddir. Aramid elyaf, kompozit takviyesi için insan yapımı organik bir elyaf olan aromatik bir poliimidir. Aramid elyaflar, tokluk veya hasar/darbe direncinin ek avantajı ile düşük yoğunlukta iyi mekanik özellikler sunar. Cam ve karbon ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek gerilme mukavemetine, orta bir modüle ve çok düşük bir yoğunluğa sahip olarak karakterize edilirler. Aramid elyaflar hem elektrik hem de ısı izolatörüdür ve kompozitlerin darbe direncini artırır. Organik çözücülere, yakıtlara ve yağlayıcılara karşı dayanıklıdır. Aramid kompozitler basınç dayanımı açısından cam veya karbon kompozitler kadar iyi değildir. Kuru aramid elyaflar toktur, kablo veya halat olarak ve balistik uygulamalarda sıklıkla kullanılmıştır. Kevlar® belki de en iyi bilinen aramid elyaf örneğidir. Aramid, lastiklerde çelik kuşak yerine kullanılan baskın organik takviye elyafıdır.

Aramid lifleri, mevcut takviye lifleri arasında en düşük özgül ağırlığa ve en yüksek çekme mukavemeti/ağırlık oranına sahiptir. Hem cam elyaf hem de aramid elyaf kompozitleri, darbeli ortamlarda iyi tokluk sergiler. Aramid lifleri yüksek çekme mukavemetine, ancak daha düşük basma mukavemetine sahiptir. Aramid, daha kırılabilir bir şekilde hasara uğrama eğiliminde olan karbon fiberin aksine, darbe altında sünek bir şekilde yanıt vermeye meyillidir (Mallick, 2008).

Karbon (grafit) elyaflar: PAN (poliakrilonitril), rayon ve zift gibi organik öncüllerden üretilir, son ikisi genellikle düşük modüllü elyaflar için kullanılır. Karbon ve grafit elyaf terimleri tipik olarak birbirinin yerine kullanılır, ancak grafit teknik olarak PAN bazlı karbon elyaflar için yüzde 93-95'e karşılık yüzde 99'dan fazla karbon bileşimine sahip elyafları ifade eder. Karbon elyaf, tüm takviye elyafları arasında en yüksek mukavemet ve sertliği sağlar. Yüksek sıcaklık performansı karbon elyaflar için özellikle olağanüstüdür. PAN bazlı elyafların en büyük dezavantajı, temel malzemenin maliyeti ve enerji yoğun üretim sürecinin bir sonucu olarak yüksek nispi maliyetleridir. Karbon fiberler, bu fiberlerin nispeten yüksek sertlik-ağırlık ve yüksek mukavemet-ağırlık oranlarından yararlanarak, havacılıkta ve spor malzemelerinin bazı uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük yoğunluk ve orta maliyetle

birleşen yüksek sertlik ve mukavemet, karbon fiberi, kullanımda cam fiberden sonra ikinci sıraya yerleştirmiştir. Çekme modülü, en az 207 GPa'dan en çok 1035 GPa'ya kadar değişmektedir (Mallick, 2008). Karbon fiberlerin mukavemeti ve sertliği işleme değişkenlerine göre değişir, böylece yüksek modül veya orta modül gibi farklı dereceleri mevcuttur ve yüksek modül ile yüksek mukavemet arasında tercih yapılır.

Karbon fiberin gerilme mukavemeti, dikkate alınan spesifik tipe göre farklılık gösterir. Tipik bir değer olarak, fiber çekme mukavemeti 3,1 ila 5,5 GPa (450 ila 800 ksi) aralığında ve 1,7 özgül ağırlıkla kombine olarak sertlik 240 GPa (35 msi) civarındadır. Bu nedenle, elyafın kendisi 7075 T6 alüminyumdan 5 ila 10 kat daha dayanıklıdır ve ağırlığı ile kıyaslandığında yaklaşık %60'ında 3,5 kat daha serttir. Yüksek performanslı yapıların mekanik tasarımında avantaj potansiyeli olduğu açıktır (Pekbey, 2005).

Bor lifleri yüksek sertlik/ağırlık oranı ve iyi basma dayanımı gösterir, ancak aynı zamanda çok yüksek maliyetlidir. Bor liflerinin çekme mukavemeti 379-414 GPa aralığındadır. Bor, havacılık uygulamasında kullanılan en eski liflerden biridir. Bununla birlikte, 1960'ların sonlarında piyasaya sürülmesinden bu yana karbon liflerinin fiyatları istikrarlı bir şekilde düşerken, bor lifleri pahalı kalmıştır. Bor lifleri, tipik olarak yaklaşık 200 mikron olan nispeten büyük bir çapa sahiptir. Bu lifler hem alüminyumda hem de polimerik matrislerde özel uygulamalarda kullanılmıştır. Bor lifleri ayrıca burkulmaya karşı mükemmel direnç sağlar ve bu da bor lifi takviyeli kompozitler için yüksek basma dayanımına katkıda bulunur (Mallick, 2008).

Motor bileşenleri gibi çok yüksek sıcaklık uygulamaları elde etmek için seramik matrislerle kullanım için bir dizi başka elyaf geliştirilmektedir. Bu duruma ipliksi formda kullanılan silisyum karbür elyafı örnek olarak verilebilir. Bu lifler, yüksek sıcaklık uygulamalarında önemli bir yer edinmektedir. Cam, karbon ve aramid elyaf kullanımına göre sınırlı bir kullanım alanı bulunmaktadır. Silisyum karbür elyaflar, mükemmel oksidasyon direnci ve yüksek sıcaklık mukavemeti nedeniyle öncelikle yüksek sıcaklıkta metal ve seramik matrisli kompozitlerde kullanılır. Silisyum karbür liflerin mukavemeti ve sertliği oda sıcaklığında borunkiyle hemen hemen aynıdır. Silisyum karbür ipliksi takviyeli metaller, takviyesiz metallere ve sürekli fiber takviyeli metallere alternatif olarak da büyük ilgi görmektedir. Silisyum karbür ipliklileri çok küçüktür (8-20 µinç (200-508 nm) çapında ve yaklaşık 0,03 mm

uzunluğunda) ve ekstrüzyon, haddeleme ve dövme gibi standart metal şekillendirme işlemleri kolaylıkla uygulanabilir (Gibson, 2016).

Polyester ve naylon termoplastik elyaflar son zamanlarda hem birincil takviye olarak hem de cam elyafı ile hibrit olarak kullanılmaktadır. Cazip özellikleri arasında düşük yoğunluk, makul maliyet ve iyi darbe ve yorulma direnci bulunmaktadır. Polyester elyaflar oldukça yüksek mukavemete sahip olmalarına rağmen, sertlikleri camın oldukça altındadır. Yüksek mukavemet ve yüksek sıcaklık için uçak veya havacılık uygulamalarında olduğu gibi metalleri ve metal oksitleri içeren daha özel takviyeler kullanılır. Ticari olarak kullanılan bazı liflerin özellikleri Tablo 1.1’de listelenmiştir (Hassan, 1998).

Tablo 1.1: Yaygın olarak kullanılan liflerin özellikleri.

Fiber Tipi	Özgül Ağırlık [g/cm ³]	Çekme Modülü [GPa]	Çekme Dayanımı [MPa]	Yüzde Uzama [%]
E-camı	2,54	72,4	3450	4,8
S-camı	2,49	86,9	4300	5
Karbon	1,86	380	2700	0,7
Aramid (Kevlar-49)	1,45	131	3620	2,8
Bor	2,7	393	3100	0,8

Malzemedен bağımsız olarak, takviyeler çok çeşitli proseslere ve son ürün gereksinimlerine hizmet edecek formlarda olabilir. Takviye olarak tedarik edilen malzemeler arasında lif demeti, öğütülmüş fiber, kırılmış teller, sürekli, kırılmış veya ısıyla termoform keçe bulunur. Takviye malzemeleri benzersiz elyaf varyasyonları ile tasarlanabilir ve ürün gereksinimlerine ve üretim sürecine bağlı olarak önceden şekillendirilebilir.

Lif demetleri: Çok uçlu ve tek uçlu lif demetleri öncelikle termoset bileşiklerde kullanılır, ancak termoplastiklerde de kullanılabilir. Çok uçlu demetler, doğranan ve reçine matrisine rastgele bırakılan birçok ayrı iplikçik veya filament demetinden oluşur. Levha kalıplama (SMC), preform ve elyaf püskürtme gibi proseslerde çok uçlu demetler kullanılır. Çok uçlu demetler bazı elyaf sarma ve profil çekme uygulamalarında da kullanılabilir. Tek uçlu demetler, tek bir iplikçik halinde sarılmış

birçok ayrı filamentten oluşur. Bu ürün genellikle elyaf sarma veya profil çekme gibi tek yönlü takviye kullanan proseslerde kullanılır.

Keçe ve tül: Takviye keçeler ve dokuma olmayan tüller genellikle birim alan başına ağırlığı ile tanımlanır. Takviye türü, elyaf dağılımı ve keçe veya tülü bir arada tutmak için kullanılan bağlayıcı miktarı, keçe ürünleri arasındaki farklılıkları belirler. El yatırma metodu gibi bazı işlemlerde bağlayıcının çözünmesi gereklidir. Diğer proseslerde, özellikle basınçlı kalıplama ve pultrüzyonda bağlayıcı, hidrolik kuvvetlere ve kalıplama sırasında matris reçinesinin çözünme etkisine dayanmalıdır. Bu nedenle, bağlayıcı açısından bakıldığında çözünür ve çözünmez bağlayıcılar olmak üzere iki genel keçe veya tül kategorisi bulunur.

Dokuma, dikişli, örgü ve 3 boyutlu kumaşlar: Bir kompozitte reçineye takviye malzemesi olarak kullanılabilecek birçok kumaş türü vardır. Çok eksenli takviyeler; bükümlü ve katlı iplikten bir kumaşa sürekli liflerin dokunması, örülmesi veya dikilmesi ile üretilir. Takviye kumaşlar hemen hemen her çeşit elyaf kullanılarak üretilebilir. En yaygın kumaşlar cam, karbon veya aramid liflerinden üretilir. Kumaşlar, genellikle yüksek performans gereken uygulamalarda yönlendirilmiş gerilmeleri ve yüklemeleri karşılar. Çoğu kumaştaki elyafların sürekli yapısı nedeniyle mukavemet/ağırlık oranı kesilmiş veya doğranmış elyaflardan çok daha yüksektir. Dikişli kumaşların, kumaş yapısı içinde özelleştirilmiş elyaf oryantasyonlarına göre düzenlenebilmesiyle, kesme veya burulma yüklemelerine karşı özel tasarım yapmaya olanak sağlar.

Tek eksenli (UD): Tek eksenli takviyeler arasında şeritler, kısa yünler, tek eksenli yün levhalar ve elyaf veya iplikçik demetleri bulunur. Bu formdaki liflerin tümü bir doğrultuda paralel olarak hizalanır ve kıvrımsızdır, böylece en yüksek mekanik özellikleri sağlar. Tek eksenli şeritleri veya levhaları kullanan kompozitler, elyaf yönünde yüksek mukavemete sahiptir. Tek eksenli levhalar incedir ve çoğu yapısal uygulama için birden fazla katman gereklidir. Tek eksenli takviyeler için tipik uygulamalar, uçak bileşenleri veya yarış tekneleri gibi yüksek yüklemelere göre tasarlanmış kompozitleri kapsar.

Prepregler: Bir takviye formu ve polimer matrisinden yapılmış hazır bir malzemedir. Prepreg yapmak için takviye elyaflar veya kumaş gibi formlar bir reçine

banyosundan geçirilir. Reçine elyafa doyurulur (emdirilir) ve kürlenme aşamalarına hazırlamak için ısıtılır. Termoset veya termoplastik prepregler mevcuttur ve bileşen malzemelere bağlı olarak buzdolabında veya oda sıcaklığında saklanabilir. Prepregler, tasarım gereksinimlerine göre çeşitli yönlerde elle veya mekanik olarak üretilir.

Öğütülmüş elyaflar: Çok kısa elyaf uzunluklarına (genellikle 3 mm'den az) sahip doğranmış elyaflardır. Bu ürünler genellikle termoset macunlarda, dökümlerde veya sentetik köpüklerde reçine büzülmesinden dolayı kürlenmiş bileşimin çatlamasını önlemek için kullanılır.

Genel olarak takviye elemanı ve matristen oluşan kompozitler takviye elemanının matris içindeki konumuna göre çeşitli kategorilerde sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırmaya bir örnek de çok eksenli (multiaxial) örgülerdir. Çok eksenli örgüler E-camı, S-camı, aramid ve karbon gibi yüksek çekme dayanımına sahip fiberlerden üretilen dikişli, kıvrımsız yapıya sahip takviye malzemeleridir. Çok eksenli ürünler, her biri farklı eksenlerde elyaf dizilimine sahip bir veya daha çok katmandan oluşan kompozit takviye malzemeleridir ve geniş bir ürün çeşitliliğine sahiptir: Tek eksenli, iki eksenli, üç eksenli, dört eksenli, tek tarafı keçeliler ve karma örgüler gibi. Bu katmanlar genellikle polyster gibi yapısal olmayan dikiş ipliği ile birbirine bağlanır (Bektaş ve Ağır, 2014).

1.1.2 Matris Özellikleri

Kompozitteki reçine matrisinin birincil derece işlevleri; takviye lifleri arasında gerilmeleri aktarmak, lifleri bir arada tutmak için yapıştırıcı görevi görmek, olumsuz çevresel faktörlere karşı bariyer özelliği sağlamak, lifleri mekanik ve çevresel hasarlardan korumaktır. Kompozit bir yapının çekme yükünü taşıma kapasitesinde az bir rol oynar. Bununla birlikte, kompozit malzemenin düzlem içi kesme özelliklerinin yanı sıra tabakalar arası kesme üzerinde matris seçiminin büyük bir etkisi vardır. Matris, basma yüklemesi altında fiberin burkulma olasılığına karşı yanal destek sağlar, bu nedenle kompozit malzemenin basma dayanımını bir dereceye kadar etkiler (Mallick, 2008).

Matris fazı, lifleri birbirine bağlar ve harici olarak uygulanan bir gerilmenin liflere iletiildiği ve dağıtıldığı ortam görevi görür. Uygulanan yükün sadece çok küçük bir kısmı matris fazı tarafından taşınır. Matris malzemesinin sünek olması esastır. Ek olarak, fiberin elastisite modülü matrisinkinden çok daha yüksek olmalıdır. Lifleri, mekanik aşınmalar veya çevresel kimyasal reaksiyonlar nedeniyle oluşabilecek yüzey hasarından korur. Ayrıca göreceli yumuşaklığı ve plastisitesi sayesinde liflerden ayrılır.

Matris, ağır hasarlara neden olan kırılğan çatlakların fiberden fibere yayılmasını önler. Fiber ve matris arasındaki bağlanma kuvvetleri yüksektir. Zayıf matristen güçlü liflere stres iletimini en üst düzeye çıkarmak için güçlü bağlanma gerekir. Sonuç olarak matris, lifleri yapısal bir birim içinde bir arada tutar ve onları dış hasarlardan korur, uygulanan yükleri liflere aktarır, iletir ve çoğu durumda süneklik, tokluk veya elektrik yalıtımı gibi ihtiyaç duyulan bazı özellikleri sağlar (Gibson, 2016).

Kompozit uygulamalarında termoset polimerler sıklıkla kullanılmıştır ve bu malzemeler için çok sayıda karakterizasyon verisine erişilebilir. Termosetler, kütleme işlemi sırasında geri dönüşü olmayan bir bağ oluşturarak çapraz bağlanır. Sertleştikten sonra, katı termoset reçineler orijinal sıvı formlarına geri dönüştürülemez. Yaygın termosetler polyester, vinilester, epoksi ve poliüretandır.

Doymamış Polyester Reçineler (UPR) kompozit endüstrisinde en yaygın kullanılan reçinedir ve kullanılan toplam reçinelerin yaklaşık %75'ini oluşturur. Formüle edilmiş veya işlenmiş polyester reçinede istenen özellikleri elde etmek için bir dizi hammadde ve işleme tekniği mevcuttur. Polyesterler, polimer zincirlerinin oluşturulması sırasında modifiye edilebilme veya uyarlanabilme kapasiteleri nedeniyle çok yönlüdür. Kompozit endüstrisinin tüm bölümlerinde neredeyse sınırsız kullanılabilirliğe sahip oldukları görülmüştür. Bu reçinelerin temel avantajı, mekanik, kimyasal ve elektriksel özellikleriyle boyutsal kararlılığı, maliyeti ve kullanım veya işleme kolaylığı arasındaki dengedir. Bu reçineler, özellikler ve proses uyumluluğu sağlamak için formüle edilebilir ve kimyasal olarak uyarlanabilir. Termoset polyesterler, dikarboksilik asitlerin ve iki fonksiyonlu alkollerin (glikoller) kondensasyon polimerizasyonu ile üretilir. Ek olarak, doymamış poliesterler, dikarboksilik asit bileşenin bir parçası olarak maleik anhidrit veya fumarik asit gibi

doymamış bir malzeme içerir. Bitmiş polimer, düşük viskoziteli bir akışkan vermek için stiren gibi reaktif bir monomer içinde çözülür. Bu reçine kürlendiğinde, monomer polimer üzerindeki doymamış bölgelerle reaksiyona girerek katı bir termoset yapıya dönüştürür. Doymamış polyesterler, temel yapı taşlarının yapılarına bağlı olarak sınıflara ayrılır. Bazı yaygın örnekler ortoftalik (ortho), izoftalik (iso), disiklopentadien (DCPD) ve bisfenol A fumarat reçineleridir. Buna ek olarak, polyester reçineler son kullanım uygulamasına göre genel amaçlı (GP) veya yanma geciktirici (FR) gibi özel polyesterler olarak sınıflandırılır.

Sert, kırılğan, yumuşak ve esnek gibi özellikleri arasında değişen çeşitli özelliklerde polyester reçineler formüle edilebilir. Polyester reçinelerin avantajları düşük viskozite, hızlı kürlenme süresi ve düşük maliyettir. Ancak özellikleri genellikle epoksilere göre daha düşüktür. Daha düşük viskoziteleri ve daha hızlı kürlenme süreleri nedeniyle, işlenmesi çoğu epoksi reçinesinden daha kolaydır. Polyesterler, düşük maliyetleri, yeterli mekanik özelliklere ve çevresel dayanıklılığa sahip olmaları nedeniyle en yüksek oranda kullanılmaktadır. Yüksek hacimsel büzölmeleri, kürlenme sırasında yüzey kusurlarına neden olabileceğinden dezavantajlıdır. Polyester kompozitler, borular ve tanklar, duş kabinleri ve küvetler, tekneler ve otomobil bileşenleri olarak kullanılmaktadır (Mallick, 2008 ve Hassan, 1998).

Kompozitlerde matris malzemesi olarak yaygın kullanılan epoksi reçineler termoset polimerlerin en önemli sınıfını oluştururlar. Bunlar üstün mekanik, termal ve elektriksel özelliklerinden dolayı elyaf takviyeli kompozitleri, elektriksel lamineleri, kalıp dökümü, kaplamayı, aletle işlemeyi ve yapıştırmayı içeren yapısal uygulamalarda ve koruyucu kaplamalarda geniş ölçüde kullanılırlar. Ancak bütün bu uygulamalarda epoksi reçineler doğada kırılğan ve rijittir ve çoğu uygulamalarda kullanımını sınırlayan düşük darbe dayanımına ve çatlak ilerlemesine karşı zayıf bir dirence sahiptir (Mirmohseni, 2010).

Epoksi reçineler, çeşitli kompozit parçalar, yapılar ve beton onarımında köklü bir geçmişe sahiptir. Reçinenin yapısı, değişen performans seviyelerine sahip bir dizi farklı ürün elde etmek için tasarlanabilir. Epoksi reçinelerin doymamış polyester reçinelere göre önemli bir avantajı ise daha düşük büzölmeleridir. Epoksiler öncelikle üstün mekanik özelliklere, aşındırıcı sıvılara ve ortamlara karşı dirence, üstün elektriksel özelliklere, yüksek sıcaklıklarda iyi performansla, bir alt tabakaya iyi

yapışmaya veya bu faydaların bir kombinasyonuna sahip yüksek performanslı kompozitler üretmek için kullanılır. Bununla birlikte, epoksi reçineler özellikle iyi UV direncine sahip değildir. Epoksi reçineler çok çeşitli özelliklere sahiptir, çok sayıda başlangıç materyali kürleme maddesi ve değiştirici mevcuttur. Genel olarak epoksi reçineler, yüksek mekanik özelliklere ve liflere mükemmel yapışma özelliğine sahiptir. Epoksi reçineler, üstün performans sunan ancak polyesterlere göre daha maliyetli olmasına rağmen yaygın olarak kullanılan termosetlerdir. Ticari olarak çok çeşitli epoksi reçineleri mevcuttur. İstenilen hedeflere ulaşmak için gereken uygun özellik aralığını ve gerekli maliyeti seçmek için üreticinin literatürüne danışılmalıdır. Epoksiler için tipik kürlenme sıcaklıkları 121 ila 177 °C (250 ila 350 °F) aralığında değişmektedir. Ancak, bazı ortam sıcaklığı ürünleri mevcuttur. Sonuç olarak, epoksi matris, çok çeşitli özellikler, kür sırasında uçucu maddelerin olmaması, kür sırasında düşük büzülme, kimyasallara ve solventlere karşı mükemmel direnç, çok çeşitli dolgu maddelerine, elyaflara ve diğer substratlara mükemmel yapışma gibi birçok avantaja sahiptir. Bununla birlikte, nispeten yüksek maliyet ve uzun kür süresi başlıca dezavantajlarıdır. Diğer reçinelerden daha yüksek viskozite nedeniyle, epoksi reçineleri nispeten pahalıdır. Bu nedenle, pultrüzyon gibi büyük miktarlarda reçine gerektiren bazı üretim süreçlerinde kullanımları sınırlı hale gelmiştir (Mallik, 2008 ve Hassan, 1998). Kürlenme hızları, uygun sertleştirici ve/veya katalizör sistemlerinin seçilmesiyle proses gereksinimlerine uyacak şekilde kontrol edilebilir. Genel olarak epoksiler, iki parçalı bir sistem olarak bir anhidrit veya bir amine sertleştirici eklenerek kürlenir. Farklı sertleştiriciler ve bir sertleştiricinin miktarı farklı bir kürlenme profili üretir ve bitmiş kompozitlere farklı özellikler verir. Epoksinin viskozitesi çoğu polyester reçineden çok daha yüksek olduğundan, nihai mekanik özellikleri elde etmek için bir post-cure (yüksek ısı) gerektirir ve bu da epoksilerin kullanımını daha zor hale getirir. Ancak epoksiler polyesterlere kıyasla çok az koku yayarlar.

Epoksi reçineler, cam, karbon ve aramid dahil olmak üzere bir dizi lifli takviye malzemesiyle birlikte kullanılır. Bu son grup hacim olarak küçüktür, nispeten yüksek maliyetlidir ve genellikle yüksek mukavemet ve/veya yüksek sertlik gereksinimlerini karşılamak için kullanılır. Epoksiler, özellikle vakum torba kalıplama, otoklav kalıplama, basınçlı torba kalıplama, basınçlı kalıplama, elyaf sarma ve el yatırma metodu gibi çoğu kompozit üretim süreciyle uyumludur.

Vinil esterler, epoksi reçinelerin avantajlarını doymamış polyester reçineler için tipik olan daha iyi kullanım/daha hızlı kürleme ile birleştirmek için geliştirilmiştir. Bu reçineler epoksi reçinenin akrilik veya met-akrilik asit ile reaksiyona girmesiyle üretilir. Maleik anhidrit kullanıldığında polyester reçinelere benzer doymamış bir bölge sağlar. Elde edilen malzeme stiren içinde çözülerek polyester reçineye yakın bir sıvı elde edilir. Vinil esterler de polyester reçinelerde kullanılan geleneksel organik peroksitlerle kürlenir. Vinil esterler mekanik tokluk ve mükemmel korozyon direnci sağlar. Bu gelişmiş özellikler, epoksi reçinelerde tipik olan karmaşık işleme, kullanım veya özel atölye imalat uygulamaları olmadan elde edilir.

Vinilester reçinelerinin mekanik özellikleri, epoksi ve polyester reçinelerinki arasındadır. Vinilester reçineleri, epoksilerden daha yüksek kırılma tokluğuna ve daha iyi ıslanma özelliklerine ve polyesterlere göre cam elyaflara daha iyi yapışmaya sahip olup aynı zamanda daha esnektirler. Vinilester reçineleri, mükemmel kimyasal direnç ve çekme mukavemeti gibi epoksi reçinelerinin ve düşük viskozite ve hızlı kürleme gibi doymamış polyester reçinelerinin iyi özelliklerine sahiptir. Bununla birlikte, vinilester reçinelerinin hacimsel büzülmesi, epoksi reçinelerinkinden daha yüksek olan %5-10 aralığındadır. Ayrıca, epoksi reçinelerle karşılaştırıldığında yalnızca orta düzeyde yapışma gücü sergiler. Vinilester ile benzer, ancak bir miktar geliştirilmiş mekanik özelliklere ve gelişmiş solvent direncine sahip polyesterler daha düşük maliyetli malzemelerdir. Üstün mekanik özellikler, darbe hasarı direnci ve yorulma ömrü gösteren vinilester laminatlar, tipik polyesterlerden daha yüksek bir hasar uzaması da gösterir (Mallick, 2008).

Fenolikler, genellikle fenol (karbolik asit) bazlı bir reçine sınıfıdır. Fenolikler, işleme sırasında çıkarılması gereken suyu üreten bir yoğunlaşma reaksiyonu yoluyla sertleşen termoset reçinelerdir. Pigmentli uygulamalar kırmızı, kahverengi veya siyah ile sınırlıdır. Fenolik kompozitler, yüksek sıcaklık direnci, sürünme direnci, mükemmel ısı yalıtımı ve ses sönümlenme özellikleri, korozyon direnci ve mükemmel yangın/duman/duman toksisitesi özellikleri dahil olmak üzere birçok arzu edilen performans özelliklerine sahiptir. Fenolikler, mühendislik ürünü ahşaplarda (kontrplak), fren balatalarında, debriyaj plakalarında, devre kartlarında yapıştırıcı veya matris bağlayıcı olarak uygulanır.

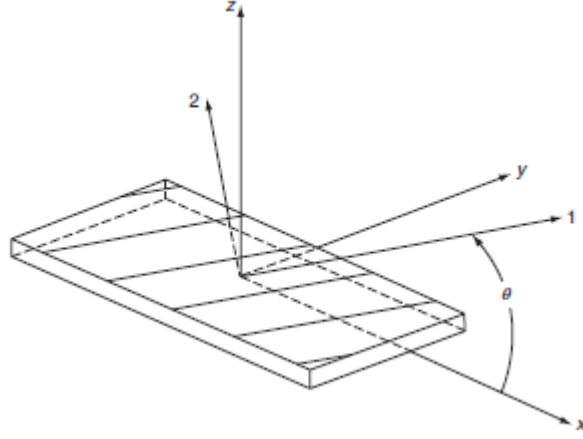
İyi yanma direnci nedeniyle fenolikler birçok uygulamada yer almaktadır. Regülasyonlarda daha katı yangın, duman ve toksisite düzenlemeleriyle kullanımları yaygınlaşmıştır. Düşük maliyetleri ve iyi özellik dengesine rağmen oldukça kırılğan yapıları temel dezavantajlarıdır (Hassan, 1998).

Bor ve karbon elyafı alüminyum kullanılan metal matrisli kompozitler, polimerik matrislere göre daha yüksek sıcaklıkta uygulama olanağı bulmaktadır. Toyota tarafından Japonya'da bir milyon adet üzerinde üretilen aşınma direncini artırmak ve yüksek termal iletkenlik için kullanılan bir metal matris piston başarılı bir uygulama örneği olarak gösterilebilir. Seramik matris malzemeleri daha da yüksek sıcaklık aralıkları için geliştirilmektedir.

Reçineler, imalat süreciyle uyumlu bir şekilde kürlenmelidir. Bazı parçalar küçüktür ve hızlı bir şekilde yerleştirilebilir. Bir reçine ne kadar hızlı kürlenirse, kalıplarda geri dönüş o kadar hızlı olur ve üretim oranları o kadar artar. Diğer parçalar, laminasyon işlemi için daha fazla zamanın gerekli olduğu büyük yerleştirmeler içerebilir. Basınçlı kalıplama, pultrüzyon ve bazen RTM'de ısıtılmalı kalıplar hızlı kürlenme sağlar. Bitmiş bir parçanın fiziksel özellikleri, kürlenmesinden büyük ölçüde etkilenir. Kompozitin dayanımı, laminat yüzeyinin kimyasal direncinin yanı sıra kürlenme işleminden de etkilenir. Eğilme, basınç ve çekme özellikleri kısmen küren verimliliği tarafından belirlenir. Bir reçinenin tam potansiyelini geliştirmek için kürlenme tamamlanmalıdır. Kalın plakalar özel dikkat gerektirir. Aşırı büzülme, laminatın eğrilmesini ve kürlenme sırasında yüksek ekzotermle ilgili diğer sorunları önlemek için kürlenme sıcaklığı kontrol edilmelidir.

1.1.3 Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu

Liflerin birbirlerine göre düzenlenmesi veya yönü, lif konsantrasyonu ve dağılımı fiber takviyeli kompozitlerin mukavemeti ve diğer özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Şekil 1.3'te gösterildiği gibi, liflerin bir matris içinde birbirine paralel konumlandırıldığı ince bir tabakayı düşünelim. Elastik özelliklerini tanımlamak için ilk önce 1-2-z sistemi ve x-y-z sistemi olmak üzere iki koordinat sistemi tanımlanır (Mallick, 2008).



Şekil 1.3: Ana eksenlerin ve yükleme eksenlerinin tanımı.

Hem 1-2 hem de x-y eksenleri lamina düzleminde ve z eksenine dik. 1-2-z sisteminde, malzeme koordinat eksen 1 fiber yönüne paraleldir ve tabakanın uzunluğuna yönünü temsil eder ve eksen 2 kompozit düzleminde fiber doğrultusuna normaldir ve tabakanın enine yönünü temsil eder. Mühendislik sabitlerini belirleyen aşağıdaki varsayımlar yapılır:

- Lifler ve matris arasında mükemmel bir bağ vardır.
- Lifler paraleldir ve her yere eşit olarak dağılmıştır
- Hem lif hem de matris izotropiktir.
- Hem lifler hem de matris için Hooke yasası geçerlidir.
- Uygulanan yükler fiber yönüne paralel veya diktir.
- Hem lifler hem de matris lineer elastik malzeme gibi davranır (Pekbey, 2005).

Tek yönlü sürekli lif 0° laminanın elastik özellikleri aşağıdaki denklemlerden hesaplanır:

Şekil 1.4a'ya bakıldığında 1 doğrultusunda çekme gerilmesinin uygulandığı boyuna modül:

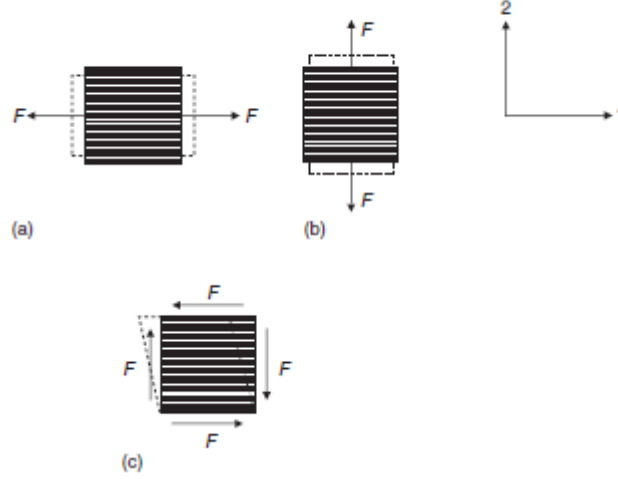
$$E_{11} = E_f V_f + E_m V_m \quad (1.1)$$

Burada V_f ve V_m sırasıyla fiber ve matrisin hacim oranlarıdır.

Eşitlik (1.1) ayrıca (1.2) eşitliği olarak da yazılır:

$$E_{11} = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A} \quad (1.2)$$

Burada E_f ve E_m sırasıyla fiber ve matrisin modülleri olarak tanımlanır.



Şekil 1.4: Tek yönlü sürekli lif 0° laminanın gerilme uygulamaları a) Boyuna çekme gerilmesi, b) Enine çekme gerilmesi, c) Düzlem içi kayma gerilmesi.

Şekil 1.4b'ye bakıldığında 2 doğrultusunda çekme gerilmesinin uygulandığı enine (transvers) modül (Mallick, 2008):

$$E_{22} = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f} \quad (1.3)$$

Burada fiber doğrultusunda Young Modülü E_{11} iken, fiberlere dik doğrultudaki Young Modülü E_{22} 'dir.

Şekil 1.4c'ye bakıldığında 12 düzleminde kesme gerilmesinin uygulandığı düzlem içi kayma modülü (G_{12}):

$$G_{12} = G_{21} = \frac{G_f G_m}{G_f V_m + G_m V_f} \quad (1.4)$$

Poisson oranı ν_{12} :

$$\nu_{21} = \frac{E_{22}}{E_{11}} \nu_{12} \quad (1.5)$$

1.1.4 Kompozit Malzemelerin Özellikleri

Kompozitler günlük hayatımıza tamamen nüfuz etmiş durumdadır; kullandığımız arabalarda, golf sopalarında, mahallelerimizdeki atık suyu uzaklaştıran borularda ve çok daha fazlasında kullanılmaktadır. Roketler gibi bazı uzay uygulamaları kompozit malzemeler olmadan muhtemelen yerden kalkamazdı. Bunların başında yüksek mukavemet, hafiflik, iyi korozyon direnci, tasarım esnekliği ve yorulma ömrü gelmektedir. Kompozit malzemelerin avantajları Tablo 1.2’de verilmiştir.

Tablo 1.2: Kompozit malzemenin avantajları.

Avantajlar
a. Yüksek mukavemet
b. Yüksek rijitlik
c. İyi korozyon direnci
d. Aşınma direnci
e. Hafiflik
f. Isı izolasyonu
g. Akustik izolasyon
h. Çekicilik ve estetik görünüm
i. Yorulma ömrü
j. İmalat kolaylığı

1.1.4.1 Yüksek Mukavemet

Kompozitler, ağırlık başına çelik gibi diğer malzemelerden daha mukavemettir. Kompozitlerin iki ana bileşeni (elyaflar ve reçineler) mukavemete katkıda bulunur. Lifler yükü taşıırken, reçineler kuvveti kompozit parça boyunca gerektiği gibi dağıtır. Kompozitler çevredeki en dayanıklı malzemelerden biridir. Malzemenin yoğunluğunu göz önünde bulundurduğunuzda, kompozitler diğer yapı malzemelerinin çoğundan çok daha mukavimdir. Uçaklardan otomobillere kadar birçok ileri teknoloji ürünleri için tercih edilen malzeme olmaktadır. Belirli reçineler ve takviyeler birleştirilerek herhangi bir uygulamanın belirli mukavemet gereksinimlerini karşılayacak şekilde formülasyonu özelleştirilebilir. Örneğin, reçine ve takviye oranını değiştirebilir veya elyaflar bir yönde veya çeşitli yönlerde yönlendirilebilir. Kompozitler anizotropiktir, yani malzeme özellikleri takviye malzemelerinin (elyaflar) yerleşimine ve katman sayısına bağlı olarak değişir. Bu,

tasarımcıların nihai ürünün özelliklerini uyarlayabilmeleri için mühendislik esnekliği sağlar. Mukavemet söz konusu olduğunda, yapısal tasarımı etkileyen dört ana başlık vardır: Spesifik, çekme, kesme ve basma mukavemeti.

Spesifik mukavemet: Bir malzemenin özgül mukavemeti olarak da adlandırılan mukavemet-ağırlık oranı, malzemenin ağırlığına göre mukavemetinin karşılaştırılmasıdır. Bir malzemenin mukavemetinin yoğunluğuna bölünmesi özgül mukavemeti verecektir. Mühendisler, tasarımcılar ve şartname hazırlayıcılar giderek daha yüksek özgül mukavemete sahip malzemeler aramaktadır. Çelik gibi bazı malzemeler oldukça mukavim ve ağırdır. Bambu direkler gibi diğer malzemeler mukavim ve hafif olabilir. Kompozitler hem mukavemetli hem de hafif olacak şekilde tasarlanabilir. Çok yüksek mukavemet/ağırlık oranlarına sahip olduklarından kompozitler, uçaklar ve arabalar gibi ağırlığın çok önemli olduğu uygulamalar için tercih edilen bir malzemedir. Daha hafif araçlar daha az yakıt tüketir.

Çekme dayanımı: Bir malzemenin kırılmadan, çatlamadan, deforme olmadan veya başka bir şekilde hasara uğramadan önce karşılayabileceği gerilme miktarını ifade eder. Çekme mukavemetinin bir ölçüsü de eğilme mukavemetidir (bir malzeme veya yapının bükülmeye dayanma kabiliyeti). Çekme ve eğilme mukavemeti mühendisler ve tasarımcılar için önemli ölçümlerdir. Çökmeden önce ne kadar gerilmeye dayanabileceğini bilmeden bir köprü tabliyesi veya tavan inşa etmek olası değildir. Çekme mukavemeti malzemeye göre değişir ve mega paskal (MPa) cinsinden ölçülür. Örneğin, çeliğin nihai gerilme mukavemeti 400 ila 690 MPa arasında değişirken, karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin nihai mukavemeti, fiber oryantasyonuna ve diğer tasarım faktörlerine bağlı olarak 1200 ila 2410 MPa arasında değişir.

Kesme dayanımı: Bir malzemenin katmanlar kayarken gerilmeye ne kadar iyi direnebileceğini açıklar. Bir malzemenin hasara uğramadan önce kaldırabileceği maksimum kayma gerilimi (veya birim alan başına kuvvet) miktarını bilmek önemlidir. Bu, mühendislerin ve tasarımcıların bir yapının destekleyebileceği ağırlık veya yük miktarını ve farklı yönlerde kuvvetler uygulandığında yapıya ne olabileceğini bilmelerini sağlar. Kompozitlerde kesme mukavemeti formülasyona ve tasarıma bağlı olarak değişir. Kompozitler, kayma gerilmeleri bir düzlem içinde, düzleme enine veya katmanlar boyunca (interlaminar) yönlendirilecek şekilde

tasarlanabilir. Fiber oryantasyonu, katmanların sıralanması, kullanılan fiberlerin türü ve hacmi, çekirdek malzemelerin türü ve yoğunluğu ve daha fazlası dahil olmak üzere kayma özelliklerini kontrol etmenin çeşitli yolları vardır.

Basma dayanımı: Bir malzemenin basınçla sıkıştırıldığında veya düzleştirildiğinde nasıl performans gösterdiğini belirtir. Bazı malzemeler basınç dayanımı sınırına ulaştıklarında kırılır veya kopar, diğerleri ise kalıcı olarak deforme olur. Kompozitler tipik olarak basınç mukavemetinden daha yüksek çekme mukavemetine sahiptir.

1.1.4.2 Hafiflik

Kolay kurulum; hafif kompozit kullanmanın en önemli avantajlarından biri, kullanımının, taşınmasının ve kurulumunun kolay olmasıdır. Bu da projelerde zaman kazandırır. Virginia'daki Wolf Trap Ulusal Parkına 2012 yılında FRP tabliyeli bir yaya köprüsü kurulmuştur. Köprü'nün beton bir köprüden yüzde 80 daha hafif olması vinçle kaldırılmasını, taşınmasını ve yerleştirilmesini daha hızlı hale getirmiştir. Tabliye üç günde kurulurken, beton bir tabliye en az dört hafta sürebilirdi. Hafif kompozitler ayrıca bataklıklardaki elektrik direkleri veya dağlardaki boru hatları gibi uzak yerlerdeki kurulumları da kolaylaştırmaktadır.

Maliyet tasarrufu; daha hafif parçalar ve ürünler genellikle pek çok son kullanıcının talep ettiği ağırlık ve maliyetten tasarruf sağlar. Bugüne kadar üretilmiş en büyük ve en hafif tanklardan biri olan NASA ve Boeing'in uzay görevlerinde yakıt taşımak için kullanılan tamamen kompozit bir kriyojenik tankı, roket tanklarının ağırlığını yüzde 30 oranında azaltabilecek ve fırlatma maliyetlerini en az yüzde 25 oranında düşürebilecek bir gelişmedir.

Standartlara uygunluk; kompozitler uygulamaların belirli standartları ve düzenlemeleri karşılması gerektiğinde genellikle kaçınılmazdır. Bunun en önemli örneği yakıt verimliliği ile ilgilidir. Otomotiv endüstrisinde kurumsal ortalama yakıt verimliliği standartlarının karşılanması gerekliliği hafif malzemelerin kullanımına ivme kazandırmaktadır. Başlıca firmaların araçların brüt ağırlığını büyük ölçüde azaltmak için genellikle kompozitleri içeren planları vardır. GM, 2013 yılında bazı

karbon fiber takviyeli parçalar içeren Chevrolet Silverado Cheyenne konsept aracını üretmiştir. Bu araç 5,3L Silverado'nun boş ağırlığından yaklaşık 90 kg daha hafiftir. Volkswagen'in sadece 3,5 ton ağırlığındaki ticari aracı olan Transporter %40 daha fazla taşıma kapasitesi ve sevkiyatlarda %30'a varan tasarruf sağlayarak dizel tüketimi ve karbondioksit emisyonlarından tasarruf sağlamaktadır (Acma, 2016).

1.1.4.3 Korozyon Direnci

Kompozitlerden üretilen ürünler, zorlu kimyasal ve sıcaklık ortamlarına karşı uzun süreli direnç sağlar. Kompozitler genellikle açık havada maruz kalma, kimyasal işleme uygulamaları ve diğer zorlu ortamlar için tercih edilen malzemedir. Kompozitlerde reçinelerin birincil işlevlerinden biri, çevreledikleri elyafları korumaktır. Korozyon direnci sağlamak üzere tasarlanmış düzinelerce reçine vardır. Her bir benzersiz formülasyon kostik çözeltiler, asidik ortamlar, alkali ortamlar, oksitleyici kimyasallar ve yüksek sıcaklıklar gibi belirli koşullara karşı koruma sağlar. İlk korozyon reçinelerinde bisfenol fumurat ve klorendik anhidrit reçine kimyaları kullanılmıştır. Daha sonra izoftalik reçineler geliştirilmiş ve korozyona dayanıklı reçinelerin temel dayanağı haline gelmiştir. İzofthalik reçineler epoksi vinil ester reçinelerle birlikte günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kompozit yapı boyunca tipik olarak aynı reçine matrisi kullanılacak olsa da takviyeler laminatın üç özel alanında kullanılabilir. Laminatın iç yüzeyinde fiberglas veya sentetik bir örtü kullanılır. İç yüzey, kompozit ve korozif malzemenin ara yüzeyidir. Örtü, kompozit için reçine açısından zengin (%90 reçine) bir yüzey sağlamaya hizmet ederken, aksi takdirde sadece reçineli bir yüzey (veya jel kaplama) denendiğinde oluşacak reçinede mikro çatlakları önler. Bir sonraki katman, örtü için daha sağlam bir destek sağlayan ve aynı zamanda reçine açısından zengin (%70 reçine) olan doğranmış fiberglas katmandır. Bu katman genellikle örtü katmanından oldukça kalındır ve örtü katmanı ile birleştirildiğinde 2,5 ila 5 mm kalınlığında bir korozyon bariyeri oluşturur. Son katman ve açık ara en kalın katman laminatın yapısal kısmıdır. Bu katmanda yüksek cam içerikli (%35 reçine, %65 takviye) bir yapısal katman sağlamak için doğrudan çekme tek uçlu lifler, kumaşlar veya doğranabilir takviyeler gibi farklı fiberglas takviye biçimleri kullanılabilir. Korozif bir ortamda ilk maruziyet bölgesi olduğundan, örtü tabakası için kullanılan çok çeşitli malzemeler vardır. C-cam,

E-CR cam, çeşitli sentetik termoplastik dokumasız kumaş türleri ve karbon örtü, örtüler için ana malzeme seçenekleridir. Her birinin üstün olduğu belirli bir ortam vardır.

1.1.4.4 Tasarım Esnekliği

Kompozitlerin en büyük avantajlarından biri, diğer malzemelerin çoğundan daha kolay bir şekilde karmaşık şekillere sokulabilmesidir. Karmaşık şekiller ve konturlar yüksek basınçlı aletlere ihtiyaç duyulmadan mümkündür çünkü kompozitler üretim sırasında reçine sertleştiğinde veya katılaştığında oluşur. Dolayısıyla kompozit parçalar ister düşük hacimlerde manuel olarak ister yüksek hacimli, otomatik süreçler kullanılarak üretilsin, kolayca birçok şekle bürünebilir. Parçaların ve ürünlerin şekli söz konusu olduğunda seçeneklere sahip olmak, kompozit kullanan neredeyse her sektör için avantajlıdır. Tasarımcılar kompozitlerle çalışırken parçalar belirli yönlerde ve alanlarda mukavemet ve sertliğe sahip olacak şekilde özel olarak üretilebilir. Örneğin, kompozit bir parça tek bir yönde bükülmeye direnç gösterecek şekilde yapılabilir. Malzemelerin stratejik olarak yerleştirilmesi ve elyafların yönlendirilmesi, şirketlerin benzersiz özellik gereksinimlerini karşılamak için parçalar ve ürünler tasarlamasına olanak tanır.

1.1.4.5 Dezavantajları

Tüm bu avantajlarının yanında kompozit malzemelerin kullanımını sınırlayan bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan başlıcaları Tablo 1.3'te belirtilmiştir.

Tablo 1.3: Kompozit malzemenin dezavantajları.

Dezavantajlar
a. Ham maddenin pahalı olması
b. Üretimin güçlüğü
c. İşlenmesinin güç olması
d. Diğer malzemeler gibi geri dönüşümün olmayışı
e. Tamir edilmelerinin yeni problemler yaratabilmesi
f. Ürünün üretim yöntemi kalitesine bağlı olması

1.1.5 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

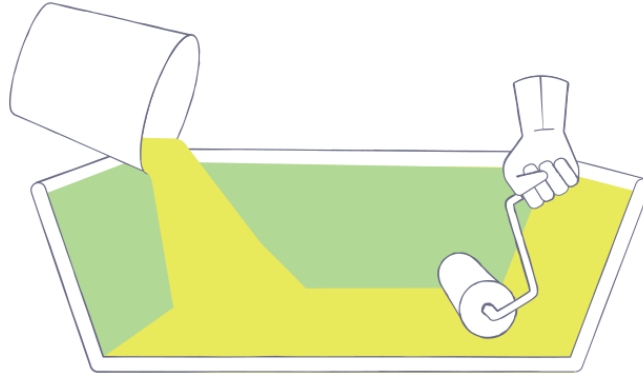
Üç tür kompozit üretim süreci vardır; açık kalıplama, kapalı kalıplama ve polimer döküm kalıplama. Bu kalıplama kategorileri içinde, her birinin kendine özgü faydaları olan çeşitli işleme yöntemleri vardır.

1.1.5.1 Açık Kalıplama

Kompozit malzemeler (reçine ve elyaflar) açık bir kalıba yerleştirilerek kürlenir veya sertleşir. Açık kalıplar için takım maliyeti genellikle ucuzdur, böylece bu tekniğin prototip ve kısa üretim çalışmaları için kullanılmasını mümkün kılar. Açık kalıplamada, hammaddeler (reçineler ve elyaf takviyeleri) kürlenirken veya sertleşirken havaya maruz kalır. El yatırma, elyaf püskürtme ve elyaf sarma gibi farklı yöntemler kullanılır.

El yatırma yöntemi: En yaygın ve en ucuz açık kalıplama yöntemidir. Çünkü en az miktarda ekipman gerektirir. Elyaf takviyeleri bir kalıba elle yerleştirilir ve reçine bir fırça veya rulo ile uygulanır. El yatırma, çok küçükten çok büyüğe kadar çok çeşitli kompozit ürünler yapmak için uygun bir açık kalıplama yöntemidir (Şekil 1.5). Kalıp başına üretim hacmi düşüktür; ancak birden fazla kalıp kullanarak önemli miktarlarda üretim yapmak mümkündür. El yatırma en basit kompozit kalıplama yöntemidir ve düşük maliyetli takımlama, basit işleme ve çok çeşitli parça boyutlarına olanak sağlar. Tasarım değişiklikleri kolaylıkla yapılabilir. Ekipmana minimum yatırım yapılır. Yetenekli operatörlerle iyi üretim oranları ve tutarlı kalite elde edilebilir. Yüksek kaliteli bir yüzey için ilk olarak bir püskürtme tabancası kullanılarak jel kaplama kalıba uygulanır. Koruyucu tabaka kaplama yeterince sertleştiğinde, elyaf takviye kalıbın üzerine manuel olarak yerleştirilir. Laminasyon reçinesi dökülerek, fırçalanarak, püskürtülerek veya bir boya rulosu kullanılarak uygulanır. Laminatı sağlamlaştırmak, takviyeyi iyice ıslatmak ve sıkışmış havayı çıkarmak için FRP silindirleri, boya silindirleri veya silecekler kullanılır. Laminat kalınlığını oluşturmak için sonraki fiberglas takviye katmanları eklenir. Sandviç yapı olarak bilinen uç taneli balsa, köpük ve bal peteği gibi düşük yoğunluklu çekirdek malzemeler plakayı rijitleştirmek için yaygın olarak kullanılır. Genellikle fiberglas kompozit yapının basit,

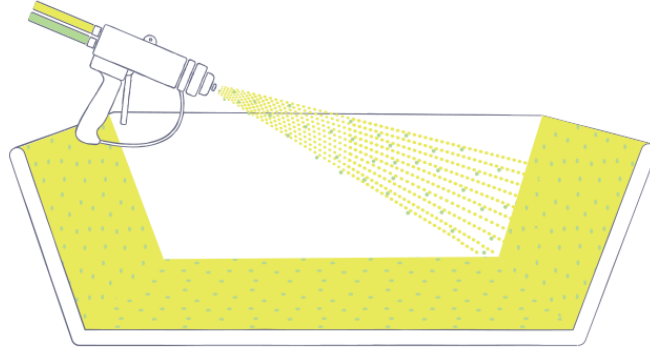
tek boşluklu kalıpları kullanılır. Kalıplar küçükten çok büyüğe kadar değişebilir ve kompozit kalıpları spektrumunda düşük maliyetlidir.



Şekil 1.5: El yatırma yöntemi şeması.

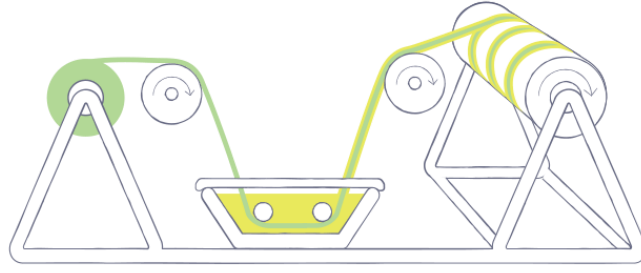
Elyaf püskürtme yöntemi: El yatırmaya benzer, ancak takviye malzemesini kısa lifler halinde kesmek, reçineye eklemek ve karışımı (kırılmış fiber matris karışımı) bir kalıplama yüzeyine biriktirmek için özel ekipman (özellikle bir doğrayıcı tabancası) kullanır. Elyaf püskürtme, el yatırmaya göre daha otomatiktir ve tipik olarak büyük miktarlarda üretim yapmak için kullanılır (Şekil 1.6). Elyaf püskürtme veya doğrama, çok çeşitli şekil ve boyutlarda tekneler, tanklar, nakliye bileşenleri ve küvet/duş üniteleri yapmak için uygunluğu açısından el yatırmaya benzer bir açık kalıp yöntemidir. Doğranmış bir laminat iyi bir uyumluluğa sahiptir ve karmaşık şekilleri kalıplarken bazen el yatırma metodu ile yapılan bir parçadan daha hızlı üretilebilir. Elyaf püskürtme işleminde operatör kalınlığı ve tutarlılığı kontrol eder, bu nedenle işlem el yatırma yöntemine göre operatöre daha bağımlıdır. Kalıp başına üretim hacmi düşük olsa da birden fazla kalıp kullanarak önemli üretim miktarları üretmek mümkündür. Bu proses basit, düşük maliyetli takımlar ve basit işlemler kullanır. Taşınabilir ekipman sayesinde neredeyse hiçbir parça boyutu sınırlaması olmaksızın yerinde imalata izin verir ve proses otomatikleştirilebilir. El yatırmada olduğu gibi, jel kaplama önce kalıba uygulanır ve sertleşmeye bırakılır. Sürekli demetli cam fitil ile reçine karışımı kalıba bırakan bir doğrayıcı tabancadan beslenir. Laminat daha sonra cam lifleri iyice emdirmek ve karışımı sıkıştırmak için rulolanır. Kalınlık için gerektiği şekilde ilave karışım tabakalar eklenir. Dokuma elyaf veya örme kumaşlar gibi takviyeleri karışımlarla birlikte kullanılabilir. El yatırmada kullanılanla aynı çeşitlilikteki çekirdek malzemeler kolayca dahil edilebilir. Bu yöntemde el yatırma ile aynı fiberglas kompozit yapıda basit, tek boşluklu kalıplar kullanılır. Kalıplar

küçükten çok büyüğe kadar değişebilir ve kompozit kalıplar yelpazesinde düşük maliyetlidir.



Şekil 1.6: Elyaf püskürtme yöntemi şeması.

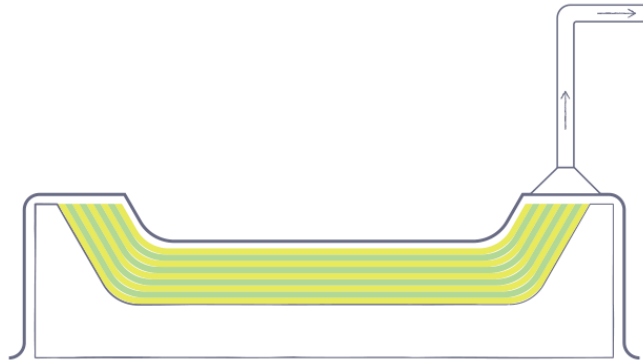
Elyaf sarma yöntemi: Dönen silindirik bir kalıp üzerine reçineye doymuş, sürekli elyaf takviye şeritleri uygulayan otomatik bir işlemdir ve diğer açık kalıplama işlemlerine göre daha az emek gerektirir. Elyaf sarma, kalıp olarak dönen bir mandrel kullanan otomatik bir açık kalıplama işlemidir. Erkek kalıp konfigürasyonu, bitmiş bir iç yüzey ve ürünün dış çapı üzerinde bir laminat yüzey üretir. Elyaf sarma, kimyasal ve yakıt depolama tankları, borular, yığınlar, basınçlı kaplar ve roketler gibi içi boş, genellikle silindirik ürünlerin üretiminde yüksek gerilme mukavemeti sağlayan yüksek derecede elyaf yüklemesi ile uygulanır. Proses, yüksek mukavemet/ağırlık oranlı laminatlar üretir ve homojenlik ve elyaf oryantasyonu üzerinde iyi bir kontrol sağlar. Sürekli iplik fitili bir reçine banyosundan beslenir ve dönen bir mandrel üzerine sarılır. Fital beslemesi, mandrel uzunluğu boyunca hareket eden bir trolley üzerinde çalışır (Şekil 1.7). Filament, gerekli yönlerde maksimum mukavemet sağlamak için önceden belirlenmiş bir geometrik düzende yerleştirilir. Yeterli katman uygulandığında, laminat mandrel üzerinde kürlenir. Kalıplanmış parça daha sonra mandrelden sıyrılır. Basınçlı kaplar için iki eksenli olarak sürekli elyaf sarma yöntemi kullanılabilir. Elyaf sarma, içi boş parçanın iç yüzeyini oluşturmak için çelik veya alüminyumdan yapılmış uygun boyut ve şekle sahip mandreller kullanır. Bazı mandreller parçanın çıkarılmasını kolaylaştırmak için katlanabilir.



Şekil 1.7: Elyaf sarma yöntemi şeması.

1.1.5.2 Kapalı Kalıplama

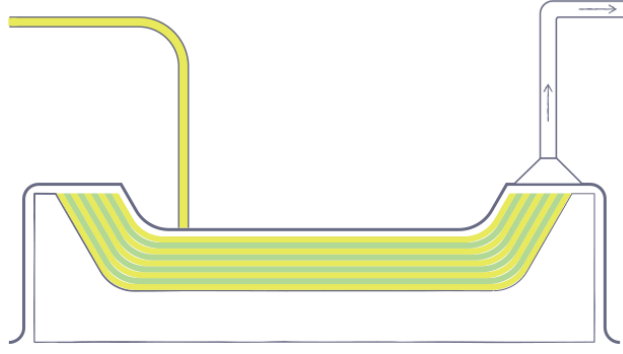
İki taraflı bir yüzey gerekiyorsa ya da yüksek üretim hacimleri gerekiyorsa kompozit malzemelerin atmosfere kapalı bir vakum torbası veya iki taraflı bir kalıp içinde işlendiği ve kürlendiği kapalı kalıplama yöntemi kullanılır. Kapalı kalıplamada, hammaddeler (elyaf ve reçine) iki taraflı bir kalıp içinde veya bir vakum torbası içinde (atmosfere kapalı) sertleşir. İhtiyaca ve imkanlara göre çeşitli kapalı kalıplama yöntemleri uygulanmaktadır.



Şekil 1.8: Vakum torbalama yöntemi şeması.

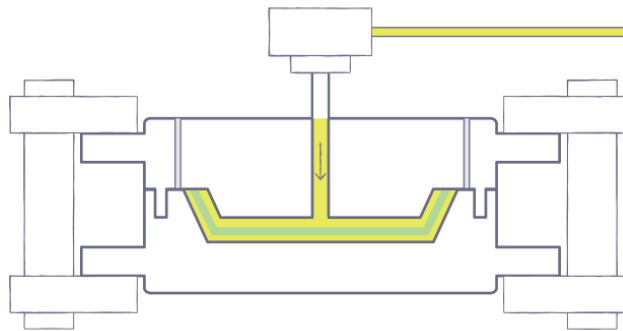
Vakum torbalama yöntemi: Laminatın (bir reçine ile bağlanmış iki veya daha fazla fiber takviye katmanı) mekanik özelliklerini iyileştirmek için tasarlanmıştır (Şekil 1.8). Sıkışan havayı ve fazla reçineyi dışarı atmak için bir vakum oluşturularak laminat negatif basınçlandırılır. Yüksek elyaf konsantrasyonu sandviç yapının katmanları arasında daha iyi yapışma sağlar. Buna ek olarak, vakum torbalama, el yatırma gibi açık kalıplama teknikleri kullanıldığında oluşan fazla reçinenin ortadan kaldırılmasına yardımcı olur. Vakum torbalama, açık kalıp laminatların mekanik

özelliklerini iyileştirir. Bu proses, tek tip konsolidasyon derecesine sahip laminatlar üretirken aynı zamanda sıkışmış havayı çıkararak son ürünlerdeki boşluk içeriğini azaltabilir. Vakum torbasının içindeki basıncın azaltılmasıyla, harici atmosferik basınç torba üzerinde kuvvet uygular. Laminat üzerindeki basınç sıkışmış havayı ve fazla reçineyi uzaklaştırır ve laminatı sıkıştırarak daha yüksek oranda elyaf takviyesi sağlar. Vakum torbalama ıslak yatırma laminatlar ve prepreg kompozitler ile kullanılabilir. Islak yatırma torbalamada takviye elle serme yapılarak emdirilir, ardından vakum torbası kalıba monte edilir ve laminatı sıkıştırmak ve hava boşluklarını gidermek için kullanılır. Önceden emprenye edilmiş gelişmiş kompozitlerin kalıplanması durumunda, prepreg malzeme kalıba serilir, vakum torbası monte edilir ve kalıp ısıtılır veya kalıp negatif atmosferik basınç kuvvetine ek olarak hem ısı hem de dış basınç uygulayan bir otoklava yerleştirilir. Prepreg-vakum torbası-otoklav yöntemi çoğunlukla gelişmiş kompozit uçak ve askeri ürünler oluşturmak için kullanılır. Geleneksel el yatırma teknikleriyle imal edilen yapılar reçine bakımından zengin hale gelebilir ve vakum torbalama bu sorunu ortadan kaldırabilir. Ayrıca, işlem doğru şekilde yapılırsa elyafın tamamen emdirilmesi de sağlanabilir. Vakum torbası işleme ile daha iyi çekirdek bağlama da mümkündür. Vakum torbalama işleminin en basit şeklinde, esnek bir film (PVA, naylon, mylar veya polietilen) ıslak tabakanın üzerine yerleştirilir, kenarlar kapatılır ve vakumlanır. Daha gelişmiş bir vakum torbalama şekli, laminatın üzerine bir ayırma filmi yerleştirilir, ardından fiberglas kumaş, dokunmamış naylon, polyester kumaş veya laminattan fazla reçineyi emen başka bir malzemeden bir hava alma katmanı yerleştirir. Hava alma katmanının üzerine dokuma olmayan bir kumaştan bir hava alma katı yerleştirilir ve vakum torbası tüm tertibatın üzerine monte edilir. Torbanın içinden bir vakum çekilmesi, boşlukları ortadan kaldırmak ve laminattaki fazla reçineyi zorlamak için atmosferik basınç kullanır. Basınç ilavesi ayrıca yüksek elyaf konsantrasyonuna neden olur ve sandviç yapı katmanları arasında daha iyi yapışma sağlar. Konturlu olmayan PVC köpük balsa tabakalarını dışı bir kalıba yerleştirirken, çekirdeğin dış laminata uygun şekilde ikincil olarak bağlanmasını sağlamak için vakum torbalama tercih edilen tekniktir. Kalıplar geleneksel açık kalıp işlemleri için kullanılanlara benzerdir.



Şekil 1.9: Vakum infüzyon yöntemi şeması.

Vakum infüzyon yöntemi (VIP): Reçineyi bir laminatın içine sürmek için vakum basıncı kullanan bir tekniktir. Vakum infüzyon tipik olarak çok büyük yapıların üretiminde kullanılır. Vakum infüzyon yüksek mukavemetli, hafif yapılar üretir ve açık kalıplama işlemi veya ıslak serme vakum torbalama yöntemleri ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde emisyon azaltımı sağlar. Bu süreç, açık kalıplama ile aynı düşük maliyetli takımları kullanır ve minimum ekipman gerektirir. Vakum infüzyonu çok yüksek reçine-elyaf oranlarına olanak sağlar ve kompozitin mekanik özellikleri çok daha üstün olabilmektedir. Vakum infüzyon çok büyük yapıları kalıplamak için uygundur ve düşük hacimli bir kalıplama işlemi olarak kabul edilir. Kalıp geleneksel şekilde jel kaplanabilir. Jel kaplama sertleştikten sonra, laminatın tüm katlarını ve gerekirse çekirdek malzemesini içeren kuru takviye kalıba yerleştirilir. Kuru takviyenin üzerine delikli bir ayırıcı film yerleştirilir. Daha sonra kaba bir ağ veya kırışık bir kattan oluşan bir akış ortamı yerleştirilir ve delikli boru, reçineyi laminat boyunca dağıtmak için bir manifold olarak konumlandırılır. Vakum torbası daha sonra kalıp çevresine yerleştirilir ve kapatılır. Vakum torbası ile reçine kabı arasında bir tüp bağlanır. Laminatı birleştirmek için bir vakum uygulanır ve reçine kalıbın içine çekilir (Şekil 1.9).

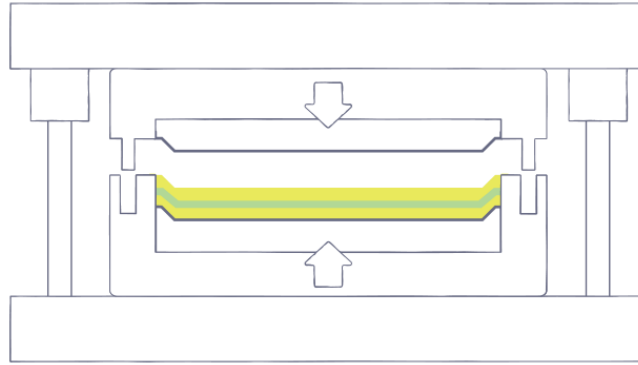


Şekil 1.10: Reçine transfer kalıplama yöntemi şeması.

Reçine transfer kalıplama yöntemi: Sıvı kalıplama olarak da adlandırılan reçine transfer kalıplama (RTM), takviye malzemesinin kapalı bir kalıba yüklendiği, kalıbın sıkıştırıldığı ve reçinenin basınç altında (enjeksiyon portları aracılığıyla) pompalandığı kapalı bir kalıplama yöntemidir. Bu süreç, açıkta kalan tüm yüzeylerde pürüzsüz yüzeylere sahip karmaşık parçalar üretir. Süreç basit veya son derece otomatik olabilir ve döngü süreleri hızlıdır. Reçine transfer kalıplama (RTM), kompozit üretmek için kullanılan bir ara hacim kalıplama işlemidir. Şekil 1.10'da reçine basınç altında bir kalıp boşluğuna enjekte edilir. Takviye malzemesi kalıbın içine kuru olarak serilerek, 3 boyutlu takviyeler de dahil olmak üzere herhangi bir malzeme ve yönlendirme kombinasyonu kullanılabilir. Parça kalınlığı takım boşluğu tarafından belirlenir. Sıcaklık kontrollü takımlarda hızlı döngü süreleri elde edilebilir ve süreç basitten yüksek otomasyona kadar değişebilir. RTM, düşük maliyetli kompozit kalıplardan sıcaklık kontrollü metal takımlara kadar çok çeşitli takımlar kullanılabilir. Kalıp boşluğundaki reçine akışını artırmak için vakum desteği kullanılabilir. Gerekirse kalıp geleneksel olarak jel kaplanır. Takviye ve çekirdek malzeme kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılarak kelepçelenir. Reçine, enjeksiyon ekipmanı kullanılarak basınç altında enjekte edilir ve parça kalıp içinde kürlenir. RTM oda sıcaklığında yapılabilir; ancak hızlı döngü süreleri ve ürün tutarlılığı elde etmek için ısıtılmış kalıplar gereklidir. Kenetleme, çevre kenetleme veya pres kenetleme ile gerçekleştirilebilir. RTM, beklenen çalışma süresine bağlı olarak sert veya yumuşak kalıplar kullanılabilir. Yumuşak kalıplar polyester veya epoksi kalıplar olurken, sert kalıplar dökme işlenmiş alüminyum, elektroform nikel veya işlenmiş çelik kalıplardan oluşabilir. RTM, tüm kompozit prosesleri arasında en geniş takım yelpazesinden yararlanabilir. Kalıplar çok düşük maliyetli kalıplardan yüksek maliyetli, ömür boyu kullanılabilen kalıplara kadar çeşitlilik gösterebilir.

Basınçlı kalıplama yöntemi: Kompozit malzemelerin kürleşene kadar yüksek basınç ve sıcaklık altında iki eşleşen kalıp arasına sıkıştırıldığı bir üretim sürecidir (Şekil 1.11). Bu teknik, büyük miktarlarda karmaşık elyaf takviyeli polimer parçaların hızla kürleşmesi için kullanılır. Basınçlı kalıp hızlı kalıplama döngülerine ve yüksek parça homojenliğine sahiptir, proses otomatikleştirilebilir, ek olarak işçilik maliyetleri düşüktür ve tasarım esnekliği ve pürüzsüz yüzey kalitesi sağlar. Basınçlı kalıplama; karmaşık, elyaf takviyeli polimer parçaların hızlı bir döngü süresinde kalıplanması için uygun, yüksek hacimli, yüksek basınçlı bir yöntemdir. Kalıplanan malzemenin türüne

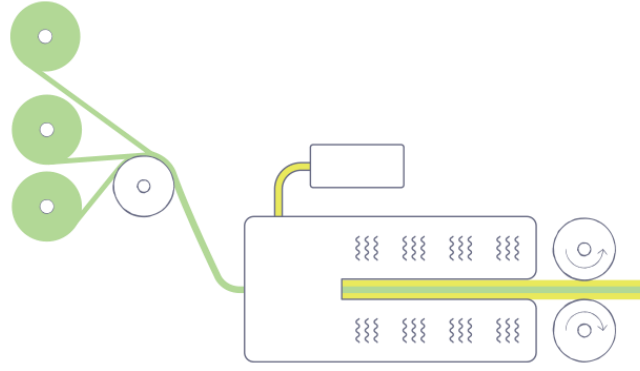
göre tanımlanan çeşitli basınçlı kalıplama türleri vardır; levha kalıplama (SMC), yığın kalıplama (BMC), kalın kalıplama (TMC) ve ıslak yatırma kalıplama. Basınçlı kalıp takımları, büyük hidrolik preslere monte edilmiş ısıtılmış metal kalıplardan oluşur, proses otomatikleştirilebilir. Basınçlı kalıplama, parça tasarımında esneklik ve kesici uçlar, nervürler, çıkıntılar ve ekler gibi geometrilere olanak sağlar. Yüzey kalitesi yüksek ürünler elde edilebilir ve daha düşük parça ürün maliyetine katkıda bulunur. Basınçlı kalıp yönteminde sonraki düzeltme ve işleme gereklilikleri en aza indirilir ve işçilik maliyetleri düşüktür. Kalıp seti hidrolik veya mekanik bir pres kalıbına monte edilir ve kalıplar 250 ile 400 °C arasında ısıtılır. Kalıplar genellikle tek veya çok gözlü konfigürasyonlarda olabilen işlenmiş veya dökme metal veya alaşım kalıplardan oluşur. Çelik kalıplar sertleştirilir, bazen daha fazla dayanıklılık için krom kaplanır.



Şekil 1.11: Basınçlı kalıplama yöntemi şeması.

Profil çekme yöntemi (pultrüzyon): Kompozitleri çubuklar gibi uzun şekillere dönüştürmek için kullanılır (Şekil 1.12). Sürekli takviye telleri, emdirilmeleri için bir reçine banyosundan çekilir, ardından kompozitleri sürekli uzunluklar halinde şekillendiren ısıtılmış çelik kalıplardan çekilir. Süreç sürekli olarak çalışır, böylece kolayca otomatikleştirilebilir. İşçilik maliyetleri düşüktür ve bitmiş ürünler oldukça iyi özellikler sergiler. Profil çekme; çubuk stoğu, yapısal şekiller, kirişler, kanallar, boru, tüp, olta çubukları ve golf sopası şaftları gibi sabit bir kesite sahip ürünlerin üretimi için sürekli bir işlemdir. Profil çekme yöntemi, son derece yüksek elyaf yüklemesine sahip profiller üretir; bu nedenle, pultrüzyon ürünleri yüksek yapısal özelliklere sahiptir. Süreç kolayca otomatikleştirilebilir ve hem basit hem de karmaşık kesitlere uyarlanabilir. Çok yüksek mukavemetler mümkündür ve işçilik maliyetleri düşüktür. Sürekli cam elyaf, karbon elyaf veya bazalt elyaf fitil, mat, kumaş veya yüzey kaplama örtüsü bir reçine banyosuna emdirilir ve daha sonra güçlü bir çekici mekanizması ile

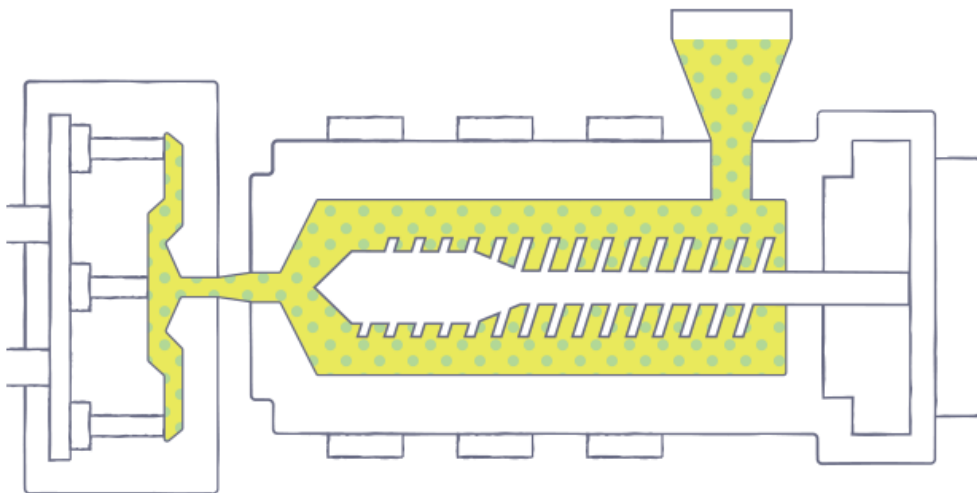
çelik bir kalıptan çekilir (bu nedenle pul-trüzyon terimi kullanılır). Çelik kalıp reçineye doymuş takviyeyi birleştirir, stoğun şeklini belirler ve elyaf/reçine oranını kontrol eder. Kalıp, reçineyi hızla sertleştirmek için ısıtılır. Birkaç çözü (bilyesi) bir raf üzerine yerleştirilir ve bir dizi çekme cihazı ve fitil kılavuzu elyafı kalıba yönlendirir. Sertleştirilmiş çelik kalıplar işlenir ve reçineye doymuş elyafın ilk şekillendirmesini yapmak için bir ön kalıp alanı içerir. Kalıplar, elektrikli veya sıcak yağ ile ısıtılır. En son pultrüzyon teknolojisi, reçinenin harici bir reçine banyosu yerine kalıbın içine verildiği doğrudan enjeksiyon kalıplarını kullanır.



Şekil 1.12: Profil çekme yöntemi şeması.

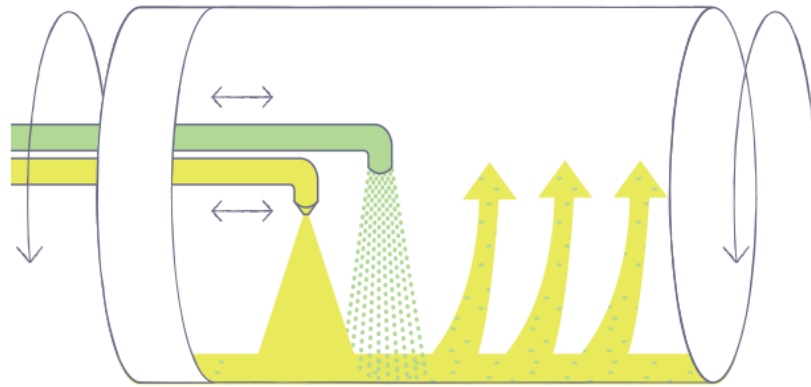
Enjeksiyon kalıplama yöntemi (RRIM): Otomotiv dış ve iç aksamlarının üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu proseste, iki veya daha fazla reçine ayrı ayrı ısıtılır ve kırılmış elyaflarla birleştirilir. Karışım yüksek basınç altında bir kalıba enjekte edilir ve basınçlandırılır. Reçine hızlı bir şekilde kurluşur. RRIM kompozitleri, çok hızlı döngü süresi, düşük işçilik, düşük kalıp bağlama basıncı ve düşük hurda oranı gibi birçok işleme avantajına sahiptir. RRIM, reçinenin özelliklerini iyileştirmek için takviyeler kullanır. Takviye kullanımı ile polimerizasyon büzülmesi azaltılır, termal genişleme azaltılır, yüksek sıcaklıklarda kompozitin sarkması en aza indirilir ve sertlik, çekme mukavemeti ve çekme uzaması gibi diğer mekanik özellikler genellikle iyileştirilir. Kırılmış elyaflar veya pullar, karıştırma potunda reaksiyona girmeden önce doğrudan reçineye eklenebilir. Ölçüm, yüksek basınçlı pompalar veya enjeksiyon silindri ile gerçekleştirilir. Tipik olarak küçük bir karıştırma odası kullanılır. İki reçine akışı yüksek basınç altında karışım odasının zıt taraflarından girer. Karıştırma, bu iki reçine akışının çarpışmasından meydana gelir. Akışlar çok yüksek basınçta karıştırılmasına rağmen sonuç düşük viskoziteli bir sıvıdır. Düşük viskoziteli karışık reçine, 50 psi (345 kPa) gibi nispeten düşük bir basınçta kalıba kolayca enjekte edilir.

Polimerizasyon, kalıp boşluğu içinde çok hızlı bir şekilde gerçekleşir ve çok az ek ısı gerekir veya hiç gerekmez. RRIM prosesi özel reçineler ve takviyeler gerektirir. Epoksiler, polyesterler, naylonlar ve poliüretanlar dahil olmak üzere bir dizi reçine RRIM işlemi için başarıyla geliştirilmiştir. Günümüzde poliüretan, RRIM'de yaygın reçinedir. Kullanılan üretanların çoğu elastomeriktir ve elastik modülleri 20.000 psi ile 500.000 psi (170 MPa ile 3,5 GPa) arasında değişmektedir. Temel RRIM takviyeleri doğranmış veya kırılmış cam elyafıdır. RRIM sürecinin farklı bir varyasyonu yapısal RIM (SRIM)'dir. Bu proseste, kırılmış elyaf preformları veya matları kalıp boşluğuna yerleştirilir. Kalıp sıkıştırılır ve kalıp boşluğuna reçine enjekte edilir. Reaksiyona giren reçine, kalıbı tamamen dolduracak ve takviye liflerine nüfuz edecek kadar uzun süre sıvı halde kalır. Ardından reçine hızla kürleşir (Şekil 1.13). Halihazırda RRIM ürünleri için başlıca pazar ulaşımıdır. RRIM parçaları için otomotiv ve kamyon uygulamaları arasında A Sınıfı gövde panelleri, ön paneller, tampon kirişleri, yedek lastik kapakları, zemin tavaları ve diğer benzer ürünler bulunmaktadır. Poliüria/amid gibi kontrol edilebilir reaktivite reçinelerinin ortaya çıkması daha büyük makinelere, daha büyük kelepçelere ve daha büyük parçalara doğru bir eğilim yaratmıştır. Ağırlığı 45 kg'ı aşan çok büyük RRIM kalıplı parçalar üretilmiştir. Bunun gibi çığır açan uygulamalar, RRIM ürünlerinde gelecekteki eğilimin daha büyük ve daha sofistike parçalar içeren daha fazla pazar kabul edilebilirliği yönünde olacağını açıkça göstermektedir.



Şekil 1.13: Enjeksiyon kalıplama yöntemi şeması.

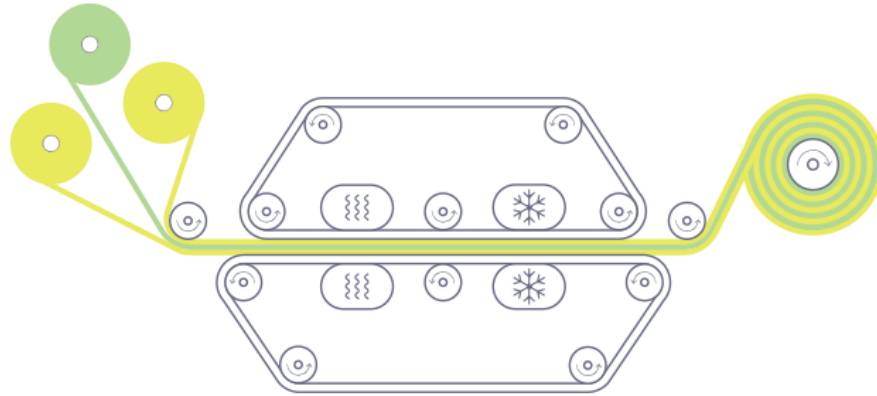
Döndürme kalıplama yönteminde: Takviyeler ve reçine dönen bir kalıbın iç yüzeyine doğru biriktirilir. Merkezkaç kuvveti, malzeme kürlenene veya sertleşene kadar bunları yerinde tutar. Döndürme kalıplama, içi boş parçalar (iki düz yüzeyli borular gibi) üretmek için kullanılır. Özellikle petrol ve kimya endüstrisi tesisatları için borular ve kimyasal depolama tankları gibi büyük çaplı yapıların üretilmesi için çok uygundur. Döndürme kalıplama yöntemi; telefon, sokak lambası ve diğer direkleri üretmek için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Şekil 1.14'teki gibi, kalıbın iç yüzeyine karşı kürlenene parçanın dış yüzeyi bitmiş yüzeyi temsil eder. Döndürme kalıplama parçalarının iç yüzeyine, yüzey görünümünü iyileştirmek ve parçada ek kimyasal direnç sağlamak için ilave bir saf reçine kaplaması verilebilir. Büyük çaplı kompozit boru ve tanklar ticari olarak santrifüj döküm ile üretilmektedir. Döndürme kalıplama yönteminin avantajları arasında bitmiş bir dış yüzey ve işleme sırasında uçucuların tutulması yer alır. Döndürme kalıplama yönteminin birincil sınırlamaları, büyük boyutlu kalıpların döndürme zorluğu ve takım başına nispeten düşük verimliliğidir.



Şekil 1.14: Döndürme kalıplama yöntemi şeması.

Sürekli çekme yöntemi: Römork ve karavan panellerinde, trafik işaretleyicilerinde, sunroolarda, buzdolabı, beyaz eşya, bina panellerinde ve elektrik yalıtım malzemelerinde kullanılan ürünler için opak ve yarı saydam düz veya oluklu levhalar ve paneller yapmak için kullanılır. Elyaf ve reçinenin birleştirildiği, iki plastik taşıyıcı film arasına sıkıştırıldığı ve bir konveyör boyunca yönlendirildiği otomatik bir süreçtir. Şekillendirme silindirleri tabakaları şekillendirir ve reçine kompozit paneli oluşturmak için bir fırın veya ısıtma bölgesinde kürlenir. Paneller otomatik olarak istenen genişlik ve uzunlukta kesilir. Tipik olarak, 3 m genişliğe kadar ekipmanlar,

işlem boyunca çekilen plastik film üzerinde takviye ve reçineyi birleştirir. Takviye ve reçinenin üzerine ikinci bir plastik film uygulanarak karıştırma ve havanın dışarıda bırakılması sağlanır, bu da genellikle sıkıştırma silindirleri ile gerçekleştirilir (Şekil 1.15). Kürlenme bir fırında tamamlanır. Paneller otomatik olarak enine ve boyuna kesilir. Oluklu levha, sıkıştırılmış levhayı kürlenme sırasında istenen şekilde tutan pabuçlar ile üretilir. Özel yüzey efektleri, daha sonra çıkarılan kabartmalı taşıyıcı filmler kullanılarak oluşturulur. İşlemde hem mat takviyeler hem de özel geniş kesicilerle kırılmış elyaflar kullanılır. Polyester ve akrilik polimerler suya dirençli ürünler için sürekli laminasyon yönteminde birincil reçinelerdir.



Şekil 1.15: Sürekli çekme yöntemi şeması.

1.1.5.3 Polimer Döküm Kalıplama

Reçine ve dolgu maddelerinden oluşan karışım bir kalıba dökülür (tipik olarak takviye olmadan) ve kürlenmeye veya sertleşmeye bırakılır. Bu kalıplama yöntemlerinde bazen açık kalıplama bazen de kapalı kalıplama kullanılır. Dökme polimerler kompozit endüstrisinde benzersizdir, tipik olarak elyaf takviyesine bulundurmazlar, bir uygulamanın belirli mukavemet gereksinimlerini karşılamak için tasarlanmıştır. Dökme polimer kalıplamada, herhangi bir şekil veya boyutta parça üretmek için genellikle iki yöntem kullanılır.

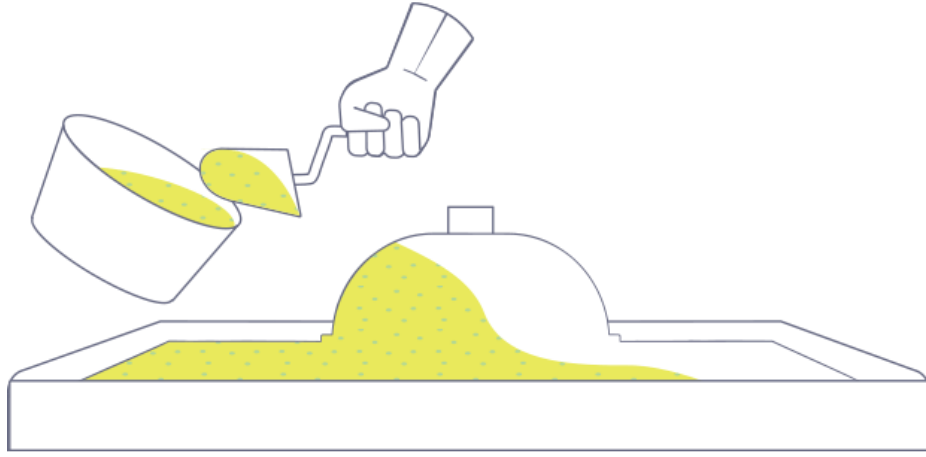
Döküm kalıplama yöntemi: Bu yöntemde jelkot kaplama kompozit bir ürün üzerinde estetik bir dış yüzey sağlamak ve dış mekân ürünlerinde ortam koşullarına dayanıklılık sağlamak üzere formüle edilmiş özel bir polyester reçinedir. Jel kaplama

baz bir reçine ve katkı maddesinden oluşur. Döküm yöntemi jel kaplamalı bir yüzey ve matris reçine dökme işlemi kullanılarak uygulanmaktadır (Şekil 1.16). Bu işlemde kalıp yüzeyine genellikle şeffaf bir kaplama filmi püskürtülür. Kaplama yeterince kürleştikten sonra, polyester bir reçine matrisine çeşitli dolgu maddeleri eklenerek karıştırılır. Hem düz bir arka plan rengi hem de doğal taşta bulunan damarların görünümü için pigmentler eklenebilir. Reçine matrisi daha sonra kalıba aktarılır ve burada matrisi düzleştirmek ve sıkıştırmak için titreşim uygulanır. Kürleşmenin ardından parça kalıptan çıkarılır. Jelkottaki çözücü stiren monomer ve/veya metilmetakrilattır (akrilik) ve kürlenme sırasında çapraz bağlar oluşturur. Döküm ürünlerinin görünümü, kullanılan dolgu maddesinin türüne ve renklendiricilerin matrise uygulanmasına göre belirlenir. Dolgu maddeleri çeşitli malzemelerden üretilir. Kompozit endüstrisinde kullanılan dolgu maddelerinin çoğu mineral maddelerdir. Mineral dolgu maddeleri, kimyasal yapılarıyla ilişkili olarak kendilerine özgü şekillere sahiptir.

Mermer: Doğal mermer görünümü, kalsiyum karbonat dolgu maddesi kullanılarak bir matris formüle edilerek yeniden üretilir. Bazı durumlarda, diğer dolgu maddeleri ile kombinasyonlar kullanılabilir. Reçine, sertleştirici, dolgu maddesi ve pigment karıştırılarak düz renkli bir matris oluşturulur. Mermer damar efekti, matrise ikinci bir pigment eklenerek ve istenen görünümü elde etmek için kısmen karıştırılarak oluşturulur.

Oniks: Dökme oniks üretim süreci, alümina trihidrat (ATH) dolgu maddesi kullanılması dışında dökme mermer benzer. Dökme oniks matrisi genellikle dökme mermerine kıyasla daha fazla bir reçine içeriğine sahiptir ve malzemelerin kombinasyonu yarı saydam bir görünüm yaratır. Oniks taş görünümü elde etmek için matrise arka plan ve damar pigmentleri eklenir.

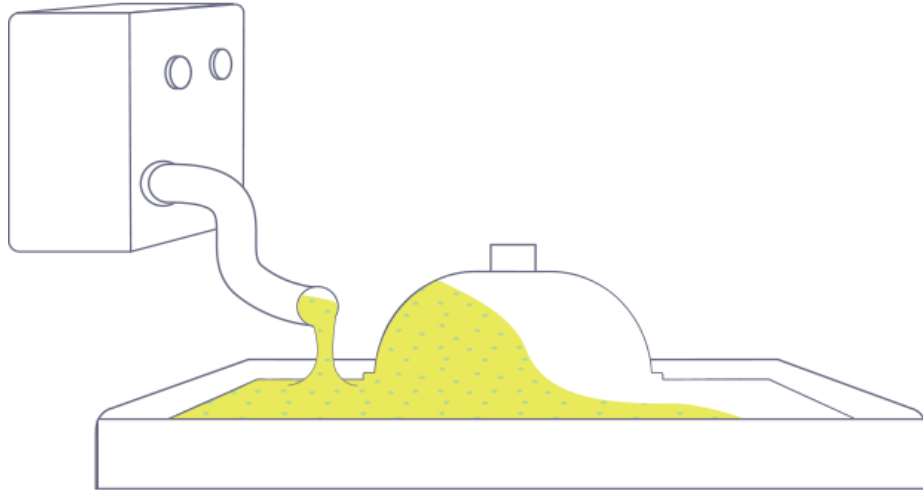
Granit: Dökme granit görünümü, renkli mıcırın reçine matrisine karıştırılmasıyla oluşturulur. Bu mıcır dökme mermerden, termoplastiklerden hatta parçacıklar halinde öğütülmüş gerçek granit taşından yapılabilir. Dökme granit matrisi genellikle polyester reçine, sertleştirici, renkli mıcır ve ATH dolgu maddesinden oluşur.



Şekil 1.16: Döküm kalıplama yöntemi şeması (Blagojević, 2020).

Katı yüzey kalıplama: Bu metod ürünleri jelkot kaplamalı yüzeyi olmayan bir döküm matrisinden oluşur. Matris içinde sıkışmış havayı çıkarmak için vakum kullanılabilir. Katı yüzey ürünleri sınırsız tasarım stilleri sunar. Katı yüzey, polyester reçine veya akrilik reçine, başlatıcı, ATH, renk mıcıruları ve pigment karışımından yapılan boşluksuz bir dökümdür (Şekil 1.17). Katı yüzey, doğal granit taşı taklidi gibi çok çeşitli görünüm ve estetik efektler elde etmek için formüle edilebilir. Bu nedenle, genellikle mutfak tezgâhı gibi ürünlerin üretiminde kullanılır. Dökme mermerin jelkot kaplamalı yüzeyinin aksine, katı yüzey kalıplama ürünleri baştan sona homojendir. Bu, fabrikasyon parçaların göze çarpmadan birleştirilmesini ve yüzeyin orijinal durumu gibi tamir edilebilmesini veya yeniden işlenmesini mümkün kılar. Katı yüzeyli dökümler, boşluksuz bir matris üretmek için vakum-karıştırma teknikleri kullanılarak yapılır. Kesildiğinde, zımparalandığında veya yapıştirıldığında düzgün bir yüzey elde edilen bir malzeme sağlar. Katı yüzeyli dökümler, matrisin fiziksel özelliklerini geliştirmek ve stabil bir ürün üretmek için yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 200 °C) kürleştirilir. Katı yüzey, yüksek hacimli karmaşık katı yüzey parçalarının kalıplanması için uygun olan yüksek basınçlı, kapalı bir kalıplama işlemi olan presle kalıplanabilir. Basınçlı kalıplama prosesinde büyük hidrolik preslere monte edilmiş ısıtmalı metal kalıplar kullanılır. Basınçlı kalıplama hızlı kalıplama döngüleri ve yüksek parça homojenliği üretir ancak takım ve ekipman için yüksek sermaye yatırımı gerektirir. Keskin kenarlar, nervürler, çıkıntılar veya ekler gibi özellikler kalıplanabilir. İyi yüzey kalitesi, son ürün maliyetlerinin düşmesine katkıda bulunabilir. Basınçlı kalıplamada proses sonrası düzeltme ve işleme uygulamaları en

aza indirilir. Bu proses sermaye yoğun ve işgücü verimlidir. Sermaye maliyetleri işçilik, hızlı döngü süreleri ve kalıp sonrası son işlemlerin azaltılması nedeniyle düşükken, ısıtmalı metal takımlar ve kalıplama presleri nedeniyle yüksektir. Basınçlı kalıplama, tek tip parçaların büyük üretim hacimleri için iyi bir seçenektir. Bu ürünler, matristeki gerçek taş sayesinde, tüm tüketici sınıfı dökme polimer ürünler arasında en sert ve en dayanıklı üründür. Yüksek sıcaklık direnci, düşük termal genleşme ve iyi leke veya çizilme direnci gibi özellikler barındırır. Tipik olarak az miktarda reçine (ağırlıkça %8-%15) taş parçacıklarıyla birleştirilir ve açık boşluklu bir kalıba dökülür ya da matristen hava çıkarmak ve düşük gözenekli bir döküm halinde preslemek için vakum destekli bir pres tekniği kullanılabilir.



Şekil 1.17: Katı yüzey kalıplama yöntemi şeması (Blagojević, 2020).

1.1.6 Matris Malzemesinde Kullanılan Katkı ve Dolgu Maddeleri

Katkı maddeleri, malzemelerin özelliklerini değiştirmek ve laminanın performansını uyarlamak için kompozitlerde kullanılır. Reçineye eklendiğinde, dolgu maddeleri su direnci, hava koşullarına dayanıklılık, yüzey düzgünlüğü, sertlik, boyutsal stabilite ve sıcaklık direnci gibi özellikleri geliştirebilir. Polimerlerin kullanılabilirliğini artırmak, işlenebilirliklerini geliştirmek veya ürün dayanıklılığını uzatmak için çok çeşitli katkı maddeleri ve modifiye edici bileşenler kullanılabilir. Katkı maddeleri genellikle reçinelere, takviyelere ve dolgu maddelerine kıyasla ağırlıkça nispeten düşük miktarlarda kullanılsa da kritik işlevleri yerine getirirler. Katkı maddeleri ve modifiye ediciler genellikle temel malzeme sisteminin maliyetini

artırsa da bu malzemeler her zaman maliyet/performansı iyileştirir. Polimer matrisinin bir parçası haline gelen reçine özelliklerini değiştirmek ve geliştirmek için kullanılan bir dizi katkı maddesi vardır. Bu katkı maddeleri şunları içerir;

Tiksotropolar: El yatırma veya püskürtme gibi bazı işlemlerde tiksotropik maddeler kullanılabilir. Tiksotropik maddeler içeren reçineler hareketsizken yüksek viskozitelerde kalır. Bu, sıvı reçinenin dikey yüzeylerden akma veya akıtma eğilimini azaltır. Reçine kaymaya maruz kaldığında viskozite azalır ve reçine kalıp üzerine kolayca püskürtülebilir veya fırçalanabilir. Füme silika ve bazı killer yaygın tiksotropik maddelerdir.

Pigmentler ve renklendiriciler: Pigment dispersiyonları ve renk pastaları kozmetik amaçlarla veya hava koşullarına dayanıklılığı artırmak için reçineye veya jelkote eklenebilir. Jel katlar söz konusu olduğunda, ince öğütülmüş pigmentler yüksek parçalayıcı karıştırıcılar kullanılarak reçine ile karıştırılır. Birçok pigment polyester reçinede boyadakinden farklı reaksiyon gösterir ve çeşitli pigmentler reçine jel süresini yavaşlatabilir veya hızlandırabilir. Katkı maddeleri reçinenin bir parçası olarak karıştırılabilir veya kalıplama işleminin bir parçası olarak (jel kat olarak) uygulanabilir. Kalıplamadan sonra çok çeşitli kaplamalar uygulanabilir.

Yanma geciktiriciler: Termoset reçinelerin çoğu yanıcıdır ve yandıklarında zehirli duman oluştururlar. Yanma direnci, uygun reçine seçimi, dolgu maddesi kullanımı veya alev geciktirici katkı maddeleri ile iyileştirilir. Bu kategoriye ATH (alümina trihidrat), brom, klor, borat ve fosfor içeren malzemeler dahildir.

Bastırıcılar: Açık kalıp uygulamalarında, hava kalitesi uyumluluğu için buharlaşmayı engellemek amacıyla stiren emisyon bastırıcılar kullanılır. Bu mum bazlı malzemeler reçine yüzeyinde bir film oluşturur ve kürlenme sırasında stiren emisyonlarını azaltır.

UV inhibitörleri ve stabilizatörler: Hem termoset hem de termoplastik kompozitler, ultraviyole (UV) radyasyon nedeniyle parlaklık kaybı, çatlama, tebeşirlenme, renk değişikliği, elektriksel özelliklerde değişiklik, kırılma ve parçalanmayı önlemek için eklenen özel malzemeler kullanılabilir. UV'yi emerek kompozitleri koruyan katkı maddelerine ultraviyole emiciler denir. Polimeri başka bir

şekilde koruyan malzemeler ultraviyole stabilizatörleri olarak bilinir. Jel kaplı olmayan bir reçinenin güneş ışığına maruz kalması durumunda, bir UV stabilizatörünün eklenmesi yüzey bozulmasını yavaşlatacaktır.

İletken katkı maddeleri: Çoğu kompozit elektriği iletmez. Metal, karbon partikülleri veya iletken elyaf ilavesiyle bir dereceye kadar elektrik iletkenliği elde etmek mümkündür. İletken malzemeler eklenerek elektromanyetik parazit koruması elde edilebilir.

Ayırıcılar: Ayırıcı maddeler parçaların kalıplardan çıkarılmasını kolaylaştırır. Bu ürünler reçineye eklenebilir, kalıplara uygulanabilir veya her ikisi de yapılabilir. Çinko stearat, basınçlı kalıplama için reçineye karıştırılan popüler bir kalıp ayırıcıdır. Mumlar, silikonlar ve diğer kalıp ayırıcılar doğrudan kalıp yüzeyine uygulanabilir.

Başlatıcılar, destekleyiciler ve inhibitörler: Poliesterlerde en önemli katkı maddesi katalizör veya başlatıcıdır. Tipik olarak, oda sıcaklığında kürlenmiş işlemler için metiletilketon peroksit (MEKP) gibi organik peroksit kullanılır veya ısıyla kürlenmiş kalıplama için reçineye benzoil peroksit eklenir. Isı ile tetiklendiğinde veya bir destekleyici (kobalt naftenat gibi) ile birlikte kullanıldığında, peroksitler reaktif bir duruma dönüşerek (serbest radikaller sergileyerek) doymamış reçinenin reaksiyona girmesine (çapraz bağ) ve katı hale gelmesine neden olur. TBC (tersiyer bütül katekol) gibi bazı katkı maddeleri reaksiyon hızını yavaşlatmak için kullanılır ve inhibitör olarak adlandırılır. DMA (dimetil anilin) gibi hızlandırıcılar kürlenmeyi hızlandırır.

Dolgu maddeleri: Dolgu maddeleri sadece kompozitlerin maliyetini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda sıklıkla, sadece takviye ve reçine bileşenleri ile elde edilemeyecek performans iyileştirmeleri sağlar. Dolgu maddeleri genellikle genişletici olarak adlandırılır. Reçineler ve takviyelerle karşılaştırıldığında, dolgu maddeleri ana bileşenler arasında en ucuz olanlardır. Dolgu maddeleri, kompozit laminatlardaki organik içeriği azaltarak yanma ve duman performansı da dahil olmak üzere mekanik özellikleri iyileştirebilir. Ayrıca, dolgulu reçineler dolgusuz reçinelere göre daha az büzülür ve böylece kalıplanmış parçaların boyutsal kontrolünü iyileştirir. Su direnci, hava koşullarına dayanıklılık, yüzey düzgünlüğü, sertlik, boyutsal kararlılık ve sıcaklık direnci gibi önemli özelliklerin tümü, dolgu maddelerinin doğru kullanımıyla geliştirilebilir.

Kompozitlerde inorganik dolgu maddelerinin kullanımı giderek artmaktadır. Kompozit laminatlarda kullanıldığında, inorganik dolgu maddeleri ağırlıkça %40 ila %65 oranında olabilmektedir. Kompozitlerde kullanılacak bir dizi inorganik dolgu malzemesi bulunmaktadır.

Kalsiyum karbonat en yaygın kullanılan inorganik dolgu maddesidir. Özellikle kompozit uygulamaları için köklü bölgesel tedarikçilerden çeşitli partikül boyutlarında ve işlemlerinde düşük maliyetle temin edilebilir. Kalsiyum karbonat dolgu maddesinin en yaygın sınıfları kireçtaşı veya mermerden elde edilir ve otomobil parçalarında çok yaygındır.

Kaolin (sulu alüminyum silikat) en yaygın kullanılan ikinci dolgu maddesidir. Endüstri genelinde daha yaygın malzeme adı olan kil olarak bilinir. Çıkarılan killer, safsızlıkların giderilmesi ve ürünün kompozitlerde kullanılmak üzere sınıflandırılması için ya hava flotasyonu ya da su ile yıkama yoluyla işlenir. Çok çeşitli partikül boyutları mevcuttur.

Alümina trihidrat, gelişmiş yanma/duman performansı gerektiğinde sıklıkla kullanılır. Yüksek sıcaklığa maruz kaldığında, bu dolgu maddesi su verir (hidrasyon), böylece alev yayılımını ve duman oluşumunu azaltır. Küvetler, duş kabinleri ve ilgili yapı ürünleri gibi kompozit sıhhi tesisat armatür uygulamaları genellikle bu amaçla alümina trihidrat içerir.

Kalsiyum sülfat, küvet/duş endüstrisi tarafından kullanılan önemli bir alev/duman geciktirici dolgu maddesidir. Daha az hidrasyon suyuna sahiptir ve su daha düşük bir sıcaklıkta açığa çıkar. Bu mineral dolgu maddesi düşük maliyetli bir alev/duman geciktirici dolgu maddesi sunar.

Nano partiküller: Son zamanlarda yapılan çeşitli çalışmalar, nanometre boyutlarındaki inorganik nano parçacıkların veya dolgu maddelerinin polimer matrislerle birleştirilmesi sonucu polimerin özelliklerini geliştirmek için verilen çabalara netice vermektedir (Shukla, 2008). Polimer matrise gömülü nano parçalar katkısız polimerlerle kıyaslandığında benzersiz mekanik, optik, elektriksel ve manyetik özelliklerinden dolayı yükselen bir trend olmaktadır (Shokrieh, 2012). Polimer nanokompozit malzemeler, polimerik bir matris ve buna gömülü 1 ile 100 nm

arasında değişen ölçülerde nanometre boyutunda inorganik parçalar içeren iki faza sahiptirler (Luo, 2003). Bu parçacıkların nanometre boyutlarından dolayı nanopartiküller, birim hacime düşen orantılı geniş yüzey alanlarına sahip olduğundan olağanüstü özellikler gösterirler. Bu özellikler, yüzeyler tarafından kullanılan oldukça önemli kimyasal ve fiziksel etkileşimlerden dolayı polimer matris ile arabirimlerdeki nanopartiküller arasındaki faz etkileşiminin bir sonucudur (Pavlidou, 2008).

Polimer nanokompozitlere olan ilgi, aslen matrisin özelliklerinde mükemmel bir etki oluşturan polimerik bir matrisin içine nano boyutlu dolgu maddelerinin ilavesinden kaynaklanmaktadır. 1990 yılında Toyota araştırma grubu polimer nanokompozitler üzerindeki ilk çalışmayı uyguladılar. Bu araştırmacılar polimerizasyon yöntemi vasıtasıyla nylon-6/montmorillonit kil esaslı polimer nanokompozit sentezlediler. Nylon-6 polimere, ağırlıkça %5 oranında kil eklendiğinde çekme modülü %68 ve eğilme modülü %224 artmıştır (Usuki, 1993). Polimerleri nanometre ölçeğinde kil ile güçlendirerek çok çeşitli mühendislik özelliklerinde önemli bir gelişme gösteren bu çalışma polimer/katmanlı silikat nanokompozitlere ve genel olarak polimer nanokompozitlere olan evrensel güncel araştırmalara öncü olarak kabul edilir (Gao, 2004).

Kompozit üretiminde kullanılan polimerlerin dayanıklılığını artırmak, işlevselliğini geliştirmek, performanslarını ve özelliklerini iyileştirmek, kullanım alanlarını genişletmek veya son ürün maliyetini düşürmek amacıyla günümüzde kompozitlerde kullanılan çeşitli özelliklerde nano katkı malzemeleri ve dolgu maddelerine aşığıdaki örnekler verilebilir;

- GnP, RGnP, karbon tabanlı katkı malzemeleri,
- SiC, Al₂O₃, Ti gibi katkılar,
- Nanokil, polyamid katkılar.

Grafen, 2004 yılında Manchester Üniversitesi'nden Andre Geim ve Kostya Novoselov tarafından ilk kez izole edilen ve 2010'da fizik alanında Nobel Ödülü kazandıran bir maddedir. Bu malzeme, bir atom kalınlığında, iki boyutlu bir yapıya sahip ve karbon atomlarının bal peteği şeklinde sıkıca düzenlenmiş halidir.

Özellikleri arasında, çelikten üç yüz kat daha güçlü olması, şimdiye kadar bilinen en hafif malzeme olması, yüksek elektron hareketliliği ve oda sıcaklığında ısıyı mükemmel şekilde ileten bir yapısı bulunmaktadır. Grafenin bu benzersiz nitelikleri, onu nanoteknoloji ve elektronikte kullanım için cazip kılmaktadır. Grafen plakası genellikle dünyanın en ince malzemesi olarak tanımlanır, nano ölçekli boyutlardan birkaç mikrona kadar uzanır ve her karbon atomu, altıgen bir düzlemde diğer üç atoma kovalent olarak bağlanır. Grafenin üretimi sırasında, kalitesini belirlemek için mikroskopik görüntüleme esastır. Bu detaylı inceleme, üretim sürecinin mükemmel sonuçlar vermesine yardımcı olur. Ayrıca, grafenin eşsiz özellikleri, kompozit malzemelerde kullanıldığında elektriksel ve mekanik performansı artırarak onu değerli bir bileşen haline getirir.

Belirli bir aralıktaki lamel katmanlarının sayısını daha da azaltmak zordur, bu nedenle endüstriyel grafen genellikle belirli grafit özellikleri gösterir. Genel olarak endüstriyel grafen; grafit nanosheets (GnPs) olarak adlandırılır (Li, 2023 ve Maitra, 2014).

Karbon nanotüpleri, grafen tabakalarının boru şeklinde bir morfolojiye uyum sağlayacak şekilde yuvarlanmasıyla hazırlanan sp² hibridizasyonuna sahip karbon atomlarının tek boyutlu allotroplarıdır. Genel olarak, bir, iki veya daha fazla rulo grafen tabakası sırasıyla tek (SWCNTs), çift (DWCNTs) ve çok duvarlı karbon nanotüpleri (MWCNTs) olarak bilinir (Kouzegaran, 2023).

Nanokil, mükemmel fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle geniş uygulama alanına sahiptir. Katkı malzemeleri ve dolgu maddeleri öncelik olarak kompozit ürünlerin maliyetini düşürür. Bunun yanında diğer takviyelere ve reçinelere nazaran yüksek performans iyileştirmeleri sağlar. Dolgular ilk uygulamalarda fazla kullanıldığı için ürünlerin fiziksel ve kimyasal dayanımlarında ciddi düşüşler gözlenmiştir. Ancak günümüzde katkı ve dolgu maddelerinin kompozitlere ne derecede etki ettiği daha iyi bilinmekte ve bu konuda çeşitli araştırmalar geliştirilmektedir. Bundan dolayı artık dolgular reçinelerin belirli özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Suya karşı dayanıklılık, olumsuz hava koşullarına dayanıklılık, sertlik, yüksek sıcaklığa dayanıklılık gibi olumsuz etkenler dolgu maddelerinin doğru kullanımıyla iyileştirilebilir.

Bunlardan başka kompozit ürünlerin kalıplardan çıkmasını kolaylaştırmak için kalıp ayırıcılar kullanılmaktadır. Kalıp ayırıcılar kompozitler için vazgeçilemez parçalardan biridir. Genellikle reçinenin içine katılarak kullanılır. Bunun yanında iç ayırıcı olarak, kalıba uygulanarak veya ayırıcı film oluşturularak da kullanılır. En yaygın bilinen ayırıcı türleri ise şunlardır:

Polivinil alkol (PVA): Genellikle çözelti halinde bulunan PVA'lar, basit ve düz kalıplarda tek başına kullanılabileceği gibi daha fazla ve karmaşık kalıplarda da ikinci bir ayırıcı olarak kullanılabilir. PVA püskürtme yöntemi ve süngerle uygulanabilir.

Vaks kalıp ayırıcılar: Vaks kalıp ayırıcılar ilk olarak 1950'li yıllarda kompozit sektörüne giriş yapmıştır. İçeriği carnauba esaslı olan vaks ayırıcılar, genellikle cila şeklinde uygulanır. Uygulama yapılırken ince katlar olarak çok katlı uygulanır. Her uygulama sonrasında her kat tek tek silinir ve parlatılır. Bu yüzden istenildiği gibi bir tabaka elde edilmesi süreç gerektirir. Zamanla sorunu çözebilmek için yarı kalıcı kalıp ayırıcılar ortaya çıkmıştır.

Yarı kalıcı (semi-permanent) kalıp ayırıcılar: Yarı kalıcı olarak adlandırılma nedeni uygulandıkları yüzeyde mikro incelikte olan bir film tabakası oluşturmalarıdır. Bir çözücünün içerisindeki polimerik reçineden oluşurlar. Ayırıcı kalıp yüzeyine uygulandıktan sonra çözücü buharlaşır ve geride mikro incelikte bir film tabakası bırakır. Doğru uygulama yapıldığında, uygulama sonunda tekrardan yeni bir kalıp ayırıcı uygulamaya ihtiyaç duyulmaz. Bundan dolayı fazla adetli ürünlerin üretiminde ve RTM gibi uygulamalarda tercih edilir. Yarı kalıcı ayırıcılar kalıp temizleyici bir solvent, bir astar ve kalıp ayırıcıdan oluşan düzenek halinde kullanılırlar.

Ayırıcı film: Reçine sistemi belli parametrelere bağlıdır (kür sıcaklığı ve basıncı gibi). Bu parametreleri karşılamaya uygun farklı yapılar vardır (PET, polyester gibi). Farklı olan bu yapıların hepsine uygun ayırıcı filmler bulunmaktadır. En çok tercih edilen ayırıcı filmler selofan ve polyesterdir. Bu ayırıcılar, kompozit levha ve dekoratif kompozit panel tarzı düz yüzeylerin imalatında yaygın olarak kullanılır.

1.2 Literatür Araştırması

Elde edilen son araştırmalar, elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde nano dolgulu epoksi matrislerinin önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir. FRP kompozitler genellikle dayanıklılığı artırmak ve mukavemetini yükseltmek için liflerle güçlendirilmiş bir polimer matris kullanılarak üretilen malzemelerdir. Bu kompozitlerin mekanik özellikleri, kullanılan matris malzemesi, lif tipi, takviye edici yapı ve yapılan işlemler gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Nano dolgulu epoksi matrisler, epoksi reçinelerine nano boyutlu dolgu maddelerinin eklenmesiyle elde edilir. Nanomaddeler genellikle nanokil, nanotüp, nanoparçacık veya grafen gibi yapıları içerir. Bu nano boyutlu dolgu maddeleri, kompozit matrisin mekanik özelliklerini geliştirmeye yönelik farklı etkiler sağlayabilir. Örneğin, nanokil gibi dolgu maddeleri, kompozit malzemenin mekanik dayanımını artırabilir, çatlak direncini artırabilir ve aynı zamanda sertliği yükseltebilir. Bu nano dolgular, matris içinde homojen bir şekilde dağıldıklarında, malzeme üzerinde olumlu etkiler gösterebilir. Bu da kompozitin daha yüksek mukavemet, darbe dayanımı ve yorulma direnci gibi özelliklerini artırabilir. Bununla birlikte, nano dolgulu epoksi matrislerin kullanımı bazı zorlukları da beraberinde getirebilir. Bu zorluklar arasında nanodolguların homojen bir şekilde dağılması, işlenebilirlik sorunları ve üretim maliyetleri gibi konular yer alabilir. Ayrıca, dolgu maddelerinin fazla ilave edilmesi, kompozitin mekanik özellikleri üzerinde istenmeyen etkilere neden olabilir. Genel olarak, nano dolgulu epoksi matrislerin elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik davranışlarını iyileştirebileceği görülmektedir. Ancak, belirli uygulamalarda bu dolgu maddelerinin optimize edilmesi ve homojen dağılımının sağlanması gerekmektedir. Bu da malzeme bilimi ve mühendisliği alanında devam eden araştırma ve geliştirme çalışmalarını gerektirmektedir.

Fiber takviyeli kompozit malzemeler, endüstriyel uygulamalarda hafiflikleri ve yüksek mukavemet özellikleri nedeniyle giderek daha fazla tercih edilmektedir. Ancak, bu malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelemeye değer boşluklar bulunmaktadır. Son yıllarda, nano boyutlu katkı maddelerinin (nanopartiküllerin) kompozit malzemelerin performansı üzerinde potansiyel bir iyileştirme sağlayabileceği düşünülmektedir. Bu literatür özeti, fiber takviyeli

kompozit malzemelere nano partikül ilavesinin mekanik özellikler ve özellikle darbe dayanımı üzerindeki etkilerini incelemektedir.

Kompozit yapılar hizmet ömürleri boyunca çeşitli düzlem içi ve düzlem dışı yükleme koşullarına maruz kalmaktadır. Literatürde yapılan birçok araştırmaya göre darbe davranışları özellikle düşük hızlı darbe yüklemesi, kompozit yapıların tasarımında ve uygulamasında dikkate alınması gereken en kritik faktörlerden biridir (Luo, 1999; Schoeppner, 2000 ve Belingardi, 2002). Elyaf takviyeli kompozitlerin tasarımındaki kilit konu, Avila ve diğ. (2007)'e göre darbe yüklemesinde fiberlerin ve matris sisteminin hasar toleransıdır. Aramid takviyeli kompozitlerin yüksek maliyeti ve karbon elyaf epoksi kompozitlerin kırılabilirliği nedeniyle, cam elyaf takviyesinin kullanımı daha yaygındır. Ayrıca, cam elyaf epoksi kompozitlerin tokluğu büyük ölçüde gerinim hızı hasarına ve matris davranışına bağlıdır ve epoksi sistemine nanokil eklenerek matris tokluğu artırılabilir. Ancak, Ferreira ve diğ. (2015) tarafından belirtildiği üzere, literatürdeki sonuçlara bakıldığında nanokil katkılı kompozitlerin kırılma tokluğu davranışı konusunda belirgin bir fikir birliği yoktur.

1.2.1 Nano Partikül İlavesinin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi

Çeşitli çalışmalar, farklı nano partikül türlerinin (örneğin, karbon nanotüpleri, nano seramikler, grafen oksit gibi) fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirebileceğini göstermektedir. Örneğin Haque ve diğ. (2003), yaptıkları çalışmada çeşitli miktarlarda (ağ. %1, %2, %5 ve %10) nanokil partiküllerin S2-cam/epoksi polimer nanokompozitlerin mekanik ve termal özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlar, nanokil ilavesinin kompozit malzemenin çekme mukavemetini artırdığını ve mikroçatlak oluşumunu azalttığını belirtmişlerdir. Bu etki, nanoyapının malzeme matrisiyle etkileşimi ve yük dağılımındaki iyileşme ile ilişkilendirilmiştir. Termomekanik özelliklerin çoğunlukla düşük kil yüklemelerinde (ağ. %1-2) arttığı, ancak daha yüksek kil yüklemelerinde (ağ. %5 ve üzeri) azaldığı sonucuna varmışlardır.

Balguri ve diğ. (2021), nanodolgu takviyelerinin morfolojisine dayanarak, epoksi nanokompozitlerin izotropik (genellikle küresel şekilde tüm yönlerde aynı boyutlara sahip bir malzeme) nanodolgularla takviyeli ve anizotropik (Kil bazlı iki

boyutlu nanodolgunlar gibi farklı yönlerde farklı özelliklere sahip farklı eksenler boyunca fiziksel özelliklerde değişiklik gösteren malzemeler) nanodolgunlarla takviyeli epoksi nanokompozitler olarak sınıflandırılabilceğini belirtmiştir. Kauçuklar, elastomerler ve inorganik partiküllerle modifikasyonun epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirdiği, partikül boyutunun mekanik özellikler üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu ve partikül boyutunun küçültülmesinin, epoksi ile dolgu maddesi arasındaki arayüzey alanının iyileştirilmesi nedeniyle kompozite fayda sağladığı bulunmuştur. Epoksinin nano ölçekte dolgu maddeleriyle takviye edilerek modifiye edilmesi, epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Literatür incelendiğinde, KNT'ler, grafen, nanokiller ve 3D nano yapılar dışındaki anizotropik nano dolgunların epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki güçlendirici etkilerinin çok sınırlı olduğu görülmüştür.

Agarwal ve diğ. (2014), silisyum karbür (SiC) dolgulu GFRE kompozitlerin fiziksel, mekanik, termal ve çizilme aşınması etkilerini incelemişlerdir. Değişik oranlarda (ağırlıkça %0, 5, 10, 15 ve 20) SiC dolgu ilavesiyle yoğunluk, sertlik, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, tabakalar arası kayma mukavemeti ve izod darbe direnci ölçülerek SiC oranının artmasıyla sertlik ve darbe dayanımı artarken çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti ve tabakalar arası kayma mukavemetinin azaldığı görülmüştür.,

Muthu ve Dendere (2014) araştırmalarında cam elyaf takviyeli polimer kompozite farklı oranlarda (ağırlıkça %0,1, %0,5 ve %1) karbon nanotüp ilave ederek mekanik özelliklere etkisini incelemişler, en iyi sonuçların ağırlıkça %0,5 karbon nanotüp ilavesiyle sağlandığını ifade etmişlerdir.

Liao ve diğ. (2014), karbon nanofiber (CNF) ve hidroksiapatit nanorod (HANR) hibrit katkılı polipropilen (PP) kompozitleri karakterize etmişlerdir. En yüksek elastisite modülü, çekme mukavemeti, termal stabilite ve biyouyumluluğa sahip hibrit dolgulu kompozit %2 nano fiber ve %20 nanorod karışımından elde edilmiştir.

Kumar ve diğ. (2013), bambu lifi-polilaktik asit biyokompozitlerin dielektrik, mekanik ve termal özelliklerini incelemişler, PLA reçineye ağırlıkça %3 doğal montmorillonit Cloisite 30B nanokil konsantrasyonu ekleyerek kompozitlerin

çekme, eğilme ve çentikli izod darbe testlerini kıyaslamışlardır. Ağırılıkça %3 nanokil ilavesi nanokompozitlerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde arttırmıştır. Bu çalışmaya göre elyaf yüzeyine tutunan nanokil partikülleri reçine ve elyaf arasındaki arayüzey bağlanmasını geliştirerek ve yükleme altında polimer zincirlerinin hareketliliğini kısıtlayarak nanokompozitlerin çekme ve eğilme özelliklerini artırır.

Ferreira ve diğ. (2013), nanokil dolgulu aramid elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerini ve yorulma dayanımını karakterize etmişler, dolgu maddesi olarak Cloisite 30B nanokillerin eklenmesiyle hem çekme hem de eğilme yüklemesi için mukavemette azalma, rijitlikte artış gözlemişlerdir. Dolgulu kompozitler, dolgulu olmayan matrislere göre daha yüksek çekme yorulma dayanımı sergilerken eğilme yorulma dayanımı daha düşüktür.

Tang ve diğ. (2011), işlenmiş haloysit takviyeli epoksi nanokompozitlerin mekanik özellikleri üzerine çalışmışlardır. Mukavemet, modül, camsı geçiş sıcaklığı ve termal stabilite gibi özelliklerden ödün vermeksizin arakatlı haloysit partikülleri içeren epoksi nanokompozitlerin kırılma tokluğunun organokil epoksi nanokompozitlere göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Nor ve diğ. (2018), nano dolgu maddesi olarak çeşitli oranlarda (ağ. %0,1, %0,3, %0,5 ve %1) çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) kullanımının bambu/cam elyaf hibrit kompozitlerin çekme ve eğilme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmış, ağırılıkça %0,5'e kadar KNT ilavesiyle kompozitlerin çekme mukavemetinde bir artış olduğunu, bu değer ötesinde kompozit mukavemetinin kayda değer bir düşüş gösterdiğini, eğilme özelliklerinde KNT ilavesiyle düşüş olduğunu belirtmiştir.

Khan ve diğ. (2011), oktadesilamin modifiye edilmiş montmorillonit Nanomer I30P organokilin karbon fiber / epoksi matris bazlı nanokompozitlerin (CFRP) kırılma direnci ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş, nanokil ilavesi ile kompozitlerin eğilme mukavemeti ve modülü önemli ölçüde artmıştır. Khan ve diğ. (2011), nanokilin karbon fiber-epoksi matris nanokompozitlerin (CFRP) kırılma dayanımı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş, ağ. %0, 1, 3 ve 5 oranlarda Nanomer I30P modifiye edilmiş oktadesilamin montmorillonit organokil katkısının Epon828 DGEBA epoksi matrisli 200 g/m² UD karbon fiber takviyeli kompozitlerde belirgin iyileştirmeler sağladığını göstermiş, ASTM D790'e göre üç

nokta eğilme testleri, ASTM D5045'e göre çekme testleri ve ASTM D6110'a göre Charpy darbe testleri yapılmış, epoksi reçinenin eğilme mukavemeti ve modülü kil ilavesiyle önemli ölçüde artmıştır. Nanokil ilavesi, esneklik, kırılma direnci ve modül üzerinde sırasıyla %20, %30 ve %25'e varan artışlar göstermiş, en iyi değerler %3 kil ilavesiyle elde edilmiştir. Nanokilin epoksi ve CFRP'ye dahil edilmesi, kompozitlerin eğilme mukavemeti ve modülünün yanı sıra darbe ve yarı statik kırılma direncini artırır. Ağırlıkça %3'ten daha yüksek kil içeriğinin olumsuz etkisinin kaynağı olarak kil aglomerasyonlarının, kompozit mukavemeti üzerinde modülden daha önemli bir etkiye sahip olan fiber-matris arayüzey yapışmasına özellikle zararlı olduğu görülmektedir.

Ulus ve diğ. (2015), karbon fiber/epoksi multiscale hibrit nanokompozitlerin mekanik özellikleri ve düşük hızlı darbe davranışı incelenmiştir. Makaledeki ana odak noktası, çok duvarlı karbon nanotüpleri ve bor nitrat nanoplateletlerin birleşiminden oluşan (%0,3 MWCNTs ve % 0,5 BNNPs) hibrit dolgu maddelerinin epoksi reçinesine dağıtılması ve bu matris malzemesinin kullanılmasıdır. Çok ölçekli hibrit laminasyon kompozitleri, vakum enjeksiyon tekniğiyle 10 tabakalı dokuma karbon fiberden simetrik olarak oluşturulmuştur. Elde edilen veriler reçinenin nanopartiküllerle modifiye edilmesi durumunda hem mukavemetin hem de kırılma anındaki gerilmenin önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Ayrıca, nanokompozitlerin elastisite modülü ve çekme mukavemeti de artmıştır. En yüksek mukavemet, BNNP/MWCNT modifikasyonu ile elde edilmiştir. BNNPs-MWCNTs/CF/epoksi çok ölçekli kompozitler için elastisite modülü %10, mukavemet %20 ve ölçülen statik tokluk yaklaşık %53 artmıştır. Sonuç olarak, reçine ve nanokompozitlerin statik dayanıklılığı da artmıştır. Ancak, mekanik özelliklerdeki artışın dinamik tepki ve enerji absorbe etme kapasitesine tam olarak yansımadağı görülmüştür.

Haque ve diğ. (2003), S2-cam/epoksi polimer nanokompozitlerde Nanocor 1.28E tipi organik olarak modifiye edilmiş montmorillonit mineralleri gibi nanokil katkısının (ağ. %1, 2, 5 ve 10) mekanik ve termal özellikleri üzerinde etkileri incelenmiştir. %1 ağırlıkça nanokil ilavesi ile kompozitlerin interlaminar kesme dayanımında %44 (33 MPa), eğilme dayanımında %24 (370 MPa), eğilme modülünde %17 (32,52 GPa) ve kırılma tokluğunda %23 (779 N) oranında artışlar gözlemlenmiştir. Sonuçlar, termomekanik özelliklerin çoğunlukla düşük kil

yüklemelerinde (ağırlıkça %1-2) arttığını, ancak daha yüksek kil yüklemelerinde (ağırlıkça %5 ve üzeri) azaldığını göstermektedir.

Kornmann ve diğ. (2005), %10 organosilikat kullanımıyla cam elyaf takviyeli epoksi nanokompozitlerin mekanik özelliklerinde belirgin artışlar elde etmiştir. Nanokil ilavesi, eğilme dayanımını %27 artırırken, eğilme modülünü %6 artırmıştır. Epoksi matrise ağırlıkça %10 nanosilika eklendiğinde, Young Modülü'nün saf epoksi için 3 GPa'dan 4,7 GPa'ya %54 oranında arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, çekme mukavemeti %36 oranında azalmış ve kopma uzaması da büyük ölçüde etkilenmiştir. Ağırlıkça %10 silikat eklenmesiyle, nanokompozitler kırılmalı bir şekilde davranmış ve malzeme gerilme-şekil değiştirme eğrisinin elastik kısmında hasara uğramıştır.

Saber ve diğ. (2007), Kil-epoksi nanokompozitlerin mekanik özelliklerini belirleyen işleme değişkenleri incelenmiştir. Farklı kil oranlarının (ağ. %0, 1, 3, 6, 10) yanı sıra karıştırma hızı (1500, 2000, 3000 ve 4500 d/dk) ve kürlenme sıcaklığı (70 °C, 80 °C, 95 °C ve 120 °C) gibi çeşitli işleme koşullarının nanokompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiş, kil miktarı arttıkça, epoksi-kil nanokompozitlerin elastik modülü maksimum %6 kil miktarına kadar artmış; daha sonra modül artık çok fazla artmayıp hafifçe azalmaya başlamıştır. Bununla birlikte, çekme dayanımı ve kırılma enerjisi, kil miktarı arttıkça sürekli olarak artmıştır ve %10'a kadar artış devam etmiştir. Optimum hız olan 3000 d/dk'dan sonra daha yüksek hızlar, kil tabakalarının ayrılmak yerine aslında kırılmasına neden olarak katmanları nanokompozit dolgu maddeleri olarak etkisiz hale getirmiş, optimum sıcaklık aralığının yaklaşık olarak 80-100 °C olduğu kürlenme sıcaklığı da daha düşük sıcaklıklarda en iyi sonuçları verirken, yüksek sıcaklıkların numune kırılmalılığına ve özelliklerinin bozulmasına neden olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmalar, farklı modifikasyon yöntemlerinin fiber kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini göstermiştir. Nanokompozitler, kil-epoksi nanokompozitler, arayüzey modifiyeli laminatlar ve polimer matris modifikasyonları gibi farklı yöntemler, malzemelerin önemli özelliklerini iyileştirmede potansiyel sunmaktadır.

1.2.2 Nano Partikül İlavesinin Darbe Dayanımına Etkisi

Kompozit malzemeler, endüstride geniş bir kullanım alanına sahip olup, farklı mühendislik uygulamalarında dayanıklılık, hafiflik ve mukavemet sağlama potansiyeline sahiptirler. Ancak, kompozit malzemelerin düşük hızlı darbelere karşı dayanıklılığı, delaminasyon hasarı gibi konularda, bazı kısıtlamaları bulunmaktadır. Bu nedenle, özellikle düşük hızlı darbelere karşı dirençlerinin artırılması, delaminasyon gibi hasarların kontrol altına alınması mühendislik alanında büyük önem arz etmektedir.

Darbe dayanımı, bir malzemenin ani kuvvetlere maruz kaldığında gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Nano partikül ilavesinin, kompozit malzemelerin darbe dayanımı üzerindeki etkileri üzerine yapılan araştırmalar çeşitli sonuçlar ortaya koymuştur. Çeşitli endüstriyel uygulamalar için kompozit malzemelerin darbe dayanımını artırmak adına nanoparçacıkların etkisi, son yıllarda önemli bir araştırma alanı olmuştur. Önceki çalışmalarda karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitler üzerine nanoparçacıkların -özellikle karbon nanotüp (KNT), nanokil ve bunların hibrit kombinasyonunun- darbe performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmalar, nanoparçacıkların kompozit malzemelerin darbe direncine olan etkisini ayrıntılı bir şekilde incelemekte ve bu alandaki potansiyel iyileştirmeleri vurgulamaktadır. Araştırmacıların farklı nanoparçacık kombinasyonlarını ve oranlarını değerlendirerek bu etkiyi daha da optimize etmeye yönelik gelecek çalışmalara odaklanması gerekmektedir. Bu literatür özeti, çeşitli nanomalzemelerin elyaf takviyeli kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe dayanımı üzerindeki etkilerini inceleyen farklı araştırmalara dayanmaktadır. Örneğin Aymerich ve diğ. (2011) çalışmalarında nano seramik ilavesinin kompozit malzemenin darbe dayanımını artırdığını göstermişlerdir. Bu artışın, nano partiküllerin enerji emilimine katkıda bulunduğu ve malzeme içindeki çatlak oluşumunu engellediği düşünülmektedir. 1 J ile 10,6 J arasında değişen darbe enerjileri ile %1, %3 ve %5 olmak üzere üç farklı kil hacim oranı kullanarak standart ve kil katkılı cam elyaf kumaş/epoksi plakaların darbe deneyleri sonucu %3 hacim oranı için nanokilin referans plakalara göre absorbe edilen darbe enerjisinde bir artış (%30'a kadar), darbe kuvvetinde bir azalma (%10'dan %15'e kadar) ve hasar alanında bir artış gözlemlenmiştir.

Koricho ve diğ. (2015), saf ve nano/mikro katkılı dokuma S2-cam elyaf takviyeli epoksi polimer kompozitlerin yarı statik çentik ve düşük hızlı darbe davranışını araştırmıştır. %1 ağırlık oranlarında nano katkı maddesi olarak Cloisite® 30B nanokil ve mikro katkı maddesi olarak iM16K mikro-cam kürecik kullanmışlardır. Saf ve mikro cam kürecik takviye edilmiş plakaların, vurucunun numune kalınlığı boyunca nüfuz etmesiyle (penetrasyon) en yüksek azami kuvveti ve düşük absorbe edilen enerji gösterdiğini, nanokil takviye edilmiş plakanın ise yüksek darbe enerjisi seviyelerinde delinme gerçekleşmediği ve maksimum absorbe edilen enerji ile minimum azami reaksiyon kuvveti sergilediğini gözlemlemişlerdir. Hibrit numuneler (epoksiye nanokil ve mikro cam kürecik katkı maddelerinin birlikte eklenmesiyle), daha yüksek azami reaksiyon kuvveti ile orta seviyede absorbe edilen enerji sergilemiştir. Bununla birlikte, aynı darbe enerjisi koşulları için saf epoksi plaka ile karşılaştırıldığında nanokil katkılı ve hibrit plakaların daha geniş bir hasar alanı gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Rafiq ve diğ. (2017), cam elyaf tülü takviyeli epoksi kompozitlerde nanokil ilavesinin darbe tepkisi üzerindeki etkisini, ağırlıkça %1,5 ve %3,0 I.30E nanokil ilavesi kullanarak incelemişlerdir. Nanokil içeren plakaların, saf numunelere kıyasla daha iyi darbe direnci sergilediğini ve ağırlıkça %1,5 nanokil içeren numunelerin, ağırlıkça %3,0 nanokil içeren numunelere kıyasla daha iyi performans gösterdiğini bulmuşlardır. Yaptıkları araştırmaya göre, epoksiye nanokil ilavesi ile pik yük ve rijitlikte bir artış, fiziksel hasarda ve absorbe edilen enerjide bir azalma tespit edilmiştir. Ayrıca, ağırlıkça %3,0 nanokil ilavesinin, numunelerdeki kil topaklanması nedeniyle darbe direncindeki gelişmeyi sınırladığı sonucuna varmışlardır.

Farklı tipte fiber takviyeli epoksi nanokompozitlerin düşük hızlı darbe özellikleri üzerine başka çalışmalar da vardır.

Reis ve diğ. (2012), epoksi reçine-sertleştirici karışımının ağırlıkça %3'ü kadar katkı içeriğine sahip iki farklı tip katkı maddesi; mantar tozu ve nanokil 30B ilave edilmiş Kevlar/epoksi kompozitlerin düşük hız darbe tepkisini ve hasar toleransını incelemiştir. Katkı ilavesinin maksimum darbe kuvvetini arttırdığını ve maksimum deplasmanı azalttığını bulmuşlardır. Çalışmalarına göre, elastik açıdan en iyi performansın katkı maddesi olarak nanokil içeren plakalarda elde edildiği ve kil ilavesinin kontrol numunelerine göre hasar alanını arttırdığı tespit edilmiştir. Mantar

tozu ilave edilmiş epoksi reçine ile üretilen plakalarda minimum hasar alanı gözlenmiştir.

Başka bir çalışmada Reis ve diğ. (2013), en iyi darbe performansını elde etmek için ideal nanokil miktarını belirlemek amacıyla (ağırlıkça %6'ya kadar) Kevlar/epoksi kompozitin düşük hızlı darbe tepkisini incelemiştir. Nanokil ilavesinin maksimum darbe kuvvetini ve hasar alanını arttırdığını bulmuşlardır. Ağırlıkça %3 ve ağırlıkça %6 nanokil ilave edilmiş epoksi reçine ile üretilen plakalar, kontrol numunelerine kıyasla elastik düzelme ve penetrasyon (nüfuziyet) eşiği açısından en iyi performansı göstermiştir.

Rahman ve diğ. (2018), farklı ağırlık oranlarına sahip (ağırlıkça %10'a kadar) nanokil ve grafen ilavesinin 4-demetli saten dokuma Kevlar-epoksi lamine kompozitlerin düşük hız darbe dayanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Darbe enerjisinin absorbe edilmesinde ve darbe dayanımında nanokilin grafenden daha etkili olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, darbe enerjisi arttıkça, nanokil katkılı plakalar için hasar alanının azaldığını bulmuşlardır.

Iqbal ve diğ. (2009), düşük hızlı darbe ve darbe sonrası basma deneyi kullanarak tek yönlü karbon fiber-epoksi kompozitlerin epoksi reçinesine nanokil ilavesinin (ağırlıkça %3 ve %5) etkisini araştırmıştır. Karbon fiber/epoksi plakalara nanokil eklenmesinin, daha küçük hasar alanı, daha yüksek artık mukavemet ve daha yüksek delinme eşiği enerji seviyesi sağlayarak darbe hasarı direncini ve hasar toleransını iyileştirdiğini bulmuşlardır. Ayrıca ağırlıkça %3 kil ilavesinin en yüksek hasar direnci için optimum seviye olduğu sonucuna varmışlardır.

Mahdi ve diğ. (2017), MWCNTs ve nanokil ilavesinin saten dokuma karbon fiber kumaş takviyeli epoksi reçineye etkisini belirlemek için düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirmiştir. Kompozit plakaların imalatında sırasıyla ağırlıkça %0,3 MWCNT, ağırlıkça %2 nanokil, ağırlıkça %0,1 MWCNT ile ağırlıkça %2 nanokil hibriti kullanmışlardır. Nanofazlı karbon fiber/epoksi kompozitlerin maksimum kuvveti arttırdığını bulmuşlardır. Hibrit nanopartikül katkılı kompozit plakalar, saf plakalara kıyasla hasar alanını azaltmış ve absorbe edilen enerjiyi artırmıştır.

Najafabadi ve diğ. (2021), üç darbe enerjisi seviyesi altında (10 J, 15 J ve 20 J) dokuma tek yönlü karbon fiber kumaş takviyeli epoksi nanokompozitlere nanokil Cloisite 20A ilavesinin etkisini araştırmıştır. Optimum nanokil ilavesinin ağırlıkça %0,2 olduğu bulunmuştur. Nanokil ilavesinin maksimum darbe kuvvetini arttırdığını ve absorbe edilen enerjiyi, maksimum deplasmanı ve delaminasyon alanını azalttığını gözlemlemiştir.

Ferreira ve diğ. (2015), nanokil ve karbon nanotüp takviyelerinin epoksi/cam elyaf kompozitlerin düşük hızlı darbe direnci üzerindeki etkisini yük-zaman, yük-deplasman, enerji-zaman diyagramları ve hasar alanı açısından ele almıştır. Ağırlıkça %0,5 nanotüp ve %1 nanokil ilavesi için en iyi enerji geri kazanımı değerine ulaşılarak daha yüksek nanoparçacık yüzdeleri için azalma eğiliminde olmakla birlikte hasar alanı açısından nanoparçacık içeriği ile daralma göstermiştir.

Nor ve diğ. (2019), nano dolgu maddesi olarak ağırlıkça %0,5 MWCNT kullanımının bambu/cam elyaf hibrit kompozitlerin düşük hızlı darbe (LVI) ve darbe sonrası basma (CAI) özelliklerine etkisini araştırmış, KNT'lerin bambu/cam hibrit kompozitlere eklenmesinin darbe, hasar boyutu ve darbe sonrası özellikleri iyileştirdiği sonucuna varmıştır. KNT'lerin hibrit kompozitlere eklenmesinin LVI özellikleri açısından daha az enerji emilimi, daha fazla azami kuvvet ve daha fazla çökme gösterdiğini ortaya koymuş, KNT/hibrit kompozitlerin tahribatsız yaklaşımla dolgusuz numunelere kıyasla daha küçük hasar boyutu tespit edilmiştir. KNT'lerin hibrit kompozitlere eklenmesiyle CAI mukavemetinde de iyileşme elde edilmiştir.

Koricho ve diğ. (2015)'e göre S-cam FRP kompozitlerde mikro ve nano dolgu maddelerinin darbe tepkisi üzerindeki etkisini inceleyen çalışmada, ağırlıkça %1 oranda nanokil ve mikro cam kürecik dolgu maddelerinin, farklı enerji seviyelerinde kompozitlerin davranışını değiştirdiği gözlemlenmiştir. Nanokil katkılı kompozitler, yüksek enerjili darbelerde daha yüksek enerji absorbe ederken, mikro cam kürecik dolgulu kompozitlerde daha yüksek maksimum kuvvet ve düşük absorbe edilen enerji gözlenmiştir.

Rafiq ve diğ. (2017), ağırlıkça %1,5 ve %3 nanokil katkısının, E-CR cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerdeki 10 ile 50 J arasındaki düşük hız darbe direncini artırdığını göstermiştir. %1,5 nanokil ilavesi, kompozitlerin maksimum kuvvet ve

rijitlik özelliklerini sırasıyla %23 ve %11 artırarak, daha az fiziksel hasara yol açmıştır. Darbe hasarı darbe enerjisi ile artmış ve hibrit nanokompozitler için daha düşük olduğu gözlenmiştir. Hasar türü delaminasyondan lif kopmasına doğru değişmiştir. Nanokil ilavesinin daha yüksek sertlik, kıvrımlı kırılma yollarının oluşumu ve daha düşük enerji emilimi nedeniyle fiziksel hasarı azalttığı sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, %3 oranda ilave edilen partiküllerin, homojen dağılım yerine aglomerasyona yol açtığı ve bu durumun darbe direncindeki iyileşmeyi sınırlandırdığı tespit edilmiştir. Optimum nanokil ilave oranının, kompozitlerin mukavemetini artırırken, partiküllerin oranı arttıkça polimere daha yüksek oranlarda ilave edilmesiyle ise istenmeyen etkilere yol açabileceği vurgulanmıştır. Mikro yapısal analizler, ilave edilen nano partiküllerin homojen dağılımının önemini ortaya koymuştur.

Bull ve diğ. (2013 ve 2014) çalışmasında maliyet ve işleme hususları nedeniyle kompozit malzemelerde tercih edilen, termoplastiklere kıyasla nispeten zayıf darbe tokluğuna sahip termoset reçinelerin tokluğunu, epoksi reçinesine termoplastik partiküller ekleyerek, 25 J ile 50 J arasında düşük hızlı darbe deneylerini hasar direncini belirlemek için gerçekleştirmiş, partikül ilavesinin darbe direncini artırdığını ve çatlakların sapma gösterdiğini ortaya koymuştur. Deney sonuçlarına göre partiküllerle toklaştırılmış sistemler, partikülsüz sisteme kıyasla düşük hızlı darbe hasar direncinde iyileşme göstermiş, 30 J'lik bir darbede modifiyesiz bir numuneye kıyasla hasar direncini iki ile dört kat civarında artırmıştır. Partikülsüz kompozitteki çatlakların partikül takviyeli sistemdeki çatlaklara göre daha az olduğu gözlemlenmiş, partiküller özellikle delaminasyonun büyümesine karşı interlaminar reçine zengin bölgelerde çatlak yön değişikliği ve köprüleme oluşturarak iyileşmeler göstermiştir. Hasara en dayanıklı sistemde çatlak yolu uzunluğunda %17'lik bir artış gözlenmiş, bu da darbe hasarı direncindeki kazanımlarla ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Mahdi ve diğ. (2017), karbon elyaf takviyeli plastik kompozitlerde, karbon nanotüp, nanokil ve hibrit nanoparçacıkların (MWCNT ve nanokil) darbe performansını artırmada etkili olduğunu göstermiştir. MWCNT'ler (%0,3), nanokil (%2) ve hibrit MWCNT-nanokil (%0,1 ve %2) içeren CFRP kompozitler üretilmiş ve 30, 40 ve 50 J enerji seviyelerinde darbe testlerine tabi tutulmuştur. Maksimum kuvvetin, MWCNT ve nanokil ilavesiyle sırasıyla %11 ve %7,5 oranında arttığı gözlenirken, hibrit nanoparçacık modifikasyonu %16'lık bir artış sağlamıştır. Hibrit

nanoparçacık modifiyeli kompozitler kontrol örneklerine kıyasla 40 J darbe enerjisinde %32 daha fazla enerji absorbe etmiş ve 30 J darbe enerjisinde hasar alanı %80 azalma göstermiştir. Nanokil ve MWCNT ilavesinde ise hasar alanında sırasıyla %30 ve %50 oranında azalma sergilenmiştir.

Heydari ve diğ. (2016), farklı nanokil yüzdeleri (ağırlıkça %0, 3, 5 ve 7) ile takviye edilmiş tek yönlü cam/epoksi kompozit kirişlerin LVI tepkisi üzerinde nanokilin etkisini araştırmıştır. Ayrıca, nanokil türünün darbe tepkisi üzerindeki etkisi Cloisite 30B ve Cloisite 15A kullanılarak değerlendirilmiştir. Nanokil içeriğinin artmasıyla delaminasyon alanında azalma ve enerji absorpsiyonunda artış gözlemlenmiştir. Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) üretim yöntemi ile elde edilen kompozitlerin, el yatırma yöntemi (HLU) ile elde edilenlere kıyasla daha az hasar aldığı ve daha fazla enerji absorbe ettiği bulunmuştur. Her iki üretim yönteminde de nanokil oranının ağırlıkça %3'ten %7'ye artmasıyla delaminasyon alanının üçte bire düştüğü ağırlıkça %5 nanokil içeren kirişler en yüksek enerji absorpsiyonuna sahip olduğu, Cloisite 15A ile takviye edilen numular Cloisite 30B'den daha az rijit olduğu, Cloisite 15A tipi nanokompozit daha fazla enerji absorbe etme kapasitesi sergilediği görülmüştür.

Ávila ve diğ. (2010), dinamik yüklemeler altında karbon fiber/epoksi matrisli hibrit nanokompozitlerin yanma sonrası düşük hızlı darbe davranışını incelemiş, nanopartiküllerin (Cloisite 30B nanokil ve grafen nanosheets) kompozitlerin yanma dayanımını artırdığı ve darbe direncini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Nanokil ilavesi maksimum darbe kuvvetinde %11,69'luk bir artışa yol açmış, darbe direncini artırma ve termal bariyer olarak işlev görme özelliği karbon oksidasyonu nedeniyle grafene göre (%6,72) daha belirgin olarak gözlemlenmiştir.

Demirci ve diğ. (2021), ağırlıkça %4 SiO₂ nanopartikül, %0,5 MWCNTs ve hibrit nanopartikül dolgulu Bazalt BFR/epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe tepkileri ve mekanik davranışı üzerine etkisini değerlendirmiştir. Nanopartiküllerin ve nano-hibrit partiküllerin ASTM D3039 ve ASTM D7136 standartlarına göre darbe ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini tanımlamak için nanopartikül, nano-hibrit ve dolgunsuz BFR/epoksi kompozitlere 10 J ve 20 J enerji seviyelerinde çekme ve düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır. Nanokilin ve MWCNT'lerin kompozitlerin mekanik özelliklerini artırdığı, delaminasyonu azalttığı ve darbe direncini iyileştirdiği

gözlemlenmiştir. Hem 10 J hem de 20 J enerji seviyelerinde SiO₂ nanopartiküllerin yüksek çekme dayanımı (%29), maksimum kuvvet (%36,5), geri tepme enerjisi (%18,6) ve düşük deplasman (%15,2), absorbe edilen enerji (%8,9) gösterdiği gözlemlenmiştir.

Kumar ve diğ. (2019), (ağırlıkça %0, %1,5 ve %2,5) nanokil takviyeli AlMg4.5Mn metal matrisli kompozitlerin titreşim ve düşük hızlı darbe tepkisini incelemiştir. Nanokil ilavesiyle alüminyum alaşımının sertliği, darbe direnci ve enerji absorpsiyonu (%32) arttığı, maksimum deplasmanın %13 azaldığı bulunmuştur.

Reis ve diğ. (2013), Kevlar/epoksi laminat kompozitlerin (ağırlıkça %1,5, %3 ve %6) Cloisite 30B nanokil ve grafen ilavelerinin darbe direncini incelemiştir. Dolgu maddelerinin eklenmesinin maksimum darbe yükünü ve hasar alanını kontrol örneklerine göre artırmış, nanokilin grafene göre daha etkili olduğu ve penetrasyonu daha iyi engellediği tespit edilmiştir. En iyi performansın %6 nanokil katkısıyla özellikle daha iyi penetrasyon direnci (%32,22) ve elastik iyileşme açısından avantajlı olduğu gözlemlenmiştir.

Rahman ve diğ. (2018), farklı ağırlık oranlarına sahip (ağırlıkça %2, 5, 10) Cloisite 30B nanokil ve grafen ilavelerinin Kevlar/epoksi kompozitlerin ağırlığı 6,27 kg ve potansiyel enerjisi 32 J olan düşük hızlı darbe dayanımına etkilerini incelemiştir. Nanokilin, grafene göre daha etkili olduğu, darbe direncini ve enerji absorpsiyonunu artırdığı, hasar alanını azalttığı ve UV bozulmasına karşı direnç sağladığı bulunmuştur. Nanokil oranı arttıkça darbe direnci de artmıştır. Ağırlıkça %10 nanokil dolgulu epoksi kompozit içeren numuneler en yüksek darbe yüküyle (%26 daha fazla) tepki vermiş ve aynı zamanda enerjinin çoğunu geri kazanmıştır (%24 daha fazla). Öte yandan, hem nanokil hem de grafen katkıları hasar alanını azaltmış, nanokil (NC), darbe direncinde (%26,9 artışa karşılık %7,5 artış), darbe enerjisi emiliminde (%15 artışa karşılık %11,37 azalma) grafenden daha etkili olduğunu göstermiştir. Penetrasyon analizi, nanokilin penetrasyonu engellemede grafenden daha iyi olduğunu göstermiştir. Hasar alanı analizi özellikle NC'nin hasar riskini azalttığını göstermiş, grafen ilavesinin darbe direncinde bir artışa katkıda bulunmadığı ancak hem nanokil hem de grafen ilavelerinin hasar alanını azalttığı tespit edilmiştir.

Islám ve diğ. (2015), nanokil (ağırlıkça %2 montmorillonit) ve karbon nanotüplerin (ağırlıkça %0,3 COOH-MWCNT) karbon fiber takviyeli epoksi kompozitler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Her iki nanopartikül türü de eğilme dayanımı, modül ve kırılma gerilmesinde benzer bir iyileşmeye sebep olmuştur. Nanokil ve karbon nanotüplerin kompozitlerde mekanik özelliklerinden 3 nokta eğilme dayanımı (sırasıyla %20 ve %19), düşük hızlı darbe testleri sonucunda 30 J enerji seviyesinde darbe direncini ve enerji absorbe etme kabiliyetini (sırasıyla %11,83 ve %19,67) arttırdığı, hasar alanını azalttığı (sırasıyla %34,01 ve %42,88) gözlemlenmiştir. Nanopartiküllerle modifiye edilmiş numuneler daha yüksek miktarda enerji absorbe edebilmiş, hasar alanı kontrol numunelerine kıyasla azalmıştır. MWCNTs ile modifiye edilmiş numuneler daha iyi darbe direnci göstermiştir.

Bagheri ve diğ. (2020), epoksi/cam elyaf kompozitlerde farklı nanokil yüzdelерinin (ağ. %1, 2, 3, 5 ve 7) mekanik özellikler üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Ağırlıkça %3 NC içeren numuneler gelişmiş darbe ve çekme özellikleri göstermiştir. Ağırlıkça %3 NC içeren hibrit numunenin elastik modülü ve çekme mukavemeti sırasıyla %11 ve %15 oranında iyileşmiştir. Öte yandan nanopartikül ağırlık yüzdesinin artırılması, reçine ve elyaflar arasındaki yapışmayı azaltmıştır.

Aymerich ve diğ. (2011), vakum infüze cam/epoksi laminatlarda (%1, 3, 5) Cloisite30B nanokil modifikasyonunun darbe soğurma yeteneğini artırdığı ve hasar alanını azalttığı tespit edilmiştir. 1 J ve 10,6 J arasında darbe enerjisiyle (0,95 ve 3,05 m/s arasında hızlarda) 2,28 kg serbest düşme darbe sonucu 1 J'dan yüksek darbe enerjilerinde nanomodifiye edilmiş laminatların darbe tepkisinin daha düşük maksimum kuvvet değerleri (yaklaşık %16'ya kadar maksimum kuvvet azalması) ve daha iyi enerji yayma özellikleri (absorbe edilen enerjide %35 artış) ile karakterize edildiği görülmektedir. Bu nedenle matrisin nanomodifikasyonu, çarpışma veya dinamik olayların etkilerinin azaltılmasıyla ilişkili yapısal uygulamalarda enerji absorbe mekanizmasını değiştirmek veya kontrol etmek için etkili bir yol olarak önerilmektedir.

Hosur ve diğ. (2007), karbon/epoksi-nanokil nanokompozitlerin düşük hızlı darbe davranışını incelemiştir. SC-15 epoksi içindeki (ağırlıkça %1, 2, 3) farklı oranlarda organik olarak modifiye edilmiş montmorillonit nanokil olan Nanomer I-

28E ilave edilmiş düz dokuma karbon/epoksi kompozitlere düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır. Maksimum kuvvet artan darbe enerjisi ile artmıştır. Sisteme nanokil infüzyonu darbe hasarını azaltmış, %1 nanokil yüklemeli laminatlar hasar alanı açısından en iyi sonuçları göstermiştir.

Iqbal ve diğ. (2009), karbon fiber - diglisidil eter bisfenol A (DGEBA) epoksi Epon828 kompozitlerin nanokil dolgulu matrislerdeki darbe hasar direncini 5,34 kg serbest düşme düşük hızlı darbe (15, 20, 25 ve 30 J) ve CAI testleri (ASTM D7137 M) kullanılarak hasar davranışları hakkında fikir edinmek için yük, enerji ve zaman ilişkileri analiz etmiştir. Oktadesilamin modifiye montmorillonit Nanomer I30P organokil içeren (ağ. %0, %3, %5) CFRP'ler, daha küçük hasar alanı, daha yüksek mukavemet ve daha yüksek eşik enerji seviyesi şeklinde darbe hasarı direncinde ve hasar toleransında önemli bir iyileşme sağlamıştır. Ağırlıkça %3 kil ilavesinin en yüksek hasar direnci sergileyerek en uygun içerik olduğu gösterilmiş, darbe hasarı boyutunu azaltmıştır. Nanokil ilavesi, matris malzemesinin kayma dayanımını artırarak tek yönlü basma yükü altında elyaf burkulmasına karşı daha yüksek bir mukavemet göstermiştir. Nanokil içeren laminatlar esas olarak delaminasyonlarla hasara uğrama eğilimindeyken, kontrol numuneleri laminat kalınlığı boyunca burkulma ile hasar davranışı göstermiştir. Nanokil ilavesinin darbe direncini artırdığı ancak yüksek nanokil yüzdelerinin kompozit delaminasyonunu artırabileceği ve düşük nanokil yüzdelerinin daha iyi delaminasyon direnci sunduğu gözlemlenmiştir.

Alomari ve diğ. (2013), farklı nanokil oranları içeren (ağ. %0, %4,3, %9,4) örgü poli para-fenilenetereftalamid aromatik poliamid elyaf Kevlar 49 (Dupont) - vinilester laminat kompozitlerin darbe direnci üzerindeki etkisi incelenmiştir. Nano montmorillonit nanomer I.34TCN (metil dihidroksietil hidrojene amonyum) nanokil ilavesinin darbe direncini artırdığı, ancak yüksek nanokil yüzdelerinin kompozit delaminasyonunu artırabileceği belirtilmiştir. Ağırlıkça %4,3 oranında nanokil ilavesi delaminasyon direncinde en iyi sonuçları göstermiştir. Kontrol numuneleri 250 J enerji seviyesinde tamamen delinirken (15 kat), hasar alanı %37 ölçülmüş, %4,3 nanokil içeren numuneler kısmi penetrasyon göstermiş (5 kat) ve delaminasyon alanı %22'ye düşmüştür. %9,4 oranındaki numuneler, hasar alanı %71'e artarken penetrasyonun 2 kattan geçtiği daha yüksek darbe direnci göstermiştir. Genel olarak, nanokil ilavesinin

kompozit malzemelerin darbe direncini artırabileceği, ancak yüksek nanokil oranlarının istenmeyen delaminasyon etkilerine neden olabileceği gözlemlenmiştir.

Avila ve diğ. (2007), montmorillonit (MMT) nanokil Nanomer I30E silikat katmanlarının (ağ. %1, %2, %5 ve %10) %65 fiber hacim oranlı 200 g/m² düz dokuma S2-cam elyaf alifatik amin trietilenetetramin diglisidil eter bisfenol A epoksi reçinesi ile 16 kat lamine kompozitlerin düşük hız darbe davranışı üzerindeki etkisini araştırdıkları çalışmada, ASTM D5628-01 düşük hızlı darbe testleri nanokilin kompozitlerin enerji absorpsiyonunu ve darbe direncini artırdığı ve delaminasyonu azalttığı gözlenmiştir. 20 J, 60 J, 80 J darbe enerjilerinde enerji absorpsiyonu sırasıyla %48, %15,4 ve %3,6 oranında artmıştır. Nanokil konsantrasyonu arttıkça darbe enerjisi emiliminin arttığı, ancak optimum performans için %5 konsantrasyonun en etkili olduğu saptanmıştır.

Pol ve diğ. (2015), 12 tabaka iki boyutlu dokuma E-cam elyaf/Epon828 epoksi/montmorillonit platelet Cloisite 30B nanokil (ağ. %0, %3, %5, %7, %10) nanokompozitlerin balistik darbe davranışını incelemek için darbe süresini çeşitli zaman aralıklarına bölerek ve her zaman aralığında absorbe edilen enerjiyi hesaplayarak teorik bir model sunmuş, bir gaz tabancası ve düz uçlu bir mermi ile 134 m/s ve 169 m/s hızlarda balistik testler gerçekleştirilmiş ve analitik tahminler deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. En iyi balistik direnç, artık hız ve arka yüzeyde oluşan hasar alanı bakımından incelendiğinde 134 m/s'lik bir darbe hızında (balistik sınıra yakın) %3 ağırlıkça nanokil içeriğinde ve 169 m/s'lik bir darbe hızında %10 ağırlıkça nanokil içeriğinde gözlenmiştir. Yapılan teorik modelleme, darbe direnci ile nanokil konsantrasyonu arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir.

Mantena ve diğ. (2009), nanoparçacık takviyeli kompozitlerin Hopkinson bar ve düşük hız darbe tepkisi üzerindeki etkisini (ağ. %1,25, %2,5, %5 ve %10) MWCNT takviyeli naylon 6,6 termoplastik plaka, (ağ. %1,25 ve %2,5) Cloisite 30B nanokil ve grafit nanoplatelet (xGnP) takviyeli Derakane 411-350 vinylester termoset plaka ve kül bazlı Eco-Core foam plakalar üzerinde incelemişlerdir. Vinil estere ağırlıkça %1,25-2,5 nanokil veya grafit plakaların eklenmesi, maksimum darbe yükünü %60 ve absorbe edilen enerjiyi %130 oranında artırmıştır. MWCNT ilavesinin mekanik özellikleri artırdığı ancak düşük hızlı darbe altında maksimum yük ve enerji absorpsiyonuna olumsuz etkilediği gözlenmiştir.

Chowdhury ve diğ. (2007), yaptıkları çalışmada belirli oranlarda (ağ. %0, %1, %2, %3) organik olarak modifiye edilmiş bir montmorillonit Nanomer I-28E nanokilin 15 kat düz dokuma karbon/SC-15 epoksi reçine sistemini vakum destekli el yatırma yöntemiyle üreterek, belirli enerji seviyelerinde (10 J, 20 J ve 30 J) 6,62 kg ağırlık düşürme düşük hız darbe tepkisi ve hasar karakterizasyonunu incelemişler, deney verileri zamana karşı yük-enerji ilişkileri açısından analiz edilmiştir. Bulgular, herhangi bir enerji seviyesinde nanokil takviyeli laminatların kontrol numunelere göre daha yüksek maksimum yük daha fazla absorbe edilen enerji bileşeni ve azalmış hasar boyutu gösterdiğini ortaya koymuştur. Böylece daha iyi darbe performansı sergilediği bu da nanokil numunelerde daha düşük hasar alanlarıyla sonuçlanmıştır. Hasar alanı en az ağırlıkça %1 nanokil numunelerinde görülmüştür. Ancak, %2 ve %3 nanokil örneklerinin hasar alanları da çok yüksek değildir.

Gupta ve diğ. (2010) nanokompozitlerin darbe tepkisini ağırlıkça %1,25 ve %2,5 Cloisite 30B nanokil ve grafit nanoplatelet (xGnP) takviyeli Derakane 411-350 vinil ester termoset kullanarak dinamik, doğal sönümlenme ve camsı geçiş özellikleri ile ilişkilendirmek için deneysel bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Bulgular, düşük hızlı darbe testleriyle %2,5 nano takviye ile neredeyse %100 enerji emiliminde bir artış göstermiş, nanoparçacık takviyeli kompozitlerin patlamaya/şoka/darbeye dayanıklı yapılar için uygun adaylar olduğunu göstermiştir.

Lin ve diğ. (2006)'nin çeşitli nanoparçacık dolgulu kompozitlerin düşük hızlı darbe testlerinin gerçekleştirildiği araştırmasında polimer reçine matrisi ve takviye elemanı olarak iki tip dolgu içeren iki nanokompozitin mekanik davranışı ve kırılma morfolojisi incelenmiştir. %2 ile %10 arasında değişen hacim oranlarında titanyum dioksit ve modifiye Na-montmorillonit Cloisite 30B nanopartikül dolgulu polyester reçine matrisli kompozitlerin düşük hız darbe testleri 2,1 m/s, 5,2 m/s ve 8,1 m/s başlangıç hızına karşılık gelen darbe enerjisi ile gerçekleştirilmiş, nanoparçacık dolgulu kompozitlerin darbe dayanımını artırdığını, ancak optimize edilmiş dolgu içeriğine sahip olmanın önemli olduğunu belirttiler. Titanyum dioksit için artan dolgu maddesi içeriğiyle birlikte darbe dayanımında %5 hacim dolgu maddesi içeriğinde elde edilen en yüksek değere kadar hafif bir artış bulunmakla birlikte, dolgu maddesinin büyük parçacık aglomerasyonları, kompozit kırılma dayanımını arttırmak suretiyle homojen olmayan partikül topaklanmaları üreteceğinden, darbe mukavemeti

kademeli olarak azalır. Titanyum dioksit kompozitlerinin çekme dayanımı, parçacık eksfoliasyonunun daha yüksek olduğu ve parçacık-reçine arayüzeyinde daha iyi yapışma nedeniyle cloisite 30B kompozitlerinden daha yüksektir.

Kosar ve diğ. (2008), çalışma nanokil ile takviye edilmiş karbon fiber-epoksi kompozitlerin düşük hızlı çarpma davranışını incelemiştir. Çeşitli oranlarda (ağ. %0, %3 ve %5) nanokil ilavesinin karbon fiber-epoksi kompozitlerin etkisine odaklanılarak, yük-enerji ve zaman ilişkileri analiz edilmiş ve malzemenin hasar davranışları incelenmiş, çarpma sonrası basma testi ile kalan basma dayanımı ölçülmüştür. Sonuçlar, organokil içeren kompozitlerin çarpma direncini artırdığını ve enerji emme kapasitesini geliştirdiğini göstermiştir. En yüksek hasar direncinin %3 ağırlıkça organokil içeriği ile elde edildiği belirlenmiştir.

Gustin ve diğ. (2005) nanokompozitlerin düşük hızlı darbe testlerinde performansını ele almış ve farklı sıcaklıklarda nanokompozitlerin darbe özelliklerinin değiştiğini belirtmiştir. Termoplastik bir poliolefinin tek başına ve ağırlıkça %5 kuaterner amonyum tuzu ile modifiye edilmiş doğal montmorillonit Cloisite 15A simektit kil minerali nanokil ile olan düşük hızlı darbe testleri -40 °C, 23,9 °C ve 65,6 °C sıcaklıklarda yapılmış ve darbe enerjileri 7 J'den polimer ile nanokompozit plakalar tam penetrasyon gerçekleşene kadar artacak şekilde devam etmiştir. Darbe testinden elde edilen kuvvet-zaman ve kuvvet-deplasman eğrileri, iki malzemenin çarpma performanslarını karşılaştırma olanağı sağlamıştır. Darbe sonuçları, polimerin ve nanokompozitin darbe performanslarının 23,9 °C ve 65,6 °C'de benzer olduğunu ancak -40 °C'de farklılık gösterdiğini göstermiştir. -40 °C'de, nanokompozitin maksimum absorbe edilen enerjisi polimerinkinden %29 daha düşüktür. Ayrıca -40 °C'de, polimer sadece 57 J'de lokal hasar yaşarken, nanokompozit 42 J darbeye kırılmıştır. Düşük sıcaklıklarda nanokompozitlerin darbe direncinin düştüğü ve nanokompozitler kırılırken polimerin lokal hasar gördüğü gözlemlenmiştir. Kil içeriğinin değiştirilmesi ve polimer boyunca kil dağılımının iyileştirilmesi ile darbe performansının geliştirilebileceği önerilmiştir.

Ali ve Joshi (2012), 150 nm PBA çekirdek ve 160 µm polimetil metakrilat (PMMA) kabuğa sahip Paraloid EXL-2314 nanopartiküller (CSP) ağ. %14 eklenerek dokuma GFRP laminatların tabaka ara yüzeylerinin modifikasyonunun darbe özellikleri üzerindeki etkisini, farklı enerji terimleri arasındaki ilişkiyi, darbe enerjisi

ve zaman fonksiyonu olarak araştırmaktadır. Modifiye laminatlarda maksimum kuvvetten önceki darbe enerjisi referans numuneye göre yüksek olmasını partiküllerin plastik deformasyonu gibi ek enerji absorpsiyon mekanizmalarının olduğu, modifiye edilmiş laminatlarda maksimum kuvvetten sonraki enerji referans numuneye göre daha düşük olmasını modifiye edilmiş laminatlarda hasar oluşturulurken daha az enerji tüketildiği, daha düşük sönümlene indeksi göstermesini modifiye edilmiş laminatlarda hasarın daha az olduğu şeklinde yorumlamışlardır. CSP partiküllerinin eklenmesiyle modifiye edilmiş laminatlarda elastik olarak depolanan enerjinin arttığı, daha düşük büzölme, yüksek dayanıklılık ve deformasyon direnci sağladığını, darbe hasarının azaldığını ve mekanik dayanıklılığı artırdığını ortaya koymuştur.

Radenkov ve diğ. (2006)'e göre polyester fiber-cam malzemelerin polimer matrisinin polikaproamid tozu (PAP poliamid 6) ve epoksi reçine ile modifikasyonu malzeme kalitesini artırmış ve çatlama oranını azaltmıştır. Modifiye edilmiş malzemelerin mekanik dayanıklılığı artırdığı ve polimer matrisinde mikroheterojenlikler oluşturarak gerilmeleri dağıttığı öne sürölmüştür. Bu yaklaşıma göre, polimer matrisinin açı içinde mikroheterojenlikler, iç gerilmeleri dengeleyen ve dış kuvvetler tarafından oluşturulan mekanik gerilmelerin belirli bir kısmını dağıtan agregat mikro düğümler şeklinde oluşur. Katkı maddelerinin konsantrasyonunun artmasıyla küçük konsantrasyonlarda (ağ. %1-4 PAP-6), cam elyaf kompozitlerin mukavemetindeki artış daha belirgin olmakla birlikte modifiye edilmiş malzemelerin çekme ve eğilme dayanımı ile darbe direnci artar. Artan PAP içeriği ile mukavemetleri kademeli olarak azalma eğilimi göstererek maksimum ağ. %10 PAP oranında modifiye edilmemiş cam elyaf kompozit malzemelerle neredeyse benzerdir.

Lin ve diğ. (2006), çeşitli nanopartiköl dolgulu kompozitler üzerinde ağırlık düşürme darbe test cihazı kullanılarak düşük hızlı darbe testleri geręekleřtirilmiřtir. Polyester epoksi matris içine iki tip nanokil metil ve kuaterner amonyum klorür ile modifiye edilmiş, ısıya dayanıklı organik olarak işlenmiş Na-montmorillonit (Cloisite 30B) ve inorganik olarak işlenmiş titanyum dioksit seramik dolgu nanopartikölü içeriği %2 ila 10 hacim arasında değişen oranlarda kullanılmıştır. Her iki takviyeli nanokompozit için 2,1 m/s, 5,2 m/s ve 8,1 m/s başlangıç hızına karşılık gelen darbe enerjisi geręekleřtirilmiř, titanyum dioksit kompozitinin çekme gerilmesi, partiköl-reçine arayüzünde daha iyi bağlanma nedeniyle Cloisite 30B kompozitinden daha

yüksektir. Cloisite 30B kompozitinin çekme dayanımı, dolgu içeriği %5 hacim fraksiyonunu aştığında giderek azalmaktadır. Nanokompozitlerin darbe dayanımı, dolgu içeriğinin artmasına bağlı olarak önemli ölçüde artmaktadır. Titanyum dioksit için yükselen dolgu içeriği ile darbe dayanımı artışı, en yüksek değer %5 hacim fraksiyonlu dolguda elde edildiği görülmüş, daha yüksek oranlarda kompozit kırılma dayanımını artıran homojen olmayan dolgunun aglomerasyonları nedeniyle darbe dayanımı giderek azalır. Cloisite 30B ve titanyum dioksit nanokompozitlerinin 2,1 m/s, 5,2 m/s ve 8,1 m/s'deki çeşitli başlangıç hızlarında kırılma eşiği neredeyse değişmeden kalmaktadır.

Sun ve diğ. (2009), nanokompozitlerin darbe direncine olan etkisini inceleyen bir derleme sunmuş, homojen parçacık dağılımının ve matris-parçacık etkileşiminin, nanokompozitlerin mekanik özelliklerini nasıl artırdığını vurgulamıştır. Yarı statik kırılma, titreşim sönümlenme veya düşük hızlı darbe enerjisi ile karakterize edilen nanokompozitlerin enerji absorpsiyonu ölçümü ve simülasyonu ile ilgili son çalışmalarını özetleyip nanokompozitlerdeki farklı enerji soğurma mekanizmalarını geleneksel kompozitlerle karşılaştırmış, nanodan makro ölçeğe kadar çeşitli parametrelerin enerji emilimi üzerindeki etkilerine dikkat çekmiştir. Çok sayıda deney bazı nano katkı maddelerinin elyaf takviyeli polimer kompozitlerin hem rijitliğini hem de enerji emilimini artırabileceğini göstermiş, nanokompozitlerde enerji soğurma mekanizmaları, katkı maddelerinin şekli ve boyutu, nano parçacıkların ve matris malzemelerinin mekanik özellikleri, arayüzey yapışması, ara faz özellikleri ve matristeki katkıların hacim oranı ve dağılımı gibi bazı temel kontrol parametrelerinin etkisi hem deneyler hem de simülasyon yöntemleri ile incelenmiştir. Deneysel veriler, homojen parçacık dağılımı ve matris ile parçacık arasındaki etkileşimin, nanokompozitlerin mekanik özelliklerinde belirgin bir iyileşme sağladığını göstermiştir.

Reis ve diğ. (2013), çalışmasında nanokil takviyeli epoksi matrisin, Kevlar kompozitlerinin darbe direncini artırabildiğini ancak yüksek yüzdelerde delaminasyon riskini artırdığını göstermiştir. İdeal nanokil miktarını belirleyerek en iyi darbe performansını elde etmek için 12 tabakalı iki eksenli dokuma Kevlar elyaf takviyeli epoksi matrise ağırlıkça %1,5, %3 ve %6 oranlarında Cloisite 30B nanokil ilave etmiş, %3 nanokil ilavesinin Kevlar kompozitlerinin darbe direncini % 32,22 artırdığı ancak

daha yüksek oranlarda (%6) hasar alanı %310,2 arttığı ve katkı maddesi arttıkça kompozitin delaminasyon eğilimi gösterdiği sonucuna varmıştır.

Alomari ve diğ. (2013), deneysel çalışmasında nanokompozitlerin düşük hızda darbe tepkilerini araştırmış, nanomer 1.34TCN nano montmorillonit kil ilavesi ile darbe direnci ve mekanik performansını artırmak için dokuma Kevlar49/vinilester kompozitleri incelemiştir. Nanokil yüzdesinin artması ile darbe dayanımı artmasına rağmen, yüksek yüzdelerde delaminasyon riski taşıdığı görülmüştür. Optimal darbe dayanımı için nanokil yüzdelerinin dikkatlice seçilmesi gereklidir. Düşük oranda nanokil (ağ. %4,3) delaminasyon direncinde en iyi sonuçları göstermiştir. Kontrol örnekleri 250 J enerji seviyesinde vurucu uç tarafından tamamen delinirken, %4,3 nanokil ilave edilmiş örnekler 5 katmana ulaşan kısmi penetrasyon göstermiş, %9,4 nanokil ilave edilmiş numuneler ise kısmi penetrasyonu 2 katmana kadar olan daha yüksek bir darbe direnci göstermiştir. Ancak yüksek oranda nanokil ilavesi kompozit delaminasyonunu kötüleştirmiştir. %9,4 nanokil ilave edilmiş numunelerin delaminasyon alanı yaklaşık %71 arttığı görülmüş, hasar alanı %22 azalarak en iyi delaminasyon direncini %4,3 oranında nanokil ilavesi ile göstermiştir.

Rahman ve diğ. (2018), Kevlar-epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbelere karşı direncini artırmak amacıyla %10'a kadar (ağ. %0, 2, 5, 10) Cloisite 30B nanokil ve grafen katkılarının etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Nanokilin ve grafenin kompozitlerin darbe direnci, enerji emilimi ve delaminasyon direnci üzerindeki etkilerini inceleyen çalışma, nanokilin, darbe direncini artırma açısından grafene göre daha etkili olduğunu ortaya koymuştur. Analizler nanokil ilavesinin darbe direncinde (%26,9 artışa karşılık %7,5 artış) ve darbe enerjisi emiliminde (15% artışa karşılık 11.37% azalma) grafene kıyasla daha etkili olduğu ve darbe direncini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Matristeki nanokil oranı arttıkça darbe direnci de artmıştır. Ağırılıkça %10 nanokil içeren kompozit numuneler en yüksek darbe kuvvetine (%26 daha fazla) maruz kalmış ve enerjinin çoğunu geri kazanmıştır (%24 daha fazla). Bununla birlikte, grafen ilavesi darbe direncinde bir artışa katkıda bulunmamıştır. Öte yandan hem nanokil hem de grafen katkıları hasar alanını azaltmıştır. Elde edilen sonuçlar, nanokilin homojen dağılımı ve yüksek katkı oranının, nanokil katkılı kompozitlerde yüksek darbe ve penetrasyon direnci sağladığını ortaya koymuştur. Bu

çalışma, nanokilin, kompozit malzemelerin darbe direnci performansını artırmak için potansiyel bir malzeme olduğunu göstermektedir.

Mahdi ve diğ. (2017), nanokil ve MWCNT'leri ayrı ayrı ilave etmenin yanı sıra CFRP kompozitlerin darbe performansını artırmada ikisinin hibritinin etkisini de incelemek üzere ağ. %0,3 MWCNT, %2 nanokil ve %0,1+%2 MWCNT+nanokil hibriti içeren CFRP kompozitleri 30, 40 ve 50 J enerji seviyelerinde darbe kuvvetine tabi tutarak enerji, yük, deplasman ve hız eğrilerini yorumlamışlardır. MWCNT ve nanokil, kompozit numunelerin darbe özelliklerini geliştirmiş ve hasar alanını hafifçe azaltmıştır. Bununla birlikte, hibrit nanopartikül takviyeli kompozit numuneler önemli bir iyileşme sergilemiştir. MWCNT ve nanokil modifikasyonu sırasıyla %11 ve %7,5'e varan bir artış sergilerken, hibrit nanopartikül modifikasyonu maksimum kuvveti %16'ya kadar iyileştirmiştir. Absorbe edilen enerji, tüm enerji seviyelerinde hibrit nanopartiküllü kompozitler için en yüksek olmuştur. Özellikle, 40 J darbe enerjisi seviyesinde referans numunelere kıyasla hibrit nanopartikül katkılı kompozitler %32'ye varan oranda fazla enerji absorbe etmiştir. Enerji seviyeleri yükseldikçe hasar alanında azalma görülmekle birlikte hibrit nanopartiküllü kompozitler, hasar alanında referans kompozitlere kıyasla %80'lik bir azalma sergilerken, nanokil ve MWCNT hasar alanında sırasıyla %30 ve %50 azalma sergilemiştir.

Bu araştırmalar, nanomalzemelerin kompozit malzemelerin darbe direncini artırma potansiyeline işaret etmekte, kompozit malzemelerin düşük hızlı darbelere karşı direncini artırmak için nanoteknolojiye dayalı dolgu maddelerinin etkisini ve farklı kompozit yapısal parametrelerin darbe direncine olan etkisini araştırmış ve endüstriyel uygulamalar için daha dayanıklı kompozit malzemelerin geliştirilmesinde önemli bir adım olmuştur. Nanokilin, özellikle delaminasyonu azaltma ve enerji absorpsiyonunu artırma gibi belirgin özellikleriyle dikkat çekici bir performans sergilediği, nanokil ilavesinin kompozitlerin darbe dayanımını artırabileceği ancak yüksek nanokil yüzdelerinin kompozitlerin delaminasyonunu artırabileceği görülmüştür.

1.2.3 Kompozitlerle İlgili Diğer Çalışmalar

Fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin darbe yükünden kaynaklanan hasarı, Andrew ve diğ. (2019)'e göre bu malzemelerin yaygın kullanımını kısıtlayan en kritik faktörlerden biridir. Bir tasarımcı, her bir katmanın elyaf yönelimini veya elyaf mimarisini ve malzeme davranışını dikkatli bir şekilde seçerek, katman sayısını azaltırken tüm yük gereksinimlerini yetkin bir şekilde karşılayabilecek bir kompozit yapılandırabilir. Bir kompozit malzemedeki matris sistemi, takviyeleri korumaya, hizalamaya ve stabilize etmeye yardımcı olmanın yanı sıra bir elyaftan diğerine gerilme aktarımını da sağlar. Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitlerin mekanik performansı, matris ve elyaf arasındaki bağ kuvvetine dayanır.

Cheon ve diğ. (1999), cam lifli takviyeli hibrit kompozitlerin Charpy enerji absorbe etme özelliklerini farklı malzeme hacim oranlarına göre incelemiştir. Cam elyaf hibrit kompozitlerde yapılan çalışma, Charpy darbe absorpsiyonunda büyük artışlar olduğunu göstermektedir. Özellikle tek yönlü Kevlar 29 lifinin darbe enerjisini absorbe etme kapasitesinde saf cam elyaf epoksi kompozite göre %3,4 hacim oranıyla %80'e, tek yönlü cam elyafın %5 hacim oranında %40'a varan artışlar sağlanmıştır.

Hocaoğlu ve Karagülle (2020), karbon nanotüp takviyesinin kompozit kırımların doğal frekansları ve titreşim karakteristikleri üzerindeki etkisini incelemiş, farklı KNT oranları ilave edilmiş üç epoksi-cam elyaf kompozit plaka (%0, %0,25, %0,5) üretilmiştir. Çok duvarlı karbon nanotüpler ultrasonik bir karıştırıcı ile epoksi reçineye karıştırılmıştır. Test numuneleri liflerin yönüne paralel ve dik olarak incelenmiş, sonuçlar az miktarda KNT (%0,25) eklemenin, yüksek miktarda (%0,5) eklemekten daha etkili olduğunu göstermektedir. Karbon nanotüp takviyesinin kompozit malzemelerin rijitliğini artırdığı ve doğal frekansları yükselttiği bulunmuştur. Yüksek oranda KNT ilavesi ile homojen olarak karıştırılmasının daha zor olması ve epoksidede aglomere olma eğilimi sebebiyle, doğal frekanslardaki artış daha azdır.

AlOmari ve diğ. (2020) düşük hızlı darbeye karşı dayanıklılığı artırmak amacıyla karbon, cam ve karışık elyaf kompozit plakaların darbe tepkisini incelemiş ve farklı reçine türleri ve sıralama dizileriyle olan ilişkisini araştırmıştır. Karbon elyaf/epoksi kompozit plakaların, cam elyaf/epoksi plakalara göre daha iyi darbe

direnci gösterdiği sonucuna varmıştır. Epoksi, fenolik ve polyester gibi farklı reçine türleriyle farklı elyaf dizilimlerinde karbon, cam ve karbon/cam karışık fiber plakaların düşük hızlı darbe davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Deneysel veriler fenolik reçine ile yapılan kompozit plakaların enerji emiliminin arttığını, darbe direncini artırma eğilimi gösterdiğini ve karbon elyaf/epoksi kompozit plakaların daha yüksek enerji absorbe etmesiyle, cam elyaf/epoksi kompozit plakalara göre daha yüksek darbe direncine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Görsel incelemeler neticesinde fenolik reçine plakalarla karşılaştırıldıklarında polyester ve epoksi reçine plakalarda büyük ölçüde darbe sonrası hasar gözlenmiştir. Karbon/cam karışık plakalarda karbon elyafların dizilişteki konumunun etkisi belirgin değildir. Sonuçlar $[90^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}]_s$ sıralama dizisine sahip plakaların $[60^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/-60^{\circ}]_s$ 'ye göre darbe direnci açısından daha iyi olduğunu ortaya koymaktadır. Karbon elyaf/epoksi kompozit plakaların, cam elyaf/epoksi plakalara göre daha iyi darbe direnci gösterdiği ve reçine tipinin kompozitlerin darbe direncine etkisinin belirgin olduğu gözlenmiştir.

Bu araştırmalar, nanoparçacık takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini ve darbe dayanımını anlamak için kapsamlı bir çalışma sağlamaktadır. Bu makalelerde incelenen çalışmalar, farklı polimer matrislerinde yapılan modifikasyonların fiber kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkilere sahip olabileceğini göstermektedir. Darbe dayanımı, büzülme, mekanik dayanıklılık gibi özelliklerin iyileştirilmesi, fiber kompozit malzemelerin uygulama alanlarını genişletebilir ve endüstriyel kullanımlarını artırabilir. Literatürdeki çalışmalar, nano partikül ilavesinin fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde potansiyel bir iyileştirme sağlayabileceğini ve darbe dayanımını artırabileceğini göstermektedir. Araştırmalar, farklı nanoparçacıkların, kompozitlerin darbe dayanımını artırmada potansiyel fakat optimize edilmiş miktarlarda kullanılması gerektiğini vurgulamaktadır. Ancak, farklı nano partikül tipleri, ilave miktarları ve dağılımının sonuçlar üzerindeki etkileri hakkında hala daha detaylı araştırmalar gerektirmektedir. Her bir çalışma, nanokompozit malzemelerin farklı yapılar da darbe dayanımı üzerindeki etkilerini ortaya koyarken, nanomateryal kullanımının malzeme mühendisliği alanında geniş bir potansiyele sahip olduğunu gösteriyor. Araştırmalar, nanokompozitlerin mekanik özelliklerinin, darbe direncini artırmak için optimize edilmiş dolgu içeriği ve homojenlik gerektirdiğini vurgulamaktadır. Bu özet, fiber

takviyeli kompozit malzemelerde nano partikül ilavesinin mekanik özellikler ve darbe dayanımı üzerindeki etkilerini belirlemek için yapılan mevcut çalışmaların genel bir bakışını sunmaktadır.

Literatür araştırması sonucu spesifik olarak bu tezde, organik interkalasyonlu nanokil, küresel toz poliamid 12 ve MWCNTs ayrı ayrı ve birlikte eklenmesinin dokuma ve kıvrımsız dikişli GFRE kompozitlerin mekanik özellikleri ve düşük hız darbe dayanımları üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Tam delinme oluşana kadar farklı enerji seviyelerinde darbe testleri yapılmış, plakaların hasar özelliklerini değerlendirmek için, sonuçlar kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman diyagramları ve ortaya çıkan fiziksel hasarın gözlemlenmesi açısından yorumlanmıştır.

1.3 Amaç ve Kapsam

Fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemeler, kullanımları esnasında olası çarpma ve darbelere karşı yüksek dayanım göstermesi istenen uygulamalar için, günümüzde kullanımları giderek artmaya başlamıştır. Örneğin, havacılık endüstrisinde uçak gövdesi ve motor türbin kanatçıklarının yapımında, denizcilik endüstrisinde ise yat ve tekne gövde yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerde darbe ve çarpma neticesinde malzemenin davranışı, absorbe ettiği enerji ve malzemede oluşan hasarların incelenmesi gibi konular son zamanlarda popüler araştırma konuları olmuş ve olmaya devam etmektedir.

Çeşitli sebeplerle malzemenin maruz kalabileceği darbe ve çarpma sonucundaki etkileşme süresi, mikro saniyeler veya mili saniyeler mertebesinde olur. Böyle bir etki altındaki malzeme, çoğu zaman sürenin uzunluğuna bağlı olarak çok farklı davranış tarzı sergiler. Bu davranış tarzı, malzemede çarpma esnasında meydana gelen hasar oluşumu ile çok yakından ilgilidir. Metaller gibi, bilinen tek tipteki ve izotropik özellikte kabul edilen malzemelerde çarpma sırasında oluşan hasar, elastik veya plastik şekil değiştirme miktarına bağlı olarak eğilme, nüfuziyet veya delinme şeklinde meydana gelir. Bu durum kompozit malzemelerde gerek hasarın oluşumu, yapısı ve gerekse büyüme mekanizması bakımından çok daha farklıdır. Çarpma hızının ve enerjisinin düşük olduğu durum genellikle düşük hızlı darbe olarak

adlandırılır. Bu türden darbelerde temas süresi, yüksek hız ve yüksek enerjili darbelere göre daha uzundur. Düşük hızlı darbeye maruz kompozit malzemelerde çoğu zaman gözle görülemeyen hasar boyutu, görülen hasara göre daha ciddi olabilir ve malzeme içerisinde daha geniş bir alana yayılır. Yüksek hızlı darbe durumunda ise hasar, darbenin meydana geldiği bölge civarında olur ve gözle görülebilir. Gerek kompozit malzemelerin karmaşık yapısı ve farklı hasar mekanizması, gerekse de çarpışma esnasındaki etkileşme süresinin kısa oluşu, kompozit malzemelerde darbe olayının incelenmesini zor ve karmaşık bir duruma getirmektedir. Ancak, kompozit malzemelerin metal ve benzeri malzemelere nazaran çok daha hafif ve bununla birlikte yüksek mukavemet değerlerine sahip olmaları, havacılık ve deniz endüstrisinde yaygın olarak kullanılmalarını sağlamaktadır.

Kompozit malzemelerin darbe davranışının değerlendirilmesinde kullanılan deneysel çalışmalar, yer tipi, serbest düşen ağırlık prensibine göre çalışan darbe deneylerinin yapılabildiği test cihazları ile yapılmaktadır. Bu darbe test cihazlarında vurucu ile numune arasında meydana gelen temas kuvvetini, vurucunun hızını, numunenin orta noktasının çökme miktarını ve vurucunun sahip olduğu enerjiyi zamana bağlı olarak verebilen bir yazılımla donatılmışlardır (Bektaş ve Ağır, 2014).

Bu çalışmada nanopartikül katkıları ile takviyeli kompozit ürünlerin geliştirilmesi, mekanik özelliklerinin ve darbe dayanımlarının iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Seramik nanokil, poliamid toz ve karbon nanotüp katkı maddelerinin GFRP kompozitlerin mekanik özellikleri ve darbe davranışları üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bunun için, epoksi reçine içerisine ağırlıkça farklı miktarlarda katkı maddesi ilave edilerek, cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler üretilmiştir. Katkı maddelerinin epoksi reçine içerisine homojen bir şekilde topaklanmadan dağılmasını sağlamak için ultrasonik karıştırıcı kullanılmıştır. Numunelerin üretimi tamamlandıktan sonra mekanik özellikleri tespit edilip düşük hızda darbeye karşı gösterdiği davranış belirlenmiştir. Kompozit plakaların, mekanik özellikleri tespiti ve darbe davranışlarını incelemek için PAÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Instron 8801 Çekme/Basma Deney Cihazı ile statik çekme basma testleri ve Instron Dynatup 9250 HV Darbe Deney Cihazı ile düşük hızlarda darbe deneyleri yapılmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde, çekme, basma ve burkulma testleri ASTM standartlarına göre

gerçekleştirilmiştir. Düşük hız darbe deneylerinde, numunelerde tam delinme gerçekleşene kadar ağırlık düşürme deneyi yapılmıştır. Değişik kombinasyonlar için, sekme (rebounding), saplanma (penetration) ve delinme (perforation) enerjileri tespit edilerek, enerji profil diyagramları oluşturulmuştur. Üretilen kompozit plakaların yapılan deneyler neticesinde birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları belirlenerek sektördeki ilgili üreticilere kaynak teşkil edecek bilimsel yayınlar hazırlanmıştır.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1 Malzeme

Bu çalışmada farklı oranlarda katkı maddesi içeren epoksi reçine esaslı cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler üretilmiştir.

Üretimde matris malzemesi olarak kullanılan epoksi reçinesi Araldite LY 1564, sertleştirici Aradur 3486 (karışım oranı ağırlıkça 100/34) Huntsman, İsviçre tarafından tedarik edilen standart bir bisfenol A diglisidil eterdir. Araldite 1564/Aradur 3486 kompozit uygulamalarında düşük viskoziteli ve yüksek esnekliğe sahip laminasyon sistemi spor gereçleri, medikal parçalar ve endüstriyel parçaların üretiminde kullanılan reçine sistemidir.

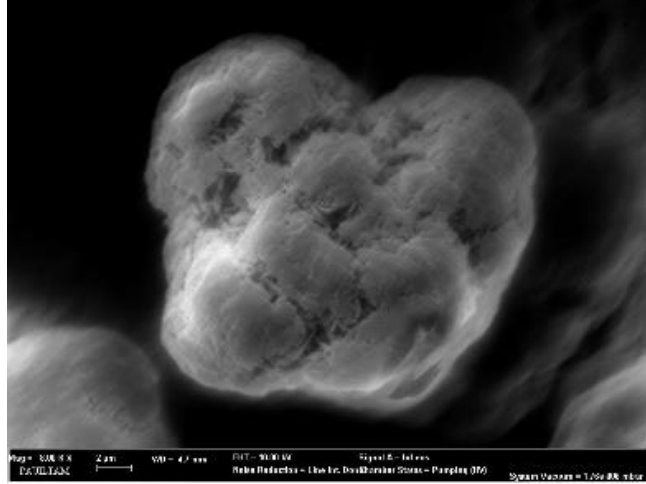
Takviye elemanı olarak kullanılan cam elyaf tipleri, Dost Kimya, Türkiye'den 300 g/m²lik yoğunluğa sahip 0°/90° düz (plain) dokuma ve 0°/90° kıvrımsız dikişli iki eksenli (biaxial) kumaştır (0° = "300/600 tex cam elyaf" 177 g, 90° = "300 tex cam elyaf" 142 g, dikiş lifi: 76 dtex 10 g).

Tablo 2.1: Takviye elemanı ve matris malzemelerinin mekanik özellikleri.

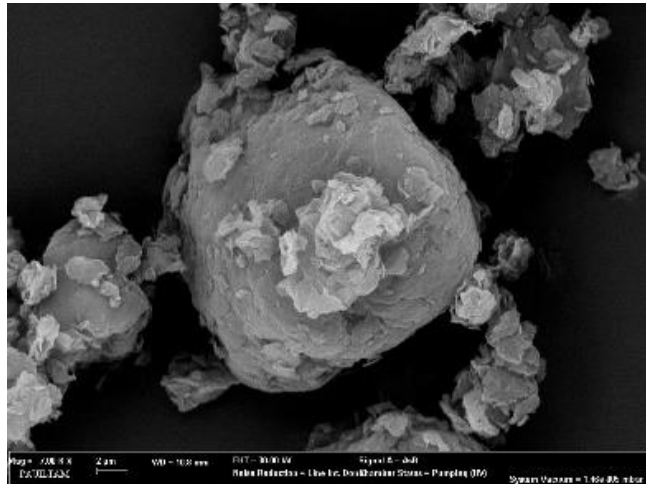
	Cam Elyaf (300 g/m ²)	Epoksi Reçinesi
Çekme Modülü:	81,5 GPa	2850-3000 MPa
Çekme Mukavemeti:	2300 MPa	70-75 MPa
% Uzama:	2,97	4
Yoğunluk:	2,5 ~ 2,6 g/cm ³	1,1-1,2 g/cm ³

Kullanılan katkı maddeleri; parçacık boyutu 10 µm'den küçük olan organik arakatkılı seramik nanokil, bis(hidrojenlenmiş alkil)dimetil, bentonitli tuz bileşimi, CLOISITE® 20 ticari adıyla BYK-Chemie GmbH (Altana Group) Wesel, Almanya tarafından temin edilmiştir.

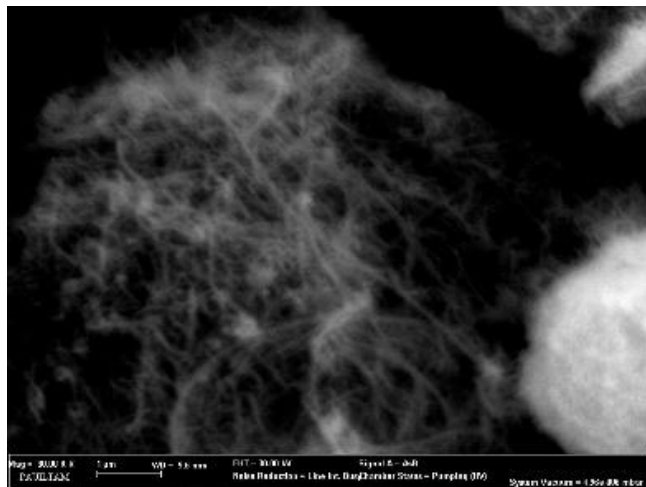
Termoset reçinelerin esnekliğini artırma özelliğine sahip ortalama çapı 30 µm olan poliamid12 tozları ORGASOL® 2002 ES 3 NAT 3 ticari adıyla Grolman (Arkema GmbH) Neuss, Almanya tarafından temin edilmiştir. Kullanılan termoplastik katkı maddesi bir tokluk ajanı görevi görerek, termoset matris malzemesinin esnekliğini ve çatlak ilerlemesine karşı direncini artırmaya katkı sağlar.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.1: SEM görüntüleri a) Poliamid, b) Nanokil, c) Karbon nanotüp.

Boyutları 10-20 nm dış çap ve 0,5-2 µm uzunluğundaki kısa çoğul duvarlı karbon nanotüpler (S-MWCNT-OH) Ege Nanotek Kimya Sanayi, Türkiye firmasından temin edilmiştir. Şekil 2.1’de (a) ORGASOL® PA12, (b) Cloisite® 20 ve (c) S-MWCNT-OH katkı maddelerinin partikül şekli gösterilmektedir. Bu çalışmada kullanılan kompoziti oluşturan takviye elemanı ve matris malzemelerinin mekanik özellikleri Tablo 2.1’de ve katkı maddelerinin fiziksel özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2: Katkı maddelerinin fiziksel özellikleri.

Katkı maddesi	Açıklama	Yoğunluk [g/cm ³]	Yoğ. (Bulked) [g/cm ³]	Ortalama tane boyutu
Nanokil (Cloisite 20)	Organik arakatkılı seramik kil	1,77	0,175	<10 µm (d ₅₀), 3,16 nm (d ₀₀₁)
Poliamid toz (Orgasol)	Küresel toz PA12	1,03	0,375	30 ±2 µm
Karbon nanotüp (S-MWCNT -OH)	Safılık: %98 OH içeriği: ağ. %1,76 Yüzey alanı: >200 m ² /g	2,1	0,22	d _d : 10-20 nm, d _i : 5-10 nm, L: 0,5-2,0 µm

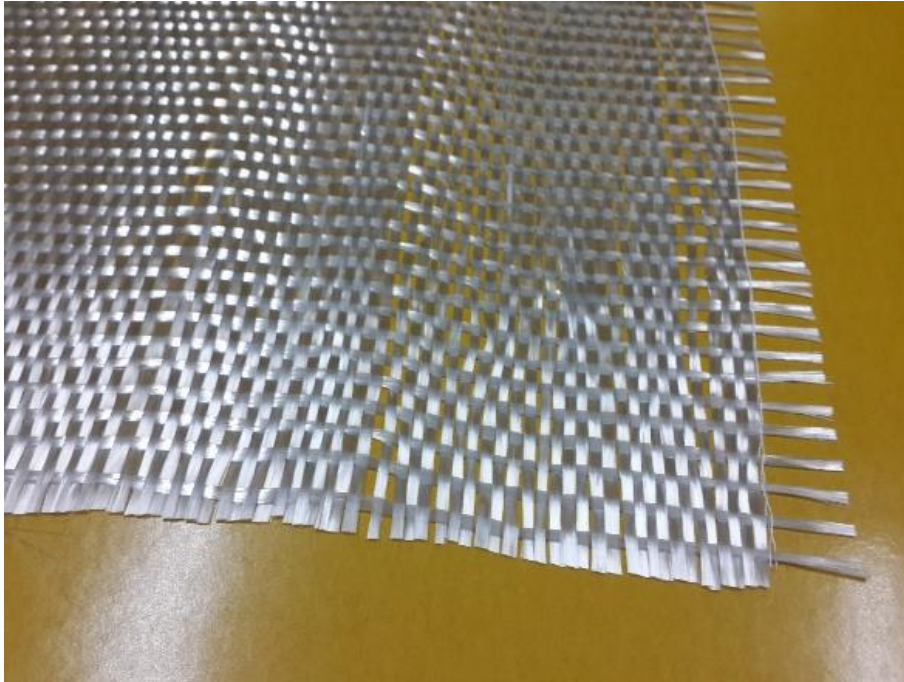
2.2 Kompozit Plaka İmalatı

GFRP kompozitlerinin imalatında dokuma (plain woven) cam elyaf kumaş takviyeli, katkısız olarak adlandırılan saf epoksi, PA olarak adlandırılan poliamid tozu/epoksi (ağırlıkça %0,5, %1 ve %2), NC olarak adlandırılan nanokil/epoksi (ağırlıkça %0,5, %1 ve %2) ve PA+NC olarak adlandırılan polyamid+nanokil/epoksi

(ağırlıkça %1+1) matris bileşimi kompozitler üretilmiştir. İki eksenli kıvrımsız dikişli cam elyaf kumaş takviyeli, katkısız olarak adlandırılan saf epoksi, KNT olarak adlandırılan karbon nanotüp/epoksi (ağırlıkça %0,3), NC olarak adlandırılan nanokil/epoksi (ağırlıkça %2), PA olarak adlandırılan poliamid tozu/epoksi (ağırlıkça %2), NC/KNT olarak adlandırılan nanokil+karbon nanotüp/epoksi (ağırlıkça %2+0,3), PA/KNT olarak adlandırılan poliamid+karbon nanotüp/epoksi (ağırlıkça %2+0,3) ve NC/PA/KNT olarak adlandırılan nanokil+poliamid+karbon nanotüp/epoksi (ağırlıkça %2+2+0,3) şeklinde matris bileşimi kompozitler üretilmiştir.

Kompozit plakaların imalatında takviye malzemesi olarak iki tip cam elyaf kumaş kullanılmıştır.

1. 0°/90° düz (plain) dokuma kumaş 300 g/m² (Şekil 2.2),
2. 0°/90° iki eksenli (BA) kıvrımsız dikişli kumaş 300 g/m² (Şekil 2.3).



Şekil 2.2: Takviye malzemesi 0°/90° düz (plain) dokuma cam elyaf kumaş.



Şekil 2.3: Takviye malzemesi 0°/90° kıvrımsız dikişli cam elyaf kumaş.

Matris: Epoksi reçine + sertleştirici (ağ. 100:34, hac. 100:41). Reçineye Şekil 2.4'te gösterildiği gibi karışım oranına göre hassas terazide tartılarak karıştırılan üç farklı tip katkı maddesi kullanılmıştır.

- K1: Orgasol® poliamid (PA),
- K2: Cloisite® nanokil (NC),
- K3: Çok duvarlı hidroksil bağlı (S-MWCNT-OH) karbon nanotüp (KNT) olarak ifade edilmiştir.



Şekil 2.4: Katkı maddelerinin hassas terazi ile tartılması.

2.2.1 Katkı Maddeleri ve Matrisin Hazırlanması

Birinci bölümde takviye malzemesi olarak 1 numaralı plain dokuma cam fiber kullanılarak katkısız matrisli kontrol numunesi ve reçine içerisinde; K1 %0,5, %1 ve %2 oranında, K2 %0,5, %1 ve %2 oranında ve her ikisi beraber K1+K2 %1+%1 oranında katkı maddesi bulunan 400 mm x 400 mm x 2 mm ebatlarında 8 tip plaka üretilmiştir (Tablo 2.3). Kompozit plakalar; her bir katkı oranı için ayrı ayrı, takviye elemanı olarak $[0^\circ/90^\circ]$ diziliminde plain dokuma 300 g/m² cam elyaf kumaştan 1200 mm x 850 mm ölçülerinde 2'şer adet hazırlanan prepregler kesilerek 400 mm x 400 mm ölçülerinde 10'ar kat tabakadan plaka kalınlığı 2 mm olacak şekilde hazırlanmıştır.

Tablo 2.3: Araştırılan dokuma kumaş takviyeli kompozit plakalar.

Kompozit Numuneler	Katkı oranları (ağ. %)	Fiber Oryantasyon Açıları (°)
E-cam/epoksi	%0	$[0^\circ/90^\circ]_{5s}$
E-cam/epoksi/PA	%0,5	$[0^\circ/90^\circ]_{5s}$
E-cam/epoksi/PA	%1	$[0^\circ/90^\circ]_{5s}$
E-cam/epoksi/PA	%2	$[0^\circ/90^\circ]_{5s}$
E-cam/epoksi/NC	%0,5	$[0^\circ/90^\circ]_{5s}$
E-cam/epoksi/NC	%1	$[0^\circ/90^\circ]_{5s}$
E-cam/epoksi/NC	%2	$[0^\circ/90^\circ]_{5s}$
E-cam/epoksi/PA+NC	%1+%1	$[0^\circ/90^\circ]_{5s}$

İkinci bölümde takviye malzemesi olarak 2 numaralı kıvrımsız dikişli iki eksenli cam elyaf kumaş kullanılarak katkısız matrisli kontrol numunesi ve reçine içerisinde; K1 %2 oranında, K2 %2 oranında, K3 ise %0,3 oranında, K1+K3 %2+%0,3 oranında, K2+K3 %2+%0,3 oranında, K1+K2+K3 %2+%2+%0,3 oranında katkı maddesi bulunan 400 mm x 400 mm x 2 mm ebatlarında 7 tip plaka üretilmiştir (Tablo 2.4). Kompozit plakalar; her bir katkı oranı için ayrı ayrı, takviye elemanı olarak $[0^\circ/90^\circ]$ diziliminde kıvrımsız dikişli 300 g/m² cam elyaf kumaştan 1200 mm x 1200 mm ölçülerinde hazırlanan prepregler kesilerek 400 mm x 400 mm ölçülerinde 8'er kat tabakadan plaka kalınlığı 2 mm olacak şekilde hazırlanmıştır.

Tablo 2.4: Araştırılan iki eksenli kumaş takviyeli kompozit plakalar.

Kompozit Numuneler	Katkı oranları (ağ. %)	Fiber Oryantasyon Açıları (°)
E-cam/epoksi	%0	[0°/90°] _{4s}
E-cam/epoksi/KNT	%0,3	[0°/90°] _{4s}
E-cam/epoksi/NC	%2	[0°/90°] _{4s}
E-cam/epoksi/PA	%2	[0°/90°] _{4s}
E-cam/epoksi/NC/KNT	%2+%0,3	[0°/90°] _{4s}
E-cam/epoksi/PA/KNT	%2+%0,3	[0°/90°] _{4s}
E-cam/epoksi/NC/PA/KNT	%2+%2+%0,3	[0°/90°] _{4s}

2.2.2 Dispersion

Kullanılan kompozitler prepreg tekniği ile üretilmiştir. Kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için, katkı maddeleri sertleştirici eklenmeden önce epoksi reçine içinde homojen olarak dağıtılmıştır. Aksi halde, katkı maddeleri homojen olmayan şekilde dağılır ise bu da stres konsantrasyonlarının kırılmanın ana nedeni olan yüzey bozukluklarına etki eder. Katkı maddelerinin epoksi matris içinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak için ultrasonik dalgalar yayarak partikülleri karıştıran bir sonikatör kullanılmıştır. Katkı maddeleri belirlenen oranlarda hassas terazi ile tartılmış ve reçineye ilave edilmiştir. Katkı maddeleri ve epoksi reçinesi karışımı, Şekil 2.5a’da gösterildiği gibi, Hielscher UP400S sonikatör ile maksimum genliğinin %50’si kullanılarak karışım sıcaklığı 45 °C’yi geçmeyecek şekilde 30 dakika boyunca gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik homojenizasyon yönteminin temeli ses dalgaları ile titreşim oluşturarak kümeleşme eğilimi gösteren katkı maddelerinin polimer matris içerisinde homojen bir şekilde dağılmasının sağlanması ve topaklanmasının önüne geçilmesi suretiyle mekanik özelliklerin olumsuz etkilenmesine neden olan gerilme yığılma bölgelerinin oluşmasına mahal vermeden karışım yapmaktır. Dispersion işleminde kullanılan mekanik karıştırma yöntemlerinden çok daha etkili bir karıştırma yöntemi olan ultrasonik karıştırma yönteminin sonucunda ısı açığa çıkmakta ve karışım ısınmaktadır. Karıştırma esnasında ısı yükselişini önlemek ve homojen karışım eldesi için su soğutmalı sirkülatör kullanılmıştır. Şekil 2.5b’de homojenizasyon esnasında karışımın sıcaklığının yükselmesini engellemek amacıyla kullanılan soğutma sistemi gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2.5: Homojenizasyon a) Sonikatör, b) Soğutma sistemi.

2.2.3 Prepreg Hazırlama

Kompozit malzemeler; yoğunluğu 300 g/m^2 olan cam elyaf kumaşlar ve saf epoksi reçinesi ve nano parçacık katkılı epoksi reçinesi ile Fibermak Composites, Türkiye firmasında üretilmiştir. Belirlenen oranlarda katkı maddesi içeren epoksi karışımları, cam elyaf kumaşla güçlendirilmiş polimer kompozitlerin matris kısmı olarak kullanılmıştır. Karışımlar hazırlandıktan sonra cam elyaf kumaşlar epoksi reçine ile ıslatılarak, tamamen reçine emdirilmiş prepreg kumaşlar hazırlanmış (Şekil 2.6), alt ve üst yüzeylere silikonlu kağıtlar yerleştirilerek prepregler hazırlanmıştır. Şekil 2.7’de görüldüğü üzere hava kabarcıkları içermeyen pürüzsüz bir arayüz oluşturmak için raflarda üç gün bekletilmiştir.



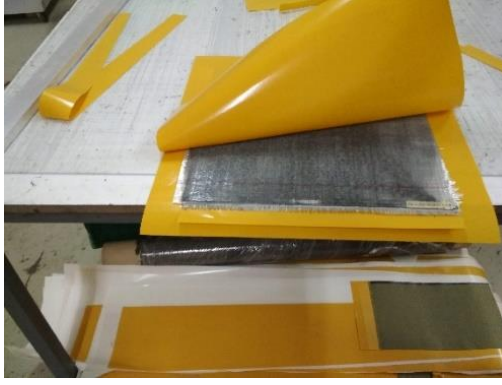
Şekil 2.6: Kumaşa reçine emdirme işlemi.



Şekil 2.7: Prepreg üretimi.

2.2.4 Kompozit Plakaların Kürlenmesi

Üç gün sonra prepregler silikonlu kağıtlardan ayrılarak Şekil 2.8a'da görüldüğü üzere istenen boyutlara göre (400 mm x 400 mm) kesilmiş, önceden belirlenen doğrultularda istenilen kalınlığa ulaşıncaya kadar prepreglerin her bir tabakası üst üste dizilerek belirli bir kalınlıkta (2 mm) kompozit plakalar elde edilmiştir. Plakalar yanmaz silikonlu kumaşlar ile ambalajlanarak presleme işlemine tabi tutulmuştur. İyi bir yapışma için presleme esnasında sıcaklığın presin her bölgesinde aynı olması gerekmektedir. Hava kabarcıklarının oluşmaması ve plaka kalınlıklarının üniform olması için gerekli tedbirler alınmıştır. Mumlu kağıtlar, pres çenelerinin yapışmasını önlemek için kullanılmıştır. Ambalaj kağıtları ile kaplı prepreg kumaşlar, 5 bar sabit basınç altında 120 °C sıcaklıkta preslenmiş ve 2 saat boyunca kürlenmiştir (Şekil 2.8b). Plakalar, termal çarpıklıkları ve gerilme yığılmalarını önlemek için ısıtma sistemi kapatılmış, en az 1 saat basınç altında bekletilerek yavaşça oda sıcaklığına soğutulmuş, daha sonra plakanın üzerindeki basınç kaldırılmıştır.



(a)

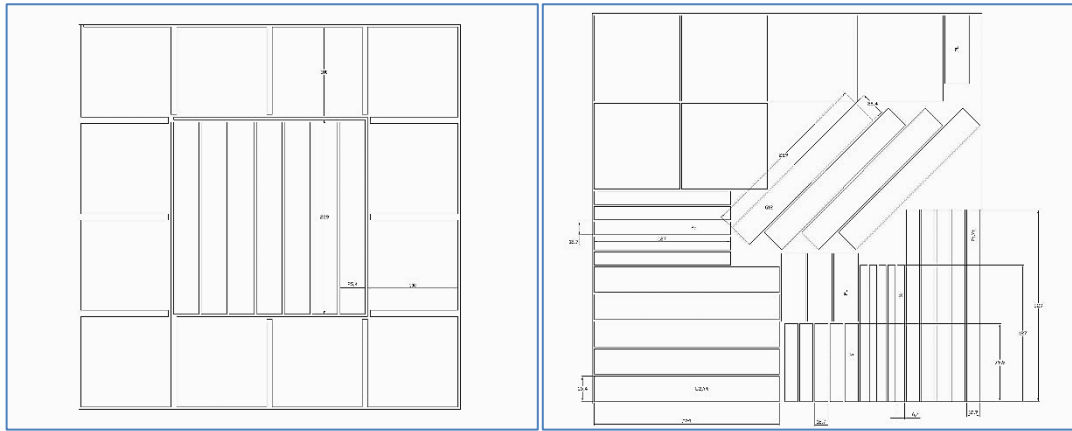


(b)

Şekil 2.8: Kompozit plakalar hazırlanması a) Prepreglerden katmanların oluşturulması, b) Tabakaların sıcak preste kürlenmesi.

2.2.5 Numune Boyutlarına Getirme

400 mm x 400 mm boyutlarında üretilen kompozit plakalardan deney numuneleri Kardeş Cam, Türkiye firmasında Şekil 2.9’da verilen şablonlara göre istenilen ölçülerde su jeti ile kesilmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.9: Su jeti ile kesim için örnek şablon.



Şekil 2.10: Su jeti ile numune boyutlarına kesme.

2.3 DeneYlerde Kullanılan Cihazlar

Üretilen kompozit malzemelerin deneysel olarak incelenmesi için Pamukkale Üniversitesi laboratuvarlarında bulunan deney cihazları kullanılmıştır.

2.3.1 Statik ve Dinamik Deney Cihazı

Polimer malzemelerin mekanik özelliklerinin ortaya konulabilmesi için çekme, basma, eğme, burkulma vb. testlere tabi tutulması gerekmektedir. Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarında Şekil 2.11’de gösterilen Instron 8801 üniversal çekme-basma test cihazı ± 50 kN yük hücreli, 150 mm stroklu, %0,005 hassasiyetinde ölçüm yapabilmektedir.

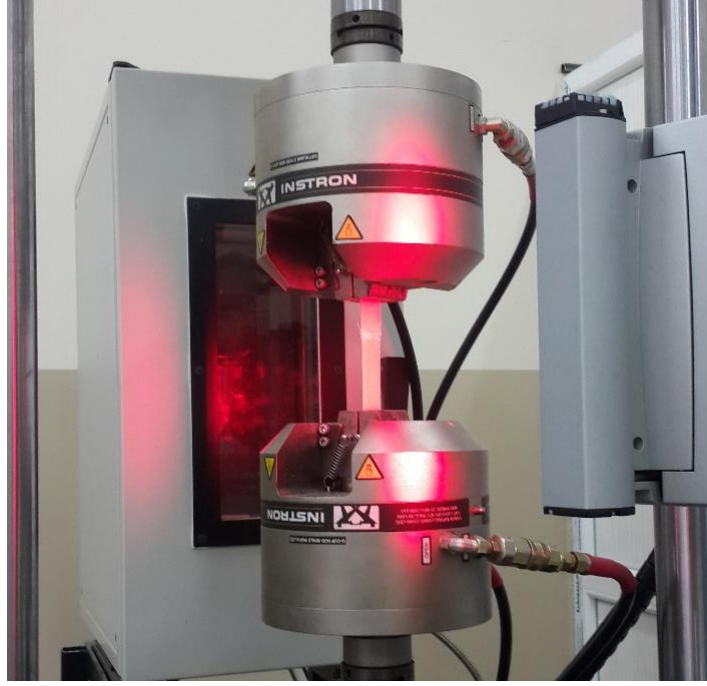
Düşük kapasite servohidrolik sistemler hemen her laboratuvarda yorulma testleri için çok faydalı bir araçlardır. Bu yorulma testi cihazları, çok geniş bir aralıkta hem düşük çevrim (LCF – Low Cycle Fatigue) hem de yüksek çevrim (HCF – High Cycle Fatigue) yorulma testlerini, çatlak ilerlemesi ve kırılma tokluğu testlerini ve diğer tüm dinamik testlerini gerçekleştirebilir.

Kullanımdaki birçok dinamik sistemin bel kemiğini oluşturan 8800 dijital kontrolör, Console Yazılımı ve yorulma-sınıfı Dynacell™ yük hücresi ve WaveMatrix™ Dinamik Test Yazılımı gibi ileri özellikler bu sistemlerde de kullanılmaktadır. LCF3 Düşük Çevrim Yorulma gibi uygulamaya özel herhangi bir kırılma mekaniği yazılım paketleri ile standarda uygun testler yapılabilmektedir.



Şekil 2.11: Instron 8801 Statik ve Dinamik Deney Cihazı.

Mekanik özellik tespiti için yapılan deneyler, ASTM standartlarına göre 23 ± 1 °C oda sıcaklığında ve $\%50 \pm 10$ bağıl nem koşullarında yapılır. Şekil değiştirmeler, Şekil 2.12’de gösterildiği gibi çift yönlü video ekstansometre ile tespit edilir.



Şekil 2.12: Video ekstansometre ile deneyin yapılışı.

2.3.2 Ağırlık Düşürmeli Darbe Deney Cihazı

Şekil 2.13'te gösterilen Instron, Dynatup 9250 HV tip darbe deney cihazı ile yüksek hızlarda deney parçasının kırılmasında soğurulan (absorbe edilen) enerji miktarı ölçülür. Darbe deneyi süresince soğurulan enerji, malzemenin mukavemetinin ve tokluğunun bir ölçüsü olarak kullanılabilir. Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarındaki darbe test cihazı, yay destekli hızlandırıcısı sayesinde 20 m/s darbe hızına ve 1600 J darbe enerjisine ulaşabilmektedir.

Sistem Özellikleri:

- Maksimum serbest düşme hızı: 5,0 m/s
- Yay ile desteklenmiş durumda Maksimum Darbe Hızı: 20 m/s
- Enerji Aralığı (Düşük ağırlıklı kafa ile): 2,6 - 826 J
- Enerji Aralığı (Orta ağırlıklı kafa ile): 4,6 - 945 J
- Enerji Aralığı (Büyük Ağırlıklı kafa ile): 25 - 1603 J
- Maksimum fiziksel Düşme Yüksekliği: 1,25 m
- Maksimum simüle ettiği Düşme Yüksekliği: 20,4 m
- -51 °C ile +177 °C arasında çalışabilen çevresel kabine sahiptir.



Şekil 2.13: Instron-Dynatup 9250 HV darbe deneyi cihazı.

2.3.3 SEM İçyapı Görüntüleme

Mekanik deneyleri tamamlanan numunelere Pamukkale Üniversitesi İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (İLTAM) alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ile i yapı incelemesi gerçekleştirilmiştir. İLTAM hakkında ayrıntılı bilgiler EK A.1’de verilmiştir.

2.3.3.1 SEM ncesi Hazırlık-Au/Pd Kaplama

Taramalı elektron mikroskoplarında, görüntü elde edebilmek için numune yüzeyinin iletken yapıda olması gerekmektedir. İletkenliğin yeterince sağlanamadığı durumlarda ise, numune yüzeyinin yüksek iletkenliğe sahip altın veya altın/paladyum karışımı gibi metaller ile çok ince bir tabaka halinde kaplanması gerekmektedir. Kaplama cihazı, gerekli olan iletkenliği sağlamak için kullanılmaktadır (Şekil 2.14).

Cihazda %80 altın (Au) ve %20 paladyum (Pd) içeren plakalar bulunmaktadır. Kaplama işlemi, yüksek vakum altında sıçratma (sputter) tekniği kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Cihazın karbon (C) başlığı da bulunmaktadır.



Şekil 2.14: Numune kaplama cihazı.

Öncelikle numunelerin kırık yüzeyinden Quorum marka Q10R5 ES model SEM/TEM kaplama cihazında altın-paladyum kaplama işlemi yapılmıştır. Yüksek vakum altında sıçratma tekniği ile 360 saniye süresince %20 Paladyum, %80 Altın kaplama yapılmıştır. Görüntüyü netleştirmek için kaplama süresi yükseltilecek şekilde iletkenliğin artırılması amaçlanmıştır. Öncelikle vakum gerçekleştirilir. Hedef (target) malzemeden akım geçirilerek elektron sökülür, argon gazı yardımıyla Şekil 2.15a'daki gibi plazma (mor ışık) oluşturularak kaplama yapılır (Şekil 2.15b).



(a)

(b)

Şekil 2.15: Au/Pd a) Kaplama işlemi, b) Kaplanmış numuneler.

2.3.3.2 FE-SEM Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu

Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu, odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyinin taratılması sonucu görüntü elde edilmesine olanak sağlayan bir elektron mikroskop türüdür (Şekil 2.16).



Şekil 2.16: ZEISS-Supra 40VP alan emisyon taramalı elektron mikroskobu.

ZEISS marka Supra 40VP model FE-SEM ile iç yapı incelemesi gerçekleştirilmiştir. FESEM hakkında ayrıntılı bilgiler EK A.2'de verilmiştir. Her numuneden 100x, 500x ve 3000x büyütmelede, SE2 ve ASB detektörde 20 kV voltajda kullanılarak iç yapı görüntülemesi yapılmıştır. Tüm numunelerin enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analizleri gerçekleştirilmiş, ayrıca örnek numunelerin haritalama (mapping) işlemleri gerçekleştirilmiştir.

2.3.3.3 EDX/EDS (Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi)

Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi, bir elektron ışınının numuneye çarptığı, bir iç kabuktaki bir elektronu uyararak, onun fırlatılmasına ve elemanın elektronik yapısında bir elektron deliği oluşumuna neden olduğu bir yüzey analitik tekniğidir. Numunenin element analizi veya kimyasal karakterizasyonu için kullanılır. Birkaç mikrometreküp boyutunda çok küçük bir numunedeki element bileşimlerini tanımlamak ve ölçmek için kullanılan standart bir yöntemdir. Uygun elementler atanır, böylece numune yüzeyindeki atomların bileşimi elde edilir. Bu prosedür, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi, EDX veya EDS olarak adlandırılır ve bir numunenin yüzeyinin bileşimini analiz etmek için oldukça kullanışlıdır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve BULGULAR

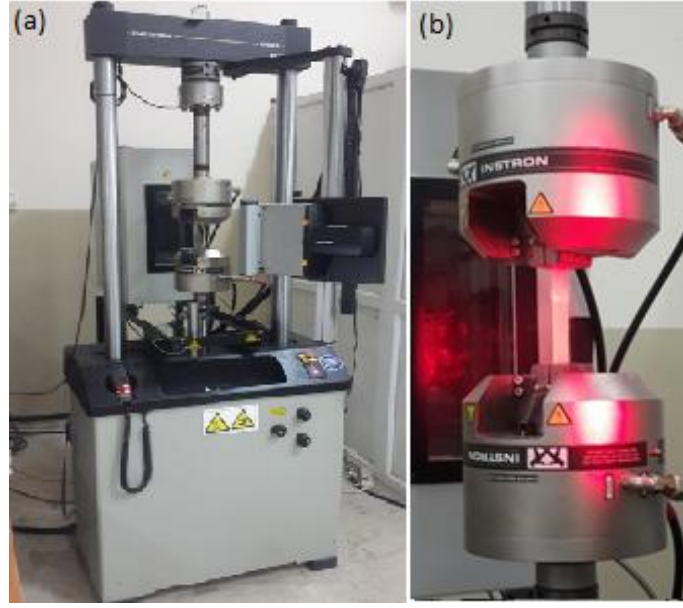
Üretilen deney numunelerine mekanik özelliklerin tespiti için Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarlarında Instron 8801 model test makinesi kullanılarak çekme, basma ve burkulma deneyleri uygulanmış, plakaların mukavemeti ve E-modülü elde edilerek katkı maddelerinin ve oranlarının kompozitlere etkisi karşılaştırılmıştır. Darbe deneyleri Instron DynaTup 9250 HV darbe test cihazında yapılmıştır. Deneyler her bir kompozit numune için en az üç özdeş örneğe uygulanarak ortalamaları alınmıştır. Deney sonuçlarının ortalamaları, en yüksek ve en düşük değerleri, standart sapma değerleri (SS), varyasyon katsayısı (CV), %95 güven aralığı (CI %95) ve %99 güven aralığı (CI %99) gibi istatistiksel analizlerle birlikte rapor edilmiş ve grafikleri hazırlanmıştır. Bütün testler standart koşullar altında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

3.1 Dokuma Takviyeli Kompozitlerin Deneysel Çalışmaları

Bu bölümde dokuma takviyeli kumaşlardan üretilen nanokompozitlerin mekanik, darbe ve iç yapı özelliklerinin tespiti hakkında detaylı bilgiler verilecektir. Deneyler Pamukkale Üniversitesi laboratuvarlarında standart koşullar altında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

3.1.1 Çekme Deneyleri

Çekme testleri Şekil 3.1a'da gösterildiği gibi Instron 8801 model bilgisayar kontrollü servo-hidrolik çekme test cihazı ile 2,0 mm/dk (0,034 mm/s) sabit hızda gerçekleştirilmiştir (ISO 527:5). Eksenel şekil değiştirmeler, deney cihazına monte edilen video ekstansometreyle ölçülmüştür. Şekil 3.1b'de örnek bir kompozit numunenin çekme deneyi gösterilmiştir.

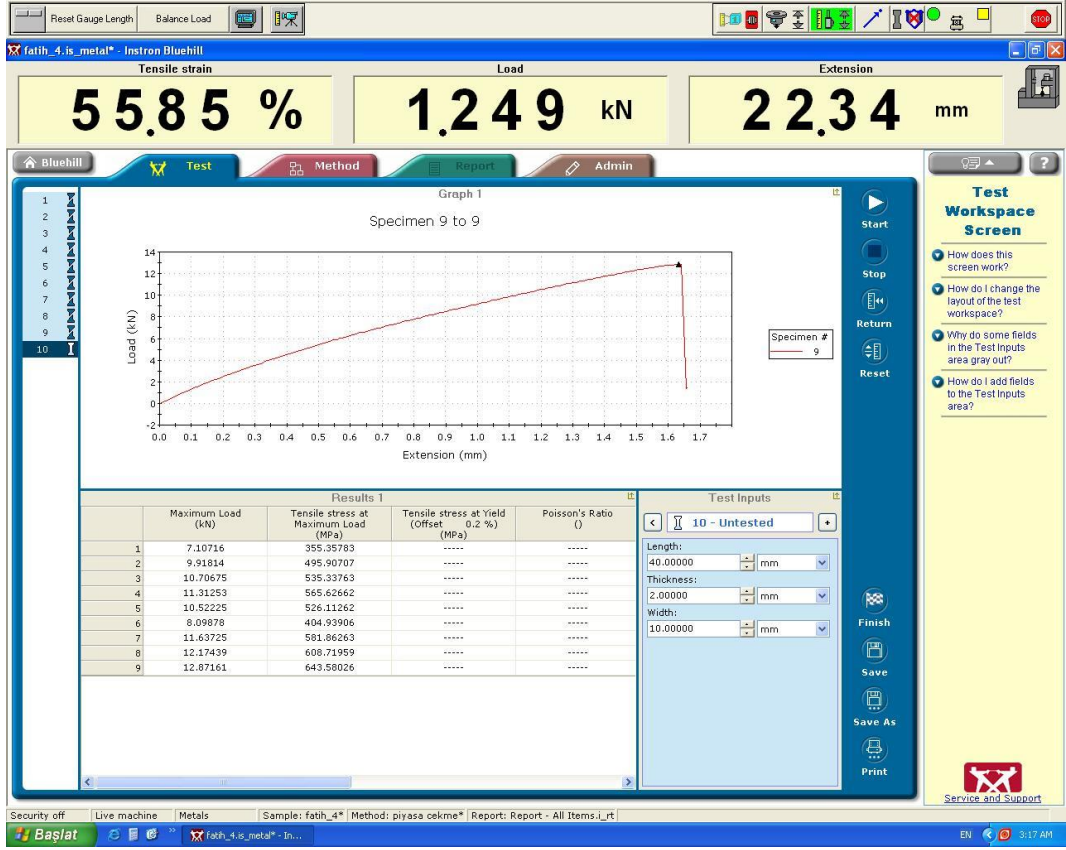


Şekil 3.1: Deney cihazı a) Instron 8801, b) Örnek mekanik deneyi.

Çekme deneylerinde her bir numune için ayrı ayrı maksimum kuvvet, maksimum kuvvetteki çekme gerilmesi (çekme dayanımı), maksimum kuvvetteki kopma uzaması ve elastisite modülü verileri elde edilerek bulunan ortalama değerler numuneler arasında karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen çekme deneylerine ait örnek numune Şekil 3.2’de ve cihazın ekran görüntüsü Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.2: Çekme deneyi yapılmış %2 nanokil katkılı numune örneği.



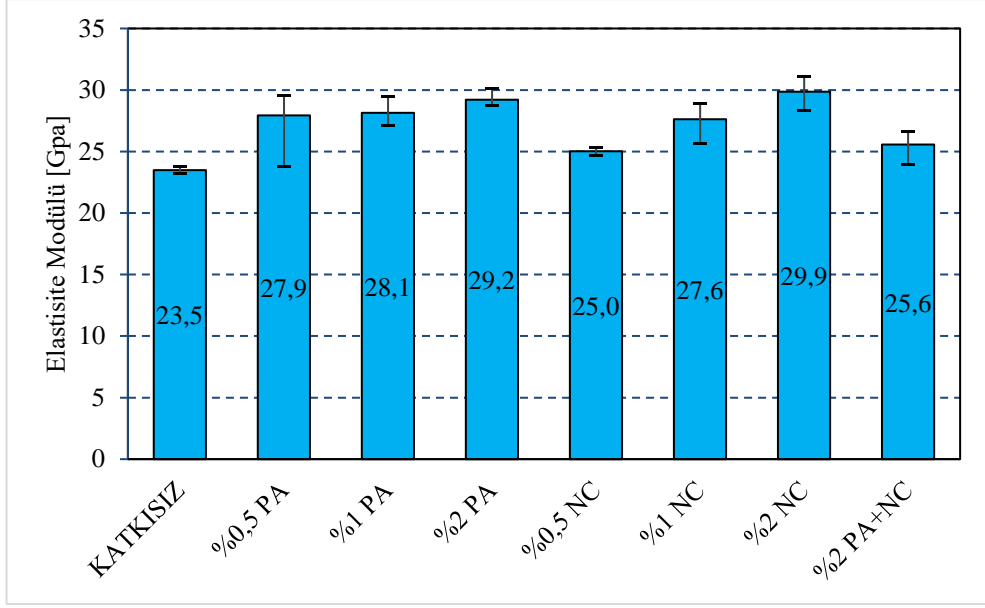
Şekil 3.3: Çekme cihazına ait örnek ekran görüntüsü.

Tablo 3.1’de çekme deneyi sonuçlarından maksimum kuvvet, çekme dayanımı, kopma uzaması ve elastisite modülünün ortalama değerleri verilmiştir. Çekme deneylerinden elde edilen ortalama, en yüksek ve en düşük değerler Şekil 3.4’te elastisite modülü, Şekil 3.5’te çekme dayanımı, Şekil 3.6’da kopma uzaması ve Şekil 3.7’de maksimum kuvvet grafiklerinde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Deney sonuçlarına ait standart sapma, varyasyon katsayısı, %95 güven aralığı ve %99 güven aralığı gibi çıkarımsal istatistik çözüm analizleri EK B bölümünde Tablo B.1, Tablo B.2, Tablo B.3 ve Tablo B.4’te verilmiştir.

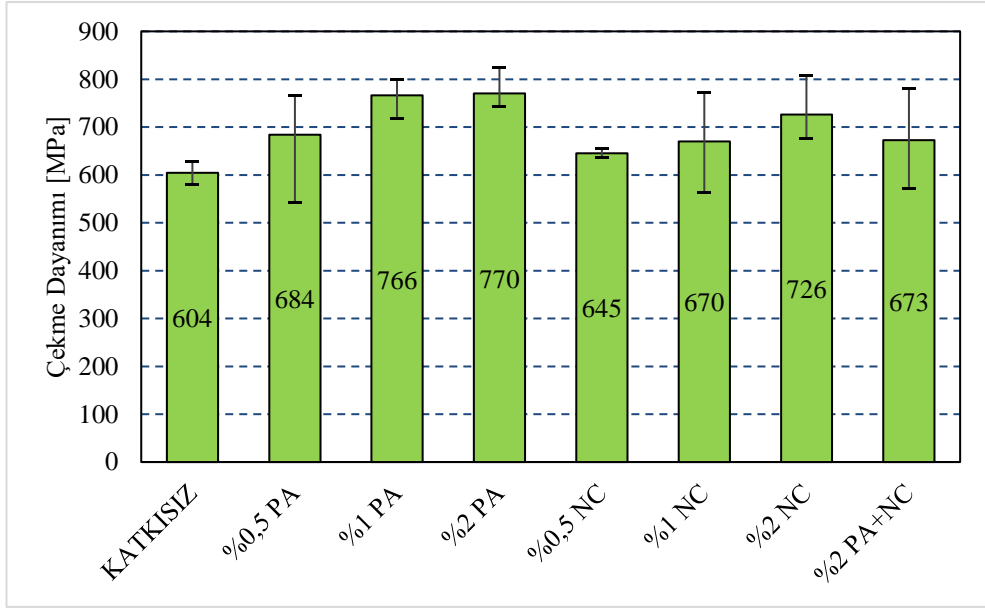
Tablo 3.1: Çekme deneyi sonuçları.

Numune	Maks. Kuvvet [kN]	Çekme Dayanımı X^T [MPa]	Kopma Uzaması [%]	Elastisite Modülü E^T [GPa]
Katkısız	12,09	604,35	3,75	23,49
%0,5 PA	13,69	684,31	3,52	27,93
%1 PA	15,32	766,13	3,83	28,15
%2 PA	15,41	770,28	3,70	29,22
%0,5 NC	12,91	645,39	3,83	25,04
%1 NC	13,41	670,30	3,44	27,63
%2 NC	14,52	726,08	3,59	29,87
%2 PA+NC	13,46	672,80	3,68	25,57

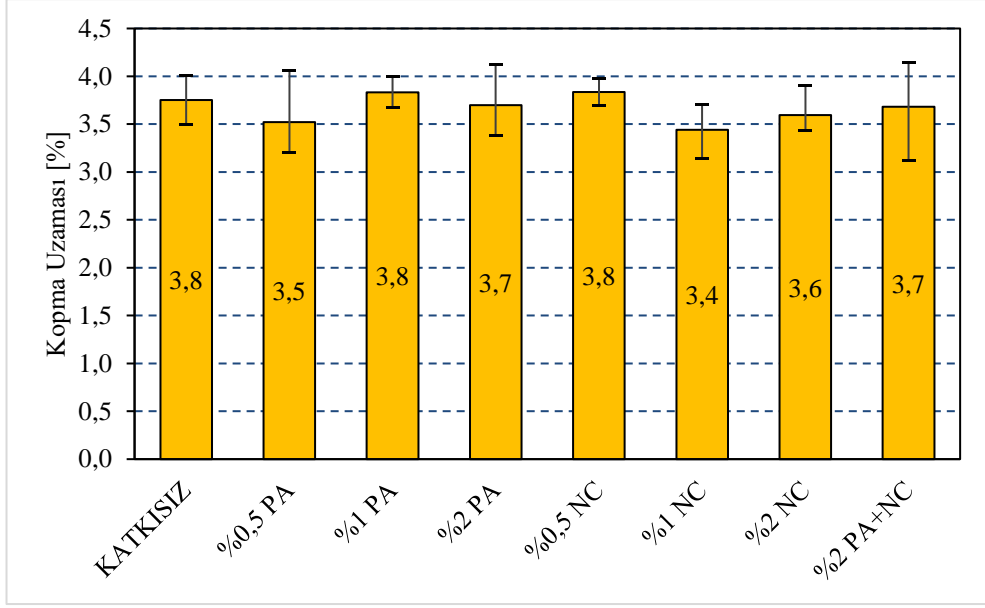
Kompozit numunelerin elastisite modülleri Şekil 3.4'te görüldüğü gibi 23,5 GPa'dan ağırlıkça %2 poliamid ilavesiyle 29,2 GPa'a, ağırlıkça %2 nanokil ilavesiyle benzer artışla 29,9 GPa'a yükselmektedir. Poliamid ve nanokil katkı maddelerinin eklenmesi kompozitlerin çekme mukavemetine de olumlu yönde etki etmiştir. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi kompozit numunelerin çekme mukavemeti 604 MPa'dan ağırlıkça %2 poliamid ilavesiyle 770 MPa'a yükselmiş ve ağırlıkça %2 nanokil ilavesiyle 726 MPa'a kadar artmıştır. Son olarak, eşit miktarda ağırlıkça %1 oranında poliamid ve ağırlıkça %1 oranında nanokil katkı maddelerinin birlikte ilavesiyle 673 MPa'a yükselmiştir.



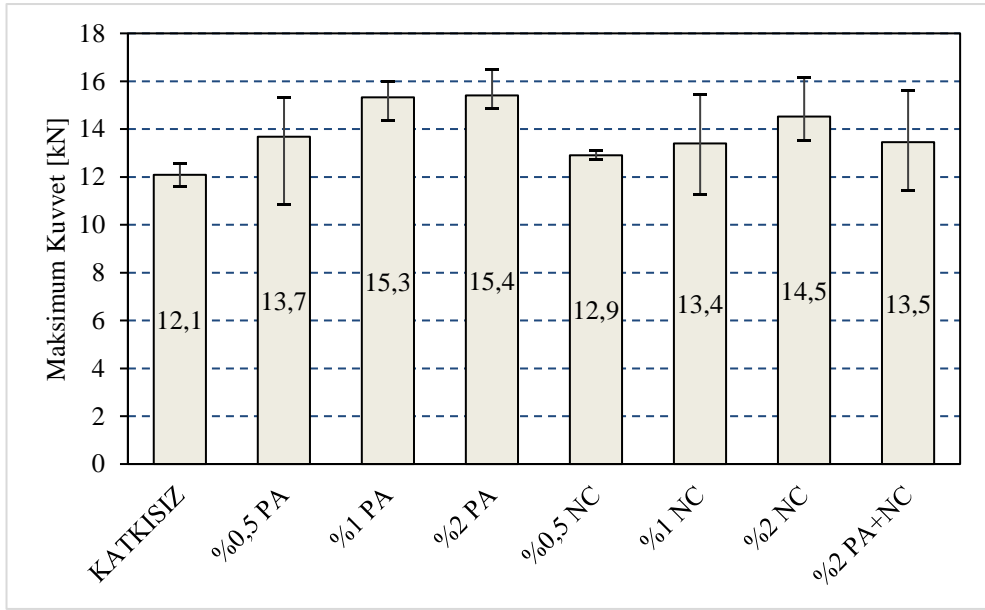
Şekil 3.4: Elastisite modülü grafiği.



Şekil 3.5: Çekme dayanımı grafiği.



Şekil 3.6: Kopma uzaması grafiği.



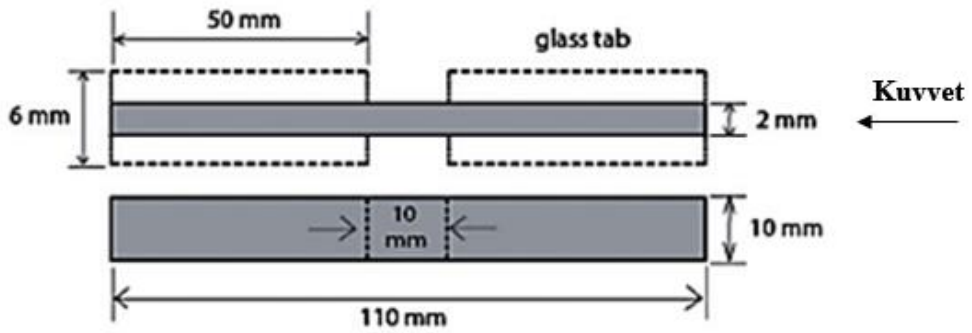
Şekil 3.7: Maksimum kuvvet grafiği.

Sonuç olarak epoksi matris içerisindeki katkı maddelerinin cam elyaf kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmış, çalışma neticesinde belirli oranlarda katkı maddesi ilavesiyle poliamid, nanokil ve poliamid/nanokil hibrit dolgulu GFRP kompozitlerin çekme mukavemeti deney sonuçlarına göre referans numunelere kıyasla sırasıyla yaklaşık %27, %20 ve %11 oranında artarken elastisite modülü sırasıyla yaklaşık %24, %27 ve %9 oranında

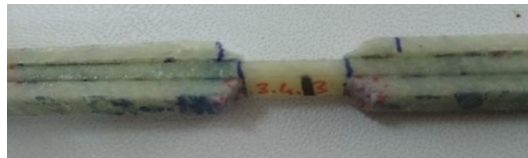
yükselmiştir. Aynı zamanda ağırlıkça %2 poliamid eklenerek üretilen kompozit malzemeler çekme mukavemetinde %27 ve çekme modülünde %24 iyileşme göstererek en iyi bulgular bu karışım oranında elde edilmiştir.

3.1.2 Basma Deneyleri

Basma deneyleri Şekil 3.8'de gösterildiği ölçülerde ISO 14126 standartına göre hazırlanmış numunelere Instron 8801 model bilgisayar kontrollü servo hidrolik basma test cihazı ile 1,0 mm/dk sabit hızda yapılmıştır (İkbal ve diğ. 2017).



(a)



(b)



(c)

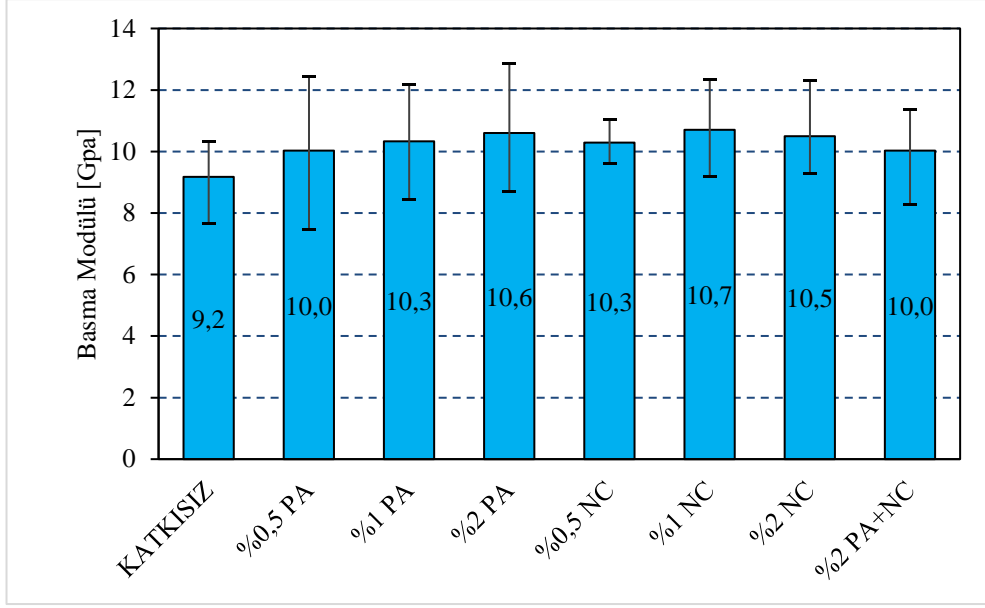
Şekil 3.8: Basma deneyi a) Numune boyutları, b) Numune örneği, c) Deney görseli.

Basma deneylerinde her bir numune için ayrı ayrı maksimum bası kuvveti, maksimum bası kuvvetindeki basma gerilmesi (basma dayanımı), basma uzaması ve basma modülü verileri elde edilerek hesaplanan ortalama, en düşük ve en yüksek değerler grafik halinde numuneler arasında karşılaştırılmıştır. Elde edilen basma deneyleri sonuçları Tablo 3.2’de verilmiştir. Deney sonuçlarına ait standart sapma, varyasyon katsayısı, %95 güven aralığı ve %99 güven aralığı gibi istatistiksel analizler EK B bölümünde Tablo B.5, Tablo B.6, Tablo B.7 ve Tablo B.8’de verilmiştir.

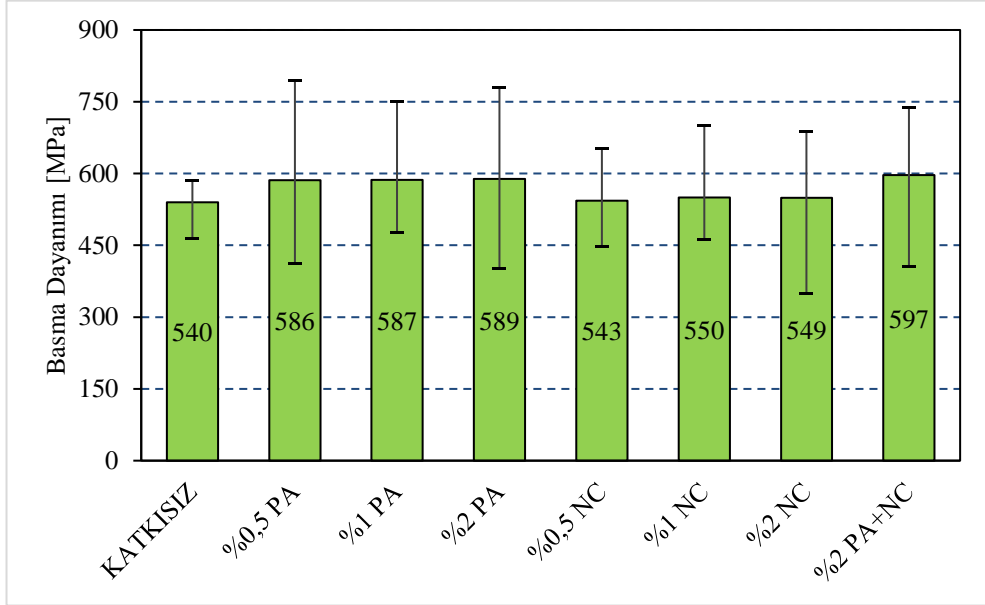
Tablo 3.2: Basma deneyi sonuçları.

Numune	Maks. Basma Kuvveti [kN]	Basma Dayanımı X^C [MPa]	Basma Uzaması [%]	Basma Modülü E^C [GPa]
Katkısız	10,80	540,06	-3,26	9,18
%0,5 PA	11,73	586,33	-3,25	10,03
%1 PA	11,74	586,78	-4,62	10,33
%2 PA	11,77	588,71	-4,22	10,60
%0,5 NC	10,87	543,45	-3,32	10,29
%1 NC	11,01	550,31	-2,34	10,70
%2 NC	10,98	549,21	-3,35	10,50
%2 PA+NC	11,93	596,71	-3,69	10,03

Uygulanan basma deneyleri sonucunda matrise eklenen bütün katkı maddeleri GFRP kompozitlerin basınç dayanımını artırmıştır. Elde edilen veriler grafikler halinde karşılaştırılmış, basma modülü karşılaştırma grafiği Şekil 3.9’da, basma dayanımı grafiği Şekil 3.10’da, basma uzaması grafiği Şekil 3.11’de ve maksimum basma kuvveti grafiği Şekil 3.12’de verilmiştir.

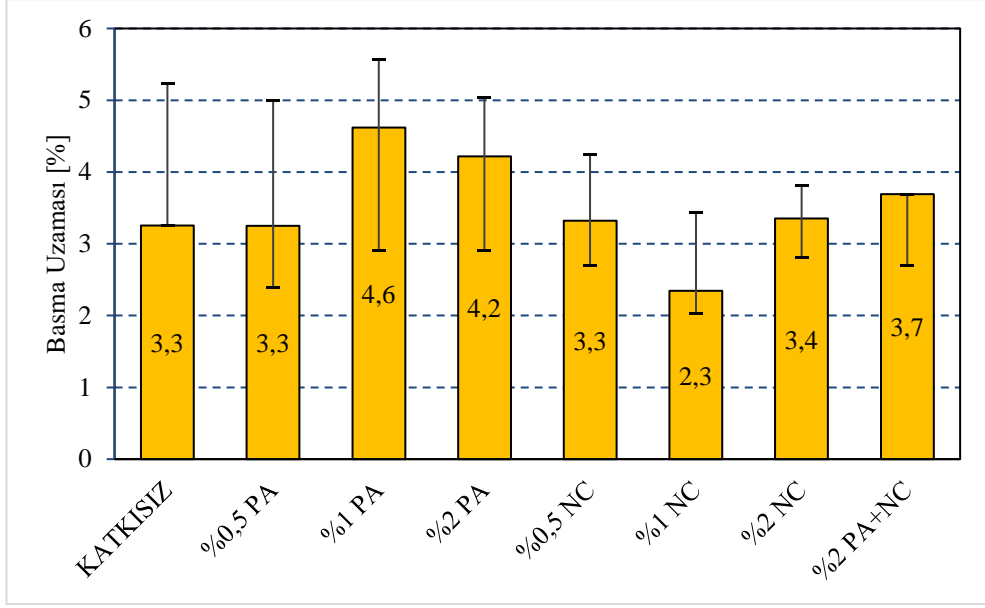


Şekil 3.9: Basma modülü grafiği.

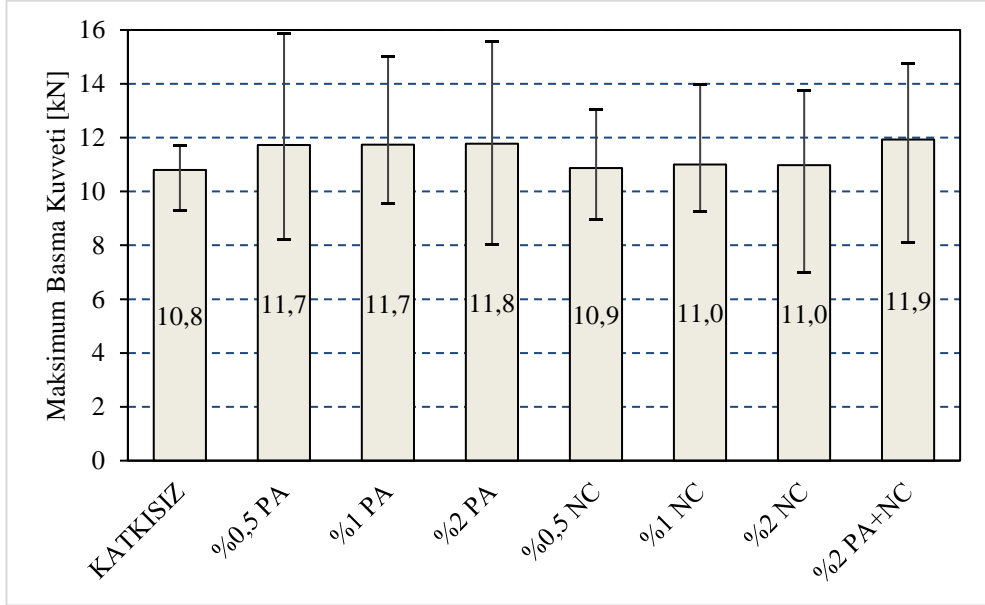


Şekil 3.10: Basma dayanımı grafiği.

Katkı maddelerinin varlığı, Şekil 3.9'da görüldüğü gibi kompozit numunelerin basma modülünü yaklaşık olarak 9 GPa'dan 10 GPa'a yükseltmiştir. Poliamid ve nanokil eklenmesi kompozitlerin basma dayanımına da olumlu yönde etki etmiştir. Şekil 3.10'dan kompozit örneklerin basma mukavemeti, ağ. %2 poliamid ilavesiyle 540 MPa'dan 589 MPa'a yükselmiş ve ayrıca ağırlıkça %2 nanokil ilavesiyle 549 MPa'a kadar artmıştır. Son olarak basma mukavemeti ağırlıkça %1 oranında aynı miktarda poliamid + nanokil katkı maddesi ilavesiyle 597 MPa'a yükselmiştir.



Şekil 3.11: Basma uzaması grafiği.



Şekil 3.12: Maksimum basma kuvveti grafiği.

Sonuç olarak katkı maddesi ilavesiyle poliamid, nanokil ve poliamid/nanokil hibrit dolgulu GFRP kompozitlerin basma dayanımı referans numunelere kıyasla sırasıyla yaklaşık %9, %2 ve %10 oranında artarken basma modülü sırasıyla yaklaşık %15, %16 ve %9 oranında yükselmiştir. Aynı zamanda ağırlıkça %1 poliamid/nanokil hibrit katkı maddesi ilavesiyle basma dayanımında %10 ve basma modülünde %9 iyileşme görülmüş, basma deneylerinde en iyi bulgular bu karışım oranında elde edilmiştir.

3.1.3 Burkulma Deneyleri

Katkısız ve katkılı E-cam/epoksi kompozitlerin kritik burkulma yükleri, Instron 8801 çeki-bası test cihazında ASTM D790 standartına göre 2 mm/dk hızda ankastre-ankastre sınır şartlarında altında bası yükleri uygulanarak deneysel olarak belirlenmiştir (Şekil 3.13).



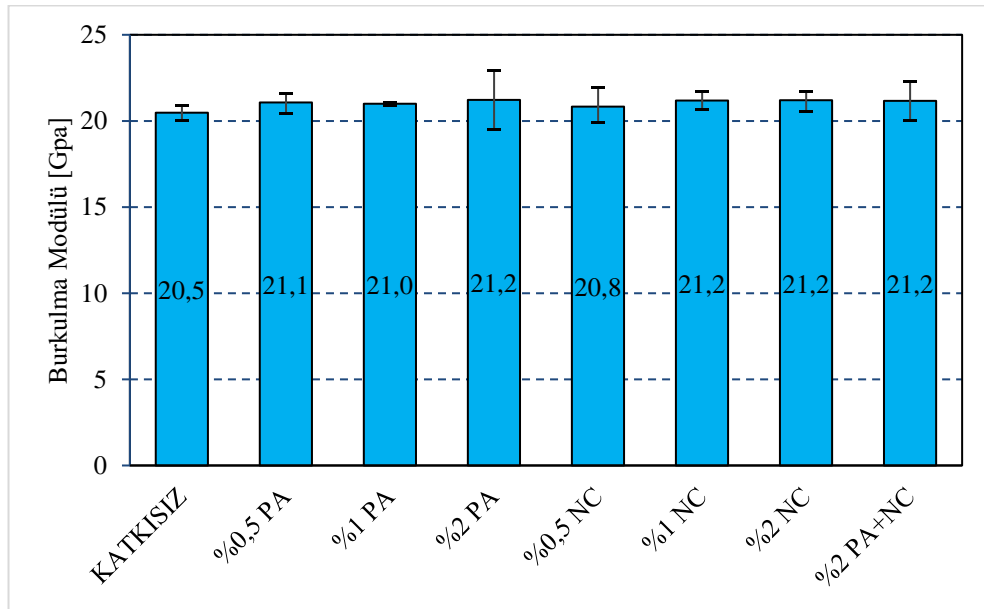
Şekil 3.13: Burkulma deneyi uygulanmış numune örneği.

Elde edilen burkulma testi sonuçları Tablo 3.3'te gösterilmektedir. Tüm katkı maddeleri ilavesi ile GFRP kompozitlerin burkulma mukavemetinin bir miktar arttığı görülmüştür. Deney sonuçlarının istatistiksel analizlerinden standart sapma, varyasyon katsayısı, %95 güven aralığı ve %99 güven aralığı verileri EK B bölümünde Tablo B.9 ve Tablo B.10'da verilmiştir.

Tablo 3.3: Burkulma deneyi sonuçları.

Numune	Kritik Burkulma Kuvveti P_k [N]	Burkulma Modülü [GPa]
Katkısız	3623,10	20,49
%0,5 PA	3624,42	21,08
%1 PA	3686,72	20,99
%2 PA	3804,52	21,22
%0,5 NC	3644,73	20,83
%1 NC	3679,72	21,18
%2 NC	3738,46	21,20
%2 PA+NC	3737,40	21,16

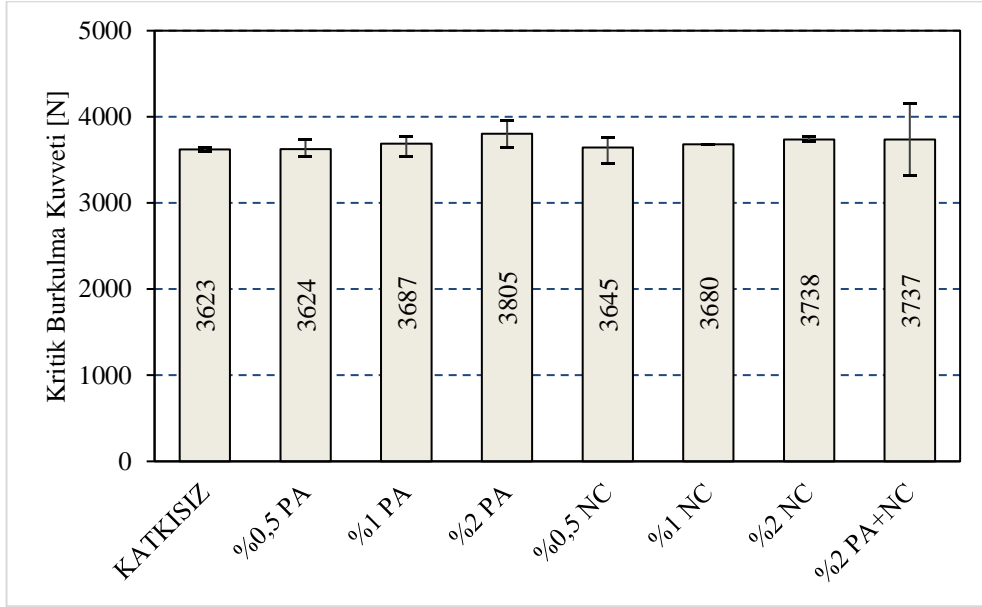
Farklı katkı türleri için deneysel burkulma verilerinden burkulma modülünün partikül ağırlık oranlarına göre ilişkisi Şekil 3.14'te, kritik burkulma yüklerinin partikül ağırlık oranlarına göre ilişkisi Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14: Burkulma modülü grafiği.

Katkı maddelerinin varlığı Şekil 3.14'te görüldüğü gibi kompozit numunelerin burkulma modülünü ortalama olarak 20 GPa'dan 21 GPa'ya yükseltmiştir. Şekil 3.15'ten, kompozit numunelerin kritik burkulma yükü ağırlıkça %2 poliamid ilavesiyle

3623 N'den 3805 N'ye yükselmiş ve ayrıca ağırlıkça %2 nanokil ilavesiyle 3738 N'a kadar artmıştır. Son olarak, ağırlıkça %1 oranında aynı miktarda poliamid+nanokil katkı maddesi ilavesiyle 3737 N'a yükselmiştir. Poliamid ve nanokil ilavesi kompozitlerin burkulma mukavemetini olumlu yönde etkilemiştir.



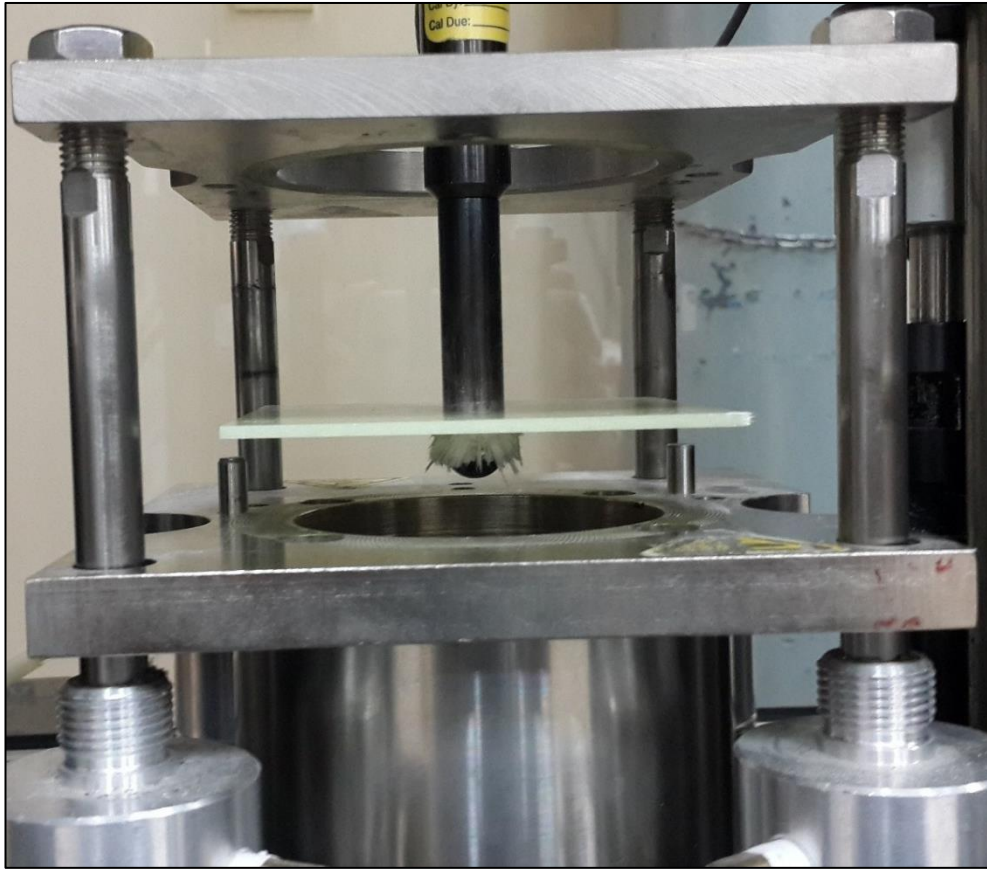
Şekil 3.15: Kritik burkulma kuvveti grafiği.

Sonuç olarak, katkı maddesi ilavesiyle poliamid, nanokil ve poliamid/nanokil hibrit dolgulu GFRP kompozitlerin kritik burkulma kuvveti referans numunelere kıyasla sırasıyla yaklaşık %5, %3 ve %3 oranında yükselirken burkulma modülü yaklaşık %3 oranında artmıştır. Aynı zamanda ağırlıkça %2 poliamid ilavesi ile burkulma mukavemetinde %5 ve burkulma modülünde %3 iyileşme görülmüş, burkulma deneylerinde en iyi bulgular bu karışım oranında elde edilmiştir.

3.1.4 Darbe Deneyleri

GFRE nanokompozitlerin üretiminde katkısız olarak adlandırılan saf epoksi, PA olarak adlandırılan ağırlıkça %2 poliamid tozu/epoksi, NC olarak adlandırılan (ağ. %2) nanokil/epoksi ve PA+NC olarak adlandırılan (ağ. %1+%1) poliamid tozu+nanokil/epoksi olmak üzere dört farklı matris bileşimi kullanılmıştır. Üretilen deney numunelerine Pamukkale Üniversitesi laboratuvarlarında düşük hız darbe deneyleri uygulanmış, plakaların enerji profil diyagramları çizilerek, katkı maddelerinin ve oranlarının kompozitlere etkisi deneysel olarak saptanmıştır.

Numunelerin darbe testi için Instron-Dynatup 9250 HV darbe test cihazı kullanılmıştır. Aksesuarları, pnömatik geri tepme frenleri, pnömatik kenetleme tertibatı ve Dynatup 930-I darbe veri toplama sistemi ile birlikte düşen bir çapraz kafadan oluşur. Ağırlık kaldırma ve tutma sistemi, ağırlık kutusunu, çapraz kafayı ve vurucu ucu istenilen yüksekliğe kaldırarak, gerekirse yay desteğini de alarak ağırlığın numuneye düşürülmesini sağlar. Böylece düşen ağırlığın yüksekliği ayarlanarak istenilen darbe enerjisi seviyesinde veya istenilen hızda numuneye darbe kuvveti uygulanır. Tüm darbe testleri sırasında, çapraz kafanın aksesuarlarıyla birlikte toplam ağırlığı 6,32 kg'dır ve vurucunun ucu 12,7 mm çapında yarım küre şeklindedir. Pnömatik geri tepme fren sistemi, etkinleştirilirse, numune üzerinde tekrarlanan darbeleri önler. Hız dedektörü darbe olayı meydana gelmeden hemen önce fotoelektrik diyot ve bayrak sistemi kullanarak darbe hızını ölçer ve sinyal koşullandırma ünitesi ile darbe hızının veri toplama kartına aktarılmasını sağlar. Darbe veri toplama sistemi, çarpma anındaki kuvvet-zaman verilerini ve anlık hızı kaydeder ve bunları vurucu ucun rijit olduğu varsayımıyla Newton'un ikinci yasasına ve kinematiğine dayalı bir kuvvet-çökme verisine dönüştürür.



Şekil 3.16: Darbe testi uygulanmış numune örneği.

Darbe testleri sırasında numuneler, 76 mm çapında dairesel bir açıklığa sahip elik plaka ile desteklenmiş ve pnömatik kenetleme aparatı kullanılarak dört köşesinde kauçuk kelepçelerle tutulmuştur. Hasar mekanizmalarını incelemek ve çeşitli darbe parametrelerini karşılaştırmak için, kompozit plakalar, numunelerin tam perforasyonuna (delinme) kadar 10 J ila 45 J arasında değişen darbe enerjileriyle merkezden darbe almıştır (şekil 3.16). Her bir darbe enerjisi seviyesinde, belirlenen herhangi bir kompozit malzeme sistemi için en az üç darbe testi gerçekleştirilmiştir. Serbest dūřen ağırlık testleri, ASTM D7136 standardına göre gerçekleştirilmiştir.

Darbe deneyleri 10 J, 20 J, 30 J, 35 J, 40 J ve 45 J darbe enerjisi seviyelerinde gerçekleştirilmiş ve katkısız ve nano katkılı kompozit numunelerin dūřük hız darbe davranışı kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman ve enerji-zaman diyagramları açısından incelenmiştir. 10 J, 20 J ve 30 J darbe enerjisi seviyelerinde vurucu uç numuneleri deforme ederek geri sekme gerçekleşir. Bu da çarpma enerjisinin tam nüfuziyet veya delinme oluşturacak kadar yüksek olmadığı anlamına gelir. Bu enerji seviyeleri için her malzeme konfigürasyonunda darbe, geri sekme ve absorbe edilen enerjiler kolaylıkla ayırt edilebilir. Kritik bir darbe enerjisi değerinden sonra kompozit plakaların delinmesi gerçekleşir. Atař ve Sayman (2008) tarafından belirtildiği gibi numunelerin delinmesine neden olan daha yüksek enerji seviyelerinde darbe oluşumundan kaynaklanan gerçek absorbe edilen enerji değerini belirlemek için vurucu uç ile numune arasındaki delinme sonrası sūrtünme etkilerinin diyagramlardan çıkarılması gerekir. Bu durum dikkate alınarak tam perforasyon (delinme) oluşana kadar 35 J, 40 J ve 45 J enerji seviyelerinde testler sūrdürölerek kontrol ve nano katkılı kompozit numunelerinin darbe hasar performansı ve direnci belirlenmiştir. Aşağıdaki bölümlerde tartışılacak ve analiz edilecek olan darbe deneyi sonuçlarının bir özeti Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4: Darbe deneyi sonuçları.

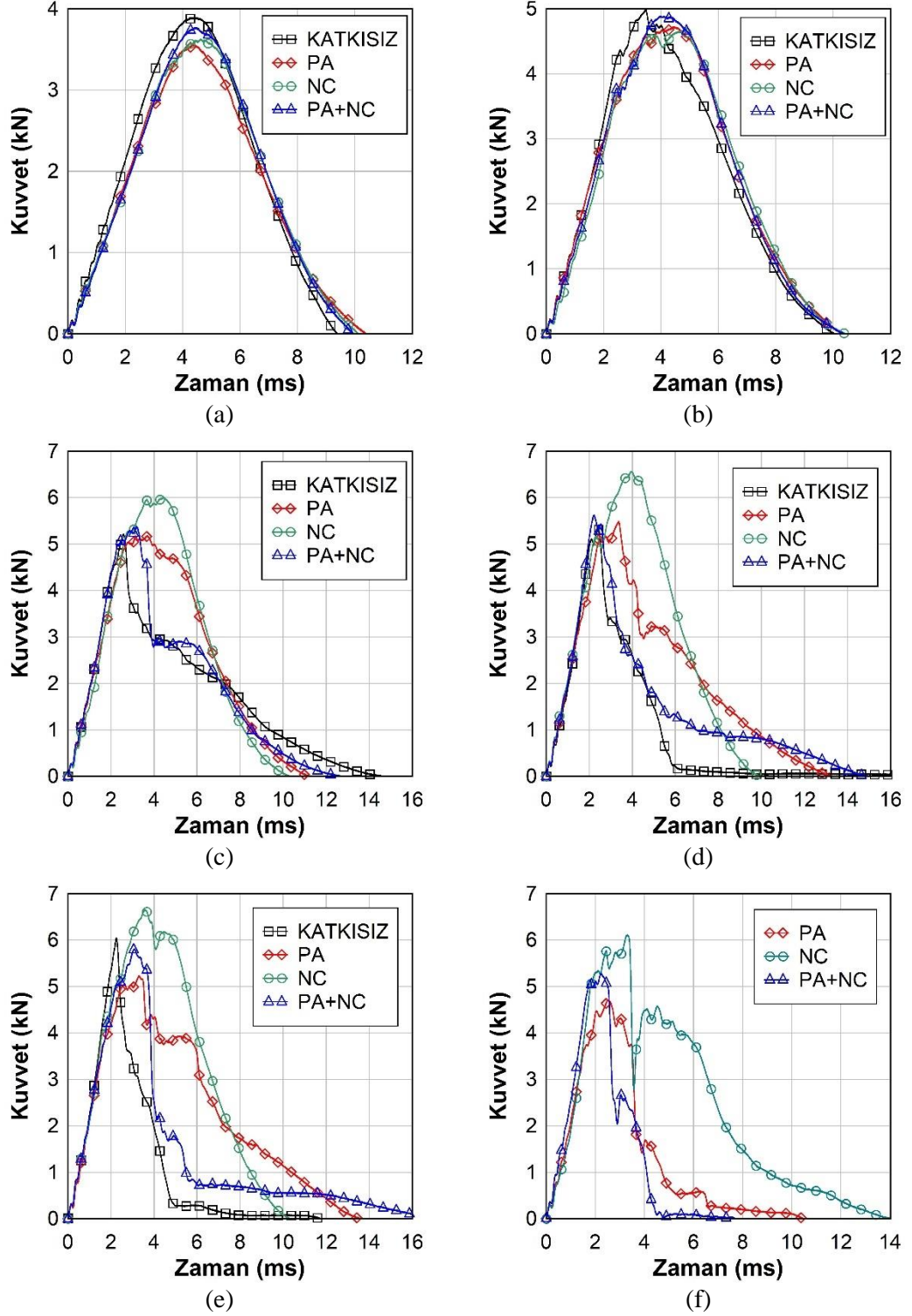
Numune	Darbe Enerjisi [J]	Maks. Kuvvet [kN]	Maks. Kuvvetteki Deplasman [mm]	Maks. Deplasman [mm]	Toplam Deplasman [mm]	Absorbe Edilen Enerji [J]
Katkısız	10	3,89	5,64	5,71	2,20	6,26
	20	4,98	6,94	7,75	3,60	15,67
	30	5,22	6,99	11,27	7,56	28,74
	35	5,36	7,13	12,99	12,99	31,58
	40	6,00	7,22	12,26	12,26	33,00
PA	10	3,56	5,88	6,14	2,74	7,57
	20	4,72	7,95	8,12	3,42	15,06
	30	5,18	8,82	9,91	4,34	24,27
	35	5,49	9,05	11,36	6,77	32,03
	40	5,24	9,70	12,56	7,21	36,20
	45	4,71	8,42	13,50	13,50	35,50
NC	10	3,63	6,02	6,14	2,57	6,98
	20	4,67	8,28	8,38	3,72	15,08
	30	6,01	9,65	9,82	4,07	22,86
	35	6,57	9,64	10,08	4,64	27,48
	40	6,65	9,93	11,04	4,97	31,44
	45	6,11	10,15	12,95	7,00	41,20
PA+NC	10	3,77	5,95	6,11	2,55	6,76
	20	4,89	7,72	8,24	3,47	15,32
	30	5,37	8,00	10,17	6,54	28,10
	35	5,62	6,67	13,40	13,40	35,00
	40	5,81	9,11	12,24	12,24	37,00
	45	5,28	7,46	13,02	13,02	33,35

3.1.4.1 Kuvvet-Zaman Eğrileri

Darbe kuvveti-zaman eğrisi, numunelerin nasıl tepki verdiği ve belirli bir darbe enerjisi seviyesi altında herhangi bir önemli hasar olup olmadığına dair niteliksel göstergeler verir ve farklı numune çeşitlerinin darbe davranışını değerlendirmek ve karşılaştırmak için iyi bir göstergedir (Mahdi ve diğ. 2017). Şekil 3.17'de farklı enerji seviyelerinde darbeye maruz kalmış katkısız, poliamid, nanokil ve poliamid+nanokil katkılı GFRE kompozit plakalara uygulanan darbe kuvvetine karşı zaman eğrileri verilmiştir. Bu eğriler, kritik bir değer olan P_{maks} 'a kadar uygulanan kuvvette düzenli bir artış ve ardından geniş matris çatlama, fiber kırılması, delaminasyon ve büyük hasar alanı ile bağlantılı olarak rijitlikteki değişikliği gösteren ani bir düşüş sergileyerek kompozit plakalar için tipik bir davranış gösterir. Bu eğriler, darbe anında numunelerde oluşan titreşimlerden kaynaklanan elastik dalgalar nedeniyle başlangıçta bazı salınımlar da içerir. Bu titreşimler, numunelerin rijitliği ve vurucu ucun kütlesi gibi çeşitli faktörlere bağlıdır.

Yüklemeden önce ve sonra darbe kuvveti simetrik olduğundan, 10 J darbe enerjisi altında tüm kompozit plakalar neredeyse elastik davranış gösterir. Darbe kuvvetinde ciddi bir düşüş gözlenmemesi numunelerde oluşan hasarların plakaların rijitliğini azaltacak kadar şiddetli olmadığını gösteriyor. 20 J ve daha yüksek darbe enerjisi seviyelerinde, kompozit plakalarda önemli bir hasarı işaret eden darbe kuvvetlerinde ani düşüşler vardır. Genel olarak, maksimum darbe kuvveti, darbe enerjisi seviyesi arttıkça artar.

Şekil 3.17'den görülebileceği gibi, 10 J ve 20 J darbe enerjisi seviyelerinde katkısız kompozitler, nanopartikül katkılı kompozitlerden daha yüksek maksimum reaksiyon kuvveti göstermiştir. Ancak darbe enerjisi seviyesi arttıkça nano-katkılı kompozitlerin maksimum reaksiyon kuvveti, katkısız kompozitinkini aşmaktadır. Ayrıntılı olarak, 10 J'luk darbe enerjisi seviyesinde, katkısız kompozitin sergilediği maksimum reaksiyon kuvveti PA, NC ve PA+NC kompozitlerinden sırasıyla %9,3, %7,2 ve %3,2 daha yüksektir. 20 J darbe enerjisi seviyesinde, maksimum reaksiyon kuvvetlerindeki yüzde farklar, katkısız kompozit lehine sırasıyla %5,5, %6,6 ve %1,8'dir.



Şekil 3.17: Kuvvet – zaman eğrileri a) 10 J, b) 20 J, c) 30 J, d) 35 J, e) 40 J, f) 45 J darbe enerjisinde.

Öte yandan, 30 J ve 35 J darbe enerjisi seviyelerinde maksimum kuvvet bulgusu NC, PA+NC, PA ve katkısız plakalar şeklinde sıralanmıştır. 30 J darbe enerjisi seviyesi için, NC numunesinin sergilediği maksimum kuvvet, PA+NC, PA ve katkısız numunesinden sırasıyla %11,9, %16,0 ve %15,1 daha fazladır ve 35 J darbe enerjisi

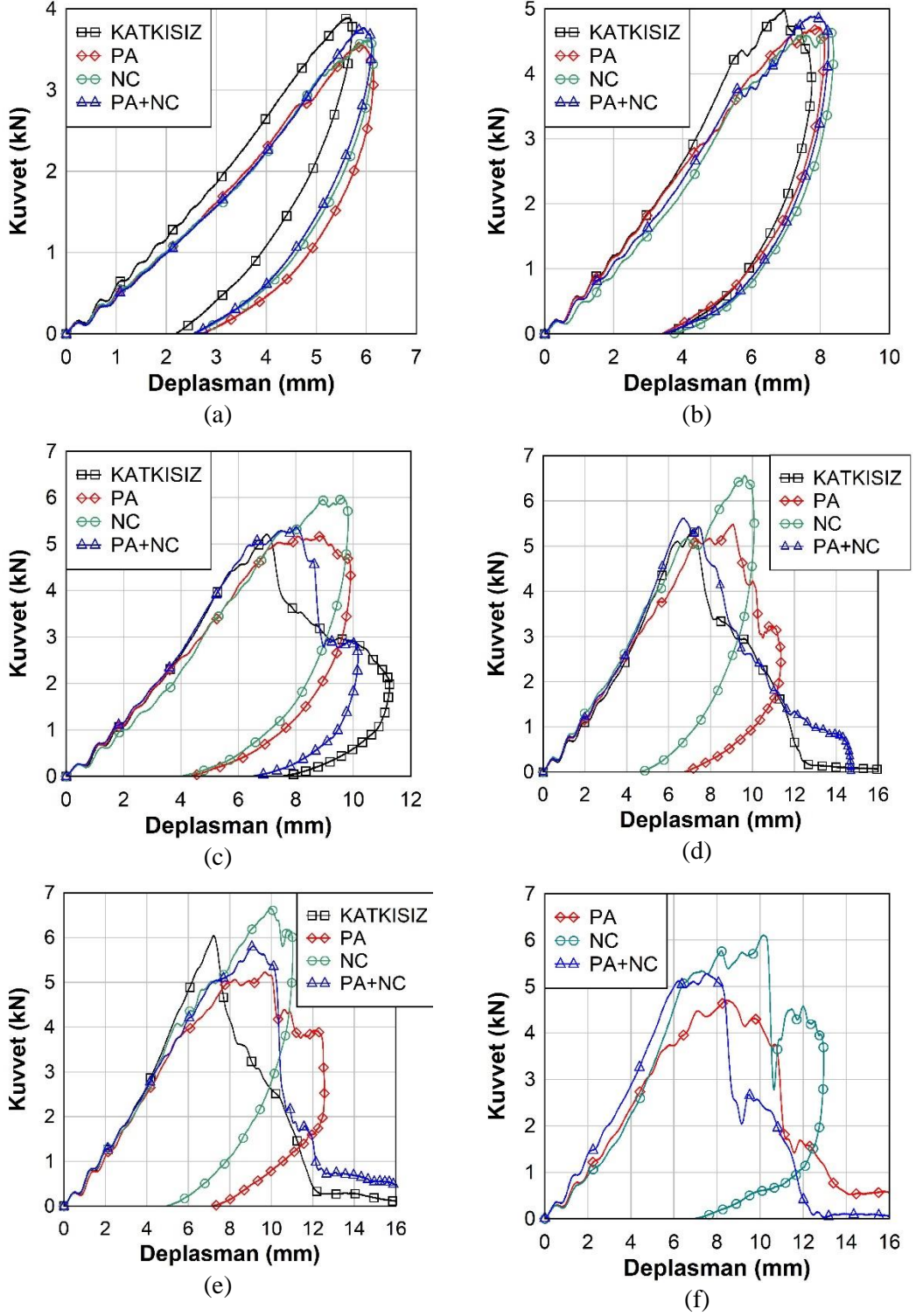
seviyesinde PA+NC, PA ve katkısız numunesinden sırasıyla %16,9, %19,6 ve %22,6 daha yüksektir. Maksimum kuvvet, büyük bir hasar oluşmadan önce belirli bir darbe enerjisi seviyesi altında bir kompozit plakanın tolere edebileceği azami yük değerini temsil eder (Iqbal ve diğ 2009). Sonuç olarak katkı maddelerinin, özellikle nanokillerin ilave edilmesi yüksek darbe enerjisi seviyelerinde GFRE kompozitlerin hasar direncini arttırdığı, yani nanopartikül katkılı plakaların hasara uğramadan hemen önce daha yüksek darbe enerjisi seviyelerini tolere edebildiği sonucuna varılabilir. Hibrit katkılı (PA+NC) kompozitler, maksimum darbe kuvveti açısından NC ve PA kompozitler arasında ara değerlerde yer edinmişlerdir. Rafiq ve diğ. (2017) ve Mahdi ve diğ. (2017)'ne göre darbe direncindeki iyileşme, esas olarak nanoparçacıkların eklenmesiyle oluşturulan fiber ve matris arasındaki etkili bir yük transfer mekanizmasından ve kıvrımlı bir kırılma yörüngesinden kaynaklanmaktadır.

Yine Şekil 3.17'den, katkısız kompozit numunesi için maksimum reaksiyon kuvvetine ulaşma süresinin genellikle diğer malzeme konfigürasyonlarından daha kısa olduğu görülmektedir. Darbe yükü maksimum değere ulaştıktan sonra, 30J, 35J ve 40J darbe enerjisi seviyelerinde nanokil ve poliamid katkılı plakalarda kademeli olarak azami kuvvette iyileşme gerçekleşir. Bu kuvvet, kısmen hasar görmüş ve hasara uğramadan kalan tabakalar tarafından taşınır. Bununla birlikte, katkısız saf kompozit numune için, plakanın tamamen delindiğini gösteren 30 J'den daha yüksek enerji seviyelerinde keskin düşüşten sonra maksimum kuvvette geri kazanım görülmemektedir. Nanoparçacık katkılı GFRE kompozitlerin perforasyon (delinme) eşikleri, aşağıdaki bölümlerde tartışılacak olan katkısız saf epoksi kompozit plakalara kıyasla daha yüksektir. 20 J'den daha yüksek darbe enerjisi seviyelerinde, nano katkılı kompozitler, vurucu uç ile numune arasında pik yükte katkısız kompozitlere kıyasla daha uzun temas süreleri göstermiş, yani daha uzun süre sürdürülen azami reaksiyon kuvvetlerine maruz kalmışlardır. Bu da plaka kalınlığı boyunca daha fazla hasar direnci ve tabakaiçi arayüz boyunca daha fazla hasar yayılımı anlamına gelmektedir. Delinme gerçekleşmeyen numunelerde, katkısız numunenin ortalama darbe süresi, 10 J ve 20 J darbe enerjisi seviyelerinde nano katkılı numunelerden biraz daha düşüktür. Ancak darbe enerjisi seviyesi 30 J'a ulaştığında, katkısız numuneler için ortalama darbe süresi 14,56 ms'ye ulaşmış ve nanopartikül katkılı kompozitlere kıyasla en yüksek değere sahiptir. Bu enerji seviyesi için ortalama darbe süresi NC plakalar için 10,25 ms, PA plakalar için 11,15 ms ve PA+NC plakalar için 12,6 ms'dir. Yüksek

darbe enerjilerinde önemli ölçüde büyük lokal hasarlar nedeniyle ve yüksek darbe enerjisi ile üretilen yüksek impuls kuvveti yüzünden gerçekleşen tam perforasyon (delinme) nedeniyle katkısız numunelerde 30 J'lik enerji seviyesinden sonra darbe süresi aniden düşer. Ayrıca, Şekil 3.17d ve Şekil 3.17e'de görülebileceği gibi, perforasyondan (delinme) sonra vurucu uç ve numune arasında oluşan sürtünme kuvvetinin, nanokatlı kompozitlerde katkısız kompozitlere kıyasla daha yüksek olduğunu belirtmekte fayda vardır.

3.1.4.2 Kuvvet-Deplasman Eğrileri

Şekil 3.18, farklı enerji seviyelerinde darbeye maruz kalan katkısız, poliamid, nanokil ve poliamid+nanokil katlı GFRE kompozit plakalar için darbe kuvvetine karşı deplasman eğrilerini göstermektedir. Şekil 3.18a-c'den de görülebileceği gibi, 10 J, 20 J ve 30 J darbe enerjisi seviyelerinde incelenen numunelerin hiçbirinde delinme meydana gelmemiştir. Kontrol numunesinin maksimum yer değiştirmesi, 10 J ve 20 J darbe enerjisi seviyelerinde nano katlı numunelerden daha düşüktür, ancak darbe enerjisi seviyesi 30 J'ye ulaştığında maksimum deplasmanın daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Darbe enerjisi seviyesi arttıkça kompozit plakaların maksimum deplasmanı artmaktadır. Ayrıntılı olarak, katkısız plakanın maksimum deplasmanı 10 J ve 20 J darbe enerjilerinde sırasıyla 5,71 mm ve 7,75 mm iken, poliamid, nanokil ve poliamid+nanokil katlı plakaların maksimum deplasmanları 10 J darbe enerjisi için sırasıyla 6,14 mm, 6,14 mm ve 6,11 mm ve 20 J darbe enerjisi için sırasıyla 8,12 mm, 8,38 mm ve 8,24 mm'dir. 30 J darbe enerjisi seviyesinde, kontrol numunesinin maksimum deplasmanı 11,27 mm'dir ve poliamid, nanokil ve poliamid+nanokil katlı numunelerden sırasıyla %13,7, %14,8 ve %10,8 daha yüksektir. Plakaların toplam (kalıcı) yer değiştirmesi için benzer gözlemler yapılabilir. Düşük maksimum ve toplam deplasman, kompozitin delinmeye karşı direnme kabiliyetini gösterdiğinden, nanokil katlı kompozitler, yüksek darbe enerjisi seviyelerinde bu konuda en iyi performansı gösterir. Bu çıkarım, Şekil 3.18d, 3.18e ve 3.18f'ye bakarak doğrulanabilir. Katkısız kompozit numunesinin, poliamid+nanokil katlı kompozitin ve poliamid katlı kompozitin delinmesi sırasıyla 35 J, 40 J ve 45 J darbe enerjisi seviyelerinde gerçekleşirken, nanokil katlı kompozit 45 J'de tam delinme sınırına yakındır ancak henüz perfore olmamıştır.



Şekil 3.18: Kuvvet – deplasman eğrileri a) 10 J, b) 20 J, c) 30 J, d) 35 J, e) 40 J, f) 45 J darbe enerjisinde.

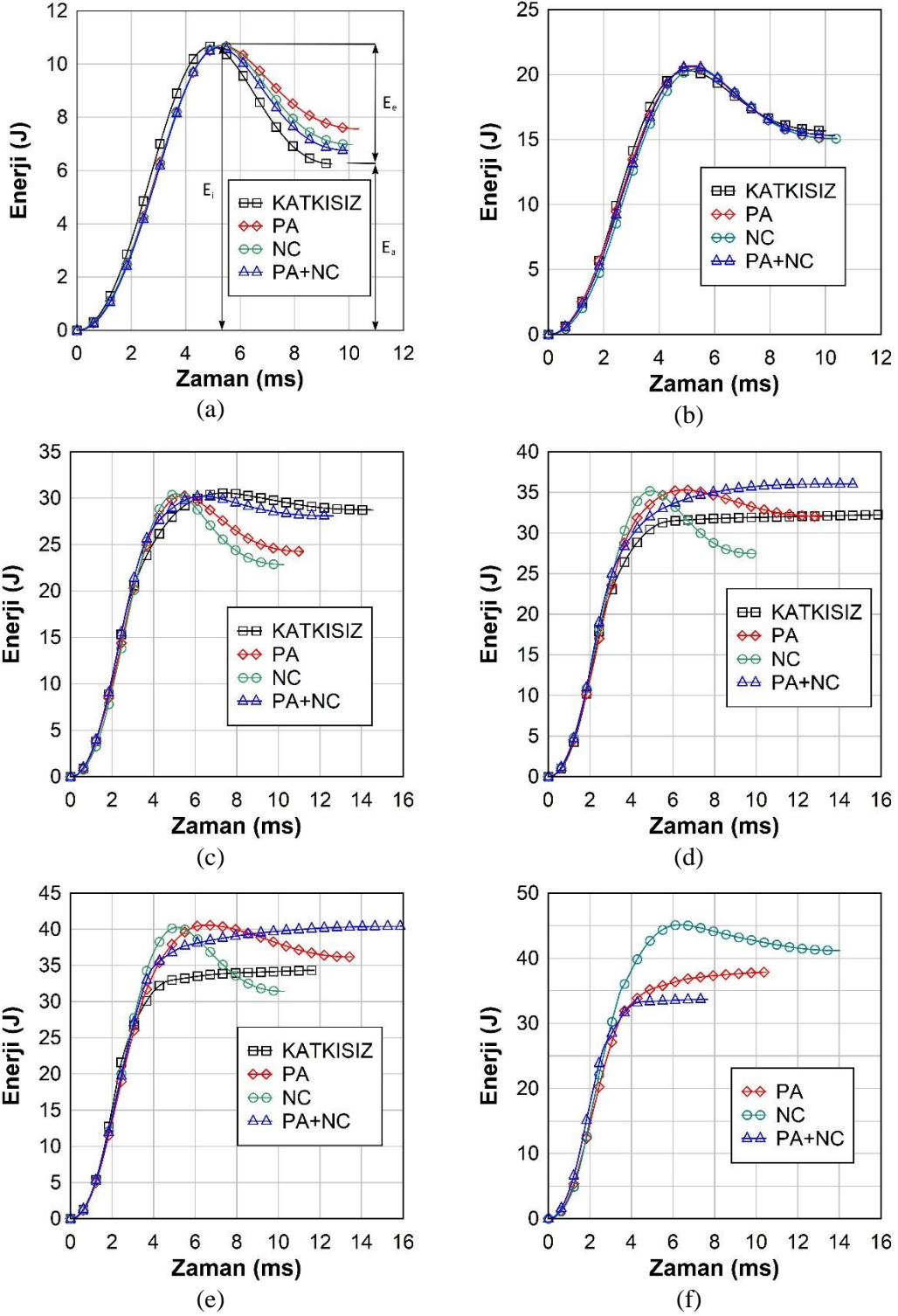
Sonuç olarak, GFRE kompozitlere nanopartikül ilavesinin numunelerin darbe dayanımını arttırdığı söylenebilir. Rafiq ve diğ. (2017)'ne göre, darbe dayanımındaki bu iyileşme, hasar modunu interlaminardan (tabaka içi) intralaminara (tabakalar arası) değiştirebilen nanopartiküllerin ilave edilmesiyle gelişmiş arayüzey yapışmasına ve

iyileştirilmiş tabakalar arası kayma mukavemetine bağlanabilir. Plakaların hasar modları, “fiziksel hasarın karakterize edilmesi” alt bölümünde ayrıca tartışılacaktır.

3.1.4.3 Enerji-Zaman Eğrileri ve Perforasyon Eşikleri

Şekil 3.19, farklı enerji seviyelerinde darbeye maruz kalan katkısız, poliamid, nanokil ve poliamid+nanokil katkılı GFRE kompozit plakalar için zamana karşı enerji eğrilerini göstermektedir. Genel olarak, vurucu ucun numuneden ilk kez geri sekmediği darbe enerjisi, nüfuz etme (penetrasyon) eşiği olarak bilinirken, vurucu ucun burnunun numunenin arka yüzünden ilk kez geçtiği soğurulan (absorbe edilen) enerji, delinme (perforasyon) eşiği olarak tanımlanır. Böylece, saplanma (penetrasyon) eşiğinde vurucunun hızı sıfıra ulaşır, ancak delinme (perforasyon) eşiği için vurucunun hızı, yalnızca vurucu uç ile numune arasındaki sürtünme kuvvetlerinin etkisi ile sıfır olabilir. Bu çalışmada, numune kalınlığı vurucu ucun yarıçapından çok daha küçük olduğu için, vurucu ucun her zaman düşük darbe enerjisi seviyeleri için geri sekmesi veya spesifik bir enerji seviyesinde numuneyi delmesi nedeniyle kesin bir penetrasyon (nüfuz etme) eşiği gözlenmemiştir. Vurucunun numuneden yüksekliği ile belirlenen toplam darbe enerjisi, elastik enerji ve absorbe edilen enerjiye bölünür. Elastik enerji numunede depolanır ve vurucu ucun geri sekmesi için kullanılır. Enerji-zaman eğrisinin düzleşme başlangıcı, vurucu ve numune arasındaki temasın ayrılması ile çakışmaktadır, dolayısıyla bu özgül enerji, hasar oluşumu olarak numune tarafından soğurulan enerjiyi gösterir (Rafiq ve diğ. 2017, Reis ve diğ. 2012). Şekil 3.19a-c'den görüleceği üzere, 10 J, 20 J ve 30 J darbe enerjisi seviyelerinde test edilen numunelerin hiçbirinde perforasyon (delinme) görülmemekte ancak darbe enerjisi seviyesi arttıkça elastik enerji azalmakta ve bu da daha yüksek hasar oluşumunu göstermektedir. Katkısız numune, 30 J darbe enerjisi seviyesinde delinme eşiğine yakındır. Ayrıca, 10 J darbe enerjisi seviyesinde nano katkılı plakalar için absorbe edilen enerjinin katkısız plakalara göre daha yüksek olduğu, buna karşın 20 J ve 30 J darbe enerjisi seviyelerinde katkısız plakalarda absorbe edilen enerjinin nano katkılı plakalara göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Darbe enerjisi seviyesi 35 J'ye ulaştığında, katkısız numunede delinme meydana gelmiş ve saf epoksi (katkısız) plakanın perforasyon (delinme) eşiğinin 32 J civarında olduğu tespit edilmiştir. Bu enerji seviyesi için enerji eğrisi maksimum bir değer göstermez, ancak sonrasında belirli bir

enerji düzeyine (delinme eşiği) ulaşıldığında, delinme işleminden sonra vurucu uç ile numune arasında oluşan sürtünme kuvvetleri yoluyla enerjinin dağılması nedeniyle eğrinin sonuna kadar istikrarlı bir şekilde artar.

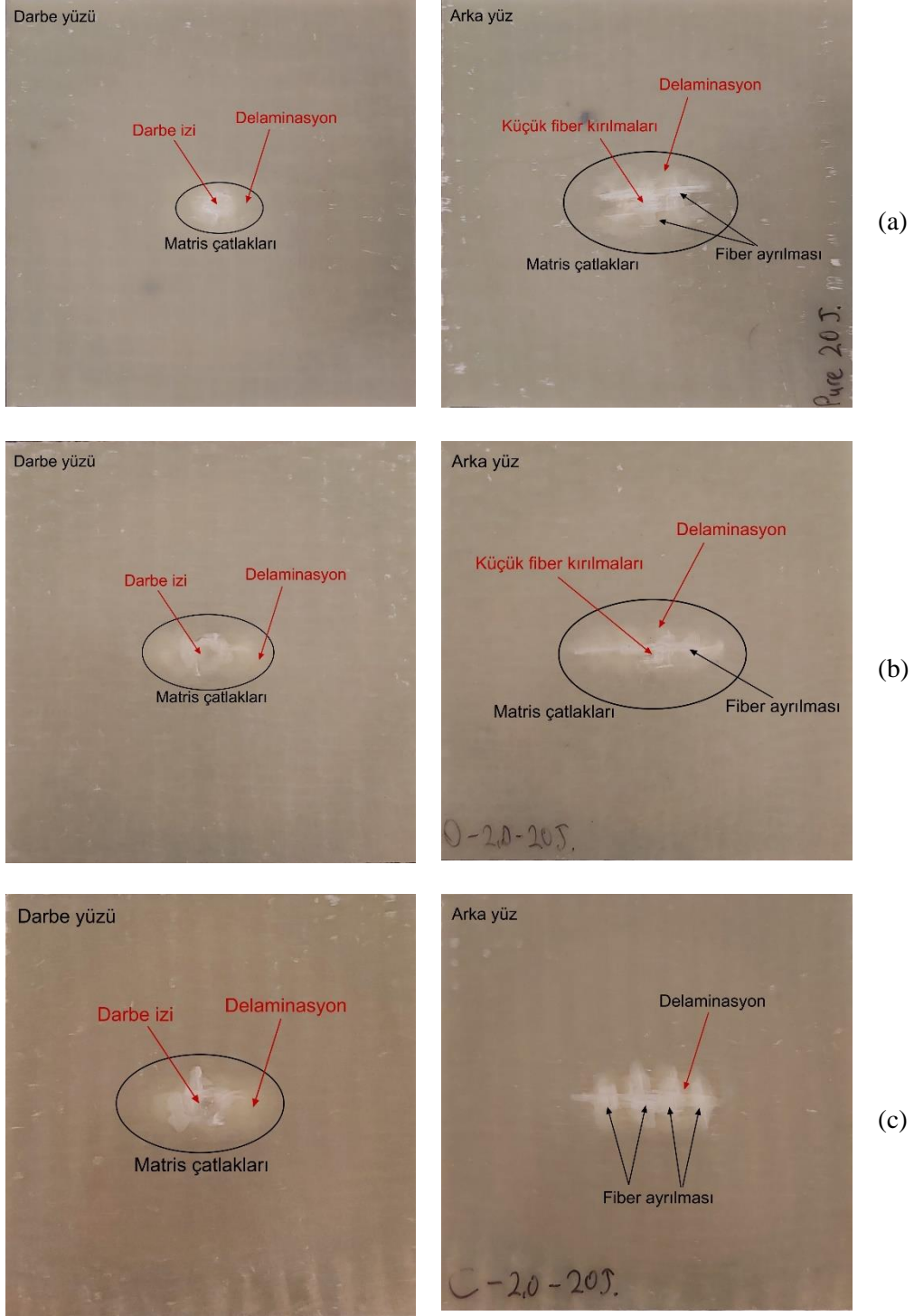


Şekil 3.19: Enerji – zaman eğrileri a) 10 J, b) 20 J, c) 30 J, d) 35 J, e) 40 J, 45 J darbe enerjisinde.

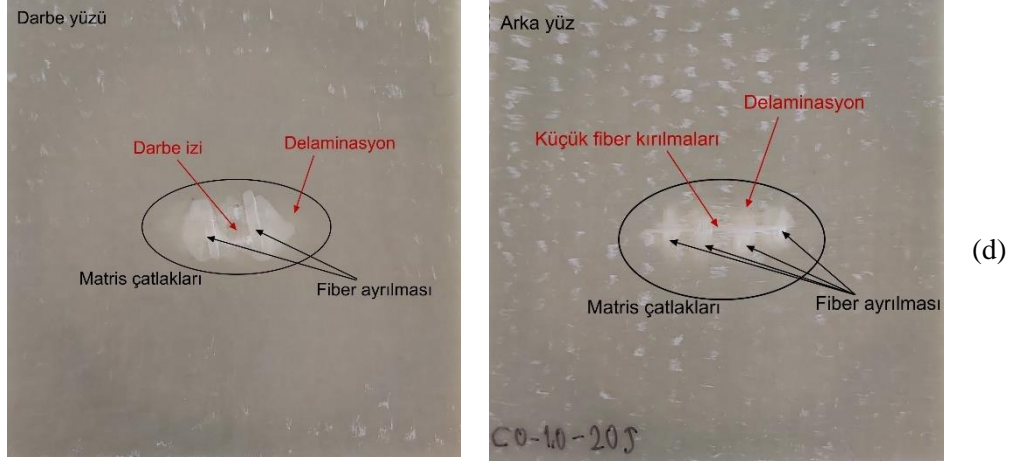
Bu nedenle, düz çizginin başlangıcı çarpışma olayının tamamlandığını gösterir ve bu noktadaki enerji numune tarafından absorbe edilen enerjiyi gösterir. Delinme eşliğinden daha yüksek darbe enerjileri için, absorbe edilen enerji hemen hemen aynı kalır ve bu da numuneye daha fazla hasar verilemeyeceğini gösterir. Sonuç olarak, katkısız numune için 40 J darbe enerjisi seviyesinde enerji-zaman eğrisinin davranışında önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. PA, NC ve PA+NC katkılı GFRE plakalar için delinme eşikleri sırasıyla 40 J, 45 J ve 37 J civarında bulunmuştur. Bu nedenle, nanokil katkılı GFRE kompozit plakalar, darbe direnci (katkısız kompozit plakaya göre yaklaşık %40 artışla) ve yüksek darbe enerjisi seviyelerinde enerji dağılımı açısından en iyi performansı göstermiştir.

3.1.4.4 Fiziksel Hasarın Karakterizasyonu

Şekil 3.20 ve Şekil 3.21, sırasıyla 20 J ve 40 J enerji seviyelerinde darbeye maruz kalmış katkısız ve nano katkılı kompozitlerin ön ve arka yüzlerinin görüntülerini göstermektedir. Genel olarak, kompozit plakalara verilen darbe hasarları; tabakaların ayrılması (delaminasyon), matris çatlaması, lif kırılması, lif ayrılması ve lif kopması ile bağlantılı olarak tabaka içi ve tabakalar arası hasarlar olarak kategorize edilebilir (Mahdi ve diğ. 2017, Fakhreddini ve diğ. 2021). Şekil 3.20 ve 3.17'den görüleceği üzere, darbe uygulanmış plakaların ön taraftaki hasarlı alanlara kıyasla arka tarafında daha büyük hasarlı alanlar gözlenmiştir. Çünkü delaminasyon ilk önce orta düzlemde oluşur ve numunenin çekme tarafında (arka kısım) devam eder (Avila ve diğ. 2007). Şekil 3.20a-d'ye bakıldığında, 20 J darbe enerjisi seviyesinde, katkısız ve nano katkılı numunelerin çarpma noktasından dışarıya doğru yayılan esas olarak matris çatlaması, lif kopması ve delaminasyon şeklinde benzer hasar kalıpları gösterdiği görülmektedir. Bu da matris çatlaması, lif kopması ve delaminasyon gibi hasarların oluşumu yoluyla yaklaşık olarak aynı miktarda enerjinin dağıldığını gösterir. Bu durum, katkısız plakalarda biraz daha yüksek olmak üzere tüm plakaların hemen hemen aynı miktarda absorbe edilen enerji sergilediği, enerji zaman profillerine (Şekil 3.19b) bakarak da doğrulanabilir.

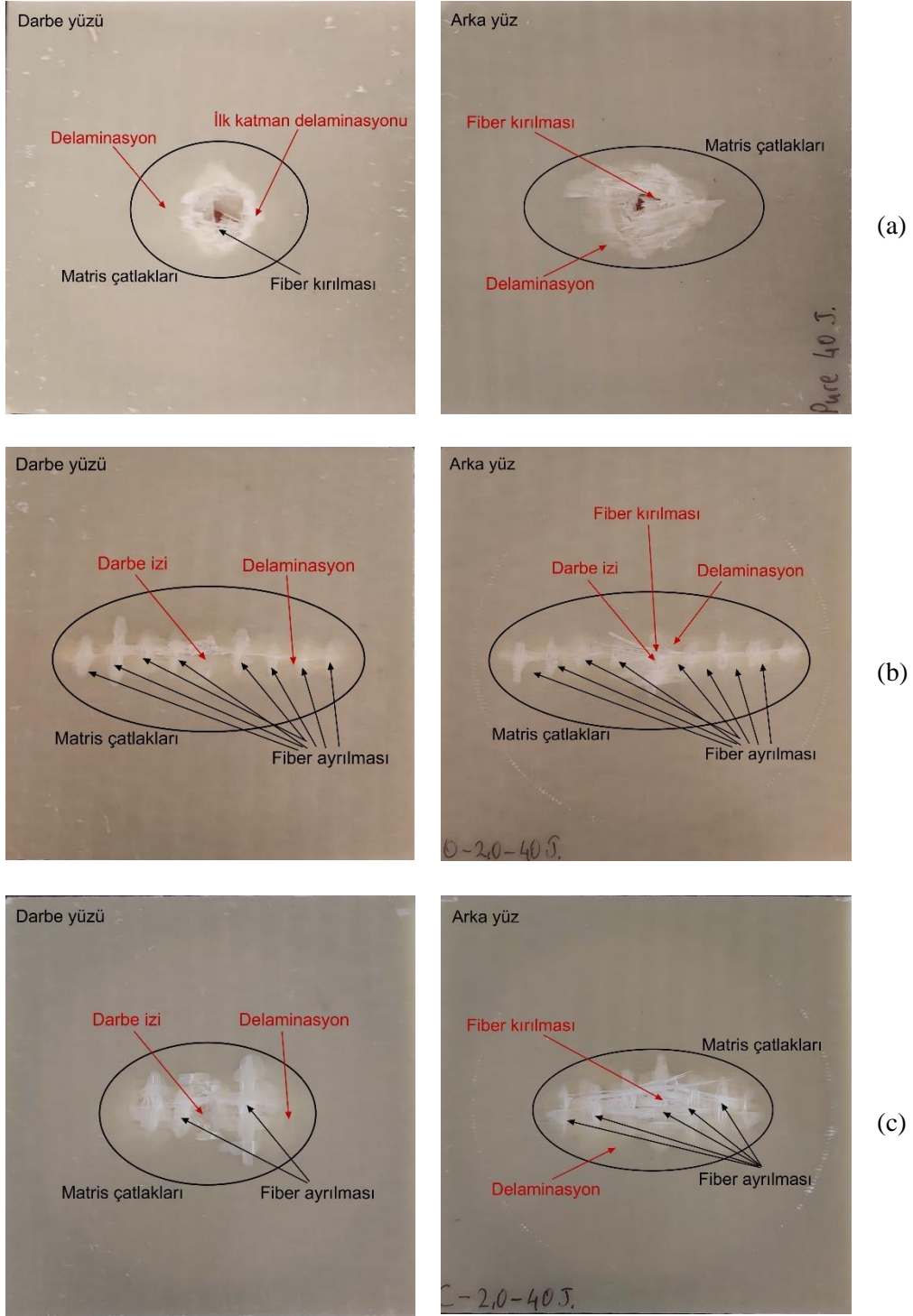


Şekil 3.20: 20 J enerji seviyesinde darbeye uğramış plakaların ön ve arka yüzlerinin görüntüleri a) Katkısız, b) PA, c) NC, d) PA+NC.

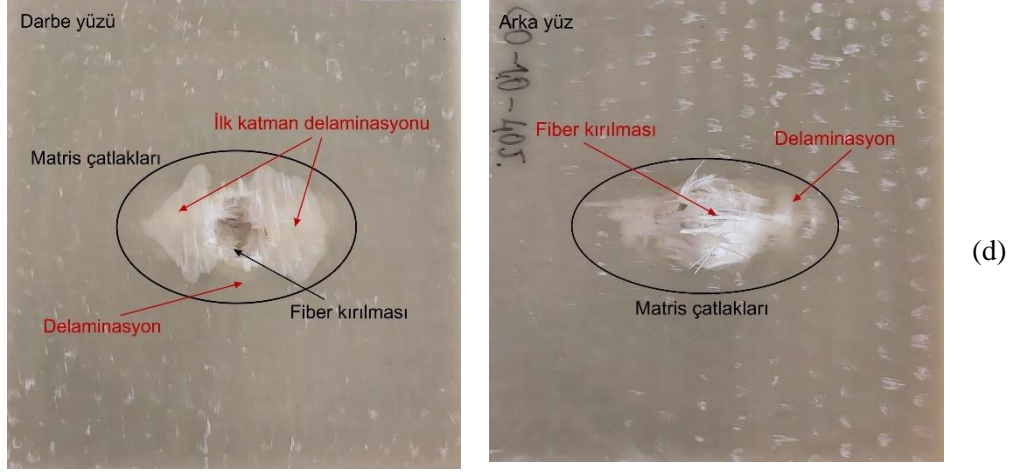


Şekil 3.20: (devam)

Ancak Şekil 3.21a-d'den görüleceği üzere, darbe enerjisi seviyesi 40 J'a yükseldikçe, GFRE kompozitlerine nanopartiküllerin eklenmesiyle hasar modu tabaka içinden tabakalar arasında değişmektedir. Nanopartiküllerin eklenmesi, tabakaiçi kayma mukavemetini artırır. Düşük darbe enerjisi seviyelerinde vurucu ucun plakaya nüfuziyeti ihmal edilebilir olduğundan, tabaka içi kayma mukavemetindeki iyileşme, hasar modunu tabaka içinden tabakalar arasında değiştiren yüksek darbe enerjisi seviyelerinde daha net gözlemlenebilir. Katkısız plaka, çarpma noktasında meydana gelen matris çatlama, fiber kırılması ve kenar delaminasyonu açısından lokalize hasar göstermektedir. 40 J'de darbe alan PA, NC ve PA+NC nanokatlı kompozitler, matris çatlama, lif kopması ve lif kırılması açısından daha büyük hasar alanı göstermiştir. Bu enerji seviyesi için, PA+NC hibrit katlı kompozit plaka tarafından absorbe edilen enerji en yüksektir, bunu PA, katkısız ve NC katlı kompozitler takip eder. 40 J darbe enerjisi seviyesinde, kontrol (katkısız) ve PA+NC hibrit katlı numunelerde tam delinme meydana geldiği ve PA katlı numunelerin delinme sınırına yakın olduğu, oysa NC katlı numunelerde nanokilin epoksi matrise dahil edilmesiyle hasar mekanizmasındaki değişikliklerden dolayı daha fazla enerji absorbe edebilme kabiliyetine bağlı olarak darbe dayanımındaki artışa işaret eden tam bir delinme hasarı görülmezken geniş bir alanda matris çatlama, lif kopması ve lif ayrılması hasarları gösterdiğini belirtmek gerekir.



Şekil 3.21: 40 J enerji seviyesinde darbeye uğramış plakaların ön ve arka yüzlerinin görüntüleri a) Katkısız, b) PA, c) NC, d) PA+NC.

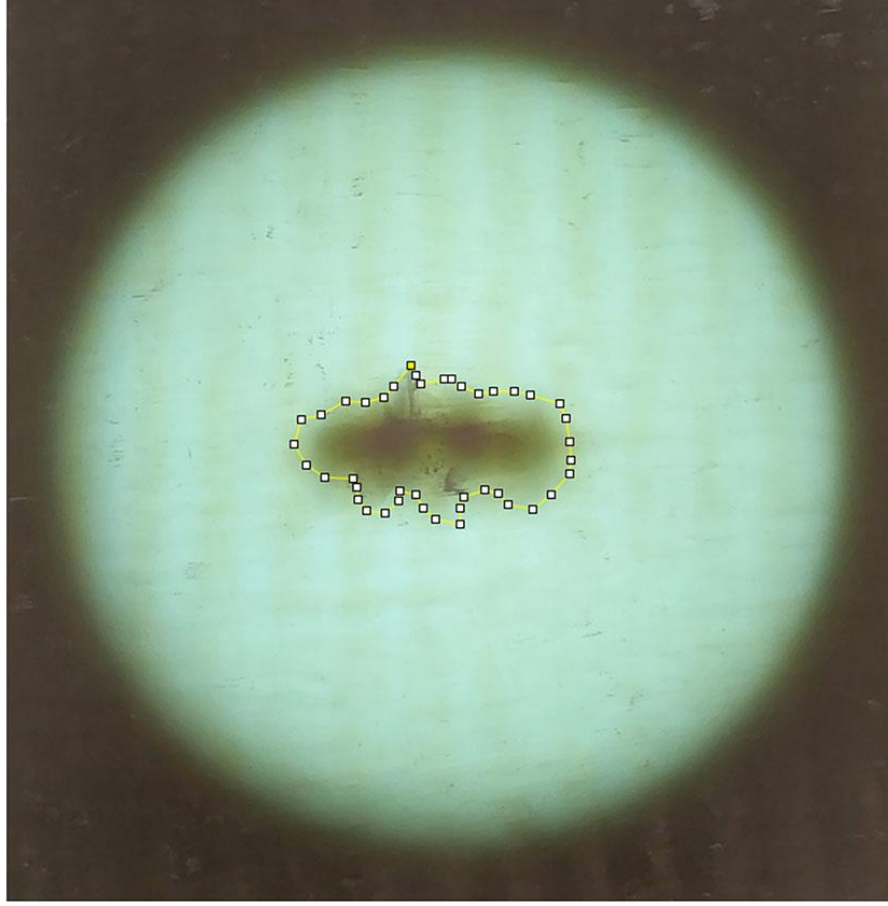


Şekil 3.21: (devam)

Toplam hasar alanı, arkadan aydınlatma yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Numune fotoğrafları, numune boyutlarına göre ölçeklenmiştir. Görünür hasar alanları, hasar kenarlarının tespit edilebilmesi için renk tonu geçişlerine dayalıdır. Toplam hasar alanları ImageJ yazılımı vasıtasıyla hesaplanmıştır. Örnek olarak, 20 J'de darbe alan NC laminatın hasar alanı Şekil 3.22'de verilmiştir. Tablo 3.5'te belirtildiği üzere hesaplanan hasar alanları, delaminasyon, matris çatlama, lif kırılması ve lif çekilmesi dahil olmak üzere tüm modlardaki hasarı kapsar. 20 J darbe enerjisi seviyesinde tüm kompozit tiplerinin toplam hasar alanları yaklaşık olarak birbirine eşittir. Darbe enerjisi seviyesi 40 J'ye yükseldikçe, nanokatlı plakalar katkısız numuneye kıyasla daha büyük hasar alanları göstermiştir.

Tablo 3.5: Hasar alanlarının karşılaştırılması.

Darbe Enerjisi [J]	Numune	Hasar Alanı [mm ²]	Standart Sapma
20	Katkısız	329,503	0,37
	PA	320,483	0,51
	NC	330,481	0,52
	PA+NC	332,263	0,49
40	Katkısız	516,014	0,53
	PA	646,073	0,65
	NC	798,022	0,67
	PA+NC	730,808	0,66

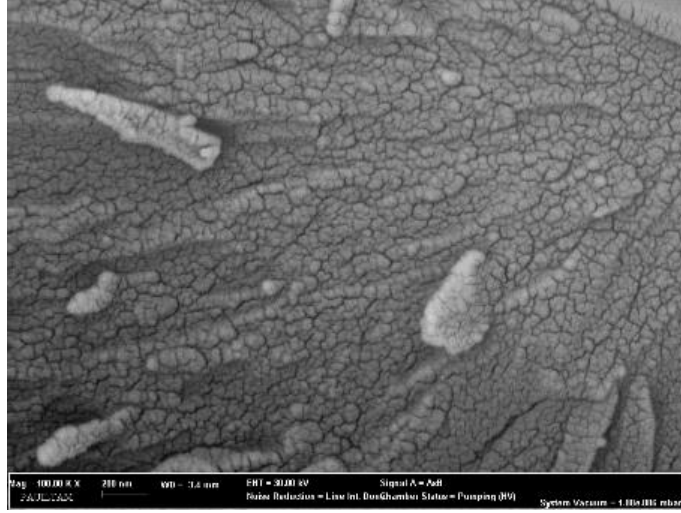


Şekil 3.22: Hasar alanı örneği (NC kompozit 20 J).

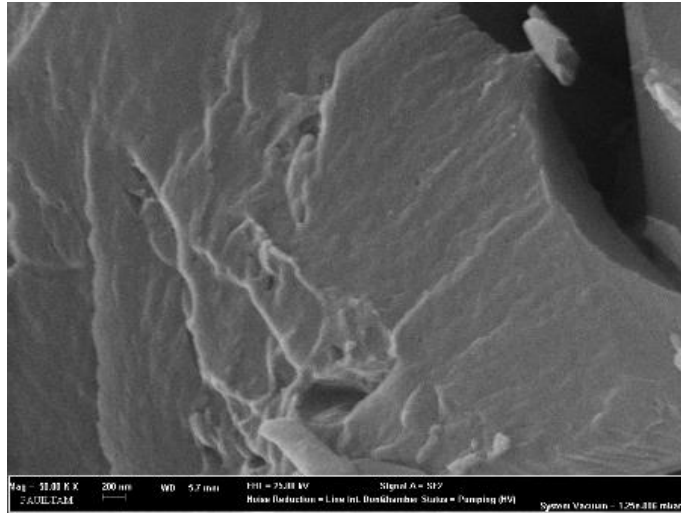
Genel olarak, nano katkılı plakalar, kompozit malzemenin darbe davranışını ve hasar mekanizmalarını değiştiren darbe dayanımı açısından katkısız numunelere kıyasla daha iyi performans göstermektedir. Yüksek enerji seviyelerinde, kontrol numunesinde kalınlık yönünde büyük deformasyonlara yol açan çarpma noktası bölgesinde ciddi hasarlar gözlenmektedir. Öte yandan, nano partiküllerin varlığı, epoksi reçinesinin kırılma davranışını artırarak hasarın kalınlık yönünden ziyade düzlem içi yönde yayılmasına neden olmaktadır.

3.1.5 SEM Görüntüleri

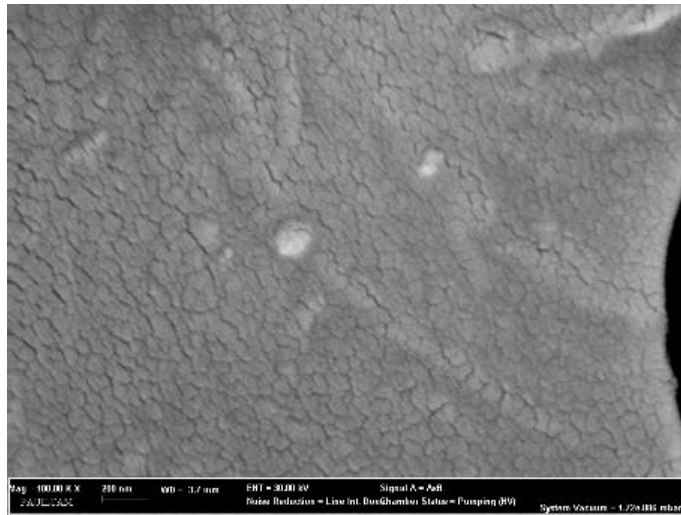
Pamukkale Üniversitesi İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde Au/Pd kaplama yapıldıktan sonra alan emisyon taramalı elektron mikroskobu ile iç yapı incelemesi gerçekleştirilen numunelerin enerji dağılımlı X-ışını analizleri ve haritalama (mapping) çıktıları verilmiştir.



(a)



(b)



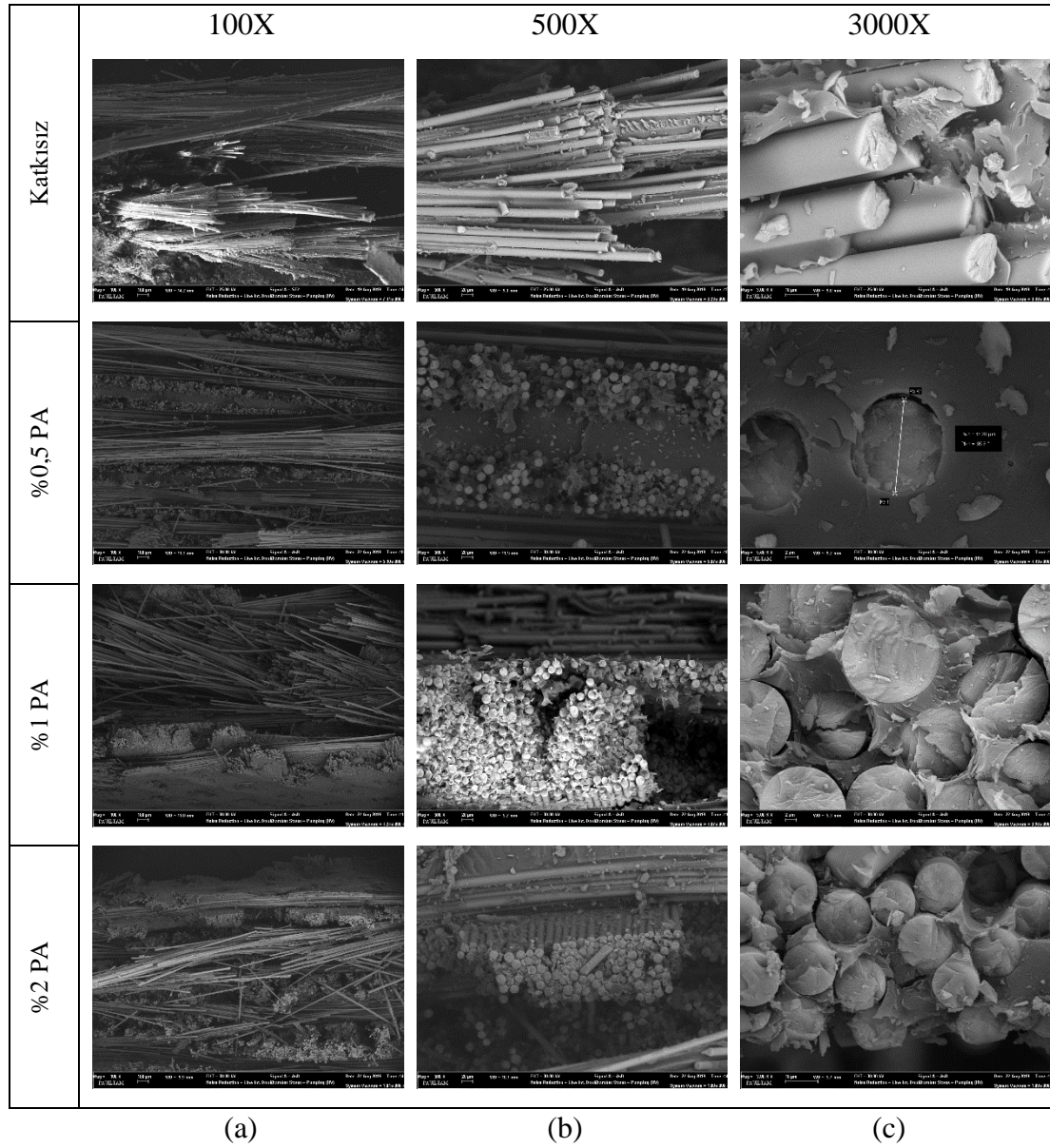
(c)

Şekil 3.23: Nanokompozitlerin SEM görüntüleri a) PA, b) NC, c) PA+NC.

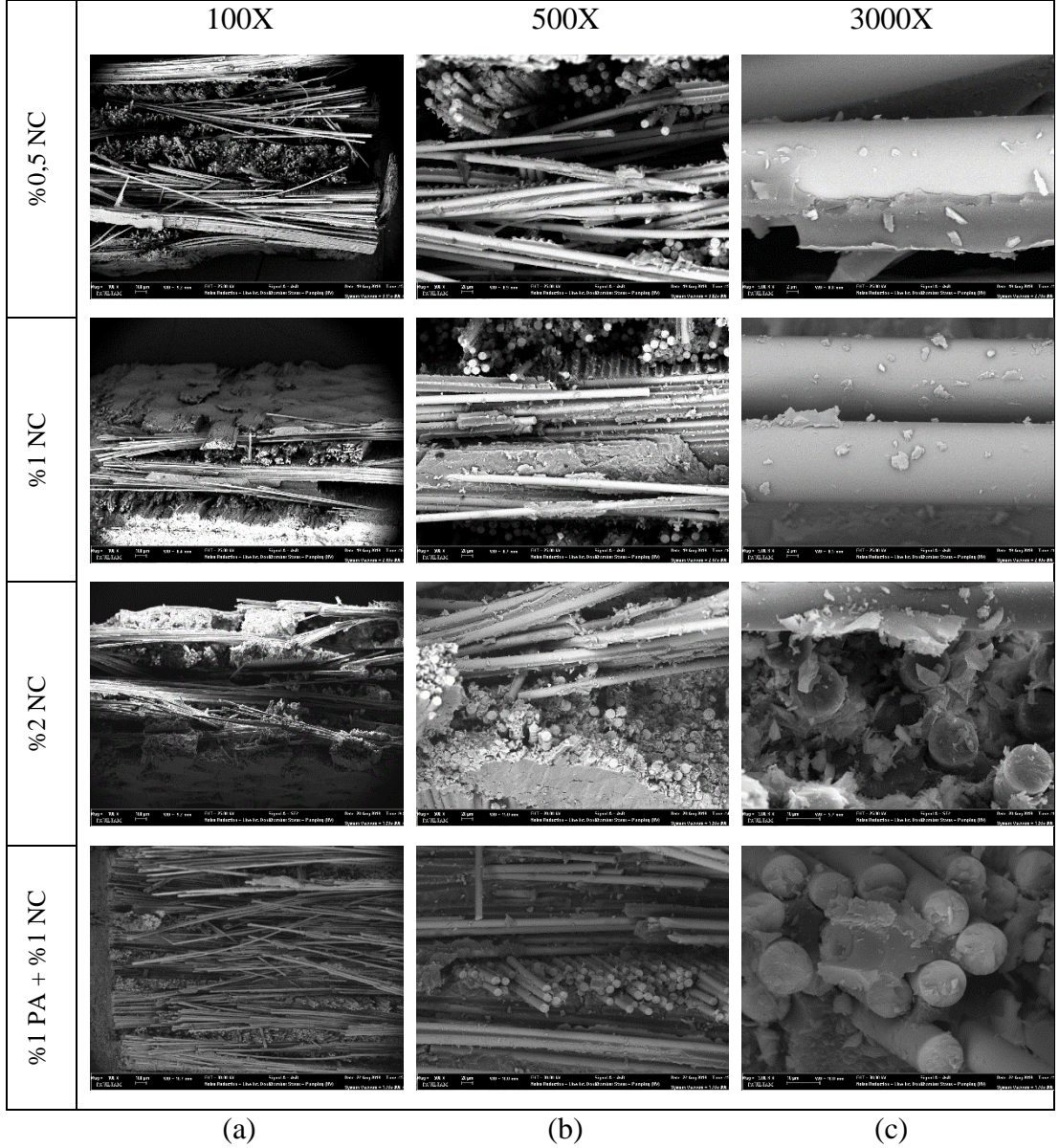
Epoksi reçine içindeki nanoparçacıkların dağılımı, ZEISS-Supra 40VP model, alan emisyon taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Nanokompozit numunelerin ilk kırılan yüzeyleri Quorum-Q10R ES model kaplama cihazı

kullanılarak altın (%80) ve paladyum (%20) ile kaplanmıştır. Daha sonra nanokompozit numunelerin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri elde edilmiştir.

Şekil 3.23'te epoksi nanokompozitlerin SEM görüntüleri verilmiştir. Büyük boyutlu poliamid agregatlarının varlığı, daha yüksek büyütmelerde gözlemlenebilirken nanokil katkıli kompozit bir dereceye kadar nispeten tekdüze mikro yapı ve ara sıra küçük kil topaklanmalarının lokalizasyonları ile daha pürüzlü bir yüzey gösterir.



Şekil 3.24: Nanokompozitlerin SEM görüntüleri a) 100X, b) 500X, c) 3000X.



(a)

(b)

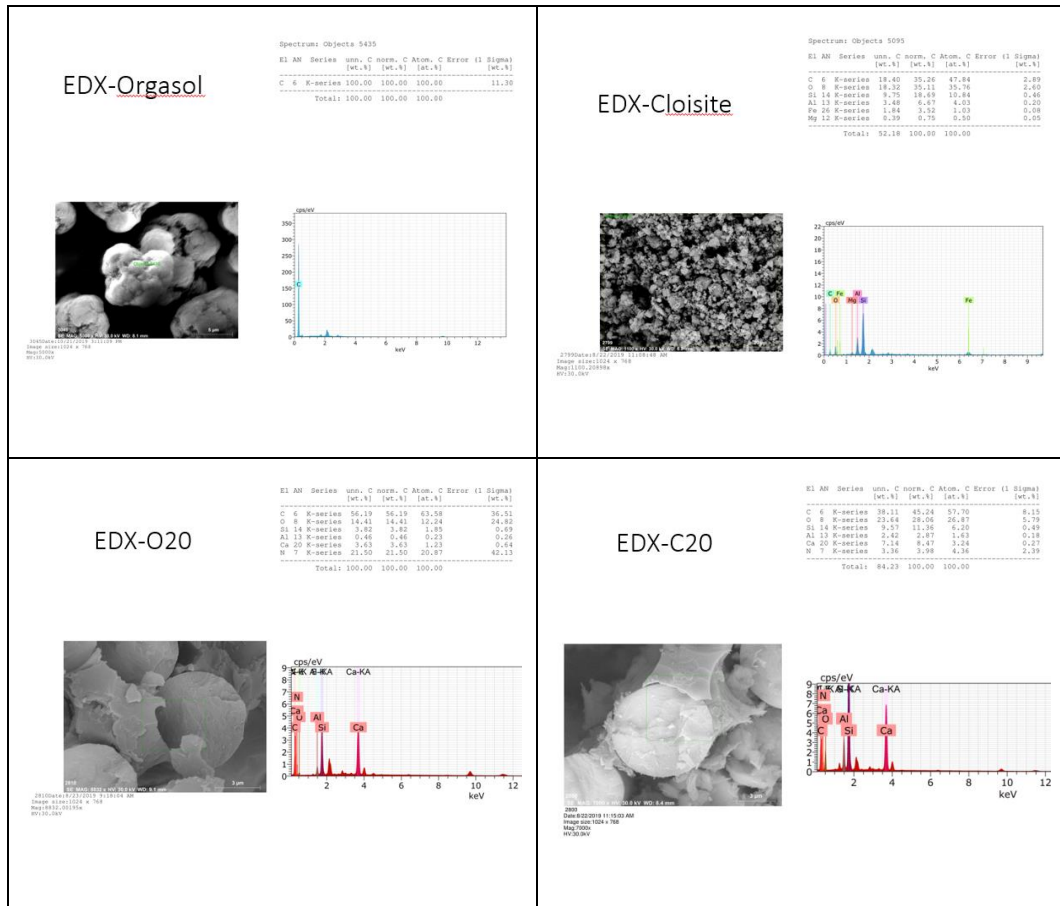
(c)

Şekil 3.24: (devam)

Şekil 3.24'te düz dokuma cam elyaf takviyeli epoksi nanokompozitlerin 100X, 500X ve 3000X büyütmelelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. 100X büyütmede fiber oryantasyonları ve kırılma yüzeyleri görülmektedir. 500X büyütmede fiber kopmaları, fiber ayrılmaları ve matris çatlakları belirginleşmiştir. Daha büyük büyütmelelerde fiber kopmaları, fiber ayrılmaları ve derin yarıklar belirgin bir şekilde görülürken; PA, NC ve PA+NC kompozitlerde reçineye karıştırılmış nanopartiküllerin varlığı görülmektedir.

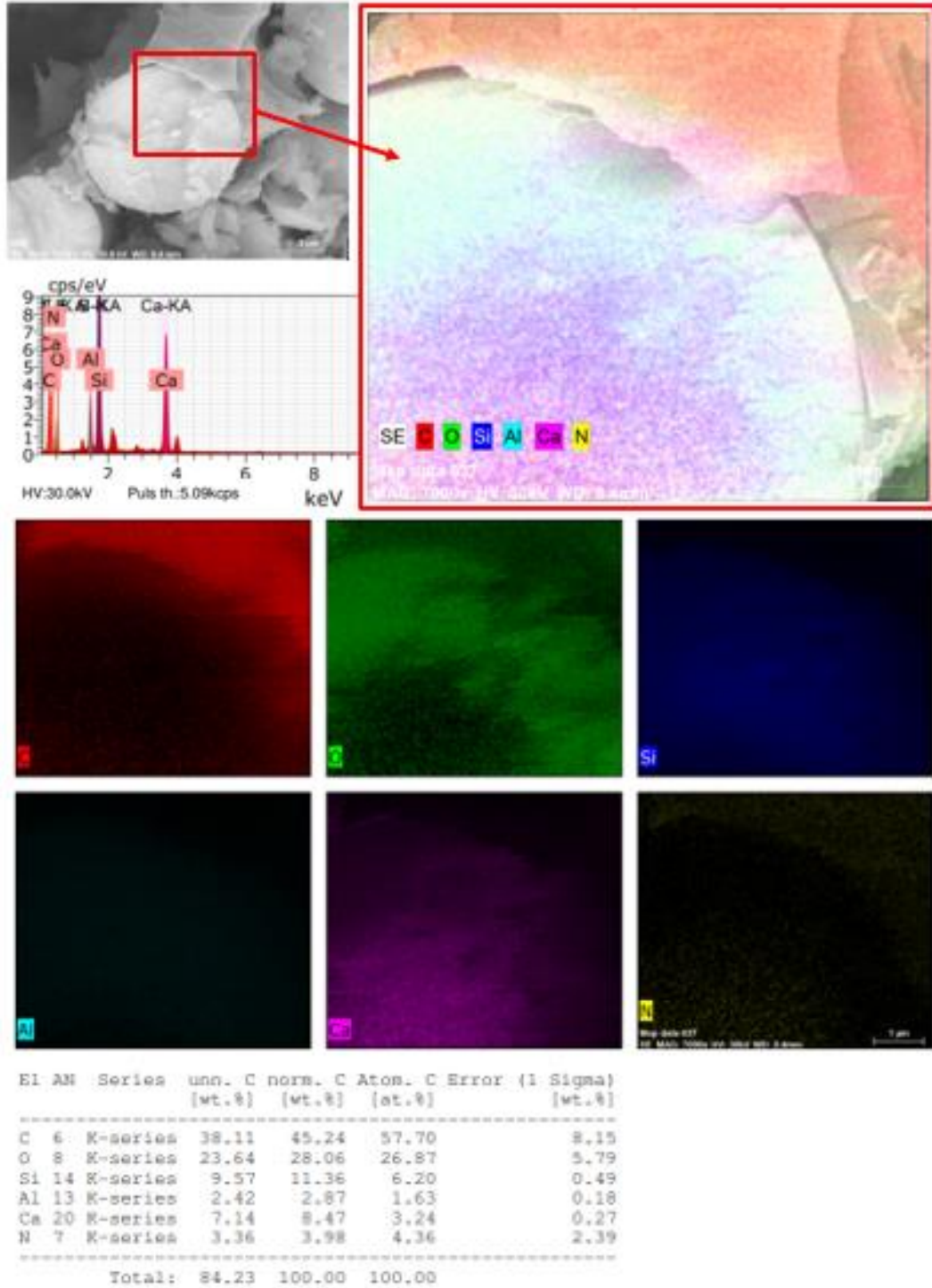
Poliamid ve nanokil katkı maddelerinin ve %2 nano katkı PA ve NC kompozitlerinin EDX analizleri Şekil 3.25'te verilmiştir. Orgasol sadece poliamid monomerlerinden oluştuğu için EDX analizlerinde sadece C piki görülmüştür. Cam

elyaf takviyeli epoksi termoset reçine içine %2 oranında PA karıştırıldığında O, Si, Ca, N ve eser miktarda Al görülmüştür. Cloisite montmorillonit silika yapıtaşlarından oluştuğu için EDX analizlerinde C, O, Si, Al pikleri barındırmaktadır. Cam elyaf takviyeli epoksi termoset reçine içine %2 oranında NC karıştırıldığında ise bunlara ilave olarak Ca ve N pikleri görülmüştür. Nanokil içeriğindeki metal oksitler %2 Cloisite ilavesinde metal ve oksijen atomları olarak sonuçlarda çıktığı gözlemlenmiştir.



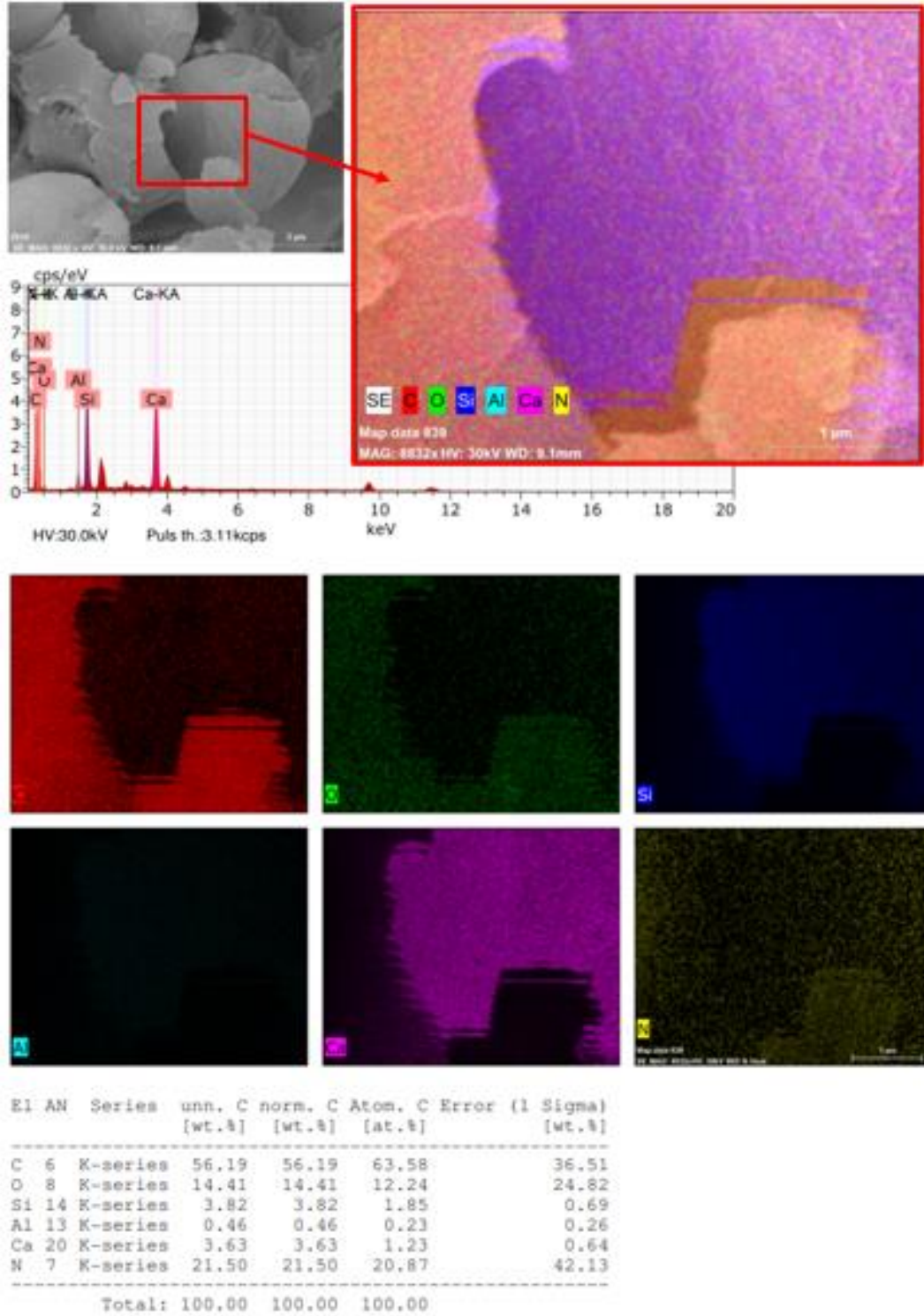
Şekil 3.25: Poliamid ve nanokil katkı maddelerinin ve %2 nano katkılı PA, NC kompozitlerinin EDX analizleri.

Şekil 3.26’da %2 NC ilaveli kompozitten haritalama işlemi kırmızı dikdörtgen ile seçili alandan gerçekleştirilmiştir. Atomların dağılımı ve EDX sonuçları gösterilmiştir. Haritalama işleminde NC’nin içeriğinde bulunan metal oksitler kompozit içeriğinde görülmüştür.



Şekil 3.26: %2 NC kompozitinin EDX-MAPPING görüntüleri.

Şekil 3.27’de %2 PA ilaveli kompozitten haritalama işlemi kırmızı dikdörtgen ile seçili alandan gerçekleştirilmiştir. Atomların dağılımı ve EDX sonuçları gösterilmiştir. Haritalama işleminde PA’nın içeriğinde bulunan C, O, Si, Al, Ca, N atomları kompozit içeriğinde görülmüştür.



Şekil 3.27: %2 PA kompozitinin EDX-MAPPING görüntüleri.

3.2 Kıvrımsız Dikişli Takviyeli Kompozitlerin Deneysel Çalışmaları

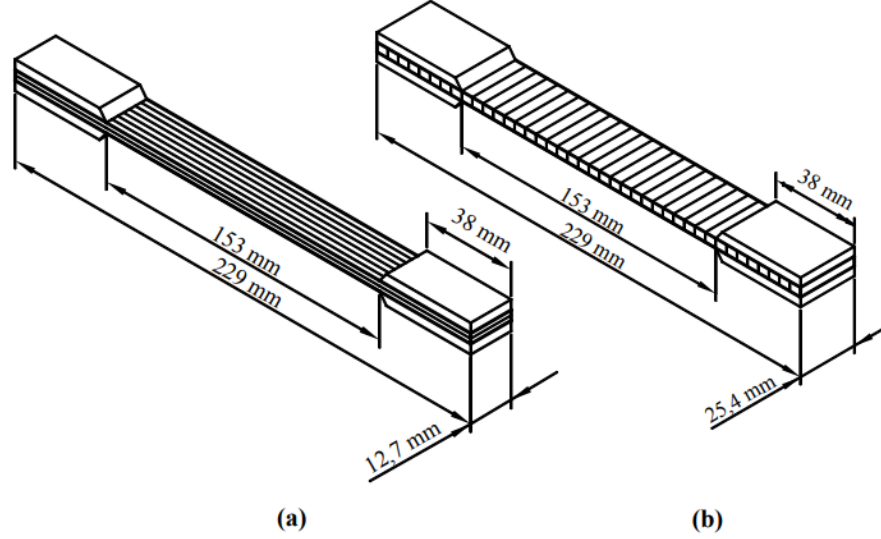
Bu bölümde kıvrımsız dikişli kumaşlardan üretilen nanokompozitlerin mekanik özellikleri, darbe dayanımları ve iç yapı özelliklerinin tespiti hakkında detaylı

bilgiler verilecektir. Kıvrımsız dikişli cam elyaf kumaş takviyeli kompozitlerin mukavemet ve rijitlik değerlerini belirlemek üzere çekme ve basma testleri, darbe davranışlarının tespiti için düşük hız darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri ASTM (American Society for Testing and Materials) standartlarına göre su jeti ile kesilerek hazırlanmıştır. Deneyler Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında standart koşullar altında (23 ± 1 °C oda sıcaklığında ve $\%50 \pm 10$ bağıl nem) gerçekleştirilmiştir.

3.2.1 Çekme Deneyleri

Üretilen kompozit plakalardan deney numuneleri çekme testleri için ASTM D3039 standartına göre Şekil 3.28'de gösterildiği ölçülerde su jeti ile kesilmiştir. Çekme testleri Instron 8801 model bilgisayar kontrollü servo-hidrolik çekme test cihazı ile yapılmıştır. Eksenel şekil değiştirmeler, deney cihazına monte edilen video ekstansometreyle ölçülmüştür. Deneyler oda sıcaklığında 2,0 mm/dk sabit hız ile çeki yükleri uygulanarak yapılmış, her bir kompozit numune için en az üç özdeş örneğe uygulanarak sonuçların ortalamaları alınmıştır.

Kompozitlerin fiber doğrultusu 1 indisi ile gösterilmek üzere, fiber yönündeki elastisite modülü E_1 ve çekme mukavemeti $X_1^T (=X^T)$ 'nin belirlenmesi için çekme yükü uygulanan numunelerin boyutları ASTM D3039'a göre Şekil 3.28a'da görüldüğü gibidir. Kompozitlerin fiber yönüne dik olan doğrultu 2 indisi ile gösterilmek üzere, fiber yönüne dik doğrultudaki elastisite modülü E_2 ve çekme mukavemeti $X_2^T (=Y^T)$ 'nin belirlenmesi için çekme yükü uygulanan numunelerin boyutları aynı standarda göre Şekil 3.28b'de görüldüğü gibidir. Kompozitlerin deney numunelerinde kopma meydana gelene kadar çeki yükü uygulanmış ve bu çeki hasar yüklerinin (P_{maks}) kesit alanına bölünmesiyle çekme mukavemetleri X^T ve Y^T tespit edilmiştir.



Şekil 3.28: Numune boyutları a) Fiber yönünde, b) Fibere dik yönde (Sayer 2009).

Elastisite modülü σ - ϵ diyagramının eğiminden elde edilir. Gerilme değeri, kuvvetin numune kesit alanına bölümünden, % uzama ise cihaz üzerine bağlanan video ekstansometreden elde edilmiştir. 0° fiber yönünde ve 90° fibere dik yönde hazırlanan numunelere uygulanan çekme deneyleri sonucu her bir numune için ayrı ayrı maksimum kuvvet, maksimum kuvvetteki çekme gerilmesi (çekme dayanımı), maksimum kuvvetteki kopma uzaması ve elastisite modülü verileri elde edilerek bulunan ortalama değerler belirlenmiş, deney sonuçları Tablo 3.6'da verilmiştir. Elastisite modülü karşılaştırma grafikleri Şekil 3.29'da, çekme dayanımı grafikleri Şekil 3.30'da, kopma uzaması grafikleri Şekil 3.31'de ve maksimum kuvvet grafikleri Şekil 3.32'de gösterilmiştir. Deney sonuçlarının istatistiksel analizlerinden standart sapma, varyasyon katsayısı, %95 güven aralığı ve %99 güven aralığı verileri EK B bölümünde Tablo B.11, Tablo B.12, Tablo B.13 ve Tablo B.14'te verilmiştir.

Kompozitlerin fiber yönünde E-modülü (E_1^T) kontrol numunesindeki değeri 21,45 GPa iken ağırlıkça %0,3 karbon nanotüp ilavesinin 21,57 GPa ile en yüksek değeri verdiği, bu değeri ağırlıkça %2 nanokil ve %2 poliamid katkı maddelerinin ayrı ayrı ilavesinin sırasıyla 21,51 GPa ve 20,63 GPa değerleri ile izlediği, ağırlıkça %2 nanokil+%0,3 karbon nanotüp, %2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp ve %2 nanokil+%2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp katkı maddelerinin hibrit olarak ilave edilmesiyle sırasıyla 20,99 GPa, 19,66 GPa ve 21,05 GPa olarak ölçüldüğü Şekil 3.29a'da görülmektedir.

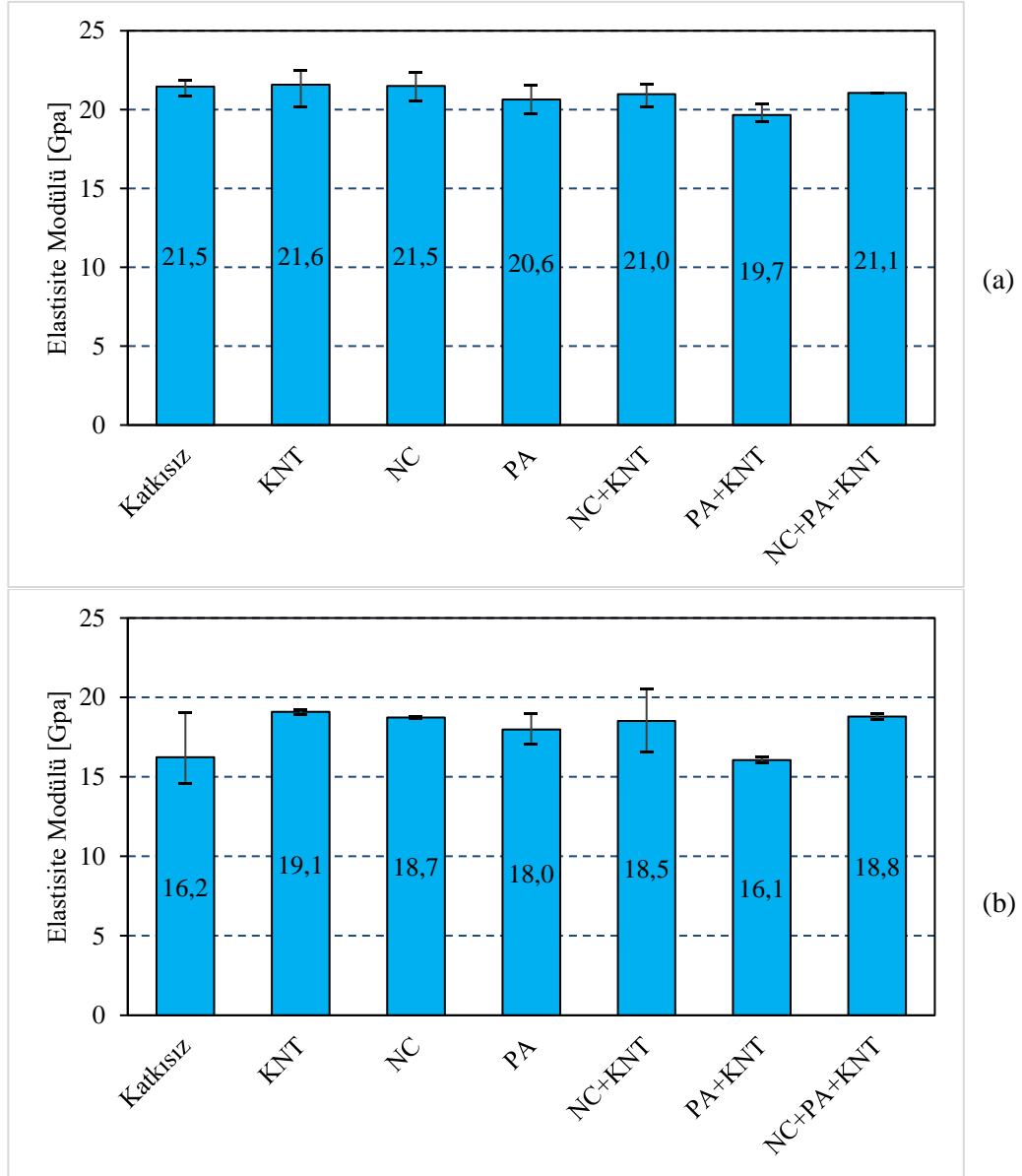
Tablo 3.6: Çekme deneyi sonuçları.

Numune	1 Doğrultusu			
	Maks. Kuvvet [kN]	Çekme Dayanımı X^T [MPa]	Kopma Uzaması [%]	Elastisite Modülü E_1^T [GPa]
Katkısız	10,85	427,04	1,84	21,45
KNT	11,54	454,50	2,00	21,57
NC	11,50	452,89	2,08	21,51
PA	11,73	461,90	2,03	20,63
NC + KNT	12,10	476,52	2,15	20,99
PA + KNT	12,41	488,46	2,22	19,66
NC+PA+KNT	11,06	435,35	2,06	21,05

Numune	2 Doğrultusu			
	Maks. Kuvvet [kN]	Çekme Dayanımı Y^T [MPa]	Kopma Uzaması [%]	Elastisite Modülü E_2^T [GPa]
Katkısız	18,39	362,06	2,10	16,23
KNT	21,26	418,43	2,24	19,09
NC	20,98	412,98	2,13	18,75
PA	21,24	418,13	2,32	17,98
NC + KNT	21,08	414,94	2,21	18,52
PA + KNT	18,88	371,64	2,17	16,05
NC+PA+KNT	19,33	380,47	2,18	18,79

Kompozitlerin fibere dik yönde E-modülü (E_2^T) değeri, katkısız referans numunesinde 16,23 GPa olarak ölçülmüş olup, ağırlıkça %0,3 karbon nanotüp ilavesiyle 19,09 GPa olmak üzere en yüksek değer elde edildiği, bu değeri ağırlıkça %2 nanokil+%2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp, %2 nanokil ve %2 nanokil+%0,3 karbon nanotüp katkı maddeleri ilavesiyle sırasıyla 18,79 GPa, 18,75 GPa ve 18,52 GPa olmak üzere izlediği son olarak ağırlıkça %2 poliamid ve %2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp ilavesiyle sırasıyla 17,98 GPa ve 16,05 GPa değerleri elde edildiği Şekil 3.29b’de görülmektedir.

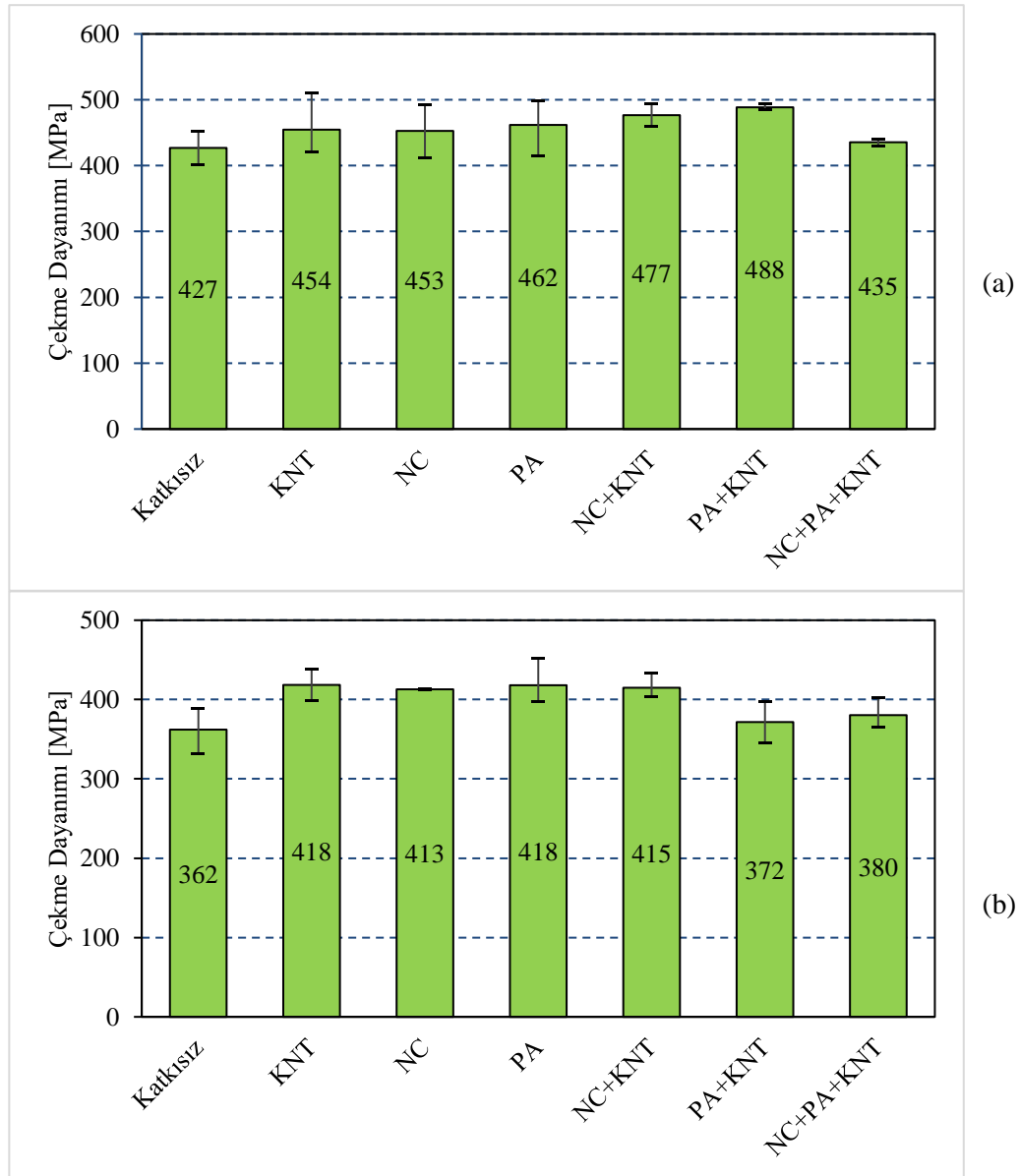
Böylece elyaf takviyeli polimer kompozitlerde matrisle belirlenen oranlarda ayrı ayrı ya da birlikte katkı maddesi ilavesinin kompozitlerin elastisite modülünü genel olarak iyileştirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.29: E-modülü grafiği a) Fiber yönünde, b) Fibere dik yönde.

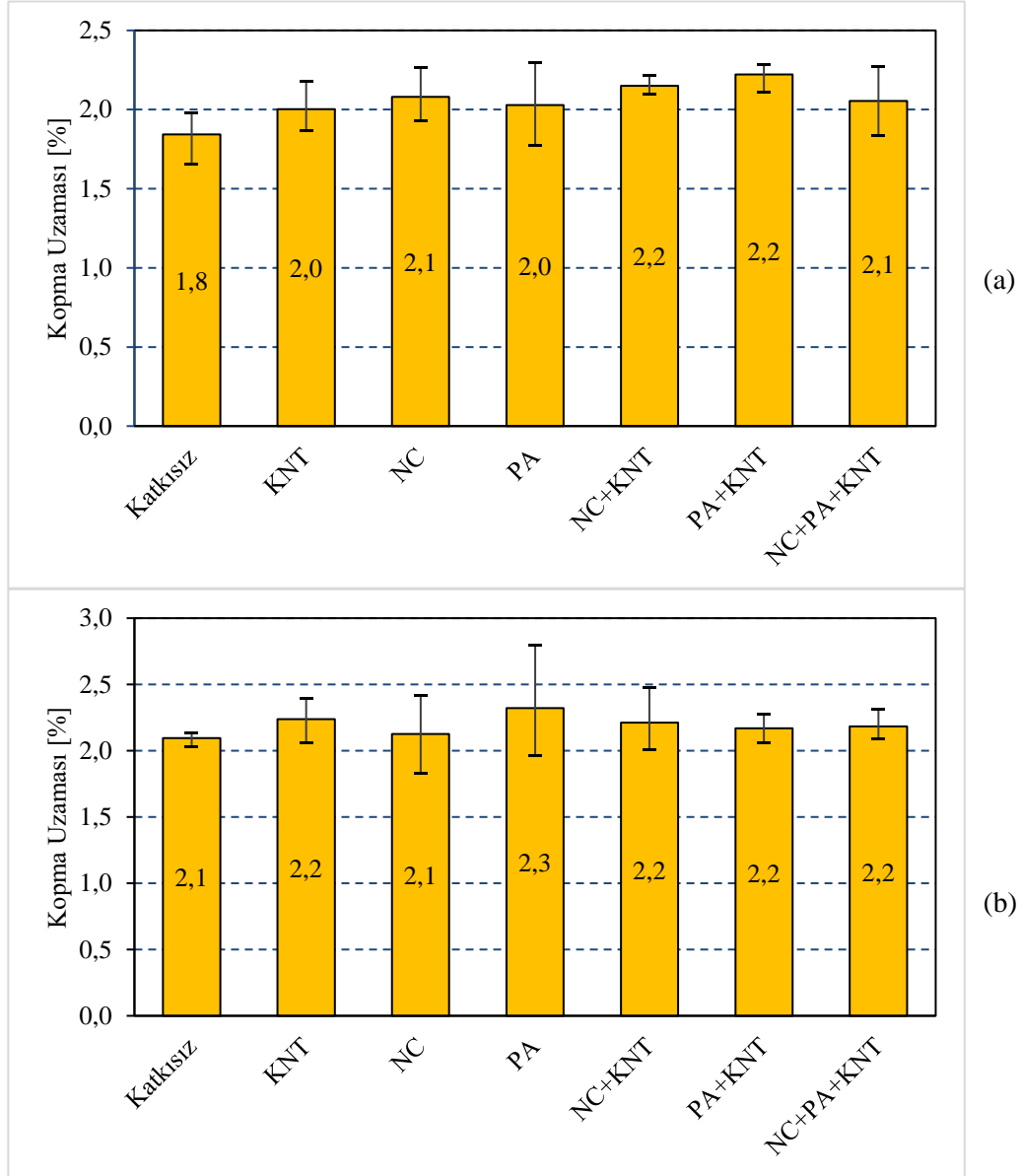
Katkı maddelerinin eklenmesi kompozitlerin mekanik özelliklerine olumlu yönde etki etmiştir. Fiber doğrultusunda en yüksek çekme mukavemeti değeri poliamid+karbon nanotüp katkılı (ağ. %2+%0,3) kompozit numunede elde edilmiştir. Şekil 3.30a'da katkısız referans numunesine kıyasla ağırlıkça %0,3 karbon nanotüp, %2 nanokil ve %2 poliamid katkı maddelerinin ayrı ayrı ilave edilmesiyle kompozit numunelerin fiber yönünde çekme mukavemeti (X^T), 427 MPa'dan sırasıyla 454 MPa, 453 MPa ve 462 MPa'a yükseldiği, ağırlıkça %2 nanokil+%0,3 karbon nanotüp, %2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp ve %2 nanokil+%2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp katkı maddelerinin hibrit olarak ilave edilmesiyle sırasıyla 477 MPa, 488 MPa ve 435 MPa'a ulaştığı görülmektedir.

Fiber doğrultusuna dik yönde en yüksek çekme mukavemeti değeri de %0,3 karbon nanotüp katkılı kompozit numunede elde edilmiştir. Şekil 3.30b’de görüldüğü gibi katkısız referans numunesine kıyasla ağırlıkça %0,3 karbon nanotüp, %2 nanokil ve %2 poliamid katkı maddelerinin ayrı ayrı ilave edilmesiyle kompozit numunelerin fibere dik yönde çekme mukavemeti (Y^T) 362 MPa’dan sırasıyla 418 MPa, 413 MPa ve 418 MPa’a artmış, ağırlıkça %2 nanokil+%0,3 karbon nanotüp, %2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp ve %2 nanokil+%2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp katkı maddelerinin hibrit olarak ilave edilmesiyle sırasıyla 415 MPa, 372 MPa ve 380 MPa’a kadar iyileşme göstermiştir.

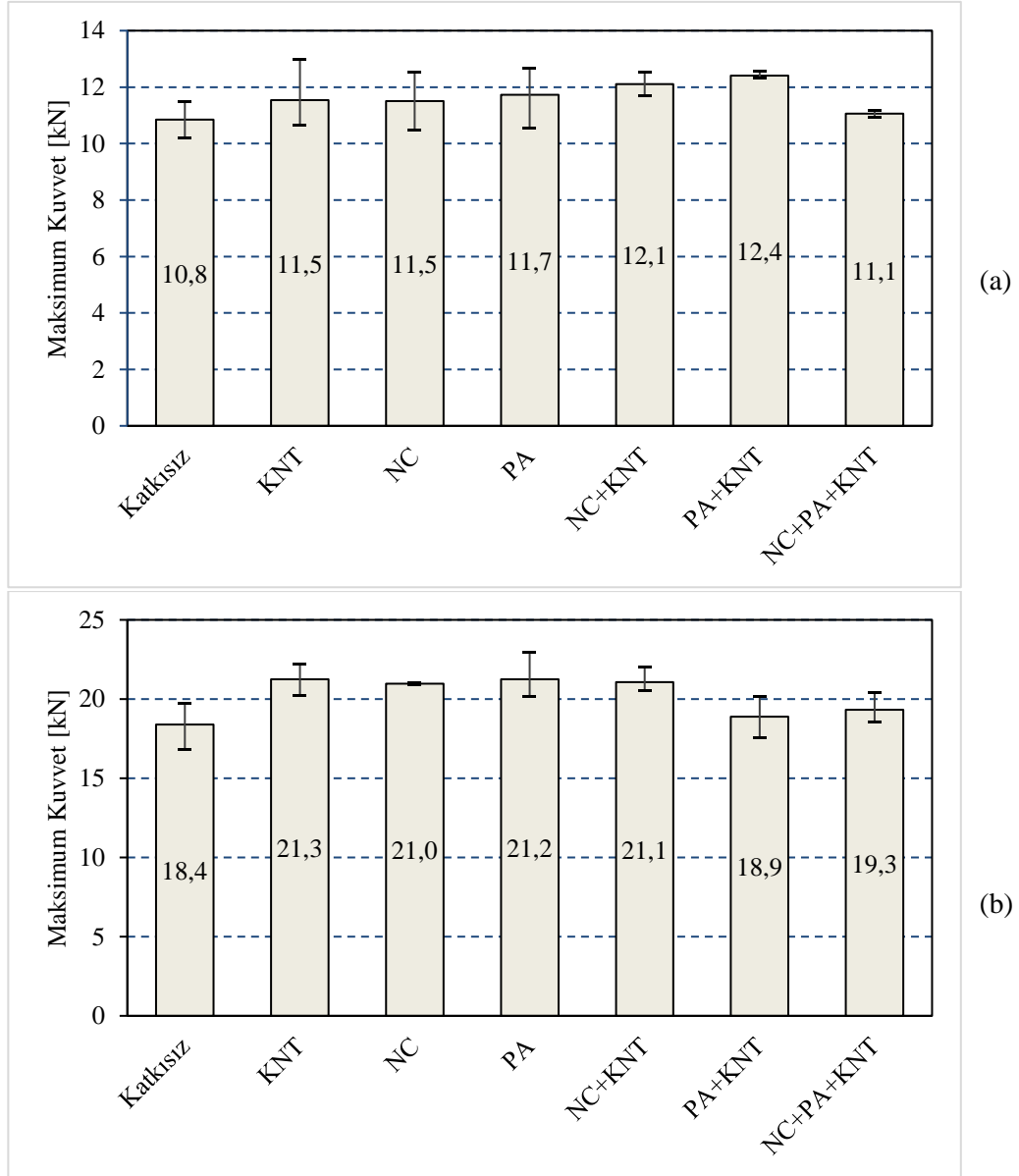


Şekil 3.30: Çekme dayanımı grafiği a) Fiber yönünde, b) Fibere dik yönde.

Matrise ağırlıkça %0,3 karbon nanotüp ilavesinin kompozitlerin çekme dayanımlarında anlamlı bir iyileşme sağladığı literatüre paralel olarak tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, karbon nanotüple birlikte nanokil ve/veya poliamid katkısı kullanıldığında olumsuz yönde etki etmesine rağmen her durumda matrise katkı maddesi ilavesi ile kompozitlerin çekme mukavemetinde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.31: Kopma uzaması grafiği a) Fiber yönünde, b) Fibere dik yönde.



Şekil 3.32: Maksimum kuvvet grafiği a) Fiber yönünde, b) Fibere dik yönde.

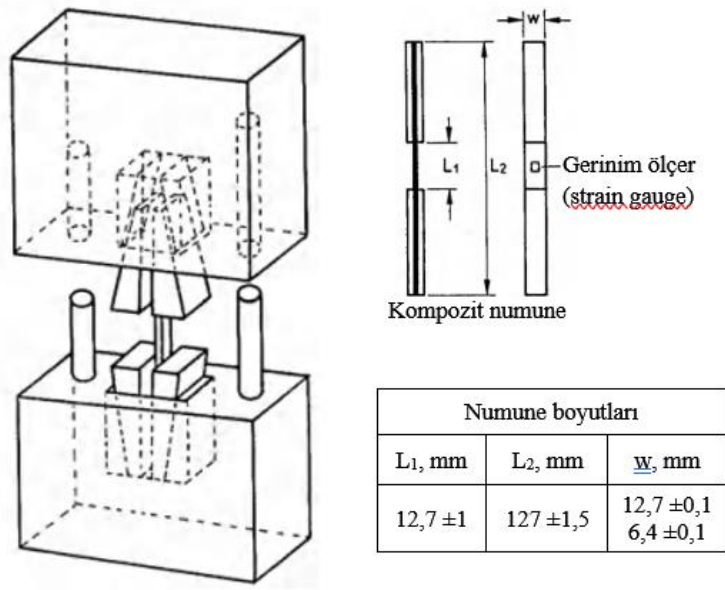
3.2.2 Basma Deneyleri

Üretilen kompozit plakalardan deney numuneleri basma testleri için Tablo 3.7 ve Şekil 3.33'te gösterildiği ölçülerde su jeti ile kesilmiştir (Carlsson ve Pipes, 1989). Basma testleri Instron 8801 model bilgisayar kontrollü servo-hidrolik basma test cihazı ile yapılmıştır. Eksenel şekil değiştirmeler, deney cihazına monte edilen video ekstansometreyle ölçülmüştür. Deneyler oda sıcaklığında 1,0 mm/dk sabit hız ile bası yükleri uygulanarak yapılmış, her bir kompozit numune için en az üç özdeş örneğe uygulanarak sonuçların ortalamaları alınmıştır.

Tablo 3.7: Basma numunesinin boyutları.

Elyaf oryantasyonu	Genişlik [mm]	Uzunluk [mm]
0°	6,4	127
90°	12,7	127

Basma deneyleri için hazırlanan numune örnekleri (Şekil 3.34a), deney cihazında basma aparatına bağlanarak hasara uğramadan önceki ve hasara uğradıktan sonraki görüntüleri Şekil 3.34b’de verilmiştir.



Şekil 3.33: Modifiye IITRI basma aparatı ve numune boyutları.

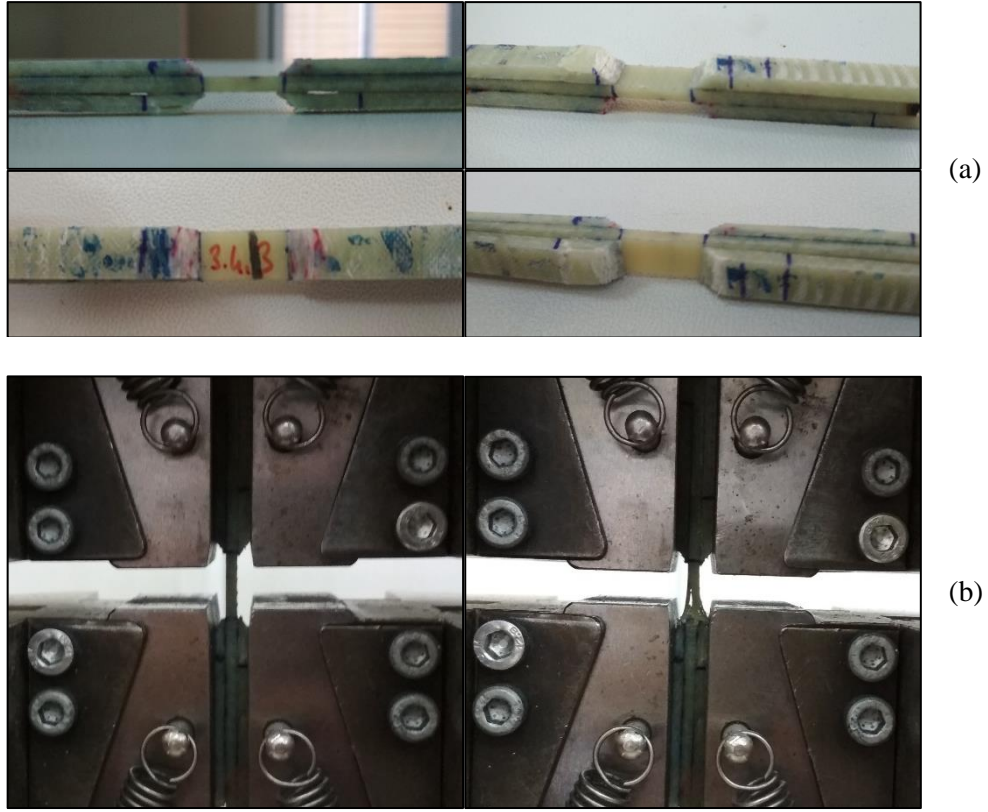
Kompozitlerin bası yükü altındaki mukavemet özelliklerinin belirlenmesi için basma deneyleri sonucunda malzemenin aşağıdaki karakteristik özellikleri bulunmuştur;

E_1^C : Elyaf yönünde Young Modülü.

E_2^C : Elyaf yönüne dik Young Modülü.

X_1^C, ϵ_1^C : Elyaf yönünde maksimum basma mukavemeti ve gerinimi.

X_2^C, ϵ_2^C : Elyaf yönüne dik maksimum basma mukavemeti ve gerinimi.



Şekil 3.34: Basma deneyleri için hazırlanan örnek numune, a) Deney numunesi, b) Basma aparatı.

Kompozitlerin fiber doğrultusu 1 indisi ile gösterilmek üzere fiber yönündeki elastisite modülü E_1^C , basma dayanımı $X_1^C (=X^C)$ ve fiber yönüne dik olan doğrultu 2 indisi ile gösterilmek üzere fiber yönüne dik doğrultudaki elastisite modülü E_2^C , basma dayanımı $X_2^C (=Y^C)$ 'nin belirlenmesi için basma yükü uygulanmıştır. Kompozitlerin deney numunelerinde hasar meydana gelene kadar bası yükü uygulanmış ve bu bası hasar yüklerinin (P_{maks}) kesit alanına bölünmesiyle basma mukavemetleri X^C ve Y^C tespit edilmiştir.

Malzeme özelliklerini belirlemek için deney sonucunda tespit edilen tanımlamalar aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

E_1^C : Fiber yönünde 0° numuneye uygulanan basma testinde gerilme-şekil değiştirme eğrisinin eğimi (σ_1/ϵ_1).

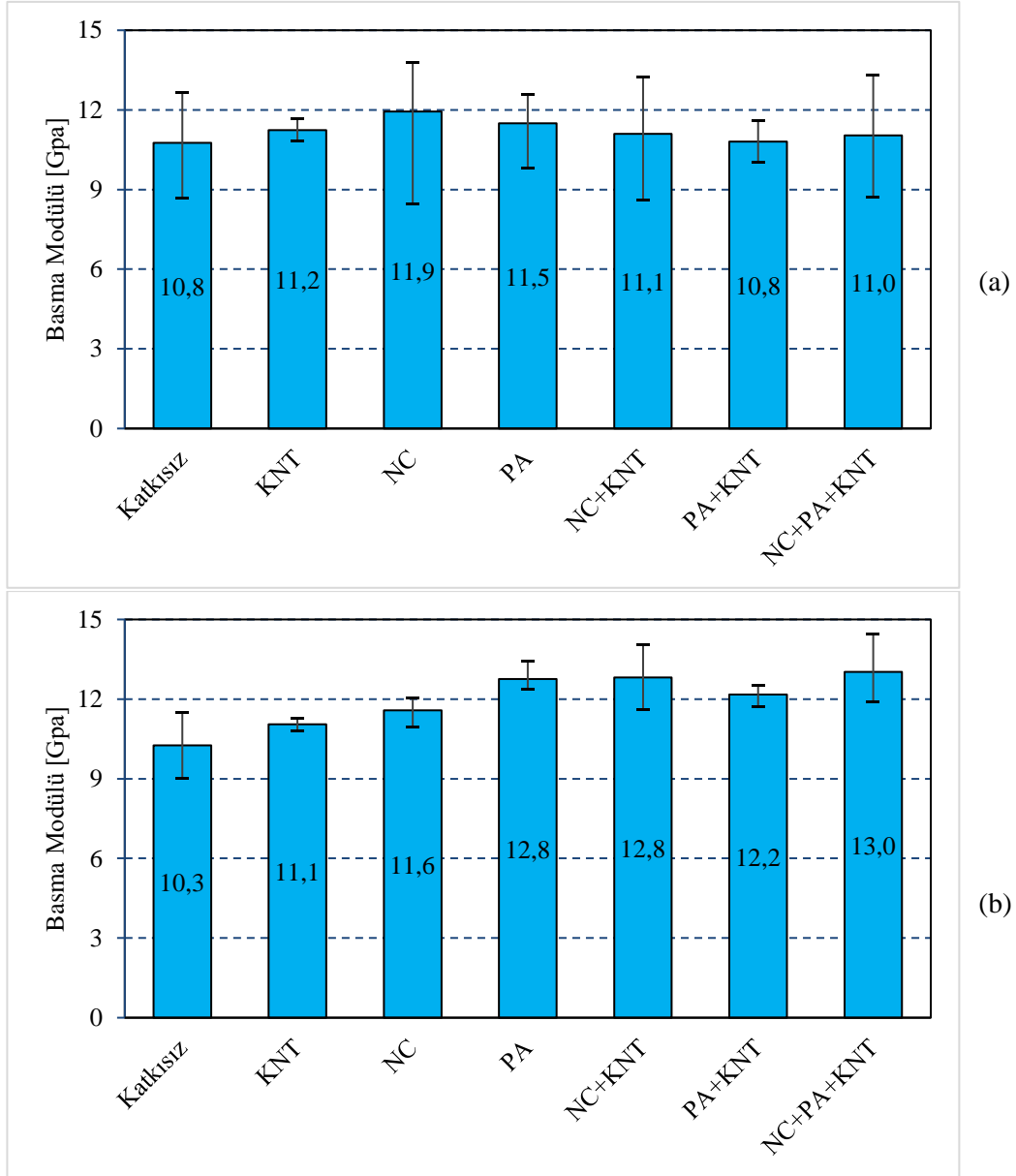
E_2^C : Fibere dik yönde 90° numuneye uygulanan basma testinde gerilme-şekil değiştirme eğrisinin eğimi (σ_2/ϵ_2).

Basma deneylerinde her bir numune için ayrı ayrı bası gerilmesi (basma dayanımı) ve basma modülü verileri elde edilerek bulunan ortalama, en büyük ve en küçük değerler verilen grafiklerde numuneler arasında karşılaştırılmıştır. Elde edilen basma deneyleri verilerin ortalamaları Tablo 3.8’de verilmiştir. Deney sonuçlarının istatistiksel analizlerinden standart sapma, varyasyon katsayısı, %95 güven aralığı ve %99 güven aralığı verileri EK B bölümünde Tablo B.15 ve Tablo B.16’da verilmiştir.

Tablo 3.8: Basma deneyi sonuçları.

Numune	1 Doğrultusu		2 Doğrultusu	
	Basma Dayanımı X^C [MPa]	Basma Modülü E_1^C [GPa]	Basma Dayanımı Y^C [MPa]	Basma Modülü E_2^C [GPa]
Katkısız	469,71	10,76	336,95	10,26
KNT	493,46	11,24	391,01	11,06
NC	479,16	11,94	407,03	11,58
PA	474,53	11,50	402,72	12,75
NC+KNT	496,60	11,10	402,96	12,81
PA+KNT	477,69	10,81	433,32	12,17
NC+PA+KNT	468,13	11,04	384,61	13,03

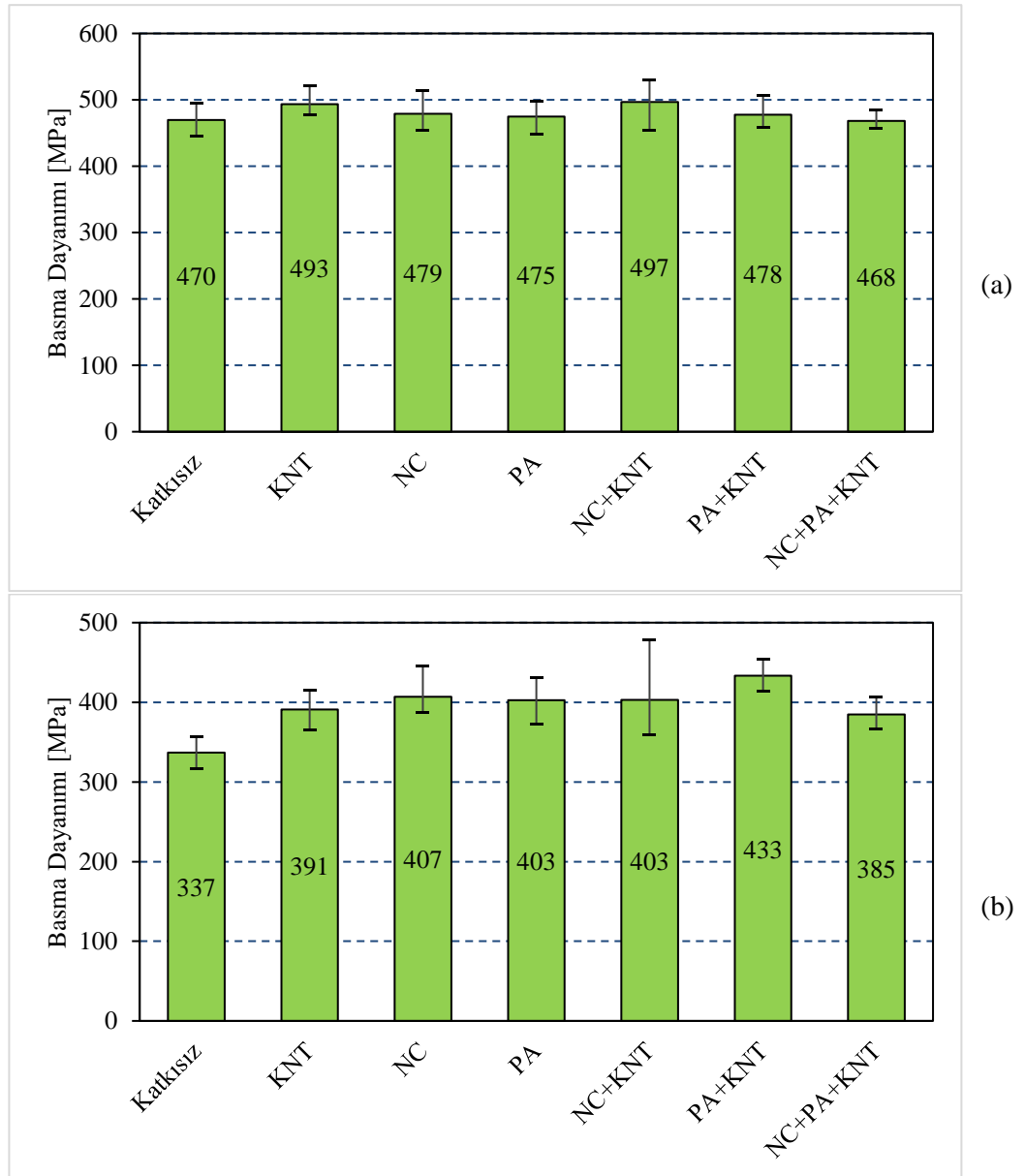
Uygulanan basma deneyleri sonucunda matrise eklenen bütün katkı maddeleri GFRP kompozitlerin basınç dayanımını artırmıştır. Elde edilen veriler grafik halinde karşılaştırılmış, 0° fiber yönünde ve 90° fibere dik yönde basma modülü karşılaştırma grafiği Şekil 3.35’te, 0° fiber yönünde ve 90° fibere dik yönde basma dayanımı karşılaştırma grafiği Şekil 3.36’da verilmiştir.



Şekil 3.35: Basma modülü grafiği a) Fiber yönünde, b) Fibere dik yönde.

Nano parçacık eklenmesi kompozitlerin basma dayanımına olumlu yönde etki etmiştir. Basma modülü katkı maddesi ilavesiyle bir miktar değişiklik göstermiştir. Şekil 3.35a’da katkısız kontrol numunesinde 10,76 GPa olarak ölçülürken sırasıyla 11,94 GPa, 11,50 GPa ve 11,24 GPa olmak üzere en yüksek basma modülü (E_1^C) değeri ağırlıkça %2 nanokil ilavesi, %2 poliamid ilavesi ve %0,3 karbon nanotüp katkılarının ayrı ayrı ilavesiyle elde edilmiştir. Bu değerleri büyüklük sırasına göre ağırlıkça %2 nanokil +%0,3 karbon nanotüp, %2 nanokil+%2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp ve %2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp ilave edilmiş nanokompozitler sırasıyla 11,10 GPa, 11,04 GPa ve 10,81 GPa olarak takip etmektedir.

Şekil 3.35b'deki grafiğe göre fibere dik doğrultudaki basma modülü (E_2^C), katkısız matrisli kontrol numunesinde 10,26 GPa iken polimer matrise ağırlıkça %2 nanokil+%2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp katkı maddesi ilave edilmiş numunede 13,03 GPa ile en yüksek değere ulaşılmıştır. Bunu, ağırlıkça %2 nanokil+%0,3 karbon nanotüp, ağırlıkça %2 poliamid ve müteakiben ağırlıkça %2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp hibrit katkı maddesi ilave edilmiş kompozit numuneler izleyerek sırasıyla 12,81 GPa, 12,75 GPa ve 12,17 GPa değerleri elde edilmiştir. Ağırlıkça %2 nanokil ve ağırlıkça %0,3 karbon nanotüp kullanılan nanokompozitlerde ölçülen basma modülü değerleri sırasıyla 11,58 GPa ve 11,06 GPa'dır.



Şekil 3.36: Basma dayanımı grafiği a) Fiber yönünde, b) Fibere dik yönde.

Şekil 3.36a incelendiğinde katkı maddesi bulunmayan kontrol numunesindeki basma dayanımı değeri 470 MPa iken matrise nanopartikül ilavesiyle yükseldiği gözlemlenen kompozitin fiber doğrultusundaki basma mukavemeti (X^C), en yüksek değere 497 MPa ile ağırlıkça %2 nanokil+%0,3 karbon nanotüp ilave edilmiş kompozit numunede ulaşmaktadır. Ağırlıkça %0,3 karbon nanotüp ilavesi ile 493 MPa hesaplanan basma dayanımı %2 nanokil ve %2 poliamid ilavesi ile sırasıyla 479 MPa ve 475 MPa olarak ölçülmüştür. Ağırlıkça %2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp katkılı numunelerde basma dayanımı 478 MPa çıkmakta iken %2 nanokil+%2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp katkı maddelerinin her üçü birlikte kullanılmasıyla hibrit katkılı kompozit numunesinin basma dayanımının 468 MPa olarak olumlu etkilendiği söylenemez.

Fibere dik doğrultudaki numunelerde yapılan testler ile elde edilen basma mukavemeti (Y^C) değişimleri Şekil 3.36b'de görülmektedir. En yüksek basma mukavemeti değeri 433 MPa ile polimer matrise ağırlıkça %2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp ilave edilmiş numunede meydana gelmiştir. Bu değeri 407 MPa ile ağırlıkça %2 nanokil ve ardından 403 MPa ile ağırlıkça %2 nanokil+%0,3 karbon nanotüp ve ağırlıkça %2 poliamid ilave edilmiş kompozit numuneleri izlemektedir. En düşük basma mukavemeti değeri ise 337 MPa olarak katkısız kontrol numunesinde elde edilmiştir. Ağırlıkça %0,3 karbon nanotüp ilave edilmiş numunede 391 MPa olan basma dayanımı %2 nanokil+%2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp katkı maddelerinin her üçü birlikte kullanılarak elde edilen hibrit katkılı kompozit numunesinde 385 MPa olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak yapılan basma deneylerinde elyaf takviyeli kompozitlerde polimer matrise nanoparçacık ilavesi ile kompozitlerin basma dayanımı ve basma modülü olumlu olarak etkilendiği gözlemlenmiştir.

3.2.3 Darbe Deneyleri

Üretilen deney numunelerine Pamukkale Üniversitesi laboratuvarlarında düşük hız darbe deneyleri uygulanmış, plakaların enerji profil diyagramları çizilerek, katkı maddelerinin ve oranlarının kompozitlere etkisi deneysel olarak saptanmıştır. Darbe deneyleri 15 J, 20 J, 25 J, 30 J ve 35 J darbe enerjisi seviyelerinde gerçekleştirilmiş,

referans olarak katkısız kontrol numunesi ve nano modifiyeli kompozit numunelerin düşük hız darbe davranışı, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman ve enerji-zaman diyagramları açısından incelenmiştir. 15 J, 20 J ve 25 J darbe enerjisi seviyelerinde vurucu uç numuneleri deforme ederek geri sekme gerçekleşir. Bu da çarpma enerjisinin tam nüfuziyet veya delinme oluşturacak kadar yüksek olmadığı anlamına gelir. Bu enerji seviyeleri için her malzeme konfigürasyonunda darbe, geri sekme ve absorbe edilen enerjiler kolaylıkla ayırt edilebilir. Kritik bir darbe enerjisi değerinden sonra kompozit plakaların delinmesi gerçekleşir. Ataş ve Sayman (2008) tarafından belirtildiği gibi numunelerin delinmesine neden olan daha yüksek enerji seviyelerinde darbe oluşumundan kaynaklanan gerçek absorbe edilen enerji değerini belirlemek için vurucu uç ile numune arasındaki delinme sonrası sürtünme etkilerinin diyagramlardan çıkarılması gerekir. Bu durum dikkate alınarak tam perforasyon (delinme) oluşana kadar 30 J ve 35 J enerji seviyelerinde testler sürdürülerek kontrol ve nano katkılı kompozit numunelerinin darbe hasar performansı ve direnci belirlenmiştir.

Aşağıdaki bölümlerde tartışılacak ve analiz edilecek olan darbe deneyi sonuçlarının bir özeti Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.9: Darbe deneyi sonuçları.

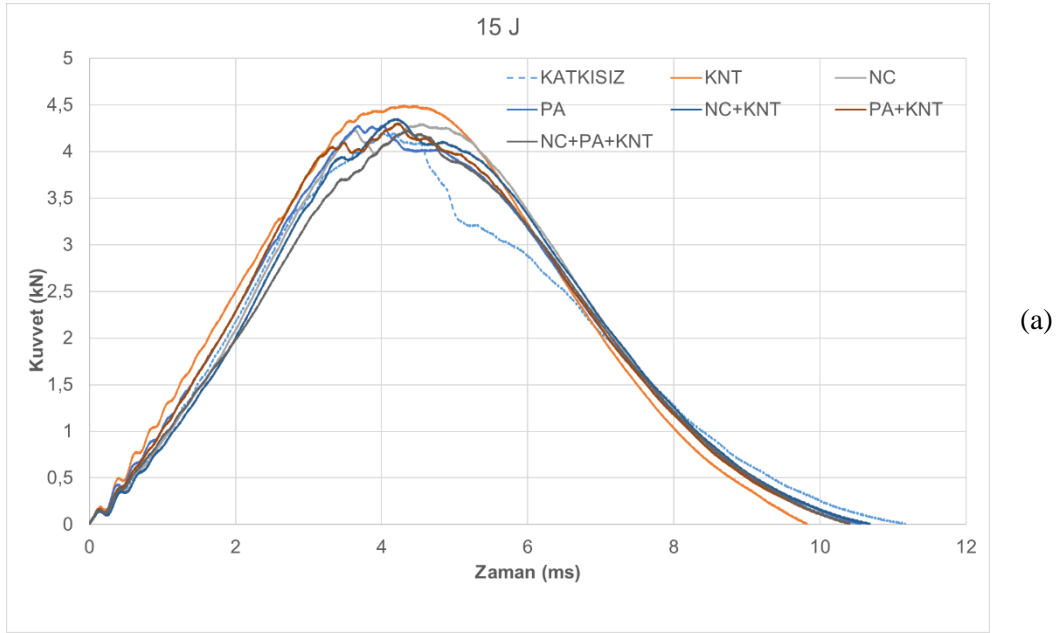
Numune	Darbe Enerjisi [J]	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.	Toplam	Toplam	Absorbe
		Kuvvet [kN]	Kuvvetteki Deplasman [mm]	Kuvvetteki Zaman [ms]	Deplasman [mm]	Deplasmandaki Zaman [ms]	Deplasman [mm]	Deplasmandaki Zaman [ms]	Edilen Enerji [J]
Katkısız	15	4,20	7,03	3,99	7,64	5,50	3,18	11,17	11,24
	20	4,58	7,77	3,68	9,25	6,34	5,00	12,91	17,47
	25	4,62	7,85	3,27	10,41	6,98	6,06	14,31	22,76
	30	5,03	7,39	2,69	11,82	8,71	8,21	18,50	28,97
	35	4,66	7,82	2,59	12,86	5,33	12,86	5,33	32,43
KNT	15	4,50	6,90	4,31	7,06	4,99	2,45	9,83	9,25
	20	4,35	7,68	3,73	8,83	5,90	4,29	11,98	16,63
	25	4,56	6,94	2,71	11,28	7,87	7,22	16,13	23,51
	30	4,52	6,98	2,47	12,32	6,28	12,32	6,28	28,32
	35	4,74	6,86	2,22	12,89	5,44	12,89	5,44	33,15

Tablo 3.9: (devam)

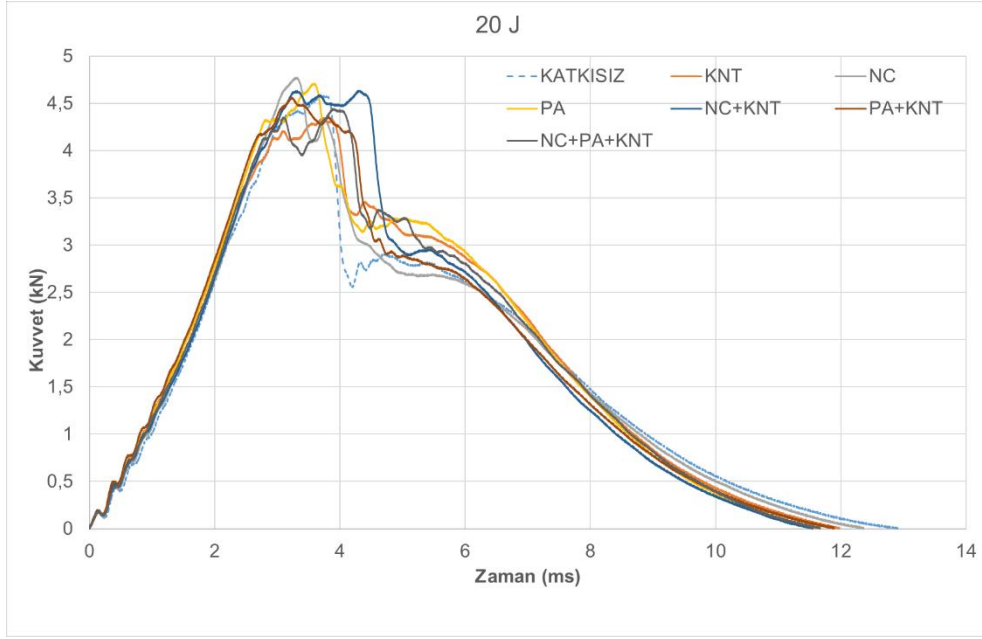
Numune	Darbe Enerjisi [J]	Maks.		Maks.		Maks.		Toplam		Absorbe Edilen Enerji [J]
		Maks. Kuvvet [kN]	Kuvveteeki Deplasman [mm]	Kuvveteeki Zaman [ms]	Maks. Deplasman [mm]	Deplasmandaki Zaman [ms]	Toplam Deplasman [mm]	Deplasmandaki Zaman [ms]		
NC	15	4,30	7,42	4,53	7,62	5,32	2,86	10,55	10,08	
	20	4,77	7,13	3,28	8,91	6,15	4,80	12,36	17,27	
	25	4,74	7,07	2,81	10,79	7,46	6,85	14,94	23,26	
	30	5,12	8,19	3,08	12,13	6,60	12,13	6,60	28,67	
	35	4,89	7,54	2,47	12,60	5,13	12,60	5,13	33,95	
PA	15	4,28	6,68	3,67	7,49	5,29	2,87	10,56	10,42	
	20	4,71	7,51	3,58	8,78	5,84	4,48	11,65	16,69	
	25	4,79	8,02	3,36	10,49	7,00	6,18	14,18	22,77	
	30	4,88	8,14	3,02	12,45	6,64	12,45	6,64	28,50	
	35	4,93	7,76	2,63	12,88	6,36	12,88	6,36	32,70	
NC+KNT	15	4,35	7,30	4,17	7,78	5,42	3,20	10,68	10,49	
	20	4,64	8,16	4,29	8,58	5,65	4,30	11,54	16,72	
	25	4,47	7,76	3,16	10,92	7,32	6,81	14,61	23,08	
	30	5,05	7,96	2,91	12,50	6,67	12,50	6,67	28,36	
	35	5,07	7,08	2,29	12,77	5,23	12,77	5,23	33,51	
PA+KNT	15	4,31	7,09	4,21	7,42	5,24	2,83	10,40	10,18	
	20	4,56	7,01	3,23	8,60	5,82	4,36	11,89	17,01	
	25	4,79	8,23	3,47	11,30	8,50	7,78	17,35	23,97	
	30	4,67	7,87	2,88	12,33	6,23	12,33	6,23	27,99	
	35	5,33	8,30	2,86	12,77	6,30	12,77	6,30	32,68	
NC+PA+KNT	15	4,23	6,91	4,34	7,20	5,31	2,79	10,41	9,84	
	20	4,44	7,86	3,88	8,82	5,87	4,65	11,67	16,81	
	25	4,70	7,93	3,31	10,31	6,80	6,02	14,03	22,83	
	30	4,84	7,00	2,51	11,69	7,90	7,59	16,40	28,60	
	35	4,68	7,54	2,49	13,36	5,81	13,36	5,81	33,86	

3.2.3.1 Kuvvet-Zaman Eğrileri

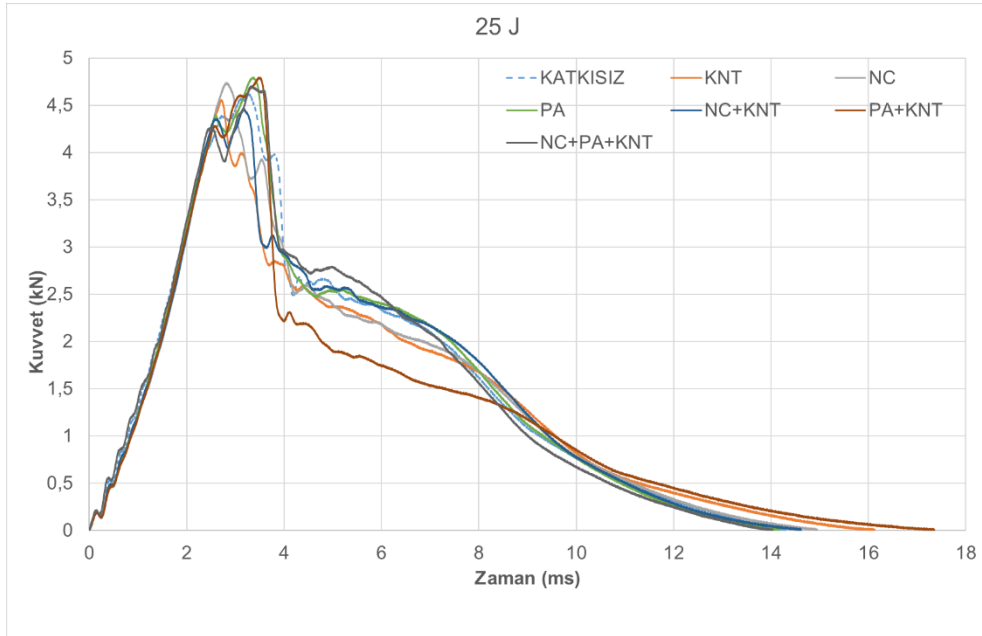
Darbe kuvveti-zaman eğrisi, numunelerin nasıl tepki verdiği ve belirli bir darbe enerjisi seviyesi altında herhangi bir önemli hasar olup olmadığına dair niteliksel göstergeler verir ve farklı numune çeşitlerinin darbe davranışını değerlendirmek ve karşılaştırmak için iyi bir göstergedir (Mahdi ve diğ. 2017). Şekil 3.37’de farklı enerji seviyelerinde darbeye maruz kalmış katkısız, poliamid, nanokil, karbon nanotüp, nanokil+nanotüp, poliamid+nanotüp ve nanokil+poliamid+nanotüp katkılı GFRE kompozit plakalara uygulanan darbe kuvvetine karşı zaman eğrileri verilmiştir. Bu eğriler, kritik bir değer olan P_{maks} 'a kadar uygulanan kuvvette düzenli bir artış ve ardından geniş matris çatlaması, fiber kırılması, delaminasyon ve büyük hasar alanı ile bağlantılı olarak rijitlikteki değişikliği gösteren ani bir düşüş sergileyerek kompozit plakalar için tipik bir davranış gösterir. Bu eğriler, darbe anında numunelerde oluşan titreşimlerden kaynaklanan elastik dalgalar nedeniyle başlangıçta bazı salınımlar da içerir. Bu titreşimler, numunelerin rijitliği ve vurucu ucun kütlesi gibi çeşitli faktörlere bağlıdır.



Şekil 3.37: Kuvvet-zaman eğrileri a) 15 J, b) 20 J, c) 25 J, d) 30 J, e) 35 J darbe enerjisinde.

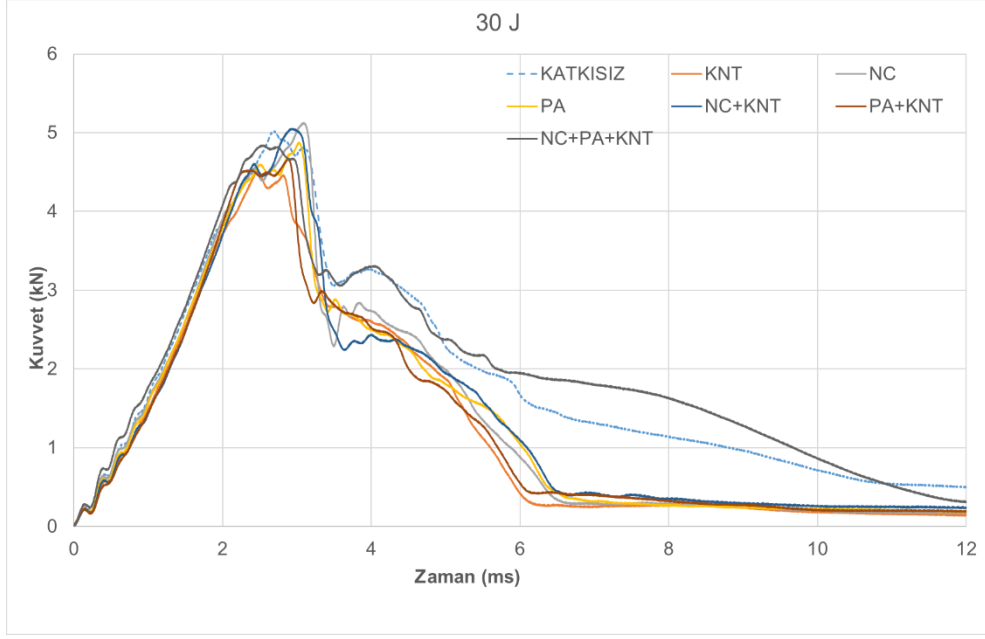


(b)

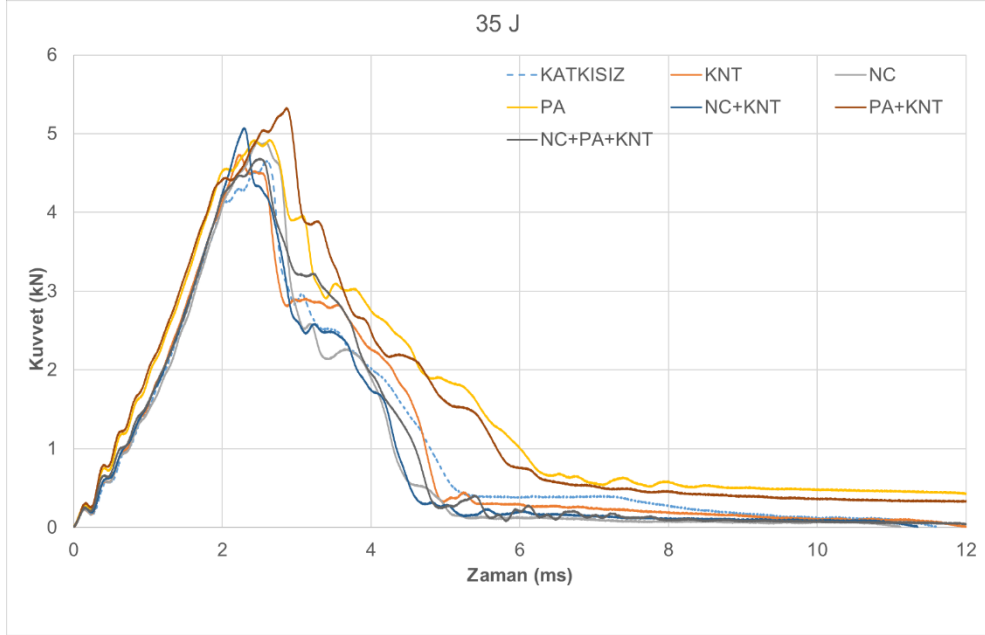


(c)

Şekil 3.37: (devam)



(d)



(e)

Şekil 3.37: (devam)

Yüklemeden önce ve sonra darbe kuvveti simetrik olduğundan, 15 J darbe enerjisi altında tüm kompozit plakalar neredeyse elastik davranış gösterir. Darbe kuvvetinde ciddi bir düşüş gözlenmemesi numunelerde oluşan hasarların plakaların rijitliğini azaltacak kadar şiddetli olmadığını gösteriyor. 20 J ve daha yüksek darbe enerjisi seviyelerinde, kompozit plakalarda önemli bir hasarı işaret eden darbe kuvvetlerinde ani düşüşler vardır. Genel olarak, maksimum darbe kuvveti, darbe enerjisi seviyesi arttıkça artar.

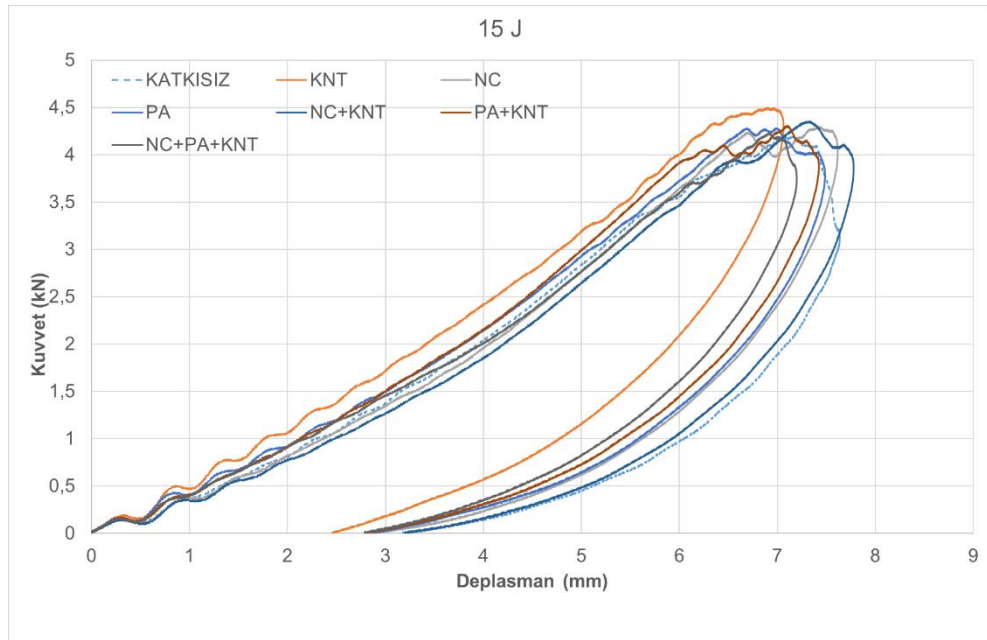
Şekil 3.37'den görülebileceği gibi 15 J'luk darbe enerjisi seviyesinde, katkısız kompozitin sergilediği maksimum reaksiyon kuvveti KNT, NC ve PA kompozitlerinden sırasıyla %7,2, %2,4 ve %1,9 daha düşüktür. Maksimum kuvvet, büyük bir hasar oluşmadan önce belirli bir darbe enerjisi seviyesi altında bir kompozit plakanın tolere edebileceği azami yük değerini temsil eder (Iqbal ve diğ 2009). Rafiq ve diğ. (2017) ve Mahdi ve diğ. (2017)'ne göre darbe direncindeki iyileşme, esas olarak nanoparçacıkların eklenmesiyle oluşturulan fiber ve matris arasındaki etkili bir yük transfer mekanizmasından ve kıvrımlı bir kırılma yörüngesinden kaynaklanmaktadır.

Nanoparçacık katkılı GFRE kompozitlerin perforasyon (delinme) eşikleri, katkısız saf epoksi kompozit plakalara kıyasla daha yüksektir. Darbe enerjisi seviyesi 30 J'da katkısız numuneler için ortalama darbe süresi 18,5 ms'dir ve nanopartikül katkılı kompozitlere kıyasla en yüksek değere sahiptir. Yüksek darbe enerjilerinde önemli ölçüde büyük lokal hasarlar nedeniyle ve yüksek darbe enerjisi ile üretilen yüksek impuls kuvveti yüzünden gerçekleşen tam perforasyon (delinme) nedeniyle numunelerde 35 J enerji seviyesinde darbe süresi aniden düşer.

3.2.3.2 Kuvvet-Deplasman Eğrileri

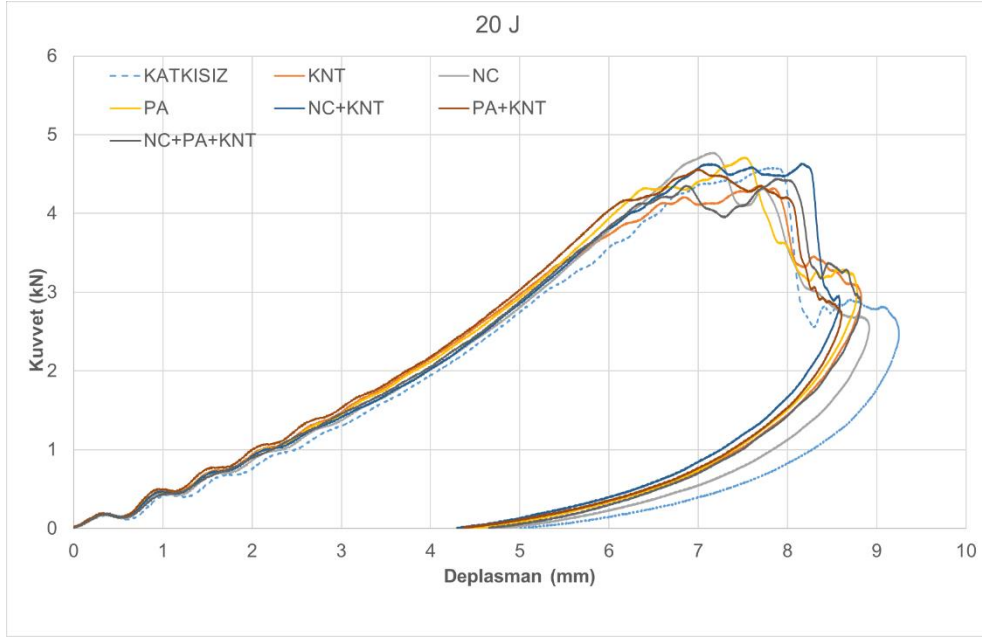
Şekil 3.38, farklı enerji seviyelerinde darbeye maruz kalan katkısız, nanokil, poliamid, karbon nanotüp, nanokil+nanotüp, poliamid+nanotüp ve nanokil+poliamid+nanotüp katkılı GFRE kompozit plakalar için darbe kuvvetine karşı deplasman eğrilerini göstermektedir. Şekil 3.38a-c'den de görülebileceği gibi, 15 J, 20 J ve 25 J darbe enerji seviyelerinde incelenen numunelerin hiçbirinde delinme (perforasyon) meydana gelmemiştir. Darbe enerjisi seviyesi arttıkça kompozit plakaların maksimum deplasmanı artmaktadır. Ayrıntılı olarak, katkısız plakanın maksimum deplasmanı 15 J ve 20 J darbe enerjilerinde sırasıyla 7,64 mm ve 9,25 mm iken nanotüp, nanokil ve poliamid katkılı plakaların maksimum deplasmanları 15 J darbe enerjisi için sırasıyla 7,06 mm, 7,62 mm ve 7,49 mm'dir. 20 J darbe enerjisi için sırasıyla 8,83 mm, 8,91 mm ve 8,78 mm'dir. Plakaların toplam (kalıcı) yer değiştirmesi için benzer gözlemler yapılabilir. Katkısız plakanın toplam deplasmanı 15 J ve 20 J darbe enerjilerinde sırasıyla 3,18 mm ve 5 mm iken nanotüp, nanokil ve poliamid katkılı plakaların toplam deplasmanları 15 J darbe enerjisi için sırasıyla 2,45 mm, 2,86 mm ve 2,87 mm'dir. 20 J darbe enerjisi için sırasıyla 4,29 mm, 4,80 mm ve

4,48 mm'dir. Düşük maksimum ve toplam deplasman, kompozitin delinmeye karşı direnme kabiliyetini gösterdiğinden, nanotüp katkıli kompozitler bu konuda en iyi performansı gösterir. Bu çıkarım, Şekil 3.38a ve 3.38b'ye bakarak doğrulanabilir. 35 J darbe enerjisinde poliamid ve poliamid+nanotüp katkıli numunelerin düşük toplam deplasman gösterdiği görülmektedir (Şekil 3.38e). Kompozite poliamid katkısının yüksek enerjilerde darbe hasarına daha fazla direndiği şeklinde yorumlanabilir. Sonuçlar genel olarak kompozitlere nanopartikül ilavesinin numunelerin darbe dayanımını arttırdığı işaret etmektedir. Rafiq ve diğ. (2017)'ne göre, darbe dayanımındaki bu iyileşme, hasar modunu interlaminardan (tabaka içi) intralaminara (tabakalar arası) değiştirebilen nanopartiküllerin ilave edilmesiyle gelişmiş arayüzey yapışmasına ve iyileştirilmiş tabakalar arası kayma mukavemetine bağlanabilir.

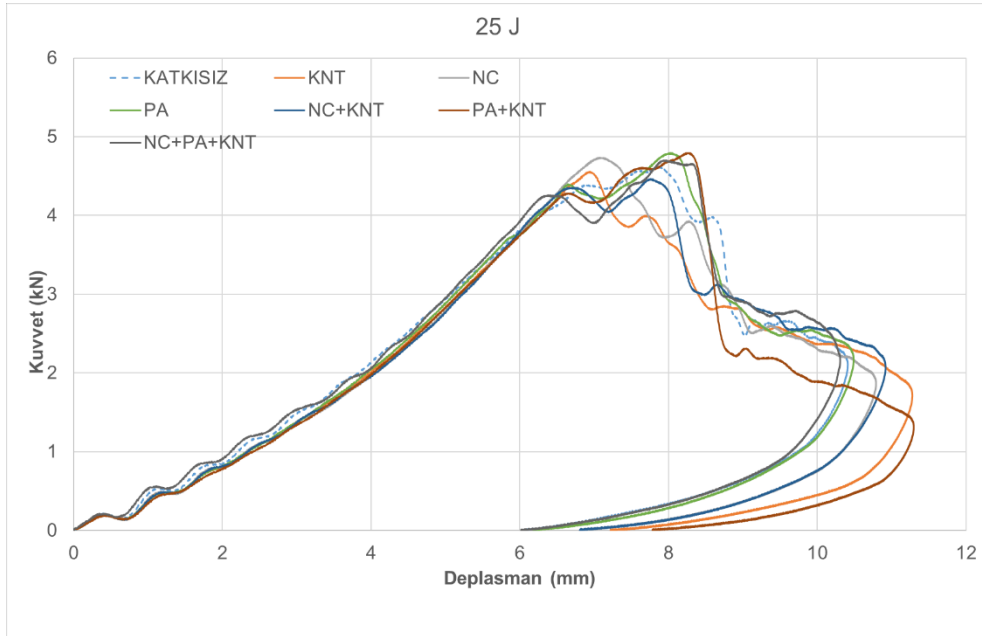


(a)

Şekil 3.38: Kuvvet–deplasman eğrileri a) 15 J, b) 20 J, c) 25 J, d) 30 J, e) 35 J darbe enerjisinde.

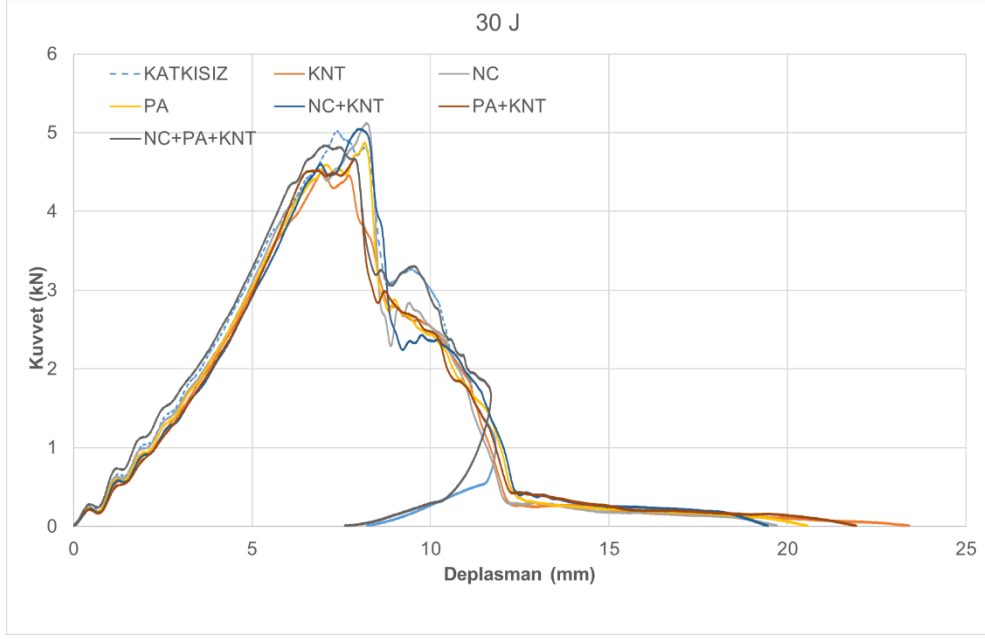


(b)

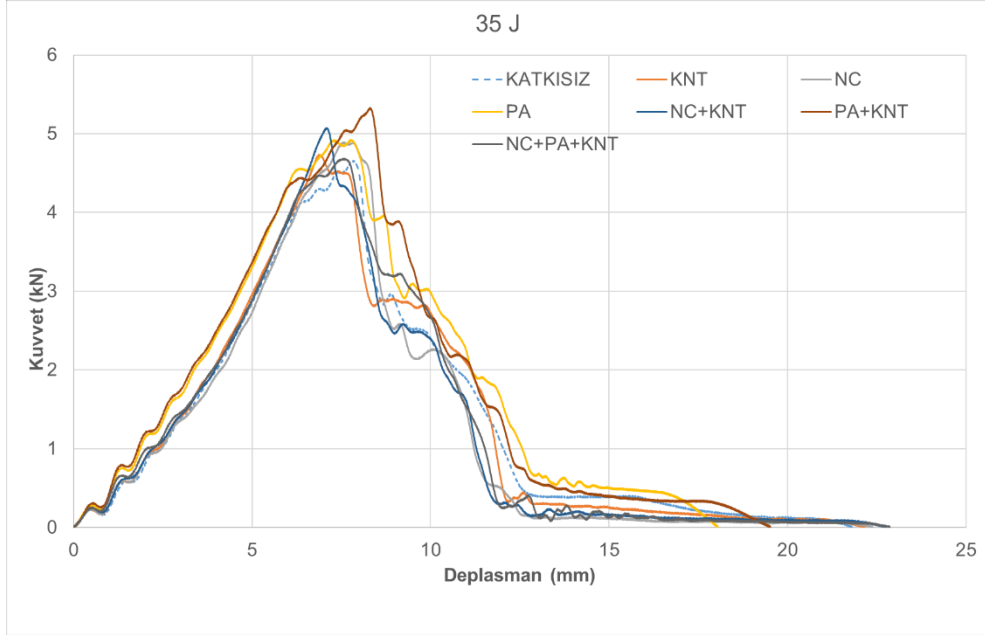


(c)

Şekil 3.38: (devam)



(d)



(e)

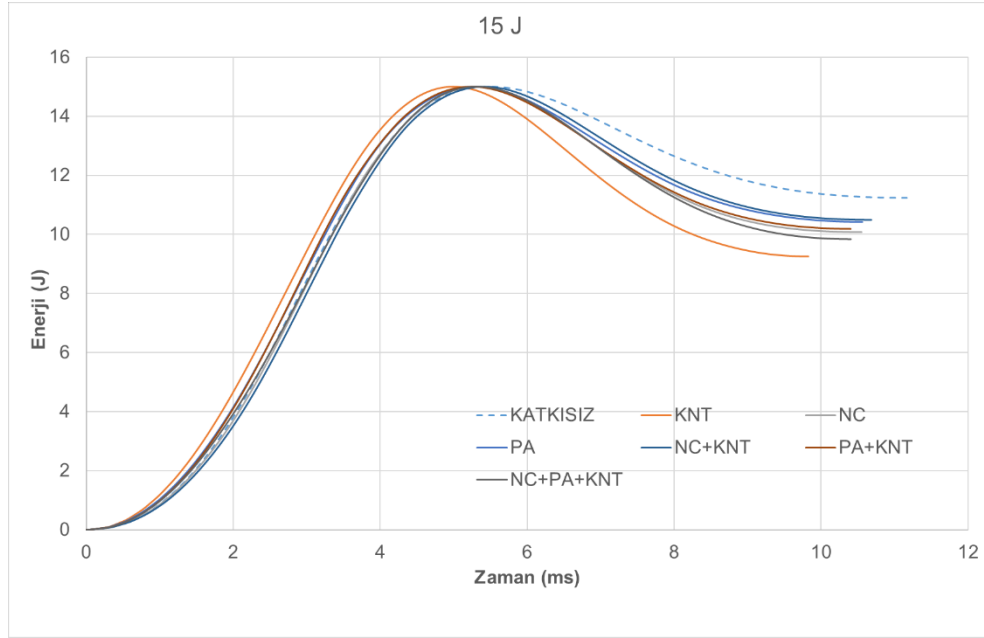
Şekil 3.38: (devam)

3.2.3.3 Enerji-Zaman Eğrileri ve Perforasyon Eşikleri

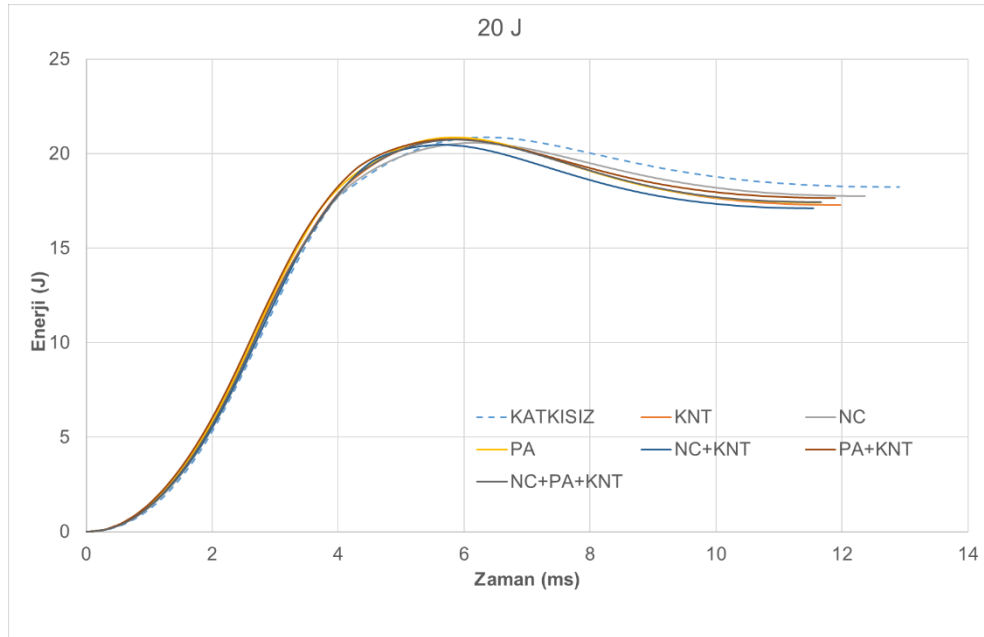
Şekil 3.39, farklı enerji seviyelerinde darbeye maruz kalan katkısız, nanotüp, nanokil, poliamid, nanokil+nanotüp, poliamid+nanotüp ve nanokil+poliamid+nanotüp katkılı GFRE kompozit plakalar için zamana karşı enerji eğrilerini göstermektedir. Genel olarak, vurucu ucun numuneden ilk kez geri sekmediği darbe enerjisi, nüfuz etme (penetrasyon) eşiği olarak bilinirken, vurucu ucun burnunun numunenin arka yüzünden ilk kez geçtiği soğurulan (absorbe edilen) enerji, delinme (perforasyon) eşiği

olarak tanımlanır. Böylece, saplanma (penetrasyon) eşiğinde vurucunun hızı sıfıra ulaşır, ancak delinme (perforasyon) eşiği için vurucunun hızı, yalnızca vurucu uç ile numune arasındaki sürtünme kuvvetlerinin etkisi ile sıfır olabilir. Numune kalınlığı vurucu ucun yarıçapından çok daha küçük olduğu için, düşük darbe enerji seviyelerinde vurucunun, her zaman geri sekerek kesin bir penetrasyon eşiği veya spesifik bir enerji seviyesine ulaşarak numuneyi deldiği gözlemlenmemiştir. Vurucunun numuneden yüksekliği ile belirlenen toplam darbe enerjisi, elastik enerji ve absorbe edilen enerjiye bölünür. Elastik enerji numunede depolanır ve vurucu ucun geri sekmesi için kullanılır. Enerji-zaman eğrisinin düzleşmeye başladığı an, vurucu ve numune arasındaki temasın ayrılması ile çakışmaktadır, dolayısıyla bu özgül enerji, hasar oluşumu olarak numune tarafından soğurulan enerjiyi gösterir (Rafiq ve diğ. 2017, Reis ve diğ. 2012). Şekil 3.39a ve Şekil 3.39b'de görüldüğü gibi 15 J ve 20 J darbe enerjisi seviyelerinde test edilen numunelerin hiçbirinde perforasyon (delinme) görülmemekte ancak darbe enerjisi seviyesi arttıkça elastik enerjisi azalmakta ve bu da daha yüksek hasar oluşumunu göstermektedir. Katkısız numune, 30 J darbe enerji seviyesinde delinme eşiğine yakındır. 15 J ve 20 J darbe enerjisi seviyesinde nanotüp katkılı plakalarda absorbe edilen enerjinin en düşük, nanopartikül katkılı plakalarda ise katkısız plakalara göre daha düşük olduğu, buna karşın 25 J ve 30 J darbe enerjisi seviyelerinde katkısız plakalarda absorbe edilen enerjinin nano katkılı plakalara göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Darbe enerjisi seviyesi 35 J'a ulaştığında, poliamid ve poliamid+nanotüp katkılı numune haricindeki diğer bütün numunelerde delinme meydana gelmiştir. Bu enerji seviyesi için enerji eğrisi maksimum bir değer göstermez, ancak sonrasında belirli bir enerji düzeyine (delinme eşiği) ulaşıldığında, delinme işleminden sonra vurucu uç ile numune arasında oluşan sürtünme kuvvetleri yoluyla enerjinin dağılması nedeniyle eğrinin sonuna kadar istikrarlı bir şekilde artar. Bu nedenle, düz çizginin başlangıç çarpışma olayının tamamlandığını gösterir ve bu noktadaki enerji numune tarafından absorbe edilen enerjiyi gösterir. Delinme eşiğinden daha yüksek darbe enerjileri için, absorbe edilen enerji hemen hemen aynı kalır ve bu da numuneye daha fazla hasar verilemeyeceğini gösterir. Sonuç olarak, 35 J darbe enerjisi seviyesinde enerji-zaman eğrisinin davranışında önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Şekil 3.39e'de enerji eğrilerinin yataya gitmeye başladığı 5 ms'de katkısız, nanotüp, nanokil, nanokil+nanotüp katkılı GFRE plakalar için delinme eşikleri 27-28 J aralığında iken poliamid ve poliamid+nanotüp katkılı numunelerde 31-32 J civarında bulunmuştur. Poliamid katkılı GFRE kompozit plakalar katkısız

kompozit plakaya göre yaklaşık %13,4, poliamid+nanotüp katkıli GFRE kompozit plakalar, katkısız kompozit plakaya göre yaklaşık %16 artışla darbe direnci ve yüksek darbe enerjisi seviyelerinde enerji dağılımı açısından en iyi performansı göstermiştir.

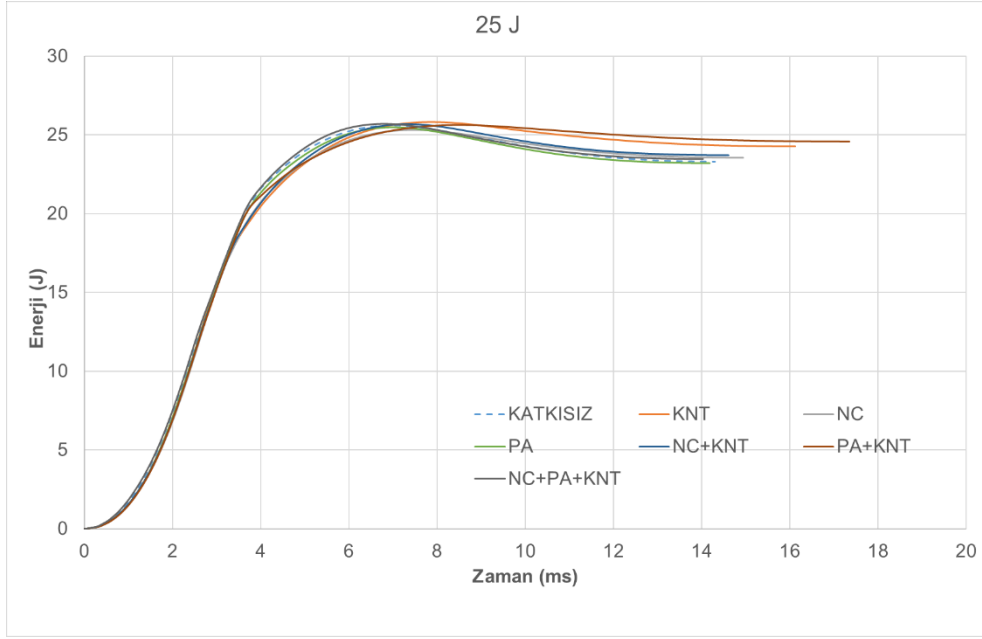


(a)

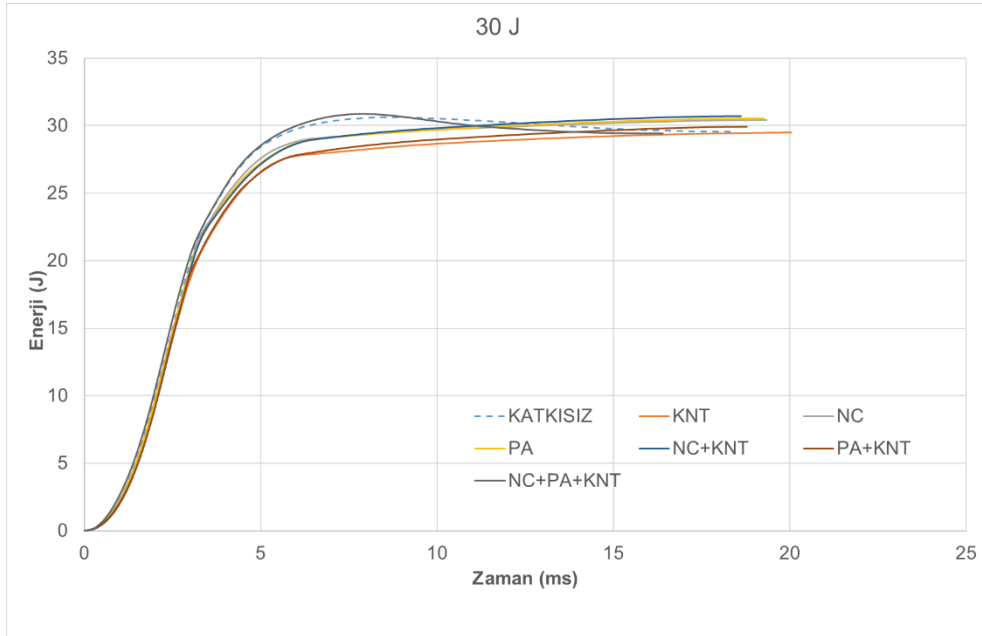


(b)

Şekil 3.39: Enerji–zaman eğrileri a) 15 J, b) 20 J, c) 25 J, d) 30 J, e) 35 J darbe enerjisinde.

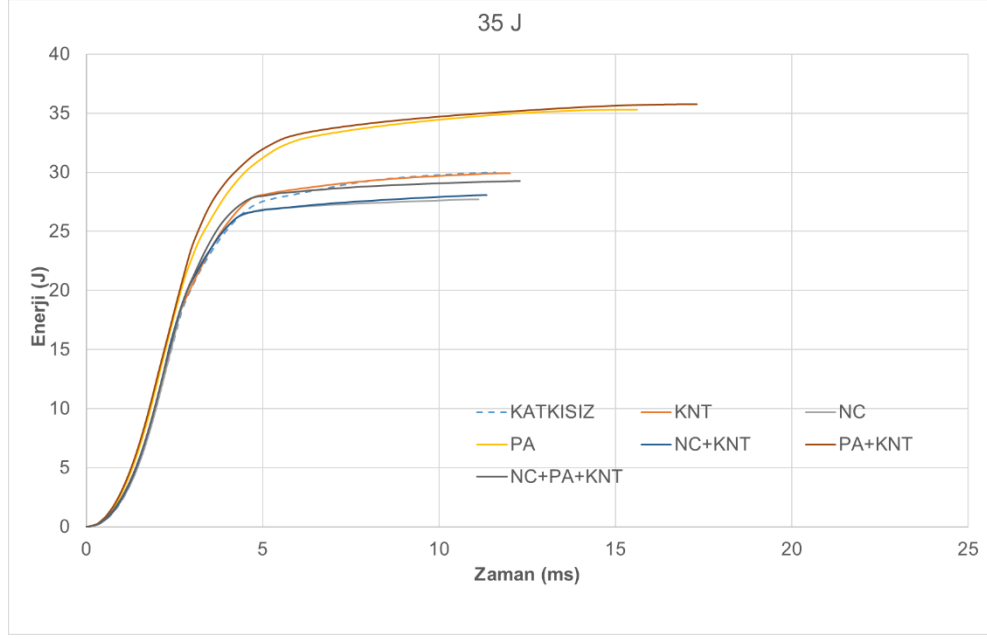


(c)



(d)

Şekil 3.39: (devam)

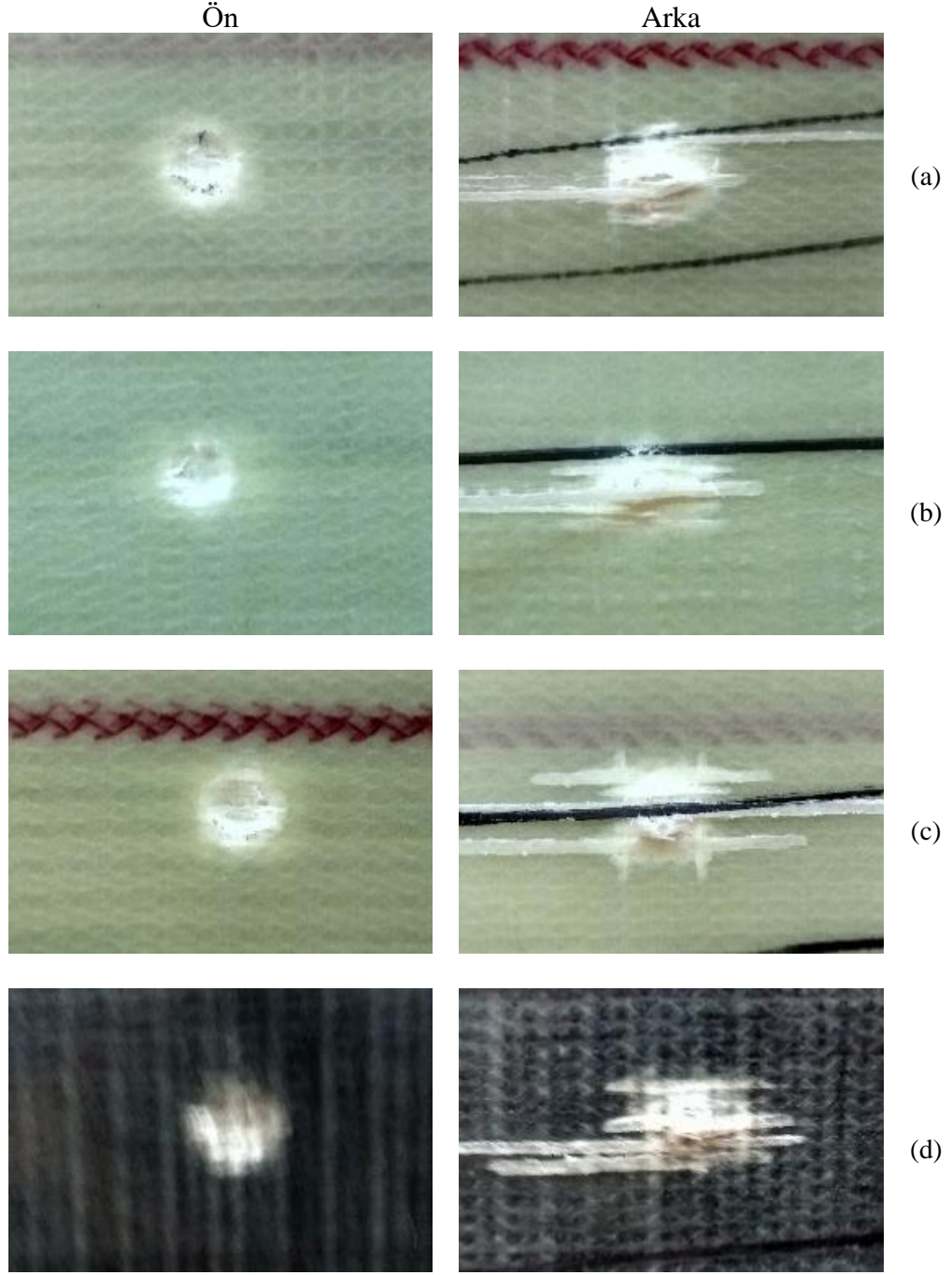


(e)

Şekil 3.39: (devam)

3.2.3.4 Fiziksel Hasarın Karakterizasyonu

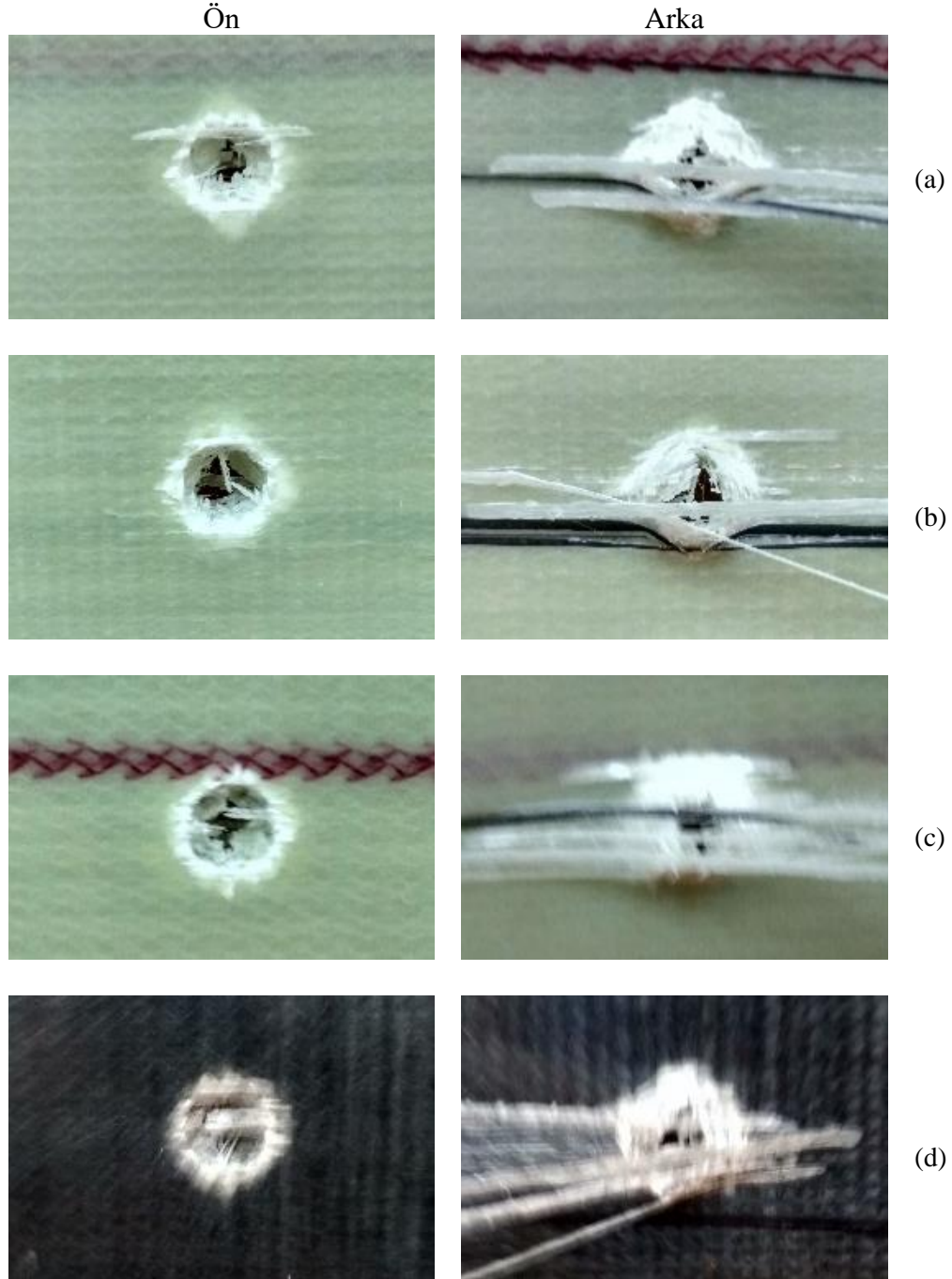
Şekil 3.40 ve Şekil 3.41, sırasıyla 20 J ve 35 J enerji seviyelerinde darbeye maruz kalmış katkısız ve nano katkılı kompozitlerin ön ve arka yüzlerinin görüntülerini göstermektedir. Genel olarak, kompozit plakalara verilen darbe hasarları; tabakaların ayrılması (delaminasyon), matris çatlaması, lif kırılması, lif ayrılması ve lif kopması ile bağlantılı olarak tabaka içi ve tabakalar arası hasarlar olarak kategorize edilebilir (Mahdi ve diğ. 2017, Fakhreddini ve diğ. 2021). Şekil 3.40 ve Şekil 3.41'den görüleceği üzere, darbe uygulanmış plakaların ön taraftaki hasarlı alanlara kıyasla arka tarafında daha büyük hasarlı alanlar gözlenmiştir. Çünkü delaminasyon ilk önce orta düzlemde oluşur ve numunenin çekme tarafında (arka kısım) devam eder (Avila ve diğ. 2007). Şekil 3.40a-d'ye bakıldığında, 20 J darbe enerjisi seviyesinde, katkısız ve nano katkılı numunelerin çarpma noktasından dışarıya doğru yayılan esas olarak matris çatlaması, lif kopması ve delaminasyon şeklinde benzer hasar kalıpları gösterdiği görülmektedir. Bu da matris çatlaması, lif kopması ve delaminasyon gibi hasarların oluşumu yoluyla yaklaşık olarak aynı miktarda enerjinin dağıldığını gösterir. Bu durum, katkısız plakalarda biraz daha yüksek olmak üzere tüm plakaların hemen hemen aynı miktarda absorbe edilen enerji sergilediği, enerji zaman profillerine (Şekil 3.39b) bakarak da doğrulanabilir.



Şekil 3.40: 20 J enerji seviyesinde darbeye uğramış kompozit plakaların ön ve arka yüzlerinin görüntüleri a) Katkısız, b) Poliamid, c) Nanokil, d) Karbon nanotüp katkılı.

Ancak Şekil 3.41a-d'den görüleceği üzere, darbe enerjisi seviyesi 35 J'a yükseldikçe, GFRE kompozitlerine nanopartiküllerin eklenmesiyle hasar modu tabaka içinden tabakalar arasında değişmektedir. Nanopartiküllerin eklenmesi, tabakaiçi kayma mukavemetini artırır. Düşük darbe enerjisi seviyelerinde vurucu ucun plakaya nüfuziyeti ihmal edilebilir olduğundan, tabaka içi kayma mukavemetindeki iyileşme, hasar modunu tabaka içinden tabakalar arasında değiştiren yüksek darbe enerjisi seviyelerinde daha net gözlemlenebilir. Katkısız plaka, çarpma noktasında meydana

gelen matris çatlaması, fiber kırılması ve kenar delaminasyonu açısından lokalize hasar göstermektedir. 35 J'de darbe alan PA, NC ve KNT nanokatlı kompozitler, matris çatlaması, lif kopması ve lif kırılması açısından daha büyük hasar alanı göstermiştir. Bu enerji seviyesi için, PA katlı kompozit plaka tarafından absorbe edilen enerji en yüksektir.



Şekil 3.41: 35 J enerji seviyesinde darbeye uğramış kompozit plakaların ön ve arka yüzlerinin görüntüleri a) Katkısız, b) Poliamid, c) Nanokil, (d) Karbon nanotüp katlı.

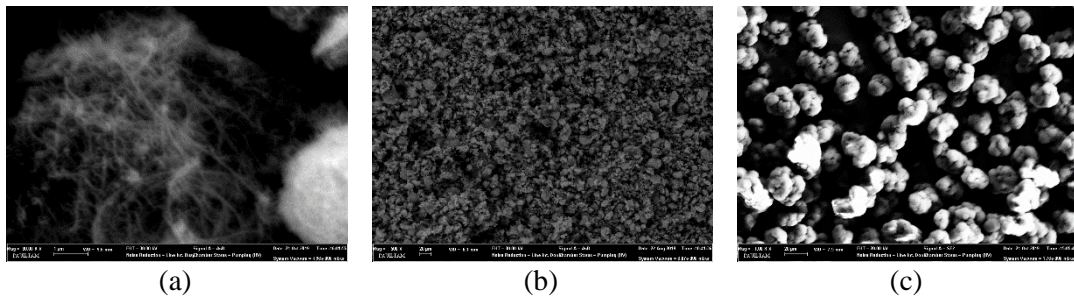
35 J darbe enerjisi seviyesinde kontrol (katkısız), KNT, NC ve PA katkılı numunelerde tam delinme meydana geldiği ve NC ve KNT katkılı numunelerde hasar mekanizmasındaki değişikliklerden dolayı geniş bir alanda matris çatlaması, lif kopması ve lif ayrılması hasarları gösterdiğini belirtmek gerekir. 20 J darbe enerjisi seviyesinde tüm kompozit tiplerinin toplam hasar alanları yaklaşık olarak birbirine eşittir. Darbe enerjisi seviyesi 35 J'a yükseldikçe, nanokatlı plakalar katkısız numuneye kıyasla daha büyük hasar alanları göstermiştir.

Genel olarak, nano katkılı plakalar, kompozit malzemenin darbe davranışını ve hasar mekanizmalarını değiştiren darbe dayanımı açısından katkısız numunelere kıyasla daha iyi performans göstermektedir. Yüksek enerji seviyelerinde, kontrol numunesinde kalınlık yönünde büyük deformasyonlara yol açan çarpma noktası bölgesinde ciddi hasarlar gözlenmektedir. Öte yandan, nano partiküllerin varlığı, epoksi reçinesinin kırılma davranışını artırarak hasarın kalınlık yönünden ziyade düzlem içi yönde yayılmasına neden olmaktadır.

3.2.4 SEM Görüntüleri

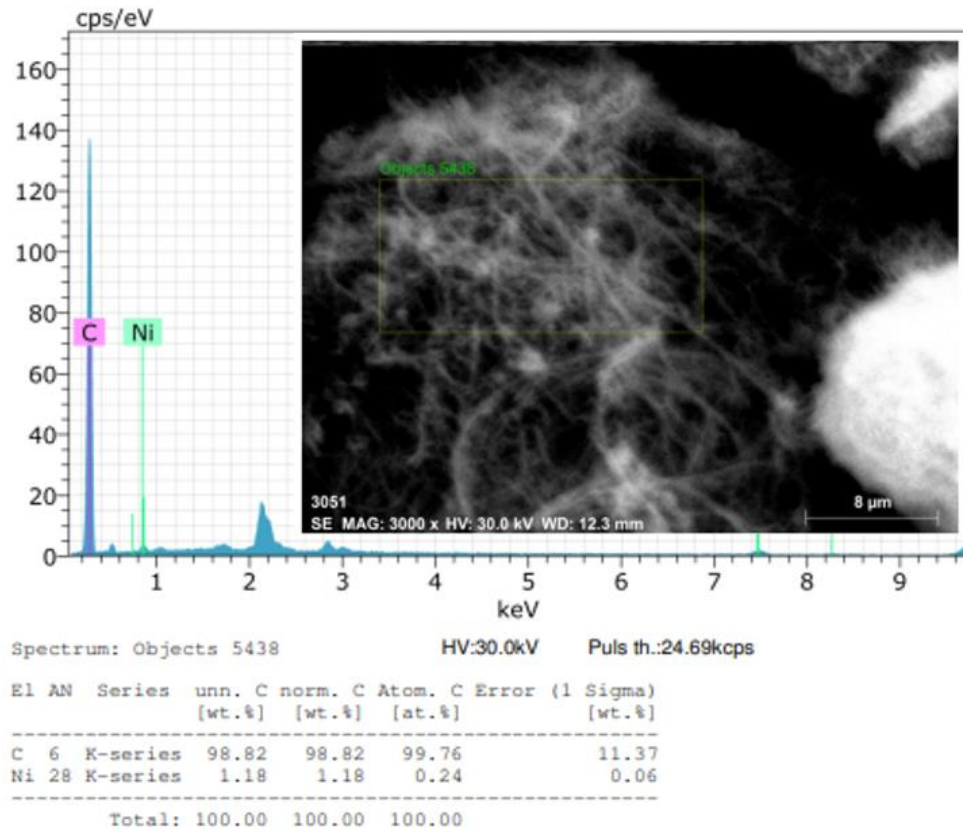
ZEISS marka Supra 40VP model alan emisyon taramalı elektron mikroskobu ile içyapı incelemesi her numunede 100X, 500X ve 3000X büyütmelemlerde 20-30 kV voltajda AsB dedektör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm numunelerin enerji dağılımlı X-ışını analizleri yapılmıştır.

Karbon nanotüp, nanokil ve poliamid parçacıklarının SEM görüntüleri Şekil 3.42'de verilmiştir.



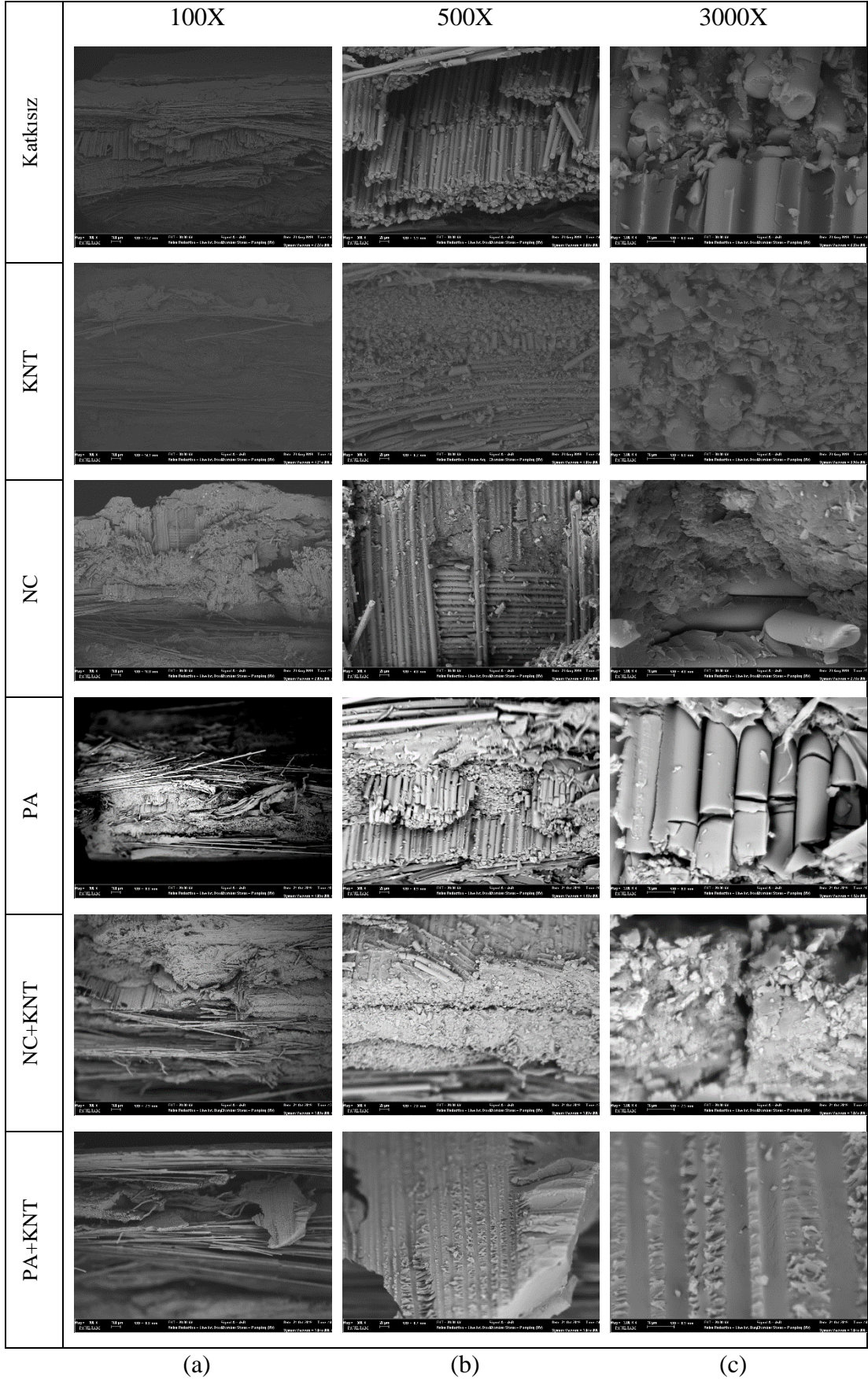
Şekil 3.42: SEM görüntüleri a) Karbon nanotüp, b) Nanokil, c) Poliamid partikülleri.

Karbon nanotüp parçacıklarının EDX analizi Şekil 3.43'te verilmiştir. Karbon nanotüp, karbon elementinin uzunluk-çap oranı $28 \times 10^6:1$ olan allotropudur. Çok katmanlı (çoklu duvarlı) karbon nanotüpler nanoteknolojide C60 molekülü ark buharlaştırmayla karbon elementinin allotropu olan grafitten yapay olarak üretilir. MWCNT'ler iç içe yerleştirilmiş birkaç grafen tüpten oluşur. Karbon atomundan oluşan bir grafen katmanının silindir şeklinde bükülerek uçlarının birleştirildiği ve grafen içerisindeki bağlarından oluşturulduğu düşünülürse EDX analizinde yoğun C piki görüldüğü anlaşılabilir.

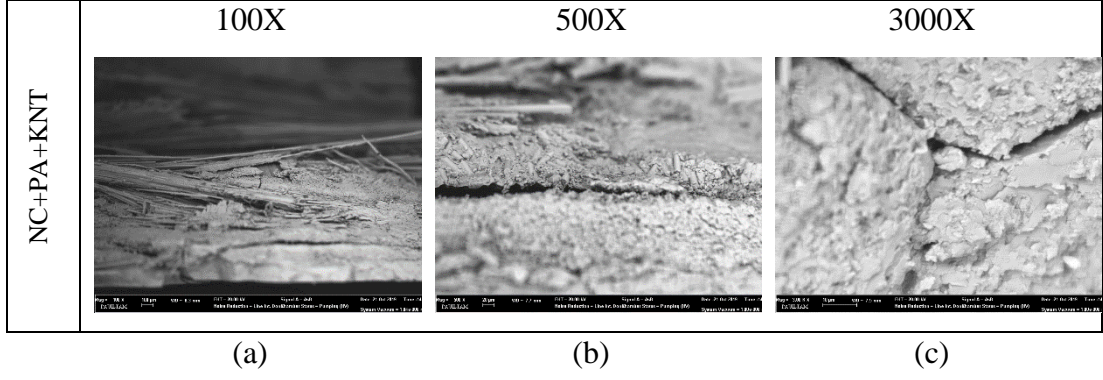


Şekil 3.43: Karbon nanotüp parçacıklarının EDX analizi.

Şekil 3.44'te iki eksenli kıvrımsız dikişli cam elyaf takviyeli epoksi nanokompozitlerin 100X, 500X ve 3000X büyütmelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. 100X büyütmede fiber oryantasyonları ve kırılma yüzeyleri görülmektedir. 500X büyütmede fiber kopmaları, fiber ayrılmaları ve matris çatlakları belirginleşmiştir. Daha büyük büyütmelerde fiber kopmaları, fiber ayrılmaları ve derin yarıklar belirgin bir şekilde görülürken; NC, NC+KNT ve NC+PA+KNT kompozitlerinde reçineye karıştırılmış nanopartiküllerin varlığı görülmektedir.

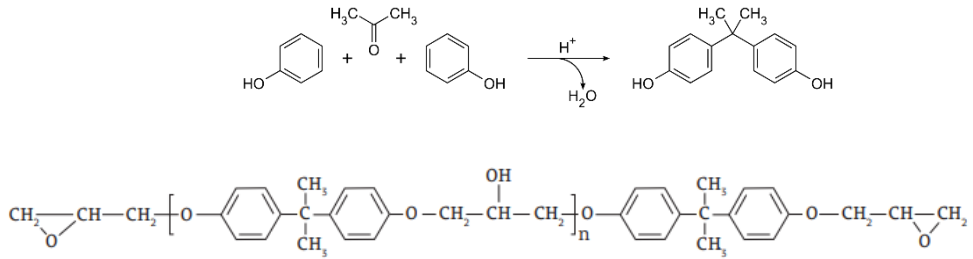


Şekil 3.44: Nanokompozitlerin SEM görüntüleri a) 100X, b) 500X, c) 3000X büyütmede.

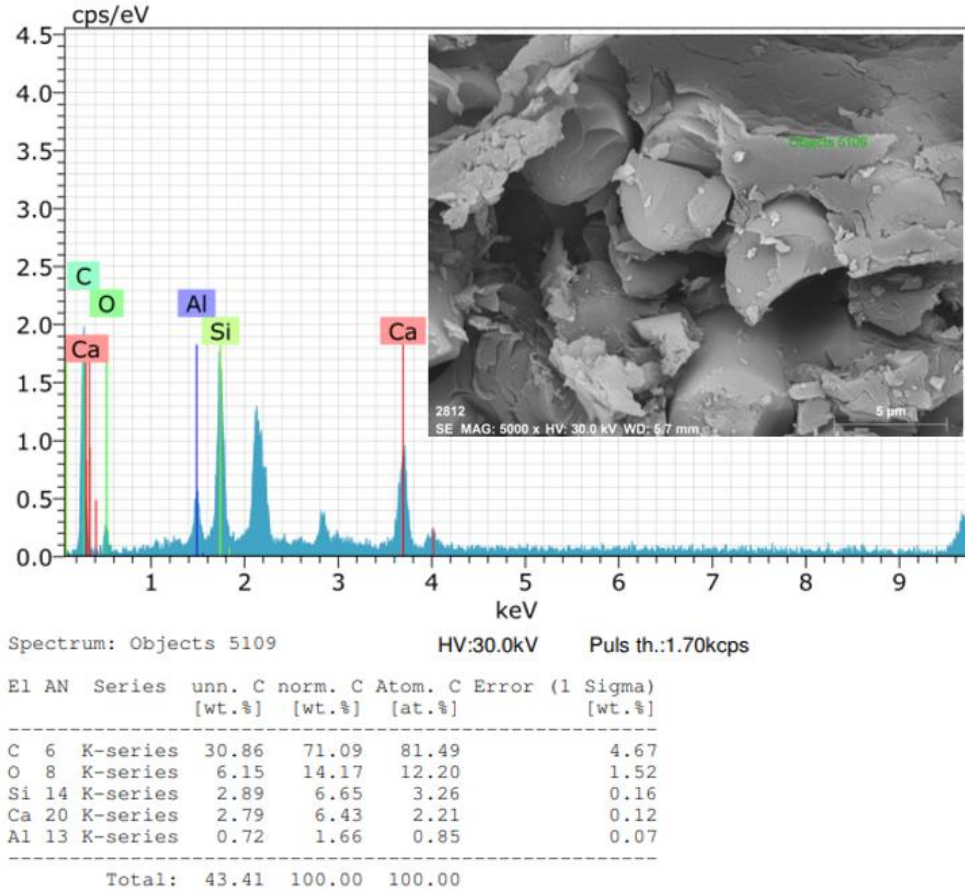


Şekil 3.44: (devam)

Tekstil sınıfı cam elyaflar 1720 °C’de eriyen silika kumundan yapılıdır. Takviye malzemesi olarak kullanılan E-camı SiO₂ (silika), Al₂O₃ (alüminyum oksit veya alümina) ve CaO (kalsiyum oksit veya sönmüş kireç) içeren bir bileşimle alkali dirençli olarak geliştirilmiştir. Matris olarak kullanılan karbon, hidrojen ve oksijenden oluşan bisfenol-A (BPA) epoksi reçine (Şekil 3.45)’ye takviye elemanı olarak cam elyaftan oluşan katkısız iki eksenli kıvrımsız dikişli cam elyaf takviyeli epoksi kompozit numunesinin Şekil 3.46’daki EDX analizinde yüksek C, O ve düşük Si, Ca ve Al pikleri görülmüştür.

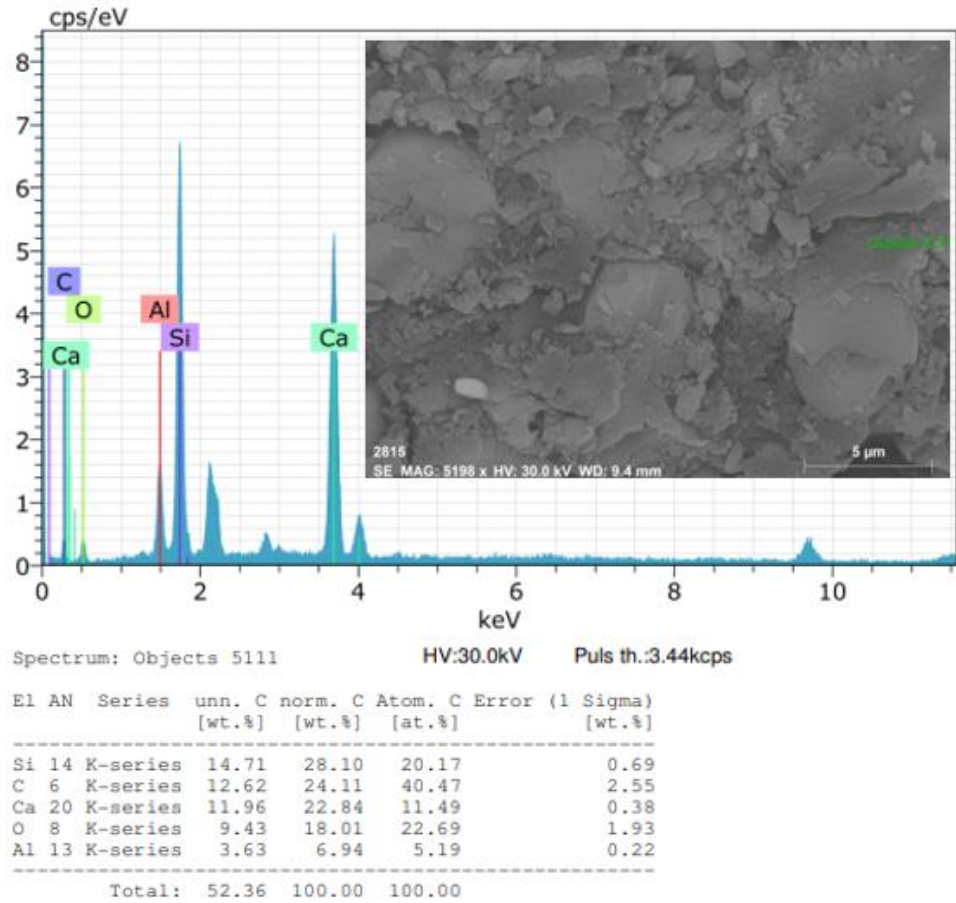


Şekil 3.45: Bisfenol-A diglisidil eter (DGEBA) epoksi reçinesinin kimyasal sentezi.



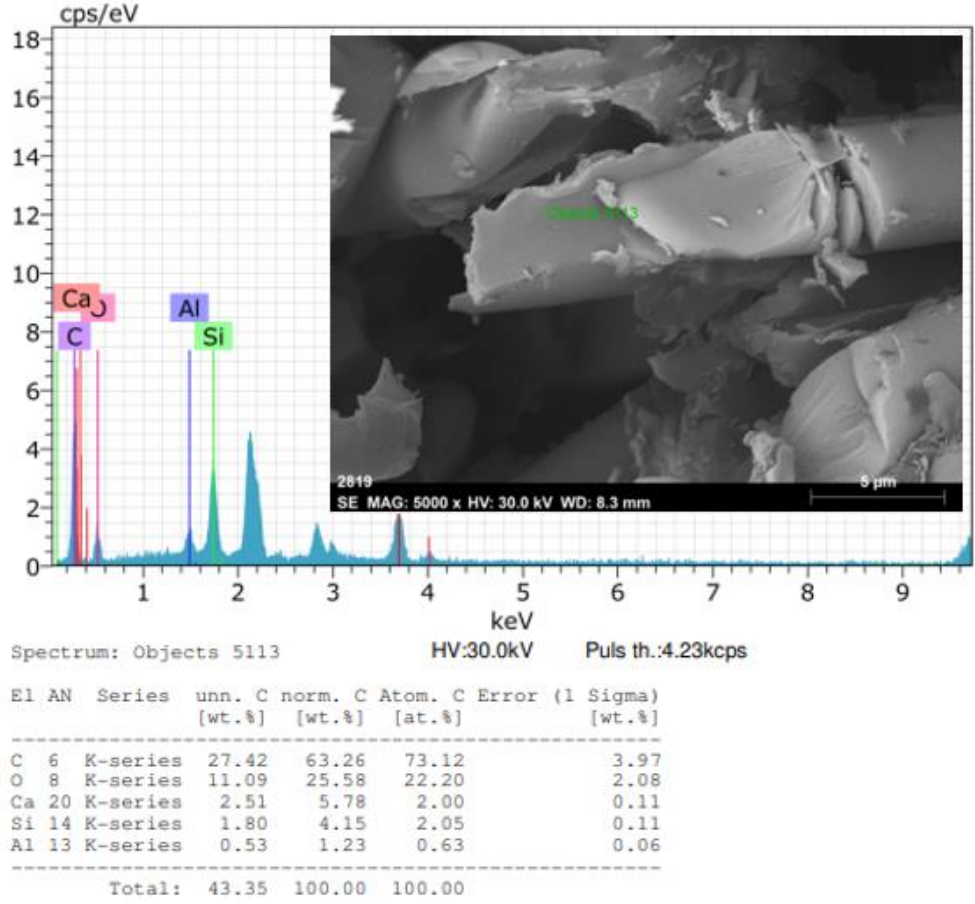
Şekil 3.46: Katkısız deney numunesinin EDX analizi.

Benzer şekilde C, O, Si, Ca ve Al piklerinden oluşan KNT numunesinin EDX analizi Şekil 3.47’da verilmiştir. Karbon nanotüp partikülleri ultrasonik karıştırıcı yardımıyla epoksi matrise homojen olarak dağıtılmıştır.



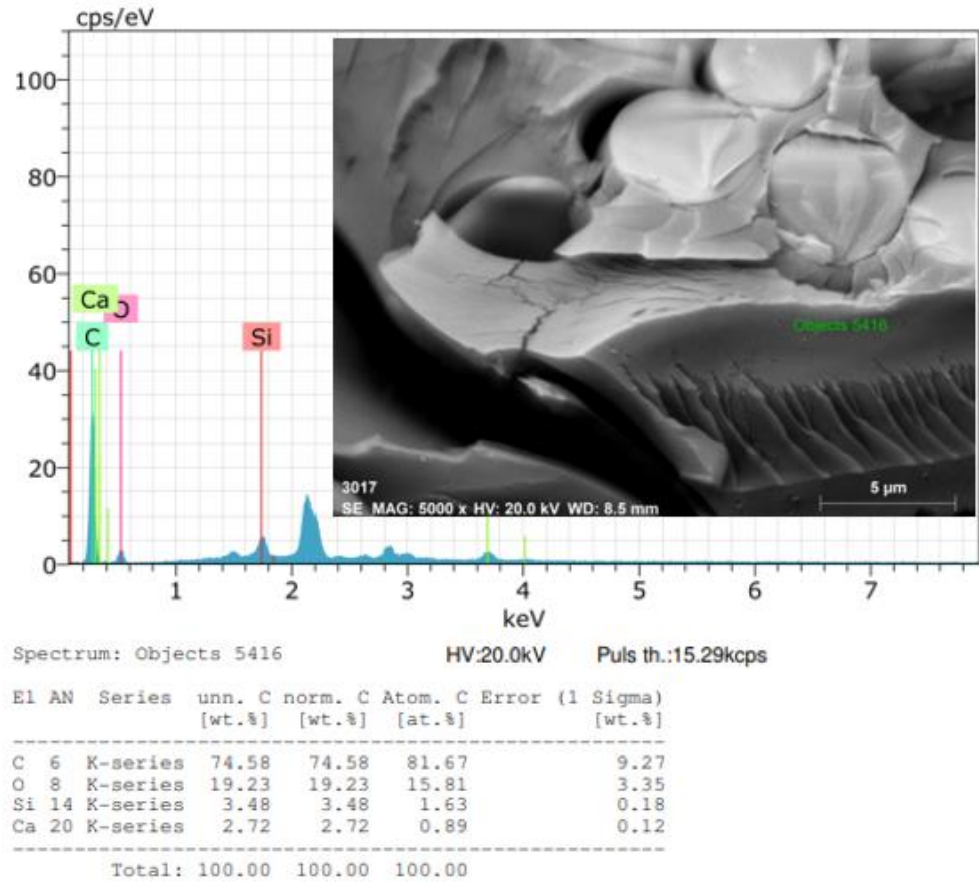
Şekil 3.47: KNT numunesinin EDX analizi.

NC numunesinin EDX analizi Şekil 3.48’de verilmiştir. Epoksi reçine matrisi CH₃ monomerinden oluştuğu için EDX analizinde yüksek oranda C ve O pikleri bulunmaktadır. Kompozite %2 nanokil ilavesinde içeriğinde bulunan metal oksitler, metal ve oksijen atomları olarak EDX analizinde kendini göstermektedir.



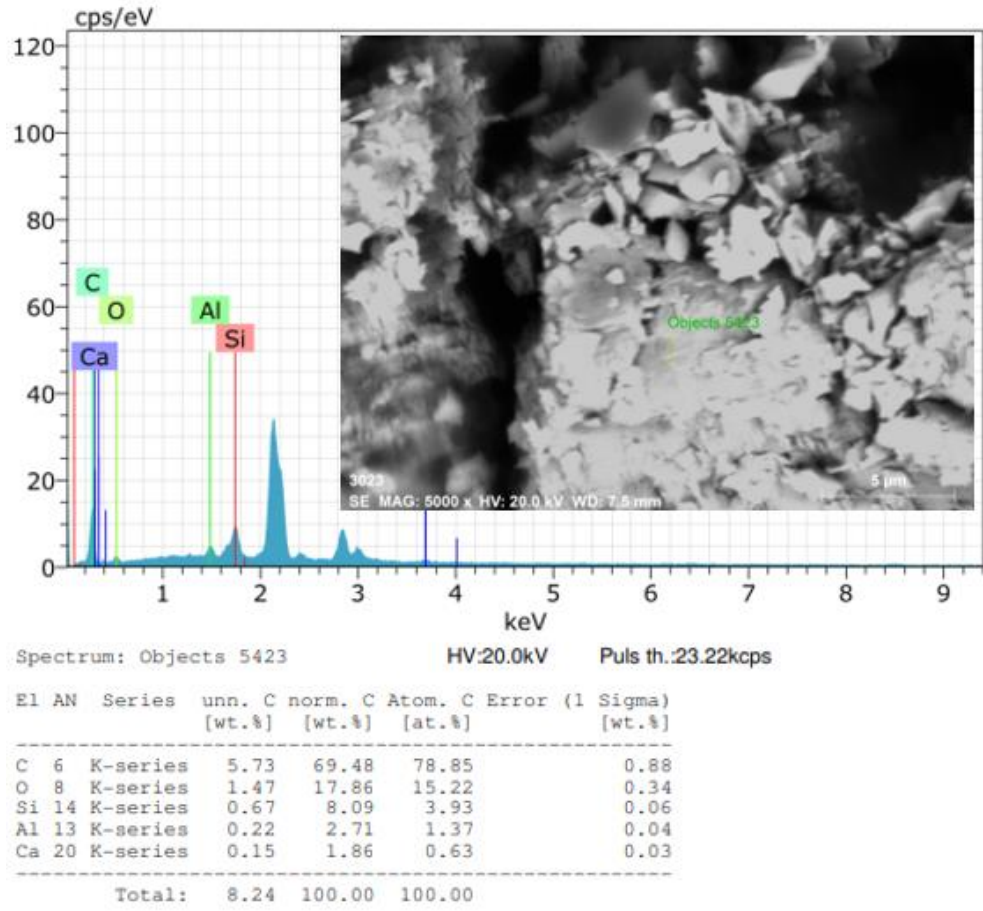
Şekil 3.48: NC numunesinin EDX analizi.

Şekil 3.49’da PA numunesinin EDX analizi gösterilmiştir. PA12 (polidolaktam) yarı kristalin kristalli termoplastik bir malzemedir. Polimerizasyon için temel hammaddesi bütadiendir. Poliamid 12, bir termoplastik elastomer (TPE) materyali olan PA12 segmenti ve bir polieter segmenti (polieter blok amit) içeren bir blok polimerdir. Poliamidler, amid birimler içeren uzun zincir polimerlerdir (N-H-C=O). Bu polimerler, bir asidin amit ile polimerizasyonundan elde edilmektedir.



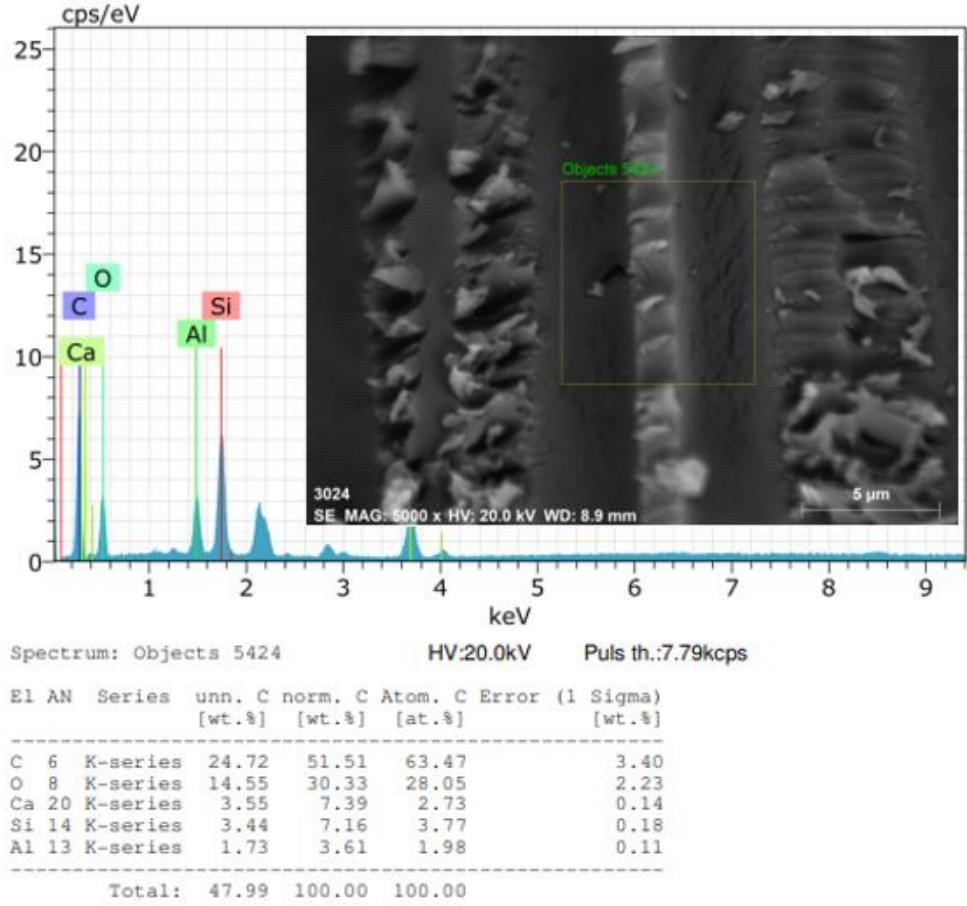
Şekil 3.49: PA numunesinin EDX analizi.

Şekil 3.50’de NC+KNT numunesinin EDX analizi gösterilmiştir. Nanokil ve karbon nanotüpün karıştırılmasıyla C, O, Si, Al ve Ca pikleri elde edilmiştir.



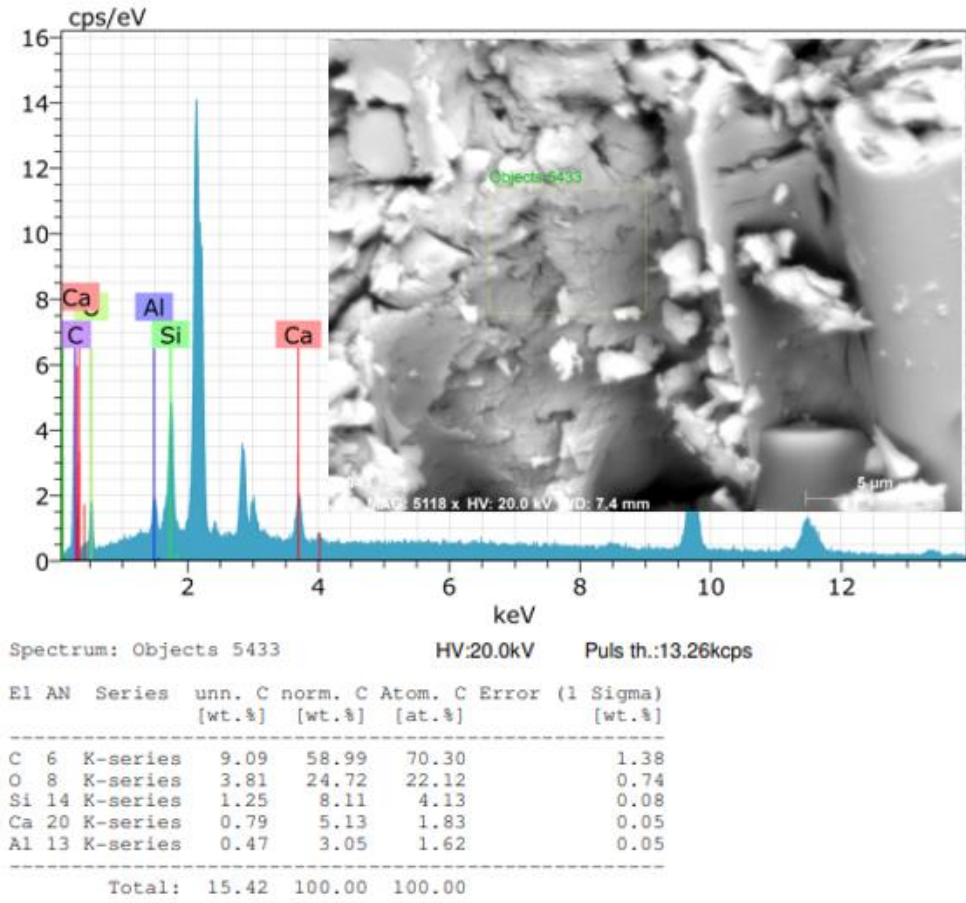
Şekil 3.50: NC+KNT numunesinin EDX analizi.

Şekil 3.51’de PA+KNT numunesinin EDX analizi gösterilmiştir. Poliamid ve karbon nanotüpün karıştırılmasıyla C, O, Si, Ca ve Al pikleri elde edilmiştir.



Şekil 3.51: PA+KNT numunesinin EDX analizi.

Şekil 3.52’de NC+PA+KNT numunesinin EDX analizi gösterilmiştir. Kompozite ağırlıkça %2 nanokil+%2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp parçacıkları karıştırılmasıyla C, O, Si, Ca ve Al pikleri elde edilmiştir.



Şekil 3.52: NC+PA+KNT numunesinin EDX analizi.

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, içerisine ağırlıkça farklı miktarlarda katkı maddesi ilave edilerek üretilen cam elyaf takviyeli kompozitler malzemelerin mekanik özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Organik interkalasyonlu nanokil, poliamid 12 küresel toz ve karbon nanotüp katkı maddelerinin GFRE kompozitlerinin mekanik özellikleri ve düşük hızlı darbe özellikleri üzerindeki etkileri, çekme, basma, burkulma ve ağırlık düşürme darbe deneyleri ile incelenmiştir. Nanokompozitler, prepreg ve sıcak presleme teknikleri kullanılarak üretilmiştir. Ağırlık oranları %2'ye kadar farklı oranlarda olan nanopartiküller, bir ultrasonik sonikatör ile epoksi reçine-sertleştirici karışımı içinde dağıtılmıştır. Karşılaştırma amacıyla katkı maddesi içermeyen kontrol numuneleri de üretilmiştir. Plakaların kuvvet, çökme ve enerji eğrilerini belirlemek için 10 J ile 45 J arasında değişen farklı darbe enerjisi seviyeleri kullanılmıştır. Plakaların darbe hasarı özelliklerini belirlemek için kompozit numunelerde meydana gelen fiziksel hasarlar da incelenmiştir.

4.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, katkı maddelerinin cam elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerine olan etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Organik interkalasyonlu nanokil, poliamid 12 küresel toz ve karbon nanotüp katkı maddelerinin GFRE kompozitlerinin mekanik özellikleri ve düşük hızlı darbe özellikleri üzerindeki etkileri, çekme, basma, burkulma ve ağırlık düşürme darbe deneyleri ile incelenmiştir. Nanokompozitler, prepreg ve sıcak presleme teknikleri kullanılarak üretilmiştir. Ağırlık oranları %2'ye kadar farklı oranlarda olan nanopartiküller, bir ultrasonik sonikatör ile epoksi reçine-sertleştirici karışımı içinde dağıtılmıştır. Karşılaştırma amacıyla katkı maddesi içermeyen kontrol numuneleri de üretilmiştir. Plakaların kuvvet, çökme ve enerji eğrilerini belirlemek için 10 J ile 45 J arasında değişen farklı darbe enerjisi seviyeleri kullanılmıştır. Plakaların darbe hasarı özelliklerini belirlemek için kompozit numunelerde meydana gelen fiziksel hasarlar da incelenmiştir.

Düz dokuma GFRP kompozitlerinin çekme mukavemeti poliamid, nanokil ve poliamid+nanokil ilavesi ile sırasıyla yaklaşık %27, %20 ve %11 oranında artarken,

çekme modülü ise %24, %27 ve %9 oranında artmıştır. GFRP kompozitlerin basma dayanımı sırasıyla poliamid, nanokil ve poliamid+nanokil ile yaklaşık %9, %2 ve %10 artarken, basma modülü %15, %16 ve %9 artmıştır. Kritik burkulma yükü sırasıyla poliamid, nanokil ve poliamid+nanokil ile yaklaşık %5, %3 ve %3 artarken, burkulma modülü yaklaşık %3 oranında artmıştır.

Özetle ağırlıkça %2 poliamid ilave edilerek üretilen kompozit malzemeler, çekme mukavemetinde %27'lik bir gelişme ve çekme modülünde %24'lük bir iyileşme göstermiştir. Ağırlıkça %1 poliamid+%1 nanokil eklenmesiyle basma mukavemetinde %10, basma modülünde %9 iyileşme görülmüştür. Ayrıca ağırlıkça %2 poliamid eklenmesiyle burkulma mukavemetinde %5, burkulma modülünde %3 iyileşme görülmüştür.

Diğer taraftan kıvrımsız dikişli kumaş takviye edilmiş kompozit malzemelerde ise fiber yönünde çekme mukavemeti (X^T), katkısız referans numunesine kıyasla ağırlıkça %0,3 karbon nanotüp, %2 nanokil ve %2 poliamid katkı maddelerinin ayrı ayrı ilave edilmesiyle 427 MPa'dan sırasıyla 454 MPa, 453 MPa ve 462 MPa'a yükseldiği, ağırlıkça %2 nanokil+%0,3 karbon nanotüp, %2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp ve %2 nanokil+%2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp katkı maddelerinin hibrit olarak ilave edilmesiyle sırasıyla 477 MPa, 488 MPa ve 435 MPa'a ulaştığı görülmektedir.

Fiber doğrultusuna dik yönde en yüksek çekme mukavemeti değeri de %0,3 karbon nanotüp katkılı kompozit numunede elde edilmiştir. Katkısız referans numunesine kıyasla ağırlıkça %0,3 karbon nanotüp, %2 nanokil ve %2 poliamid katkı maddelerinin ayrı ayrı ilave edilmesiyle kompozit numunelerin fibere dik yönde çekme mukavemeti (Y^T) 362 MPa'dan sırasıyla 418 MPa, 413 MPa ve 418 MPa'a artmış, ağırlıkça %2 nanokil+%0,3 karbon nanotüp, %2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp ve %2 nanokil+%2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp katkı maddelerinin hibrit olarak ilave edilmesiyle sırasıyla 415 MPa, 372 MPa ve 380 MPa'a kadar iyileşme göstermiştir.

Matrise ağırlıkça %0,3 karbon nanotüp ilavesinin kompozitlerin çekme dayanımlarında anlamlı bir iyileşme sağladığı literatüre paralel olarak tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, karbon nanotüple birlikte nanokil ve/veya poliamid katkısı

kullanıldığında olumsuz yönde etki etmesine rağmen her durumda matrise katkı maddesi ilavesi ile kompozitlerin çekme mukavemetinde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir.

Kıvrımsız dikişli elyaf takviyeli kompozitlerin fiber yönünde E-modülü (E_1^T) ise kontrol numunesindeki değeri 21,45 GPa iken ağırlıkça %0,3 karbon nanotüp ilavesinin 21,57 GPa ile en yüksek değeri verdiği, bu değeri ağırlıkça %2 nanokil ve %2 poliamid katkı maddelerinin ayrı ayrı ilavesinin sırasıyla 21,51 GPa ve 20,63 GPa değerleri ile izlediği, ağırlıkça %2 nanokil+%0,3 karbon nanotüp, %2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp ve %2 nanokil+%2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp katkı maddelerinin hibrit olarak ilave edilmesiyle sırasıyla 20,99 GPa, 19,66 GPa ve 21,05 GPa olarak ölçülmüştür.

Bu kompozitlerin fibere dik yönde E-modülü (E_2^T) değeri, katkısız referans numunesinde 16,23 GPa olarak ölçülmüş olup, ağırlıkça %0,3 karbon nanotüp ilavesiyle 19,09 GPa olmak üzere en yüksek değer elde edildiği, bu değeri ağırlıkça %2 nanokil+%2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp, %2 nanokil ve %2 nanokil+%0,3 karbon nanotüp katkı maddeleri ilavesiyle sırasıyla 18,79 GPa, 18,75 GPa ve 18,52 GPa olmak üzere izlediği son olarak ağırlıkça %2 poliamid ve %2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp ilavesiyle sırasıyla 17,98 GPa ve 16,05 GPa değerleri elde edilmiştir.

Nano parçacık eklenmesi kıvrımsız dikişli cam elyaf takviyeli kompozitlerin basma dayanımına da olumlu yönde etki etmiştir. Katkı maddesi bulunmayan kontrol numunesindeki basma dayanımı değeri 470 MPa iken matrise nanopartikül ilavesiyle yükseldiği gözlemlenen kompozitin fiber doğrultusundaki basma mukavemeti (X^C), en yüksek değere 497 MPa ile ağırlıkça %2 nanokil+%0,3 karbon nanotüp ilave edilmiş kompozit numunede ulaşmaktadır. Ağırlıkça %0,3 karbon nanotüp ilavesi ile 493 MPa hesaplanan basma dayanımı %2 nanokil ve %2 poliamid ilavesi ile sırasıyla 479 MPa ve 475 MPa olarak ölçülmüştür. Ağırlıkça %2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp katkılı numunelerde basma dayanımı 478 MPa çıkmakta iken %2 nanokil+%2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp katkı maddelerinin her üçü birlikte kullanılmasıyla hibrit katkılı kompozit numunesinin basma dayanımının 468 MPa olarak olumlu etkilendiği söylenemez.

Kıvrımsız dikişli cam elyaf takviyeli kompozitlerin basma modülü de katkı maddesi ilavesiyle bir miktar değişiklik göstermiştir. Katkısız kontrol numunesinde 10,76 GPa olarak ölçülürken sırasıyla 11,94 GPa, 11,50 GPa ve 11,24 GPa olmak üzere en yüksek basma modülü (E_1^C) değeri ağırlıkça %2 nanokil ilavesi, %2 poliamid ilavesi ve %0,3 karbon nanotüp katkılarının ayrı ayrı ilavesiyle elde edilmiştir. Bu değerleri büyüklük sırasına göre ağırlıkça %2 nanokil +%0,3 karbon nanotüp, %2 nanokil+%2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp ve %2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp ilave edilmiş nanokompozitler sırasıyla 11,10 GPa, 11,04 GPa ve 10,81 GPa olarak takip etmektedir.

İki eksenli kıvrımsız dikişli takviyeli kompozitlerin fibere dik doğrultudaki elde edilen basma mukavemeti (Y^C) değişimleri de olumlu yönde kendisini göstermektedir. En yüksek basma mukavemeti değeri 433 MPa ile polimer matrisle ağırlıkça %2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp ilave edilmiş numunede meydana gelmiştir. Bu değeri 407 MPa ile ağırlıkça %2 nanokil ve ardından 403 MPa ile ağırlıkça %2 nanokil+%0,3 karbon nanotüp ve ağırlıkça %2 poliamid ilave edilmiş kompozit numuneleri izlemektedir. En düşük basma mukavemeti değeri ise 337 MPa olarak katkısız kontrol numunesinde elde edilmiştir. Ağırlıkça %0,3 karbon nanotüp ilave edilmiş numunede 391 MPa olan basma dayanımı %2 nanokil+%2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp katkı maddelerinin her üçü birlikte kullanılarak elde edilen hibrit katkılı kompozit numunesinde 385 MPa olarak belirlenmiştir.

Fibere dik doğrultudaki basma modülü (E_2^C), katkısız matrisli kontrol numunesinde 10,26 GPa iken polimer matrisle ağırlıkça %2 nanokil+%2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp katkı maddesi ilave edilmiş numunede 13,03 GPa ile en yüksek değere ulaşılmıştır. Bunu, ağırlıkça %2 nanokil+%0,3 karbon nanotüp, ağırlıkça %2 poliamid ve müteakiben ağırlıkça %2 poliamid+%0,3 karbon nanotüp hibrit katkı maddesi ilave edilmiş kompozit numuneler izleyerek sırasıyla 12,81 GPa, 12,75 GPa ve 12,17 GPa değerleri elde edilmiştir. Ağırlıkça %2 nanokil ve ağırlıkça %0,3 karbon nanotüp kullanılan nanokompozitlerde ölçülen basma modülü değerleri sırasıyla 11,58 GPa ve 11,06 GPa'dır.

Böylece kıvrımsız dikişli cam elyaf takviyeli kompozitlerde polimer matrisle nanoparçacık ilavesi ile kompozitlerin basma dayanımı ve basma modülünün olumlu olarak etkilendiği söylenebilir.

İki eksenli kırımsız dikişli kompozitlerin darbe davranışları incelendiğinde 15 J'luk darbe enerjisi seviyesinde katkısız kompozitin sergilediği maksimum reaksiyon kuvveti KNT, NC ve PA kompozitlerinden sırasıyla %7,2, %2,4 ve %1,9 daha düşüktür. Nanoparçacık katkılı GFRE kompozitlerin perforasyon (delinme) eşikleri, katkısız saf epoksi kompozit plakalara kıyasla daha yüksektir. Deplasman değerleri açısından incelendiğinde kompozite poliamid katkısının yüksek enerjilerde darbe hasarına daha fazla direndiği şeklinde yorumlanabilir. Darbe enerjisi davranışına bakıldığında katkısız, nanotüp, nanokil, nanokil+nanotüp katkılı GFRE plakalar için delinme eşikleri 27-28 J aralığında iken poliamid ve poliamid+nanotüp katkılı numunelerde 31-32 J civarında bulunmuştur. Poliamid katkılı GFRE kompozit plakalar katkısız kompozit plakaya göre yaklaşık %13,4, poliamid+nanotüp katkılı GFRE kompozit plakalar, katkısız kompozit plakaya göre yaklaşık %16 artışla darbe direnci sergilediği ve yüksek darbe enerjisi seviyelerinde enerji dağılımı açısından en iyi performansı gösterdiği gözlemlenmiştir.

Düz dokuma cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin darbe deneyleri neticesinde ise nanopartiküllerin eklenmesi yüksek enerji seviyelerinde maksimum darbe yükünü %22,6'ya kadar artırmıştır. Katkısız ve nano katkılı kompozitlerin delinme eşikleri belirlenmiştir. Nanokil katkılı GFRE kompozitlerin delinme eşiği en yüksek olarak belirlenmiş ve bunu poliamid katkılı, poliamid+nanokil hibrit katkılı ve katkısız kompozit plakalar izlemektedir. Genel olarak, nanoparçacıkların eklenmesi GFRE kompozitlerin darbe hasar direncini arttırmıştır. Kompozitlerde meydana gelen fiziksel hasarlar analiz edildiğinde, 40 J darbe enerjisi seviyesinde katkısız plakaların matris çatlaması, fiber kırılması ve darbe noktasında kenar delaminasyonu açısından lokalize hasarlar gösterdiği, nano katkılı plakaların ise matris çatlaması, lif kopması ve lif kırılması açısından daha büyük hasar alanı sergilediği görülmüştür. Nanopartiküllerin eklenmesi, GFRE kompozitlerin darbe davranışını ve hasar mekanizmalarını yüksek darbe enerjisi seviyelerinde değiştirmiş ve hasarın kalınlık yönünden ziyade düzlem içi yönde yayılmasına neden olmuştur.

4.2 Öneriler

Bu çalışmada, epoksi matris içindeki katkı maddelerinin cam elyaf kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda kompozit malzemelerde katkısız, poliamid, nanokil ve karbon nanotüp katkılı numuneler karşılaştırılmıştır. Katkılı plakaların katkısız plakalara göre genel olarak birbirinden üstün özellikleri belirlenmiştir. Poliamid ve nanokil katkılı kompozitlerde %2, karbon nanotüp katkılı çalışmalarda ise %0,3 katkı oranının en ideal katkı oranı olduğu literatüre göre belirlenmiştir. Kompozitlerin mekanik özellikleri ve darbe dayanımlarının matrise ilave edilen düşük katkı oranlarıyla iyileştirilebildiği gibi daha yüksek oranlarda özelliklerde düşüşler ve hasar mekanizmalarında bozulmalar görülmekle beraber ilave edilen katkı maddelerinin matris içine homojen karıştırılması da kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada ultrasonik karıştırma yöntemi kullanılmakla beraber, farklı karıştırma yöntemleri uygulanarak kompozitlerin mekanik özelliklerinin ve darbe davranışlarının geliştirilmesi sağlanabilir. Ayrıca farklı ortam sıcaklıklarına ve şartlarına maruziyet sonucu kompozitlerin dayanımlarında bozulmalar olup olmadığı da ayrı bir inceleme konusudur.

5. KAYNAKLAR

Acma, “What are composites? [online]”, (20 November 2023), <https://compositeslab.com/composites-101/what-are-composites/index.html>, (2016).

Agarwal, G., Patnaik, A. and Sharma, R. K., “Thermo-mechanical properties and abrasive wear behavior of silicon carbide filled woven glass fiber composites”, *Silicon*, 6 (3), 155–168, doi: 10.1007/s12633-014-9184-4, (2014).

Ali, M. and Joshi, S. C., “Energy absorption characteristics of interface modified GFRP laminates under low velocity impact”, *Advanced Materials Research*, 626, 589–593, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.626.589, (2013).

AlOmari, A. S., Al-Athel, K. S., Arif, A. F. M. and Al-Sulaiman, F. A., “Experimental and computational analysis of low-velocity impact on carbon-, glass- and mixed-fiber composite plates”, *Journal of Composites Science*, 4 (4), doi: 10.3390/jcs4040148, (2020).

Alomari, A., Aldajah, S., Hayek, S., Moustafa, K. and Haik, Y., “Experimental investigation of the low speed impact characteristics of nanocomposites”, *Materials and Design*, 47, 836–841, doi: 10.1016/j.matdes.2012.12.079, (2013).

Andrew, J. J., Srinivasan, S. M., Arockiarajan, A. and Dhakal, H. N., “Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: A critical review”, *Composite Structures*, 224, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111007, (2019).

Atas, C. and Sayman, O., “An overall view on impact response of woven fabric composite plates”, *Composite Structures*, 82 (3), 336–345, doi: 10.1016/j.compstruct.2007.01.014, (2008).

Avila, A. F., Soares, M. I. and Silva Neto, A., “A study on nanostructured laminated plates behavior under low-velocity impact loadings”, *International Journal of Impact Engineering*, 34 (1), 28–41, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2006.06.009, (2007).

Ávila, A. F., Dias, E. C., Lopes Da Cruz, D. T., Yoshida, M. I., Queiroz Bracarense, A., Gabriela, M., Carvalho, R. and De Ávila Junior, J., “An

investigation on graphene and nanoclay effects on hybrid nanocomposites post fire dynamic behavior” *Materials Research*, 13 (2), 143–150, doi: 10.1590/S1516-14392010000200005, (2010).

Aymerich, F., Dalla Via, A. and Quaresimin, M., “Energy absorption capability of nanomodified glass/epoxy laminates”, *Procedia Engineering*, 10, 780–785, doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.129, (2011).

Azeez, A. A., Rhee, K. Y., Park, S. J. and Hui, D., “Epoxy clay nanocomposites - Processing, properties and applications: A review”, *Composites Part B: Engineering*, 45 (1), 308–320, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.04.012, (2013).

Baba-Ahmadi, S. B., Hashemian, M., Khosravi, M. and Khandan, A., “An experimental and analytical investigation of novel nanocomposite reinforced with nanoclay with enhanced properties for low velocity impact test”, *Journal of Nanostructures*, 10 (1), 92–106, doi: 10.22052/JNS.2020.01.011, (2020).

Balguri, P. K., Samuel, D. G. H. and Thumu, U., “A review on mechanical properties of epoxy nanocomposites”, *Materials Today: Proceedings*, 44, 346–355, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.742, (2021).

Bektaş, N. B. and Ağır, I., “Impact response of composite plates manufactured with stitch-bonded non-crimp glass fiber fabrics”, *Science and Engineering of Composite Materials*, 21 (1), 111–120, doi: 10.1515/secm-2012-0066, (2014).

Belingardi, G. and Vadori, R., “Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates” *International Journal of Impact Engineering*, 27, 213–229, doi: 10.1016/S0734-743X(01)00040-9, (2002).

Blagojević, J., Mijatović, B., Kočović, D., Stojanović, B., Ivanović, L. and Gajević, S., “A review to cast polymer composite materials for interior environments” *Applied Engineering Letters*, 5 (1), 1–7, doi: 10.18485/aeletters.2020.5.1.1, (2020).

Bull, D. J., Scott, A. E., Spearing, S. M. and Sinclair, I., “The influence of toughening-particles in CFRPs on low velocity impact damage resistance performance” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 58, 47–55, doi: 10.1016/j.compositesa.2013.11.014, (2014).

Bull, D. J., Spearing, S. M., Sinclair, I. and Helfen, L., “Three-dimensional assessment of low velocity impact damage in particle toughened composite laminates using micro-focus X-ray computed tomography and synchrotron

radiation laminography” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 52, 62–69, doi: 10.1016/j.compositesa.2013.05.003, (2013).

Carlsson, L. A. and Pipes, R. B., *Hochleistungs-faserverbundwerkstoffe Herstellung und experimentelle Charakterisierung*, Stuttgart: Universitat Delaware, doi: 10.1007/978-3-322-96703-9, (1989).

Chowdhury, F. H., Hosur, M. V. and Jeelani, S., “Processing, impact response and damage characterisation of plain-weave carbon/epoxy-nanoclay nanocomposites” *Polymers and Polymer Composites*, 15 (6), 425–435, doi: 10.1177/096739110701500601, (2007).

Demirci, İ., Avcı, A. and Demirci, M. T., “Investigation of nano-hybridization effects on low velocity impact behaviors of basalt fiber reinforced composites” *Journal of Composite Materials*, 55 (3), 401–414, doi: 10.1177/0021998320949640, (2021).

Fakhreddini-Najafabadi, S., Torabi, M. and Taheri-Behrooz, F., “An experimental investigation on the low-velocity impact performance of the CFRP filled with nanoclay” *Aerospace Science and Technology*, 116, doi: 10.1016/j.ast.2021.106858, (2021).

Ferreira, J. A. M., Reis, P. N. B., Costa, J. D. M. and Richardson, M. O. W., “Fatigue behaviour of Kevlar composites with nanoclay-filled epoxy resin” *Journal of Composite Materials*, 47 (15), 1885–1895, doi: 10.1177/0021998312452024, (2013).

Ferreira, J. A. M., Santos, D. S. C., Capela, C. and Costa, J. D. M., “Impact response of nano reinforced mat glass/epoxy laminates” *Fibers and Polymers*, 16 (1), 173–180, doi: 10.1007/s12221-015-0173-z, (2015).

Gao, F., “Clay/polymer composites: the story” *Materials Today*, 7 (11), 50–55, doi: 10.1016/S1369-7021(04)00509-7, (2004).

Gibson, R. F., *Principles of composite material mechanics*, Boca Raton: CRC Press, (2016).

Gupta, S., Raju Mantena, P. and Al-Ostaz, A., “Dynamic mechanical and impact property correlation of nanoclay and graphite platelet reinforced vinyl ester nanocomposites” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29 (13), 2037–2047, doi: 10.1177/0731684409341762, (2010).

Gustin, J., Freeman, B., Stone, J., Mahinfalah, M. and Salehi-Khojin, A., “Low-velocity impact of nanocomposite and polymer plates” *Journal of Applied Polymer Science*, 96 (6), 2309–2315, doi: 10.1002/app.21433, (2005).

Haque, A., Shamsuzzoha, M., Hussain, F. and Dean, D., “S2-glass/epoxy polymer nanocomposites: Manufacturing, structures, thermal and mechanical properties” *Journal of Composite Materials*, 37 (20), 1821–1838, doi: 10.1177/002199803035186, (2003).

Hassan, M., “Optimum design and development of a cost-effective pultruded hybrid composite mast”, MSc Thesis, *Dalhousie University Faculty of Engineering Department of Civil Engineering*, Halifax, (1998).

Heydari-Meybodi, M., Saber-Samandari, S. and Sadighi, M., “An experimental study on low-velocity impact response of nanocomposite beams reinforced with nanoclay” *Composites Science and Technology*, 133, 70–78, doi: 10.1016/j.compscitech.2016.07.020, (2016).

Hocaoğlu, M. and Karagülle, H., “Effect of carbon nanotube reinforcement on the natural frequencies and damping ratios of nanocomposite beams” *Materials Research Express*, 7 (2), doi: 10.1088/2053-1591/ab721a, (2020).

Homam, S. M., “Durability of fibre reinforced polymers (FRP) used in concrete structures”, MSc Thesis, *University of Toronto Department of Civil Engineering*, Toronto, (2000).

Hosur, M. V., Chowdhury, F. and Jeelani, S., “Low-velocity impact response and ultrasonic NDE of woven carbon/epoxy-nanoclay nanocomposites” *Journal of Composite Materials*, 41 (18), 2195–2212, doi: 10.1177/0021998307074146, (2007).

Ikbal, M. H., Ahmed, A., Qingtao, W., Shuai, Z. and Wei, L., “Hybrid composites made of unidirectional T600S carbon and E-glass fabrics under quasi-static loading” *Journal of Industrial Textiles*, 46 (7), 1511–1535, doi: 10.1177/1528083715624259, (2017).

Iqbal, K., Khan, S. U., Munir, A. and Kim, J. K., “Impact damage resistance of CFRP with nanoclay-filled epoxy matrix” *Composites Science and Technology*, 69 (11–12), 1949–1957, doi: 10.1016/j.compscitech.2009.04.016, (2009).

Islam, M. E., Mahdi, T. H., Hosur, M. V. and Jeelani, S., “Characterization of carbon fiber reinforced epoxy composites modified with nanoclay and carbon

nanotubes” *Procedia Engineering*, 105, 821–828, doi: 10.1016/j.proeng.2015.05.078, (2015).

ISO, N., 14126, Fibre-reinforced plastics – determination of compressive properties in the inplane direction, (1999).

ISO, P. E., 527-5, Fiber reinforced plastics – determination of tensile properties, (1998).

İltam, “Pamukkale Üniversitesi İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi [online]”, (20 Nov 2023), <http://iltam.pau.edu.tr/cihazlar/fesem.html>, (2019).

Khan, S. U., Iqbal, K., Munir, A. and Kim, J. K., “Quasi-static and impact fracture behaviors of CFRPs with nanoclay-filled epoxy matrix” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (3), 253–264, doi: 10.1016/j.compositesa.2010.11.011, (2011).

Koricho, E. G., Khomenko, A., Haq, M., Drzal, L. T., Belingardi, G. and Martorana, B., “Effect of hybrid (micro- and nano-) fillers on impact response of GFRP composite” *Composite Structures*, 134, 789–798, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.08.106, (2015).

Kornmann, X., Rees, M., Thomann, Y., Necola, A., Barbezat, M. and Thomann, R., “Epoxy-layered silicate nanocomposites as matrix in glass fibre-reinforced composites” *Composites Science and Technology*, 65 (14), 2259–2268, doi: 10.1016/j.compscitech.2005.02.006, (2005).

Kosar, I., Ullah, K. S., Kim, J. K. and Munir, A., “Study on the low -velocity impact behavior of CFRP with nanoclay-filled epoxy matrix” *Advanced Materials Research*, 47-50 Part 2, 1205–1208, doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.47-50.1205, (2008).

Kouzegaran, V. J., “Karbon nanotüp transistörlerin gücü ve potansiyeli [online]”, (5 September 2023), <https://shop.nanografi.com.tr/blografi/karbon-nanotup-transistorlerin-gucu-ve-potansiyeli-nanografi>, (2023).

Kumar, P. S. S. R., John Alexis, S., Saravana Mohan, M., Edwin Sudhagar, P. and Madara, S. R., “Vibration-impact study on AlMg4.5Mn reinforced nanoclay composites” *Materials Today: Proceedings*, 28, 1140–1143, doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.096, (2019).

Kumar, V., Sharma, N. K. and Kumar, R., “Dielectric, mechanical, and thermal properties of bamboo-poly(lactic acid) bionanocomposites” *Journal of*

Reinforced Plastics and Composites, 32 (1), 42–51, doi: 10.1177/0731684412461290, (2013).

Lee, D. G., Lim, T. S. and Cheon, S. S., “Impact energy absorption characteristics of composite structures” *Composite Structures*, 50 (4), 381–390, doi: 10.1016/S0263-8223(00)00117-3, (2000).

Li, H., Zhang, T., Zhang, J., Zhang, W., Lu, H., Wang, J., Wang, R., Lv, H., Yang, M., Lv, D. and Xia, L., “Amorphism SiBON interface anchored rGO nanoplatelets composites with tunable electromagnetic properties for microwave absorption” *Carbon*, 214, doi: 10.1016/j.carbon.2023.118343, (2023).

Liao, C. Z., Wong, H. M., Yeung, K. W. K. and Tjong, S. C., “The development, fabrication, and material characterization of polypropylene composites reinforced with carbon nanofiber and hydroxyapatite nanorod hybrid fillers” *International Journal of Nanomedicine*, 9 (1), 1299–1310, doi: 10.2147/IJN.S58332, (2014).

Lin, J.-C., Chang, L. C., Nien, M. H. and Ho, H. L., “Mechanical behavior of various nanoparticle filled composites at low-velocity impact” *Composite Structures*, 74 (1), 30–36, doi: 10.1016/j.compstruct.2005.03.006, (2006).

Luo, R. K., Green, E. R. and Morrison, C. J., “Impact damage analysis of composite plates” *International Journal of Impact Engineering*, 22, 435–447, (1999).

Mahdi, T. H., Islam, M. E., Hosur, M. V. and Jeelani, S., “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, doi: 10.1177/0731684417693429, (2017).

Maitra, S. and Roy, J., “Nanoceramic matrix composites: Types, processing, and applications” *Advances in Ceramic Matrix Composites: Second Edition*, 27–48, doi: 10.1016/B978-0-08-102166-8.00003-7, (2018).

Mallick P. K. (Ed.), *Fiber-Reinforced Composites Materials, Manufacturing and Design*, CRC Press, (2008).

Mantena P. R., Al-Ostaz A., Cheng A. H. D., “Dynamic response and simulations of nanoparticle-enhanced composites” *Composites Science and Technology*, 69 (6), 772–779, doi:10.1016/j.compscitech.2008.02.035, (2009).

Mirmohseni, A. and Zavareh, S., “Epoxy/acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer/clay ternary nanocomposite as impact toughened epoxy” *Journal of Polymer Research*, 17 (2), 191–201, doi: 10.1007/s10965-009-9305-8, (2010).

Muthu, J. and Dendere, C., “Functionalized multiwall carbon nanotubes strengthened GRP hybrid composites: Improved properties with optimum fiber content” *Composites Part B: Engineering*, 67, 84–94, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.06.012, (2014).

Nor, A. F. M., Sultan, M. T. H., Jawaid, M., Azmi, A. M. R. and Shah, A. U. M., “Analysing impact properties of CNT filled bamboo/glass hybrid nanocomposites through drop-weight impact testing, UWPI and compression-after-impact behaviour” *Composites Part B: Engineering*, 168, 166–174, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.12.061, (2019).

Nor, A. F. M., Sultan, M. T. H., Jawaid, M., Talib, A. R. A., Azmi, A. M. R., Harmaen, A. S. and Asa’ari, A. Z. M., “Bamboo/glass/CNT Composites” *BioResources*, 13 (2), (2018).

Özgül, F. and Bektaş, N. B., “Investigation of the effects of additives on mechanical properties of E-glass reinforced thermoset composites” *Acta Physica Polonica A*, 135 (5), 915–918, doi: 10.12693/APhysPolA.135.915, (2019).

Pavlidou, S. and Papaspyrides, C. D., “A review on polymer-layered silicate nanocomposites” *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 33 (12), 1119–1198, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2008.07.008, (2008).

Pekbey, Y., “Buckling of economical composite bars”, Ph.D Thesis, *Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences*, İzmir, (2005).

Pol, M. H., Liaghat, G., Zamani, E. and Ordys, A., “Investigation of the ballistic impact behavior of 2D woven glass/epoxy/nanoclay nanocomposites” *Journal of Composite Materials*, 49 (12), 1449–1460, doi: 10.1177/0021998314535010, (2015).

Radenkov, M. F., Cherkezova, P. T., Dikov, V. K. and Radenkov, F. D., “Modification of polymeric matrix of polyester fiber-glass materials with powder polyamide and epoxy resin” *Russian Journal of Applied Chemistry*, 79 (11), 1907–1911, doi: 10.1134/S1070427206110322, (2006).

Rafiq, A., Merah, N., Boukhili, R. and Al-Qadhi, M., “Impact resistance of hybrid glass fiber reinforced epoxy/nanoclay composite” *Polymer Testing*, 57, 1–11, doi: 10.1016/j.polymertesting.2016.11.005, (2017).

Rahman, A. S., Mathur, V. and Asmatulu, R., “Effect of nanoclay and graphene inclusions on the low-velocity impact resistance of Kevlar-epoxy laminated composites” *Composite Structures*, 187, 481–488, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.12.054, (2018).

Raju Mantena, P., Al-Ostaz, A. and Cheng, A. H. D., “Dynamic response and simulations of nanoparticle-enhanced composites” *Composites Science and Technology*, 69 (6), 772–779, doi: 10.1016/j.compscitech.2008.02.035, (2009).

Reddy, J. N., *Mechanics of laminated composite plates and shells theory and analysis* (Second Edition), CRC Press, (2004).

Reis, P. N. B., Ferreira, J. A. M., Santos, P., Richardson, M. O. W. and Santos, J. B., “Impact response of Kevlar composites with filled epoxy matrix” *Composite Structures*, 94 (12), 3520–3528, doi: 10.1016/j.compstruct.2012.05.025, (2012).

Reis, P. N. B., ZhangFerreira, J. A. M., Zhang, Z. Y., Benameur, T. and Richardson, M. O. W., “Impact response of Kevlar composites with nanoclay enhanced epoxy matrix” *Composites Part B: Engineering*, 46, 7–14, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.10.028, (2013).

Saber-Samandari, S., Khatibi, A. A. and Basic, D., “An experimental study on clay/epoxy nanocomposites produced in a centrifuge” *Composites Part B: Engineering*, 38 (1), 102–107, doi: 10.1016/j.compositesb.2006.03.010, (2007).

Sayer, M., “Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2009).

Schoeppner, G. A. and Abrate, S., “Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31 (9), 903–915, doi: 10.1016/S1359-835X(00)00061-0, (2000).

Shokrieh, M. M., Kefayati, A. R. and Chitsazzadeh, M., “Fabrication and mechanical properties of clay/epoxy nanocomposite and its polymer concrete” *Materials and Design*, 40, 443–452, doi: 10.1016/j.matdes.2012.03.008, (2012).

Shukla, D. K., Kasisomayajula, S. V. and Parameswaran, V., “Epoxy composites using functionalized alumina platelets as reinforcements” *Composites Science and Technology*, 68 (14), 3055–3063, doi: 10.1016/j.compscitech.2008.06.025, (2008).

Sun, L., Gibson, R. F., Gordaninejad, F. and Suhr, J., “Energy absorption capability of nanocomposites: A review” *Composites Science and Technology*, 69 (14), 2392–2409, doi: 10.1016/j.compscitech.2009.06.020, (2009).

Tang, Y., Deng, S., Ye, L., Yang, C., Yuan, Q., Zhang, J. and Zhao, C., “Effects of unfolded and intercalated halloysites on mechanical properties of halloysite-epoxy nanocomposites” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (4), 345–354, doi: 10.1016/j.compositesa.2010.12.003, (2011).

Ulus, H., Üstün, T., Sahin, Ö. S., Karabulut, S. E., Eskizeybek, V. and Avcı, A., “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, doi: 10.1177/0021998315580835, (2016).

Usuki, A., Kawasumi, M., Kojima, Y., Okada, A., Kurauchi, T. and Kamigaito, O., “Swelling behavior of montmorillonite cation exchanged for ω -amino acids by ϵ -caprolactam” *Journal of Materials Research*, 8 (5), 1174–1178, doi: 10.1557/JMR.1993.1174/METRICS, (1993).

Yilmaz, Y., Ozgul, F. and Agir, I., “An experimental study on low velocity impact characteristics of glass fiber reinforced epoxy nanocomposites” *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 48 (1), 1–13, doi: 10.1007/S12046-023-02090-7/TABLES/3, (2023).

EKLER

6. EKLER

EK A İçyapı Görüntüleme

A.1 İLTAM Hakkında Bilgi

Pamukkale Üniversitesi İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (İLTAM) 23 Haziran 2017 tarihinde 30105 sayılı resmî gazete ilanı ile kurulmuştur. İLTAM gelişmiş laboratuvar sistemleri içermekte olup, yaklaşık 8363 m² kullanım alanına, kullanıma açık 6 adet laboratuvara ve 1 adet konferans salonuna sahiptir. Üniversitelerin, kamu ve özel kuruluşların araştırma ve geliştirme aşamalarında bilim ve teknolojinin gelişmesi için ortak ihtiyaı olan ileri teknoloji düzeyindeki cihazları bünyesinde bulundurarak farklı tematik alanlarda çalışma olanakları sunmak, merkezde bulunan kaliteli insan gücünün sürekli eēitimini saēlayarak ve bilgi birikimini arttırarak verimli ve etkin bir çalışma ortamı yaratmak hedefi ile hizmete girmiştir. İLTAM’da 6 farklı laboratuvar birimi (n İşlem Laboratuvarı, Görüntüleme, X-ışınları, Kromatografi, Spektroskopi ve Termal Analiz), Numune Kabul birimi ve 1 adet konferans salonu bulunmaktadır (İltam, 2019).

A.2 FESEM Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu

Yüksek voltaj ile hızlandırılan elektronların, numune üzerine odaklanması sonucunda, numune yüzeyi taratılarak, gönderilen elektronlar ile numune atomlarının etkileşmesi saēlanır. Ortaya çıkan bu etkileşimlerin uygun dedektörler yardımı ile toplanması ve sinyal gclendiricilerden geçirilerek katot ışını tüpünün ekranına gönderilmesi sonucunda görüntü elde edilir. Elde edilen görüntülerden numuneye ait tanecik boyutu ve tanecik yerleşimi hakkında bilgiler elde edilebilmektedir.

A.2.1 Teknik Özellikleri

- Elektron Tabancası: Schottky Field-Emission
- Büyütme Oranı: 12 – 1000000 x
- Hızlandırma Gerilimi: 0,02 – 30 kV
- Vakum Sistemi: Yüksek Vakum Modu (HV) ($\leq 10^{-6}$ mbar)
- Değişken Basınç Modu (VP) (0,01 – 1,33 mbar)

A.2.2 Dedektör Tipleri

SE2 dedektör (Everhart-Thornley tipi) ve In-Lens dedektör HV modda, numuneden yansıyan ikincil elektronları toplayarak (secondary elektron-SE) numune yüzeyine ait yüksek çözünürlükte topografik görüntüler elde etmek için kullanılır.

VPSE dedektör VP modda kullanılarak, kaplama yapılmamış yalıtkan, polimer ve cam gibi örneklerin görüntülerinin analizi sırasında kullanılır.

AsB dedektör HV modda, numuneden geri saçılan elektronları toplayarak (backscattered electrons-BSE) atomik kontrasta ve kristal yönelimine bağlı iki boyutlu görüntüler elde etmek için kullanılır.

EDS dedektörü ile numunenin atom konsantrasyonları belirlenebilir. Haritalama özelliği sayesinde elde edilen görüntü üzerinde numunenin içerisinde bulunan elementlerin dağılımı hakkında bilgi sahibi olunabilir. (EDS: Enerji dağılımlı spektroskopi)

STEM dedektörü ile 30kV'ye kadar biyolojik doku/numunelerin mikroyapı görüntüsü elde edilir.

A.2.3 Uygulama Alanları

- Mikroyapı Karakterizasyonu
- Malzeme yüzeyi ve kesitinde bulunan hataların analizi
- Parçacık Boyutu Analizleri
- Kaplama Morfolojisi/Ara yüzey incelemeleri
- Entomoloji çalışmaları
- Polimer malzeme kırık yüzey tespiti
- EDS haritalama
- Hasar Analizleri
- Mikro-Kimyasal Analizler (Kalitatif/Yarı Kantitatif)
- İnce film kalınlık tayini
- Yalıtkan malzemelerin analizi
- EDS Noktasal ve Çizgisel Analiz
- Hücre / doku görüntüleme (İltam, 2019).

EK B İstatistiksel Analizler

Tablo B.1: Dokuma takviyeli kompozitler (Maks. Kuvvet).

Numune	Maks. Kuvvet [kN]	Standart Sapma (SS)	Varyasyon Katsayısı (CV)	Güven Aralığı (CI %95)	Güven Aralığı (CI %99)
Katkısız	12,09	0,48	0,04	±0,67	±0,87
%0,5 PA	13,69	1,86	0,14	±1,63	±2,13
%1 PA	15,32	0,70	0,05	±0,79	±1,03
%2 PA	15,41	0,63	0,04	±0,62	±0,81
%0,5 NC	12,91	0,18	0,01	±0,24	±0,32
%1 NC	13,41	1,49	0,11	±1,46	±1,91
%2 NC	14,52	1,15	0,08	±1,30	±1,70
%2 PA+NC	13,46	1,57	0,12	±1,54	±2,02

Tablo B.2: Dokuma takviyeli kompozitler (Çekme Dayanımı).

Numune	Çekme Dayanımı [MPa]	Standart Sapma (SS)	Varyasyon Katsayısı (CV)	Güven Aralığı (CI %95)	Güven Aralığı (CI %99)
Katkısız	604,35	24,07	0,04	±33,36	±43,74
%0,5 PA	684,31	92,87	0,14	±81,41	±106,74
%1 PA	766,13	34,81	0,05	±39,39	±51,65
%2 PA	770,28	31,64	0,04	±31,01	±40,66
%0,5 NC	645,39	8,81	0,01	±12,22	±16,02
%1 NC	670,30	74,27	0,11	±72,79	±95,44
%2 NC	726,08	57,31	0,08	±64,85	±85,03
%2 PA+NC	672,80	78,69	0,12	±77,12	±101,12

Tablo B.3: Dokuma takviyeli kompozitler (Kopma Uzaması).

Numune	Kopma Uzaması [%]	Standart Sapma (SS)	Varyasyon Katsayısı (CV)	Güven Aralığı (CI %95)	Güven Aralığı (CI %99)
Katkısız	3,75	0,25	0,07	±0,35	±0,46
%0,5 PA	3,52	0,30	0,08	±0,26	±0,34
%1 PA	3,83	0,13	0,03	±0,15	±0,19
%2 PA	3,70	0,30	0,08	±0,29	±0,38
%0,5 NC	3,83	0,14	0,04	±0,2	±0,26
%1 NC	3,44	0,23	0,07	±0,22	±0,29
%2 NC	3,59	0,22	0,06	±0,24	±0,32
%2 PA+NC	3,68	0,36	0,10	±0,36	±0,47

Tablo B.4: Dokuma takviyeli kompozitler (Elastisite Modülü).

Numune	Elastisite Modülü [GPa]	Standart Sapma (SS)	Varyasyon Katsayısı (CV)	Güven Aralığı (CI %95)	Güven Aralığı (CI %99)
Katkısız	23,49	0,30	0,01	±0,42	±0,55
%0,5 PA	27,93	2,19	0,08	±1,92	±2,51
%1 PA	28,15	0,97	0,03	±1,09	±1,44
%2 PA	29,22	0,53	0,02	±0,52	±0,68
%0,5 NC	25,04	0,33	0,01	±0,45	±0,59
%1 NC	27,63	1,26	0,05	±1,24	±1,62
%2 NC	29,87	1,14	0,04	±1,29	±1,69
%2 PA+NC	25,57	1,03	0,04	±1,01	±1,32

Tablo B.5: Dokuma takviyeli kompozitler (Maks. Basma Kuvveti).

Numune	Maks. Basma Kuvveti [kN]	Standart Sapma (SS)	Varyasyon Katsayısı (CV)	Güven Aralığı (CI %95)	Güven Aralığı (CI %99)
Katkısız	10,80	0,94	0,09	±0,75	±0,99
%0,5 PA	11,73	2,58	0,22	±1,60	±2,09
%1 PA	11,74	1,71	0,15	±1,01	±1,32
%2 PA	11,77	2,67	0,23	±1,65	±2,17
%0,5 NC	10,87	1,30	0,12	±0,85	±1,11
%1 NC	11,01	1,82	0,17	±1,78	±2,34
%2 NC	10,98	2,85	0,26	±2,80	±3,67
%2 PA+NC	11,93	1,95	0,16	±1,21	±1,58

Tablo B.6: Dokuma takviyeli kompozitler (Basma Dayanımı).

Numune	Basma Dayanımı [MPa]	Standart Sapma (SS)	Varyasyon Katsayısı (CV)	Güven Aralığı (CI %95)	Güven Aralığı (CI %99)
Katkısız	540,06	46,94	0,09	±37,56	±49,25
%0,5 PA	586,33	128,88	0,22	±79,88	±104,74
%1 PA	586,78	85,38	0,15	±50,46	±66,16
%2 PA	588,71	133,27	0,23	±82,6	±108,31
%0,5 NC	543,45	64,83	0,12	±42,36	±55,54
%1 NC	550,31	90,87	0,17	±89,05	±116,76
%2 NC	549,21	142,64	0,26	±139,79	±183,3
%2 PA+NC	596,71	97,44	0,16	±60,39	±79,19

Tablo B.7: Dokuma takviyeli kompozitler (Basma Uzaması).

Numune	Basma Uzaması [%]	Standart Sapma (SS)	Varyasyon Katsayısı (CV)	Güven Aralığı (CI %95)	Güven Aralığı (CI %99)
Katkısız	-3,26	1,15	0,35	±0,92	±1,21
%0,5 PA	-3,25	1,55	0,48	±0,96	±1,26
%1 PA	-4,62	1,38	0,30	±0,82	±1,07
%2 PA	-4,22	1,48	0,35	±0,91	±1,20
%0,5 NC	-3,32	0,52	0,16	±0,34	±0,45
%1 NC	-2,34	0,96	0,41	±0,94	±1,23
%2 NC	-3,35	0,37	0,11	±0,37	±0,48
%2 PA+NC	-3,69	1,22	0,33	±0,75	±0,99

Tablo B.8: Dokuma takviyeli kompozitler (Basma Modülü).

Numune	Basma Modülü [GPa]	Standart Sapma (SS)	Varyasyon Katsayısı (CV)	Güven Aralığı (CI %95)	Güven Aralığı (CI %99)
Katkısız	9,18	0,95	0,10	±0,76	±0,99
%0,5 PA	10,03	1,77	0,18	±1,10	±1,44
%1 PA	10,33	1,39	0,13	±0,82	±1,08
%2 PA	10,60	1,32	0,12	±0,82	±1,07
%0,5 NC	10,29	0,45	0,04	±0,30	±0,39
%1 NC	10,70	1,27	0,12	±1,24	±1,63
%2 NC	10,50	1,27	0,12	±1,24	±1,63
%2 PA+NC	10,03	0,96	0,10	±0,60	±0,78

Tablo B.9: Dokuma takviyeli kompozitler (Kritik Burkulma Kuvveti).

Numune	Kritik Burkulma Kuvveti (P_k) [N]	Standart Sapma (SS)	Varyasyon Katsayısı (CV)	Güven Aralığı (CI %95)	Güven Aralığı (CI %99)
Katkısız	3623,10	24,56	0,01	$\pm 34,03$	$\pm 44,62$
%0,5 PA	3624,42	84,65	0,02	$\pm 95,78$	$\pm 125,60$
%1 PA	3686,72	112,00	0,03	$\pm 126,73$	$\pm 166,18$
%2 PA	3804,52	152,48	0,04	$\pm 211,33$	$\pm 277,11$
%0,5 NC	3644,73	140,59	0,04	$\pm 159,09$	$\pm 208,60$
%1 NC	3679,72	1,67	0,00	$\pm 1,89$	$\pm 2,48$
%2 NC	3738,46	26,12	0,01	$\pm 29,56$	$\pm 38,76$
%2 PA+NC	3737,40	339,06	0,09	$\pm 383,69$	$\pm 503,10$

Tablo B.10: Dokuma takviyeli kompozitler (Burkulma Modülü).

Numune	Burkulma Modülü [GPa]	Standart Sapma (SS)	Varyasyon Katsayısı (CV)	Güven Aralığı (CI %95)	Güven Aralığı (CI %99)
Katkısız	20,49	0,51	0,03	$\pm 0,71$	$\pm 0,93$
%0,5 PA	21,08	0,50	0,02	$\pm 0,56$	$\pm 0,74$
%1 PA	20,99	0,09	0,00	$\pm 0,1$	$\pm 0,13$
%2 PA	21,22	1,69	0,08	$\pm 2,35$	$\pm 3,08$
%0,5 NC	20,83	1,01	0,05	$\pm 1,14$	$\pm 1,50$
%1 NC	21,18	0,37	0,02	$\pm 0,42$	$\pm 0,55$
%2 NC	21,20	0,50	0,02	$\pm 0,56$	$\pm 0,74$
%2 PA+NC	21,16	0,91	0,04	$\pm 1,03$	$\pm 1,35$

Tablo B.11: Kıvrımsız dikişli takviyeli kompozitler (Maks. Kuvvet).

Numune	1 Doğrultusu				
	Maks. Kuvvet [kN]	Standart Sapma (SS)	Varyasyon Katsayısı (CV)	Güven Aralığı (CI %95)	Güven Aralığı (CI %99)
Katkısız	10,85	0,52	0,05	±0,59	±0,78
KNT	11,54	1,02	0,09	±1,15	±1,51
NC	11,50	0,84	0,07	±0,95	±1,25
PA	11,73	0,77	0,07	±0,75	±0,99
NC + KNT	12,10	0,35	0,03	±0,4	±0,52
PA + KNT	12,41	0,11	0,01	±0,12	±0,16
NC+PA+KNT	11,06	0,13	0,01	±0,18	±0,23
Numune	2 Doğrultusu				
	Maks. Kuvvet [kN]	Standart Sapma (SS)	Varyasyon Katsayısı (CV)	Güven Aralığı (CI %95)	Güven Aralığı (CI %99)
Katkısız	18,39	1,21	0,07	±1,37	±1,79
KNT	21,26	0,82	0,04	±0,93	±1,22
NC	20,98	0,05	0,0025	±0,07	±0,10
PA	21,24	1,21	0,06	±1,36	±1,79
NC + KNT	21,08	0,69	0,03	±0,78	±1,02
PA + KNT	18,88	1,32	0,07	±1,82	±2,39
NC+PA+KNT	19,33	0,80	0,04	±0,90	±1,19

Tablo B.12: Kıvrımsız dikişli takviyeli kompozitler (Çekme Dayanımı).

Numune	1 Doğrultusu				
	Çekme Dayanımı X ^T [MPa]	Standart Sapma (SS)	Varyasyon Katsayısı (CV)	Güven Aralığı (CI %95)	Güven Aralığı (CI %99)
Katkısız	427,04	20,65	0,05	±23,37	±30,64
KNT	454,50	40,09	0,09	±45,36	±59,48
NC	452,89	33,04	0,07	±37,39	±49,03
PA	461,90	30,19	0,07	±29,59	±38,80
NC + KNT	476,52	13,78	0,03	±15,59	±20,44
PA + KNT	488,46	4,17	0,01	±4,72	±6,19
NC+PA+KNT	435,35	5,05	0,01	±7,01	±9,19
Numune	2 Doğrultusu				
	Çekme Dayanımı Y ^T [MPa]	Standart Sapma (SS)	Varyasyon Katsayısı (CV)	Güven Aralığı (CI %95)	Güven Aralığı (CI %99)
Katkısız	362,06	23,75	0,07	±26,87	±35,24
KNT	418,43	16,15	0,04	±18,28	±23,97
NC	412,98	1,04	0,0025	±1,45	±1,90
PA	418,13	23,73	0,06	±26,86	±35,22
NC + KNT	414,94	13,50	0,03	±15,28	±20,03
PA + KNT	371,64	25,90	0,07	±35,89	±47,06
NC+PA+KNT	380,47	15,73	0,04	±17,80	±23,34

Tablo B.13: Kıvrımsız dikişli takviyeli kompozitler (Kopma Uzaması).

Numune	1 Doğrultusu				
	Kopma Uzaması [%]	Standart Sapma (SS)	Varyasyon Katsayısı (CV)	Güven Aralığı (CI %95)	Güven Aralığı (CI %99)
	Katkısız	1,84	0,14	0,07	±0,16
KNT	2,00	0,13	0,07	±0,15	±0,19
NC	2,08	0,14	0,07	±0,16	±0,21
PA	2,03	0,21	0,10	±0,21	±0,27
NC + KNT	2,15	0,05	0,02	±0,06	±0,07
PA + KNT	2,22	0,08	0,04	±0,09	±0,12
NC+PA+KNT	2,06	0,22	0,11	±0,3	±0,40

Numune	2 Doğrultusu				
	Kopma Uzaması [%]	Standart Sapma (SS)	Varyasyon Katsayısı (CV)	Güven Aralığı (CI %95)	Güven Aralığı (CI %99)
	Katkısız	2,10	0,05	0,02	±0,05
KNT	2,24	0,14	0,06	±0,15	±0,20
NC	2,13	0,30	0,14	±0,41	±0,54
PA	2,32	0,35	0,15	±0,40	±0,52
NC + KNT	2,21	0,20	0,09	±0,22	±0,29
PA + KNT	2,17	0,11	0,05	±0,15	±0,20
NC+PA+KNT	2,18	0,09	0,04	±0,11	±0,14

Tablo B.14: Kıvrımsız dikişli takviyeli kompozitler (Elastisite Modülü).

Numune	1 Doğrultusu				
	Elastisite Modülü E_1^T [GPa]	Standart Sapma (SS)	Varyasyon Katsayısı (CV)	Güven Aralığı (CI %95)	Güven Aralığı (CI %99)
	Katkısız	21,45	0,43	0,02	±0,49
KNT	21,57	1,00	0,05	±1,13	±1,48
NC	21,51	0,74	0,03	±0,84	±1,10
PA	20,63	0,81	0,04	±0,79	±1,04
NC + KNT	20,99	0,61	0,03	±0,69	±0,90
PA + KNT	19,66	0,52	0,03	±0,59	±0,77
NC+PA+KNT	21,05	0,00095	0,000045	±0,0013	±0,0017

Numune	2 Doğrultusu				
	Elastisite Modülü E_2^T [GPa]	Standart Sapma (SS)	Varyasyon Katsayısı (CV)	Güven Aralığı (CI %95)	Güven Aralığı (CI %99)
	Katkısız	16,23	1,99	0,12	±2,26
KNT	19,09	0,13	0,01	±0,14	±0,19
NC	18,75	0,06	0,00	±0,08	±0,11
PA	17,98	0,78	0,04	±0,88	±1,16
NC + KNT	18,52	1,61	0,09	±1,82	±2,39
PA + KNT	16,05	0,19	0,01	±0,26	±0,34
NC+PA+KNT	18,79	0,17	0,01	±0,19	±0,25

Tablo B.15: Kıvrımsız dikişli takviyeli kompozitler (Basma Dayanımı).

Numune	1 Doğrultusu				
	Basma Dayanımı	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı	Güven Aralığı	Güven Aralığı
	X^C [MPa]	(SS)	(CV)	(CI %95)	(CI %99)
Katkısız	469,71	23,73	0,05	±23,25	±30,49
KNT	493,46	19,62	0,04	±22,20	±29,11
NC	479,16	25,13	0,05	±28,43	±37,28
PA	474,53	17,46	0,04	±17,11	±22,43
NC + KNT	496,60	31,23	0,06	±35,34	±46,34
PA + KNT	477,69	20,54	0,04	±23,25	±30,48
NC+PA+KNT	468,13	12,21	0,03	±13,82	±18,12
Numune	2 Doğrultusu				
	Basma Dayanımı	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı	Güven Aralığı	Güven Aralığı
	Y^C [MPa]	(SS)	(CV)	(CI %95)	(CI %99)
Katkısız	336,95	19,81	0,06	±27,45	±35,99
KNT	391,01	20,38	0,05	±23,07	±30,24
NC	407,03	27,40	0,07	±31,01	±40,66
PA	402,72	25,19	0,06	±22,08	±28,96
NC + KNT	402,96	42,15	0,10	±36,94	±48,44
PA + KNT	433,32	15,13	0,03	±14,83	±19,44
NC+PA+KNT	384,61	16,97	0,04	±16,63	±21,80

Tablo B.16: Kıvrımsız dikişli takviyeli kompozitler (Basma Modülü).

Numune	1 Doğrultusu				
	Basma Modülü	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı	Güven Aralığı	Güven Aralığı
	E_1^C [GPa]	(SS)	(CV)	(CI %95)	(CI %99)
Katkısız	10,76	1,40	0,13	±1,38	±1,81
KNT	11,24	0,35	0,03	±0,40	±0,52
NC	11,94	2,45	0,21	±2,77	±3,64
PA	11,50	1,07	0,09	±1,05	±1,37
NC + KNT	11,10	1,91	0,17	±1,87	±2,46
PA + KNT	10,81	0,57	0,05	±0,56	±0,73
NC+PA+KNT	11,04	1,87	0,17	±2,12	±2,77
Numune	2 Doğrultusu				
	Basma Modülü	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı	Güven Aralığı	Güven Aralığı
	E_2^C [GPa]	(SS)	(CV)	(CI %95)	(CI %99)
Katkısız	10,26	1,23	0,12	±1,70	±2,23
KNT	11,06	0,24	0,02	±0,33	±0,43
NC	11,58	0,47	0,04	±0,53	±0,70
PA	12,75	0,38	0,03	±0,33	±0,43
NC + KNT	12,81	1,02	0,08	±0,90	±1,18
PA + KNT	12,17	0,32	0,03	±0,31	±0,41
NC+PA+KNT	13,03	0,95	0,07	±0,93	±1,22