

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**NANO TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERDE
YORULMA KARAKTERİSTİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Hasan Yavuz ÜNAL

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Yeliz PEKBEY

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi : 31.08.2016

Bornova-İZMİR

2016

Hasan Yavuz ÜNAL tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “**NANO TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERDE YORULMA KARAKTERİSTİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 31.08.2016 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : **Prof. Dr. Yeliz PEKBAY**
Raportör Üye : **Prof. Dr. Hasan YILDIZ**
Üye : **Doç. Dr. Yusuf ARMAN**

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak sunduğum “**NANO TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERDE YORULMA KARAKTERİSTİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

.... / / 20..

İmzası

Adı-Soyadı

Hasan Yavuz ÜNAL

ÖZET**NANO TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERDE YORULMA
KARAKTERİSTİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

ÜNAL, Hasan Yavuz

Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yeliz PEKBEY

Ağustos 2016, 97 sayfa

Bu tezde, değişik oranlarda (%0,5- 0,75- 1,25 ve %2) nanokil, reçine ağırlığına göre düz dokuma cam kumaş takviyeli epoksi reçineli kompozit malzemeye eklenmiştir. Nanokil ilavesinin kompozit malzemenin mekanik ve yorulma dayanımına olan etkisi incelenmiştir. Bunun için, çekme testleri, üç nokta eğme testleri, düşük hız darbe testleri ve çeki-çeki yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Epoksi reçine içerisinde nanokillerin homojen dağılımları ultrasonik karıştırıcı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Nanokil katkısız ve ağırlıkça değişik oranlarda nanokil içeren kompozit plakalar elle yatırma tekniği ile üretilmiş, daha sonra tüm numuneler su jeti ile ASTM standartlarına göre kesilmişlerdir. Çeki – çeki yorulma testlerinde nanokil ilavesi kompozit malzemenin yorulma davranışını etkilemiştir. Çeki-çeki yorulma testleri oda sıcaklığında, gerilme oranı (R) 0,1' e eşit olacak şekilde yapılmıştır. Üç farklı gerilme seviyesi seçilmiştir. Bu gerilmeler, numunelerin çekme dayanımlarının % 50, 40 ve 30' udur. Test frekansı 5 Hz seçilmiştir. Testlerin sonuçlarına göre nanokil katkılı kompozit malzemelerin çekme, darbe ve yorulma davranışı olumlu yönde değiştirmiştir. Ağırlıkça katkı oranlarında incelendiğinde, %0,5 nanokil içeren numunelerin elastisite modülü, düşük hız darbe ve yorulma davranışları iyileşmiştir. Tüm numuneler içerisinde en fazla yorulma ömrü, statik testin %30' u gerilme uygulanan, ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numunede görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Nanokil, Düşük Hız Darbe Testi, Yorulma Analizi, GFRP, Eğilme Rijitliği

ABSTRACT**INVESTIGATION OF FATIGUE CHARACTERISTIC OF NANO
REINFORCED COMPOSITE MATERIALS**

ÜNAL, Hasan Yavuz

MSc in Mechanical Eng.

Supervisor: Prof. Dr. Yeliz PEKBEY

August 2016, 97 pages

In this thesis, various rates of nanoclay (0.5- 0.75- 1.25% and 2%) in weight with respect to epoxy resin added to plain weave glass fabric reinforced epoxy resin composite. The effect of nanoclay addition to composite material's mechanical and fatigue strength was investigated. For this purpose, tensile tests, three point bending tests, low velocity impact tests and tension-tension fatigue tests were performed. Homogenous nanoclay dispersion in epoxy resin was done with the help of ultrasonic mixer. Without nanoclay added and various rates of nanoclay containing composite plates were produced with hand lay-up techniques, after that all specimens were cut by water jet according to ASTM standard. In tension-tension fatigue test, nanoclay addition affects the composite materials' fatigue behavior. Tension-tension fatigue tests were done at room temperature, stress ratio (R) equal to 0.1. Three different stress levels were selected. These stresses were 50, 40 and 30 % of the specimens' tensile strength. Test frequency was selected 5 Hz. According to tests results, nanoclay added composite materials tensile, impact and fatigue behavior has changed in a positive direction. Considering the weight of the addition ratio, 0.5% nanoclay containing specimens' elasticity modulus, low velocity impact and fatigue behavior were increased. In all specimens, the longest fatigue life was seen from 0.5% of nanoclay containing specimen in 30% of stress level according to static test result.

Keywords: Nanoclay, Low Velocity Impact Test, Fatigue Analysis, GFRP, Bending stiffness

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince değerli bilgilerinden ve kıymetli görüşlerinden faydalandığım danışman hocam Sayın **Prof. Dr. Yeliz PEKBEY**'e, düşük hızlı darbe testlerinde yardımını esirgemeyen Dokuz Eylül Üniversitesi Makinesi Mühendisliği Bölümü'nden Sayın Doç. Dr. Bülent Murat İÇTEN ve Sayın Arş. Gör. Akar DOĞAN'a, yorulma testlerinde mesai saatleri dışında büyük özveri ile hafta sonunda bile çalışan Sayın Arş. Gör. Yüksek Mühendis Gökhan ÖZDAMAR'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu çalışma konusunda bana araştırma fırsatı veren Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Aydoğan ÖZDAMAR'a ve Mekanik Anabilim dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. Hasan YILDIZ'a, mekanik testlerde yardımcı olan Laboratuvar sorumlusu Sayın Yüksek Mühendis Zafer YENİER'e, bütün değerli mesai arkadaşlarıma ve Esan-Eczacıbaşı firmasına destekleri için teşekkür ederim.

Hayatım boyunca manevi desteklerini ve güvenlerini hissettirerek bana güç veren babam Nuh ÜNAL'a, Rahmetli annem Cevher ÜNAL'a; ablam Sakine ÜNAL ve biricik kardeşlerim Hilal ÇAKIROĞLU ile Emine Duru ÜNAL'a sonsuz sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Hasan Yavuz ÜNAL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZETvii
ABSTRACTix
TEŞEKKÜRxi
ŞEKİLLER DİZİNİxvi
ÇİZELGELER DİZİNİxx
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİxxii
1. GİRİŞ	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER ve YORULMA	21
2.1 Takviye Malzemeler	23
2.1.1 Karbon fiber	25
2.1.2 Cam fiber	28
2.1.3 Aramid fiberler	31
2.2 Matris Malzemeleri	34
2.2.1 Termoset matrisler	35
2.2.2 Termoplastik matrisler	41
2.3 Kompozit Üretim Yöntemleri	42
2.3.1 Reçine transfer kalıplama (RTM)	42

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.4 Yorulma	45
3. MALZEME ve METOT	48
3.1 Kullanılan Malzemeler.....	48
3.2 Plakaların Üretim Süreci.....	48
3.2.1 Matrisin hazırlanması	48
3.2.2 Takviyenin hazırlanması.....	50
3.2.3 Plakaların üretimi	51
3.3 Numunelerin Standartlara Uygun Kesimi.....	54
3.4 Gerçekleştirilen Testler	55
3.4.1 Çekme testi.....	55
3.4.2 Üç nokta eğme testi.....	57
3.4.3 Düşük hızda darbe testi	58
3.4.4 Yorulma testleri.....	59
4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	62
4.1 Çekme Testi Sonuçları	62
4.2 Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları.....	68
4.3 Düşük Hızda Darbe Testleri Sonuçları	72

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.3.1 Kuvvet – yer değiştirme eğrileri	72
4.3.2 Enerji – zaman eğrileri.....	76
4.3.3 Enerji profil diyagramları	80
4.3.4 Darbe hasarının karakterizasyonu.....	81
4.4. Yorulma Testi Sonuçları.....	83
5. DEğERLENDİRME	88
6. ÖNERİLER.....	91
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	92
ÖZGEÇMİŞ	97

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Sürekli ve kısa fiberli kompozitler	23
2.2. Dünya karbon fiber üretim miktarı	26
2.3. PAN ve katran temelli karbon fiber üretim yöntemi.....	27
2.4. Sürekli filaman cam fiber üretimi.	29
2.5. Aramid ve karbon fiber takviyeli kompozitlerin darbe tokluğu	33
2.6. Termoset molekülünün çapraz bağları.	36
2.7. Epoksid grubunun kimyasal yapısı	37
2.8. Doymamış polyesterin kimyasal kompozisyonu	39
2.9. Polyesterin kürleşme şeması.	40
2.10. Polimer molekülünün yapısı (a) amorf ve (b) yarı kristal.....	41
2.11. RTM yöntemiyle üretilmiş parçalar.	43
2.12. RTM kalıbı ve şematik parça üretimi.	44
2.13. Bir şafta meydana gelen yorulma hasarı.	46
2.14. Yorulma hasarına neden olan faktörler	46
2.15. Yükleme türleri, A) Tam değişkenli, B) Sıfır tabanlı ve C) Pozitif yükleme	47
3.1. Ultrasonik karıştırıcı ve soğutma çevrimi.	49

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.2. Reçinenin ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılması.....	50
3.3. Reçinenin kumaşa sürülmesi, A) Hazırlanan karışımın dökülmesi, B) Uzunluk boyunca reçinenin dağıtılması, C) Kısa kenar boyunca reçinenin dağıtılması, D) Tüm yüzeyin ıslatılmasından sonra kumaşın görüntüsü.....	51
3.4. Plakanın preslenmeye hazırlanması, A) Plakanın ölçüye getirilmesi, B) 15 kat kumaşın üst üste yerleştirilmesi, C) Plakanın yanmaz kağıtla kaplanması, D) Preslenmeye hazır plaka.....	52
3.5. Plakanın preslenmesi, A) hazırlanan paketin hidrolik prese yerleştirilmesi, B) Basınç uygulanması, C) Isıtıcının açılması.	53
3.6. Üretilmiş olan kompozit plakalar; A) Takviyesiz (yalın) plaka, B) %0,5 Nanokilli plaka, C) %0,75 Nanokilli plaka, D) %1,25 Nanokilli plaka, E) %2 Nanokilli plaka.	53
3.7. Su jeti ile kesim; A) Kesim makinası, B) Aşındırıcı partiküller, C) Düşük hız darbe testi numunesi kesimi, D) Çekme ve yorulma testleri numunesi kesimi, E) Kesme işleminden sonra plakanın görünümü.	55
3.8. Shimadzu marka test cihazı ve çekme testinin yapılışı.	56
3.9. Üç nokta eğme test düzeneği.	57
3.10. Düşük hız darbe testi makinası.	59
3.11. Yorulma testinin başlatılması, A) Numunenin cihaza bağlanması, B) Numune ismi ve boyutlarının girilmesi, C) Kuvvetlerin ve frekansın girilmesi, D) Değerlerin alınacağı çevrim sayılarının belirlenmesi, E) Makinanın kuvvet ve yer değiştirme limitleri ve F) Test sırasında bilgisayar ekranı.	60

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.1. Yalın numunenin gerilme – gerinim grafiği.	63
4.2. % 0,5 nanokil içeren numunenin gerilme – gerinim grafiği.	64
4.3. % 0,75 nanokil içeren numunenin gerilme – gerinim grafiği.	65
4.4. % 1,25 nanokil içeren numunenin gerilme – gerinim grafiği.	66
4.5. % 2 nanokil içeren numunenin gerilme – gerinim grafiği.	67
4.6. Ortalama çekme dayanımları grafiği.	67
4.7. Ortalama elastisite modülü grafiği.	68
4.8. Yalın numunenin üç nokta eğme davranışı.	68
4.9. Ağırlıkça % 0,5 nanokil içeren numunenin üç nokta eğme davranışı.	69
4.10. Ağırlıkça % 1,25 nanokil içeren numunenin üç nokta eğme davranışı.	70
4.11. Ağırlıkça % 2 nanokil içeren numunenin üç nokta eğme davranışı.	71
4.12. Darbe enerjisi 20 J olan numunelerin kuvvet – yer değiştirme grafiği.	72
4.13. Darbe enerjisi 30 J olan numunelerin kuvvet – yer değiştirme grafiği.	73
4.14. Darbe enerjisi 35 J olan numunelerin kuvvet – yer değiştirme grafiği.	74
4.15. Darbe enerjisi 40 J olan numunelerin kuvvet – yer değiştirme grafiği.	74
4.16. Darbe enerjisi 20 J olan numunelerin enerji – zaman grafiği.	77
4.17. Darbe enerjisi 30 J olan numunelerin enerji – zaman grafiği.	77

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.18. Darbe enerjisi 35 J olan numunelerin enerji – zaman grafiği.....	78
4.19. Darbe enerjisi 40 J olan numunelerin enerji – zaman grafiği.....	78
4.20. Çeşitli takviye oranları için enerji profil diyagramları.	80
4.21. Çeşitli takviye oranları için 20 J darbe enerjisinde ön ve arka yüzeylerdeki hasarlar.....	81
4.22. Çeşitli takviye oranları için 30 J darbe enerjisinde ön ve arka yüzeylerdeki hasarlar.....	82
4.23. Çeşitli takviye oranları için 40 J darbe enerjisinde ön ve arka yüzeylerdeki hasarlar.....	82
4.24. Yalın ve % 0,5 nanokilli numunenin S-N eğrisi.....	83
4.25. Yalın ve % 0,5 nanokilli numunelerin rijitlik değişimi.	84
4.26. Yalın ve % 1,25 nanokilli numunenin S-N eğrisi.....	85
4.27. Yalın ve % 1,25 nanokilli numunelerin rijitlik değişimi.	85
4.28. Yalın ve % 2 nanokilli numunenin S-N eğrisi.....	86
4.29. Yalın ve %2 nanokilli numunelerin rijitlik değişimi.....	87

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları.	21
2.2. Fiberlerin ve dökme malzemelerin mekanik özellikleri.	24
2.3. Hammaddesine göre karbon fiberin özellikleri.....	28
2.4. Cam fiber çeşitlerinin özellikleri	29
2.5. Aramid fiberlerin bazı özellikleri.....	32
2.6. Termoset ve termoplastik matrislerin karşılaştırılması.....	35
2.7. Termoset reçinelerin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	36
2.8. Bazı termoplastik reçinelerin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	42
2.9. Sıvı kalıplama yöntemleri	44
4.1. Yalın numunenin çekme testi sonuçları.	62
4.2. % 0,5 nanokil içeren numunenin çekme testi sonuçları.....	63
4.3. % 0,75 nanokil içeren numunenin çekme testi sonuçları.....	64
4.4. % 1,25 nanokil içeren numunenin çekme testi sonuçları.....	65
4.5. % 2 nanokil içeren numunenin çekme testi sonuçları.	66
4.6. Yalın ve nanokil içeren numunenin elastisite modüllerinin ve çekme dayanımlarının karşılaştırılması	68
4.7. Yalın numunenin esneklik özellikleri.	69

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.8. Ağırlıkça % 0,5 nanokil içeren numunenin esneklik özellikleri.....	69
4.9. Ağırlıkça % 1,25 nanokil içeren numunenin esneklik özellikleri.....	70
4.10. Ağırlıkça % 2 nanokil içeren numunenin esneklik özellikleri.....	71
4.11. Yalın ve nanokil içeren numunelerin eğilme rijitliklerinin ve eğilme dayanımlarının karşılaştırılması.....	71
4.12. 20 J enerjide tepe tepki kuvvetlerinin karşılaştırılması	75
4.13. 30 J enerjide tepe tepki kuvvetlerinin karşılaştırılması	75
4.14. 35 J enerjide tepe tepki kuvvetlerinin karşılaştırılması	75
4.15. 40 J enerjide tepe tepki kuvvetlerinin karşılaştırılması	75
4.16. Tüm enerji seviyelerinde tepe tepki kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	76
4.17. 20 J enerji seviyelerinde sönmömlenen enerji ve elastik enerji miktarı	79
4.18. 30 J enerji seviyelerinde sönmömlenen enerji ve elastik enerji miktarı	79
4.19. 35 J enerji seviyelerinde sönmömlenen enerji ve elastik enerji miktarı	79
4.20. 40 J enerji seviyelerinde sönmömlenen enerji ve elastik enerji miktarı	79
5.1. Nano takviyenin kompozit plaka üzerindeki etkileri.....	90

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
T_g	Camsı geçiş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
R	Gerilme oranı ($\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$)
S-N	Gerilme – ömür diyagramı (Stress - Number of cycle)
E	Elastisite modülü (MPa)
σ	Çekme dayanımı (MPa)
ρ	Yoğunluk (kg/ m^3)
F	Kuvvet (N)
A	Alan (mm^2)
L	Destekler arası mesafe (mm)
t	Kalınlık (mm)
b	Numune genişliği (mm)
u	Yer değiştirme (mm)
J	Enerji (Joule)
f	Frekans (Hz)

Kısaltmalar

DMA	Dinamik mekanik analiz
XRD	X-Işını Kırınım yöntemi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
TGA	Termogravimetrik analiz
CFRP	Karbon fiber takviyeli plastik
CPS	Simetrik çapraz tabaka
CPN	Simetrik olmayan çapraz tabaka
QIS	Yarı izotropik dizilim
EPD	Enerji profil diyagramı
OMK	Organik matrisli kompozitler
MMK	Metal matrisli kompozitler
SMK	Seramik matrisli kompozitler
PMK	Polimer matrisli kompozitler
ASTM	American Society for Testing and Materials
UHMWPE	Ultra yüksek moleküler yoğunluklu polietilen
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetre
MWCNT	Çoğul duvarlı karbon nanotüp
GFRP	Cam fiber takviyeli plastik
FSC	Yorulma dayanım sabiti
FSE	Yorulma dayanım üsteli

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
TEM	Geçirimli elektron mikroskobu
Micro-CT	Bilgisayarlı mikro tomografi
CNT	Karbon nanotüp
SEM	Taramalı elektron mikroskobu



1. GİRİŞ

Kompozit malzeme tanım olarak, iki veya daha fazla bileşenin bir araya gelerek bileşenlerin iyi özelliklerini alarak yeni bir malzeme oluşması olarak tanımlanabilir. Geleneksel metal malzemelerden farklı olarak kompozit malzemelerde özellikleri kendimiz tasarlarız. Şöyle ki izotropik malzemelerde özellikler yönden bağımsızdır. Halbuki kompozit malzemelerin özellikleri, içerisinde bulunan takviye fazından dolayı yöne bağlıdır.

Kompozit malzemelerin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Öncelikle uzay ve havacılık sektöründe kullanılmaya başlayan kompozit malzemeler zamanla zırh malzemeleri, spor arabalar, rüzgar türbini kanatları, surf tahtaları gibi ekipmanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Kompozit malzemelerin kullanımının yaygınlaşmasının nedeni hafifliğidir. Bunun yanında mekanik özellikleri geleneksel metal malzemelere göre yüksektir.

İnsanoğlunun farkına vardığı ilk gerçeklerden biri hiçbir şeyin sonsuza kadar devam etmeyeceğidir. İnsan yaşamı ani bir şekilde de son bulabilir veya uzun bir süre de devam edebilir. İnsan yaşamı gibi malzemelerinde bir sonlu kullanım ömrü vardır. Kullanım durumuna bağlı olarak malzeme ömrü, uzunda olabilir veya belirti vermeden sonlanabilir. Malzemelerin kırılmalarının en büyük nedeni yorulmadır. Yorulma, malzemenin statik yükünün altındaki bir yükte zamanla kırılması olarak tanımlanmaktadır. Bu sebeple malzemelerin yorulma davranışının araştırılması büyük önem arz etmektedir. Çeşitli yükleme modelleri kullanılarak gerilme – ömür eğrileri çıkarılmakta ve yorumlanmaktadır.

Kompozit malzemelerin ömürlerinin araştırılması da kullanıldıkları yerlerin kritik olmasından dolayı önem arz etmektedir. Teknolojinin hızlı gelişimi ile birlikte nano boyutlu partiküllerin üretimi mümkün hale gelmiştir. Kapladıkları hacme göre yüzey alanları çok büyük olan bu partiküllerin mekanik ve dinamik özelliklere olan etkileri bilim insanları tarafından araştırılmaya başlanmıştır. Ayrıca kompozit malzemelerin dayanımlarının gelen darbeye beraber düştüğü bilinmektedir.

Bu tez konusu olarak düz dokuma cam fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit malzeme içerisine nanokil ilave ederek düşük hızda gerçekleşen darbelere karşı malzemeyi daha dayanıklı yapmak, yorulma ömrünü arttırmak ve çekme dayanımı, elastisite modülü ve eğilme rijitliği gibi mekanik özellikleri arttırmak amaçlanmıştır.

Bu kısımda, literatürde yapılan çalışmalar en genel olarak nano takviyesinin “Mekanik Özelliklerine” ve “ Darbe Özelliklerine” etkisi olmak üzere iki alt başlıkta incelenecektir.

Nano takviyesinin mekanik özelliklerine olan etkisi

Nanokilin cam, karbon ve kevlar takviyeli kompozit malzemelerin reçinesine ilave edilerek mekanik, termomekanik ve yorulma özelliklerine etkisi literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Genel olarak düşük miktarda eklenen nano takviyenin, malzemenin yorulma ömrüne, artan çevrim sayısı ile birlikte rijitlik değişimine, çekme dayanımına, elastisite modülüne ve camsı geçiş sıcaklığına etkileri incelenmiştir.

Chowdhury ve arkadaşları (2006), epoksi reçine içerisine %1, 3, 5 oranında nanokil ilave ederek karbon fiber takviyeli kompozit plaka üretmişlerdir. Üretilen her iki plakadan bir tanesi üretim sonrası kürleşme işlemine tabi tutulmuş diğeri ise tutulmamıştır. Yaptıkları üç nokta eğme, dinamik mekanik analiz (DMA), kısa kiriş kayma testi ile mekanik ve termomekanik özellikleri tespit etmişlerdir. Nitrik asit ile plakaların fiber hacim oranı tespit edilmiştir. Hem nanokil içeren hem de nanokilsiz numunelerin hacim oranı %56 bulunmuştur. Plaka içerisindeki boşluk oranı nanokil eklendiğinde azalmıştır. Üç nokta eğme testine göre, sonradan yapılan kürleşme mekanik özellikleri kürleşme yapılmamış numuneye göre arttırmıştır. Her iki durumda da %2 nanokil hem dayanımı hem de modülü arttırmıştır. Fakat %3 nanokil dayanımı ve modülü düşürmüştür. Sonradan kürleşme yapılmayan %2 nanokilli numune yalın numuneye göre eğilme dayanımı %25, eğilme modülünü %14 arttırmıştır. Kürleşme yapıldığında ise aynı numune dayanımını %14, modülü ise %9 arttırmıştır. Dinamik mekanik analiz sonucuna göre, sonradan kürleşme yapılmayan numunelerde depolanan modül eklenen nanokil ile birlikte artmıştır. En iyi sonuç %2 ilavede yalın numuneye göre %49 artışla görülmüştür. %3 nanokil ilavesi ile birlikte sonuçlar kötüleşmeye başlamıştır. Depolanan modülün artması çapraz bağ yoğunluğunun arttığının da bir göstergesidir. Kaybolan modül ise %2 nanokil ilavesi ile birlikte yalın

numuneye göre %33 artmıştır. Yalın numunenin camı geçiş sıcaklığı (T_g) 64 °C iken %2 nanokil ilavesi T_g ' yi 8 derece arttırmıştır. Sonradan kürleşme yapılan numunelerde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Depolanan modül %2 nanokil ilavesinde % 52; kaybolan modül ise %47 artmıştır. Çalışılabilir sıcaklık kürleşme ile yükselmiştir. Yalın ve %2 nanokilli numunelerin T_g değeri sırasıyla 83 °C ve 96 °C'dir. Kırık yüzeyler SEM ile incelenmiştir. Görüntülere göre yalın numune, güzel fiber – matris yapışması göstermemiştir. Fiber çekip koparılması ve onu takiben fiber kırılması görülmektedir. Bunun aksine %2 nanokilli numune iyi fiber – matris yapışması göstermiş olup fiber çekip koparılması görülmemiştir. % 3 nanokil ekli numunede killer toplanma göstermiştir. Bu bölgelerde çatlak başlangıçları görülmüştür. Topaklanmaların nedeni olarak yazar, nanokil ilavesinin serbest hacmi azalttığını ve killerin hareket alanının daraldığını söylemektedir. Kısa kırı kayma testinde, benzer şekilde %2 nanokil ilaveli numune en iyi sonucu göstermiştir. Kayma dayanımındaki artış %30 seviyesindedir.

Bozkurt ve arkadaşları (2007), epoksi reçineye %1, 3, 6 ve 10 oranında organik modifiyeli ve modifiyesiz nanokil eklemiştirler. Organik modifiyeli yapılarak killerin kendi plakaları arasındaki bazal boşluk artmıştır. Cam fiber takviyeli kompozit malzeme üretmişler, mekanik ve termomekanik özelliklerini yalın kompozit malzemeye göre karşılaştırmışlardır. Plakaların fiber hacim oranı %40 – 44 arasında tespit edilmiştir. Artan kil miktarı ile plakaların boşluk miktarı artmıştır. Organik nanokilli kompozitte boşluk daha fazla olmuştur. Yapılan XRD testinde kilin karakteristik tepe noktası görülmemiştir. Bunun nedeni olarak kil partiküllerinin araya alma şeklinde dağılması ve toplanma yapmaması gösterilmektedir. Kırık yüzeylerden alınan SEM görüntülerine göre yalın reçinede yumuşak kırılma yüzeyi görülmektedir. %10'luk nanokil ilavesinde toplanma her iki nanokil çeşidinde görülmüştür. Organik modifiyeli killerin dağılımı daha başarılı olmuştur. Çekme testinde eklenen kilin çok bir etkisi olmamış hatta elastisite modülünü düşürmüştür. Üç nokta eğme testine göre, eğme dayanımı ve modülü %6 nanokil ilavesine kadar artmaktadır. Bu katkı seviyesinde dayanım ve modül sırasıyla %16 ve %13 artmıştır. Tabaka içi kayma dayanımı eklenen kil ile beraber düşmüştür. Düşüş organik modifiyeli numunede daha belirgindir. Bunun nedeni plaka içindeki boşluk miktarıdır. Kırılma tokluğu organik modifiyeli nanokil ilavesi ile beraber artarken, modifiye yapılmamış numunelerde ise düşmüştür. Bu düşüşün nedeni kil partiküllerinin toplanma yapmasıdır. Dinamik mekanik analiz sonuçlarına göre, her iki çeşit nanokil için % 6 takviye seviyesine kadar depolanan ve kaybolan modül artmaktadır. Bu artış depolanan

modülde %57 ve %51 seviyesindedir. Camsı geçiş sıcaklığı yalın numune için 81°C iken organik modifiyeli kil eklenmesiyle bu değer %5 seviyesinde artmıştır. Modifiye edilmemiş kilde ise %3 ilavesine kadar camsı geçiş sıcaklığı %3 artmış, daha fazla kil ilavesi camsı geçiş sıcaklığını düşürmüştür. Camsı geçiş sıcaklığı DSC ile de ölçülmüştür. Modifiyeli numunede camsı geçiş % 6 kil ilavesine kadar artarken % 10 ilavede değer düşmüştür. Modifiye edilmemiş kilde ise camsı geçiş sıcaklığında değişim görülmemiştir. Yalın numunede ise camsı geçiş sıcaklığı 70°C ölçülmüştür.

Xu ve arkadaşları (2008), karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit plakayı montmorillonit nanokil ile güçlendirmişlerdir. Matris ağırlığının %2 ve 4 oranında nanokil, reçine ile karıştırılmıştır. Plakalar vakum örtüleme ve otoklav yöntemiyle üretilmiştir. Numune kesitlerinin mikroskop görüntülerine göre; yalın numunede reçinece zengin bölge, nanokil ilaveli numunelere göre daha azdır. Fakat fiberler yeterli ıslanmış gibi görünmemektedir. Bunun nedeninin, uygulanan basıncın çok fazla olması sebebiyle reçinenin dışarı akması düşünülmektedir. Nanokil takviyeli numunelerde reçinece zengin bölgelerin çok olmasının nedeni; eklenen nano takviyenin reçinenin viskozitesini arttırdığı düşünülmektedir. Görüntü üzerinden fiber hacim oranı hesaplandığında eklenen nanokil ile birlikte fiber hacim oranı düşmektedir. DSC analizine göre; yalın ve %2 nanokil ekli numunelerin tepe sıcaklıkları ve ısı salınımında kayda değer fark görülmemiştir. Fakat fark %4 nanokil ekli numunede açıkça görülmektedir. Artan nanokil ile birlikte tepe sıcaklığı ve ısı salınımı, kilin ısı tutabilirliği yüzünden düşmüştür. Numunelere Mode I, tabaka içi kırılma tokluğu testi, üç nokta eğilme testi uygulanmış ve kırık yüzeylere SEM ile bakılmıştır. Mode I testine göre eklenen % 2 nanokil kırılma tokluğunu, yalın numuneye göre %53, %4 nanokil ise %85 arttırmıştır. Kırık yüzeyler incelendiğinde, yalın numunenin kırılma yüzeyinin yumuşak, fiberlerin tamamen dağıldığı ve fiber yüzeyinden reçine çıkıntısının olmadığı görülmekteyken nanokilli numunelerde fiber yüzeyleri takviyeli matris ile kaplanmış ve yüzeyin pürüzlü olduğu görülmektedir. Son olarak yapılan üç nokta eğilme testine göre, %2 nanokil eklemek eğilme dayanımını %38 arttırırken %4 nanokil eklemek dayanımı azaltmıştır. Bu azalmanın nedeni olarak nanokilin homojen olmayan dağılımı ve kompozit içerisindeki mevcut boşluklar verilmiştir.

Khan ve arkadaşları (2010), karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit plakayı montmorillonit nanokil ile güçlendirmişlerdir. Plakalar 12 kat [0/90] diziliminde yapılmıştır. Takviyesiz ve reçine ağırlığına göre %3 ve %5 nanokil içeren numunelere çekme testi ve çeki-çeki yorulma testi uygulamışlardır. Üretim

sonrasında SEM görüntülerine göre %5 kil içeren numunede ara yüzeye ekleme ve kısmı tam dağılım görülmüştür. Statik testte eklenen kil ile beraber numunelerin çekme dayanımı ve kopma uzama değeri artmıştır. Numuneler yorulma testinde, statik yükün %80- 70- 60- 45 gerilmelere maruz kalmışlardır. Aynı gerilme seviyesinde nanokil içeren numunenin ömrü yalın numuneye göre daha fazla bulunmuştur. % 45 gerilme seviyesinde, % 3 nanokil içeren numunenin ömrü yalın numuneye göre %74 daha fazla çıkmıştır. %60 gerilme uygulanan numuneler ara ara durdurularak çekme testine tabi tutulmuş ve artık özellikleri tespit edilmiştir. Bu testte de nanokil ekli numuneler daha yüksek artık gerilme değerleri göstermiştir. Makro seviyede numunelerin görüntüsüne bakıldığında ana kırılma mekanizması düzlem içi kayma gerilmesidir. Hem çekme hem de yorulma sonrası numunelerin kırık yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. Yalın numune sınırlı matris deformasyonu, fiber-matris ara yüzey ayrılması gösterirken nano takviyeli numunede pürüzlü kırık yüzey görülmektedir. Kullanılan nanokil yüzeye iyi yapışmış ve kuvveti fiberlere iletmede daha başarılı olmuştur. %5 nanokil içeren ve yalın numunenin yüzeylerinde mikro çatlakların ilerlemesi ile çukurluklar göze çarpmaktadır. Bu çukurlar yalın numunede geniş fakat sığ, nano takviyeli numunede ise dar ve derindir. Yorulma testi sırasında 5 bin, 10 bin, 20 bin, 25 bin ve 30 bin çevrimden sonra numunelere Scanning acoustic Microscopy (SAM) ile bakılarak hasar ilerlemesi yorumlanmıştır. Sonuçlara göre kil içeren numune 10 bin çevrimden önce daha çok hasar almış fakat bu hasarlara daha uzun süre dayanmıştır.

Böger ve arkadaşları (2010) , epoksi matris malzemesini %0,3 isli silika (SiO_2) ve aynı oranda çoğul duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ekleyerek geliştirmişlerdir. Vakum takviyeli reçine transfer kalıplama ile cam fiber takviyeli kompozit plakalar üretmişlerdir. İki çeşit elyaf dizilimi gerçekleştirilmiştir. Birincisi, yanal doğrultulardaki çatlakları gözlemlenmek ve fiberler arası kırılmayı tespit edebilmek için [90₉,0₈,0₈,90₉] dizilimi gerçekleştirilmiştir. Bu numunelere çekme testi uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre ilk fiberler arası kırılma yaklaşık %0,33 gerinim değerinde olmuştur. Nano takviyesiz numunenin bu noktadaki gerilme değeri 48,3 MPa'dır. Eklenen MWCNT ile bu değer %8 artmıştır. İslı silika eklendiğinde ise %16' lık bir artış görülmüştür. Çekme testi sırasında numune üzerinden direnç ölçümü gerçekleştirilmiştir. İlk matris çatlaklarından sonra dirençte artış devam etmiştir. Bunun nedeninin oluşan matris çatlaklarının iletkenlik yolunu keserek mesafeyi arttırdığı düşünülmüştür. İkinci elyaf dizilimi, kademeli çekme testi ve yorulma testlerini gerçekleştirmek için yapılmıştır. Düzlem ortasından asimetrik [0₄₉, 45₂₃, 90₅, -45₂₃] dizilim gerçekleştirilmiştir.

Kademeli çekme testinde kuvvet belirli bir gerinim değerine kadar uygulanmış ve ardından serbest bırakılmıştır. Numune üzerinden çatlak yoğunluğu ölçüldükten sonra tekrar döngü başlatılmıştır. Bu işlem isli silika ve yalın numuneye uygulanmıştır. İslı silikada çatlak yoğunluğunun, yalın numuneye göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Yorulma testlerinde üç farklı gerilme oranı kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla $R=0,1$; -1 ve 10^7 dur. Çeki-çeki yorulmasında matris malzemesi içerisine MWCNT veya isli silika eklemek fiberler arası çatlak başlangıcını ertelediği için yorulma ömrünü arttırmıştır. Çeki-bası yorulmasında MWCNT yüksek çevrim sayısında ömrü birkaç kat arttırmıştır. Bası-bası yorulması numunenin burkulmasına karşı hassastır. Eklenen nano takviyeler matris malzemesinin rijitliğini artırarak fiberleri burkulmaya karşı dayanıklı hale getirmiştir. $R= -1$ ve $R= 10$ gerilme oranlarında yüksek çevrim oranlarında nano takviyelerin etkisi görülürken, yüksek gerilme değerlerinde etkisi görülmektedir.

Manjunata ve arkadaşları (2010), GFRP kompozitin epoksi reçinesinin içerisine ağırlıkça %10 oranında nano boyutta silika (SiO_2) ekleyerek mekanik ve yorulma özelliklerini incelemiştir. Kompozit malzemede takviye fazı olarak E-glass fiber kullanılmış olup tabaka dizimi $[(+45/-45/0/90)_s]_2$ şeklindedir. Plakaların fiber hacim oranı %57 olarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen çekme testi sonuçlarına göre; kaba dökülen nano takviyeli epoksi reçine, yalın epoksi reçineye göre çekme dayanımını %19, elastisite modülünü %17 arttırmıştır. Benzer şekilde nano takviyeli GFRP kompozit malzeme, yalın GFRP kompozit malzemeye göre çekme dayanımını %5, elastisite modülünü %7 arttırmıştır. ASTM standartlarına göre yapılan yorulma testlerinde de eklenen nano takviyenin, dökülmüş epoksi numunede ve GFRP kompozitte yorulma ömrünü 3-4 kat arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Gerilme-ömür eğrilerinden çıkarılan Basquin yasası formülüne göre; nano takviye eklenmesi yorulma dayanım sabiti (FSC)' yi arttırmıştır ve yorulma dayanım üstelini (FSE)' yi azaltmıştır. Numunenin çevrim sayısı - rijitlik değişimi grafiğinden üç bölgenin varlığı görülmektedir. Yalın numune ilk iki bölgede, takviyeli numuneye göre sert düşüşler göstermiştir. Nano takviye ilavesi rijitlik düşüş hızını azaltmış ve ikinci bölgenin uzunluğunu arttırmıştır. Yüzeyler ışık mikroskobu ile incelendiğinde ± 45 derecedeki çatlaklar 10^4 çevrimden sonra oluşmuştur. Çatlak sayısı incelendiğinde, yalın numunedeki sayısının daha fazla olduğu ve artan çevrim sayısı ile birlikte arttığı görülmektedir. Çatlak sayısı bir süre sonra doyum noktasına ulaşmıştır. Yalın numune doyum seviyesine 6000 çevrimde ulaşırken takviyeli numune 15000 çevrimde ulaşmıştır. Kırık yüzeyler SEM ile

incelenmiştir. Yalın numunede düzgün kırık yüzeyler görülürken nanotakviyeli epoksida pürüzlü kırılma yüzeyi görülmüştür. Ayrıca silika nano parçacıkların kopmasından kaynaklanan boşluklar göze çarpmaktadır. Bu boşluklar nano parçacık boyutundan büyüktür. Parçacık kopması ve onu takip eden plastik boşluklar ana toklaşma mekanizmasıdır.

Altstädt ve arkadaşları (2011), çalışmalarında polyamid matris içerisine % 1, 2, 5, 10, 15 oranlarında nanokil ilave ederek yorulma çatlak ilerleme hızını incelemişlerdir. Yorulma testleri 10 Hz. frekansta yapılmıştır. Nanokil, reçine ile çift helezonlu ekstrüderler ile karıştırılmıştır. Test başlamadan önce numunelere bıçak ile keskin bir çatlak açılmıştır. Çatlak boyutu deney sırasında sürekli kontrol edilmiştir. Deney başlangıcında çatlak ilerleme hızı %5 nanokil içeren numuneye kadar aynıdır. Bu orana kadar kırılma tokluğu artar. Çatlak - zaman grafiğinin eğimi azdır. Bu, numunelerin sünekliğinin arttığını göstermektedir. %1 nanokil içeren numune yalın numuneye benzer davranış göstermiştir. Kil içeriği arttırıldığında durum tersine dönmüştür. %15 nanokilli numune gevrekleşmiştir. Bunun nedeni kilin topaklanması veya araya alma dağılımı göstermesindedir. TEM görüntülerine göre de tokluk ve çatlak ilerlemesine direnç, kilin reçine içerisindeki dağılımıyla alakalıdır. %5 orana kadar kil partikülleri tam dağılım göstermiştir.

Ferreira ve arkadaşları (2012), kevlar takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemeye nanokil ekleyerek hem çeki-çeki yorulması hem de üç nokta eğme yorulması özelliklerini araştırmışlardır. Kil oranı sabit %3 alınmıştır. Çekme testi sonuçlarına göre eklenen nanokil rijitliği %10 arttırırken dayanımı %2 düşürmüştür. Kırılma, aksenal olarak dizilen fiberlerin kırılması ve buna eşlik eden bazı boylamasına tabakalar arası delaminasyondur. Yapılan çeki-çeki yorulma testinde numunelerin orta noktasına ısı ölçer takılmış ve değişim gözlenmiştir. Testin başlangıcında matris çatlakları olduğu için sıcaklık tepe noktasına ulaşmıştır. Sıcaklık denge durumuna ulaştıktan sonra ömrün %50 si ile %80 i arasında büyük delaminasyonlardan ötürü sıcaklık tekrar artmıştır. Son olarak parçanın kırılmasına yakın boyuna doğrultuda gerçekleşen fiber kırılmalarından dolayı sıcaklık tekrar artmıştır. Rijitlik sıcaklıkla ters orantılı olarak bu noktalarda düşüş göstermiştir. Ayrıca nanokil yorulma dayanımını %12 arttırmıştır. Üç nokta eğme testinde ise yalın numunenin dayanımı daha fazla çıkmıştır. Fakat rijitlik, nano takviyelide %28 daha fazla görülmüştür. Üç nokta eğme yorulma testinde numunelerde kırılma gerçekleşmemiştir. Bunun yerine kuvvetteki %25 düşüşte test durdurulmuştur. Sonuçlara göre, tüm numunelerde ilk

çevrimle beraber gerilme aralığı düşüştü olmuştur. Takviyesiz numunede bu düşüş daha hızlıdır. Eklenen nanokil ile beraber yorulma dayanımı düşmüştür. Bunun nedeninin matrisin kırılmalılığının artması, fiber-matris yapışmasının zayıf olması ve kuvvet uygulanan noktada yüksek bası gerilme yığılmasının oluşması gösterilmiştir.

Toumi ve arkadaşları (2013), ürettikleri cam fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemeye üç yönde çekme ve fiber yönünde yorulma testi yapmışlardır. Deneyler sırasında tahribatsız muayene yöntemleri ile numuneler sürekli incelenmiştir. Numune üzerine mekanik ekstensometre bağlanarak rijitlik düşüştü de takip edilmiştir. Çekme testine göre kuvvete dik yönde mikro çatlaklar oluşmuş ve bunlara fiber-matris arayüzey ayrılması eşlik etmiştir. Daha sonra boyuna çatlaklar yük doğrultusunda kırılmadan önce görülmüştür. 0 derece ve 90 derecede yapılan testlerde rijitlik düşüştü görülmemiştir. Sadece numunenin kırılma anında düşüş olmuştur. 45 derecelik numunede yapılan testte testin sonlarına doğru rijitlik düşüştü görülmüştür. Yorulma testinde ana kırılma mekanizmaları; yanal doğrultudaki matris çatlakları, delaminasyonlar, ayrılmalar ve fiber kırılmalarıdır. Rijitlik açısından değerlendirdiğimizde ise numunenin son andaki keskin düşüştü hariç azalma görülmemiştir. Elde edilen verilerden iki çeşit ömür modeli kullanılabilir. Toumi ve arkadaşları, yapısal parçaların ömürlerinin uzun olmasından dolayı kuvvet yasasına bağlı olan denklemi seçmiştir. Gerilme düşüştüne göre hesaplama yapan modelde, yarı deneysel verilere yarı da sabitlerin deneme yanılma yöntemiyle bulunmasına dayanmaktadır. Bu modelde, gerilme oranı (R), frekans ve uygulanan maksimum gerilme formüle değişkenler olarak tanımlanmıştır. Oluşturulan model ile yapılan yorulma deneyleri uyumlu bulunmuştur.

Jin ve arkadaşları (2013), üç boyutlu tabaka tabaka kenetlenmiş dokuma cam kumaşın yorulma ömrünü, çeki-çeki yorulma testi ile tespit etmişlerdir. Öncelikle çekme testi gerçekleştirilmiş, ardından çekme dayanımının %40, 50 ve 60 seviyelerindeki gerilmesi numunelere uygulanarak S-N eğrisi çizilmiştir. Sonuçlara göre, çekme testinde maksimum kuvvet 7235,68 N olarak bulunmuş ve ana hasar nedeninin dalgalı boyuna ipliklerin kırılması ve iplik çekip koparılması olduğu görülmüştür. Hasar numune kenarından başlayarak numune merkezine doğru ilerlemiştir. Yorulma testinde ise; uygulanan gerilme arttıkça ömür azalmıştır. Çevrim sayısının artışı numunenin uzamasındaki artışı da etkilemiştir. Ayrıca kuvvet – uzama döngüleri de artan çevrim sayısı ile beraber genişlemiştir. Bu hasar alanının arttığı anlamına gelmektedir. Numune rijitliğine bağlı olarak

çizdirilen hasar indeksi grafiğine göre numune üç bölgeye ayrılmaktadır. Birinci ve üçüncü bölgeler keskin artışları barındıran ve ömrün kısa bir bölümünü işgal eden bölgeler iken ikinci bölgede yavaş ve düzenli bir artış görülmektedir. Numunenin yüzeyi ve kesit alanı ışık mikroskobu ve micro-CT ile incelenmiştir. Reçine çatlağı, boyuna iplik kırılması ve reçine – boyuna iplik arayüzey ayrılması ana hasar nedeni olarak görülmektedir. Sonlu elemanlar programı kullanılarak gerilme dağılımı incelenmiş ve kuvvetin ilk ve son atkı iplikleri arasında taşındığı, dalgalı boyuna ipliklerin ana kuvvet taşıyan elemanlar olduğu ve iç bölgede gerilmenin yüksek olmasından dolayı arayüzey ayrılmasının olduğu tespit edilmiştir. %50 gerilme seviyesinde yapılan testte numune iki kere durdurulmuş ve micro-CT ile incelenmiştir. Ömrün %10’unda sadece reçine çatlağı görülürken, %80’ inde reçine hasarı, reçine - boyuna iplik arasında arayüzey ayrılması ve boyuna iplik kırılması görülmüştür.

Loos ve arkadaşları (2013) yaptıkları çalışmada poliüretan matris içerisine ağırlıkça %0,1 ve 0,3 karbon nanotüp ekleyerek nano kompozit üretmişlerdir. Ürettikleri bu malzemeye çekme ve dört farklı gerilmede çeki-çeki yorulma testi uygulayarak yalın reçineye olan katkısını incelemişlerdir. Çekme testi sonuçlarına göre, eklenen karbon nanotüp ile beraber elastisite modülü, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri artmıştır. En iyi sonuçlar %0,3 nano katkısında bulunmuştur. Tokluk yalın numuneye göre %38 artmıştır. Yorulma testi sonuçlarına göre ise yüksek genlikte CNT ekli numunelerin ömürleri daha uzun olmuştur. Bu artış %248 seviyesindedir. CNT polimerdeki kırılmayı çatlak köprüleme ile bastırmıştır. Kırık yüzeyler SEM ile incelendiğinde yalın reçine yumuşak kırılma yüzeyi göstermiştir. CNT ilavesi ile yüzey pürüzlü kırılma göstermiştir. Nanotüplerin dağılımı homojen gerçekleşmiştir. 50 MPa gerilmede yapılan test sonucuna göre CNT’ ler yüzeyden çekip koparılmıştır. Bu durum numunelerin enerji sönümlemesini arttırarak ömrünü uzatmıştır. Sonuç olarak yazar, poliüretan matrisli karbon nanotüp takviyeli kompozit malzemeyi gelecekte epoksi reçine sistemi yerine rüzgar türbini kanatlarında kullanılabileceğini savunmaktadır.

Kavitha ve Prakash (2013) çalışmalarında büyük boyutlu yapıların yorulma testlerinin pahalı ve zaman alıcı olması sebebiyle iki çeşit ölçeklendirme (tabaka seviyesinde ve alt lamina seviyesinde) yaparak numunelerin sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Ayrıca cam fiber takviyeli kompozit malzeme içerisine %2, 3 ve 4 oranında nanokil ekleyerek hem ölçeklendirme etkisine hem de artık gerilmeye olan etkisini incelemişlerdir. Çekme testi sonuçlarına göre, % 3 nanokil

elastisite modülünü %13 arttırırken %2 ve 4 nanokil elastisite modülünü düşürmüştür. Yalın numunede tabaka seviyesinde ölçeklendirme yapıldığında, çekme dayanımı kalınlık 3 mm ve 2 mm' ye inince sırasıyla %23 ve %22 artmıştır. Kırılma gerinimi ise sırasıyla % 9 ve % 7 azalmıştır. Kırılma mekanizmaları, delaminasyon ve fiber kırılmasıdır. Alt lamina seviyesinde ölçeklendirmede, 3 mm kalınlıkta değişim olmazken, 2 mm kalınlıkta çekme dayanımı %32, kırılma gerinimi %12 artmıştır. İki ölçeklendirme seviyesindeki çekme dayanımları karşılaştırıldığında, aynı doğrultudaki tabakalarda daha iyi tabakalar arası yapışma olduğu için tabaka seviyesinde ölçeklendirmede %3 daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Reçine içerisine %3 nanokil ekleyince yalın numuneye göre çekme dayanımı %12 artarken kırılma gerinimi %13 azalmıştır. Bu numunelere tabaka seviyesinde ölçeklendirme yapınca, 3 mm kalınlıkta çekme dayanımında değişim yoktur fakat kırılma geriniminde %9 azalma görölmüştür. 2 mm kalınlıkta bu düşüş %26' dır. Alt lamina seviyesinde 3 mm ve 2 mm kalınlıkta, çekme dayanımı %3 ve %4; kırılma gerinimi %23 ve %33 azalmıştır. Çeki- çeki yorulma testi 200000 çevrim uygulanmıştır. Yalın numunede rijitlik, tabaka seviyesinde ve alt lamina seviyesinde sırasıyla, %24 ve %26; 2 mm kalınlıkta ise %44 ve %48 azalmıştır. Rijitlik değeri alt lamina seviyesinde test başlamadan daha yüksektir. Nanokil içeren numunelerde rijitlik yalın numuneye göre tabaka seviyesinde %13 artarken, alt lamina seviyesinde değişim yoktur. Rijitlik, kalınlık 3 mm inince %22; 2 mm inince % 46 azalmıştır. Yalın numunede 200000 çevrim sonrası yapılan çekme testinde, her iki ölçeklendirme türünde de çekme dayanımı ciddi düşüş yaşamıştır. Nanokil ekli numunede ise tabaka seviyesinde ölçekli numunede kalınlıktan bağımsız %6 düşüş görölürken, alt lamina seviyesinde artık gerilme çok fazla düşüş göstermiştir.

Ferreira ve arkadaşları (2013), epoksi içerisine %1-3 oranında nanokil ilave ederek yorulma davranışını incelemiştir. Nano parçacık dağılımı XRD, SEM ve TEM görüntüsü ile incelenmiştir. XRD sonuçlarında 6° civarında toplanmaların olduğu görölmüştür. Morfolojik analizlere göre %1 nanokil içeren numunede; ara yüzeye ekleme (intercalation) ve tam dağılım (exfoliation) görölürken %3 nanokil içeren numunede sadece ara yüzeye ekleme (intercalation) formları görölmüştür. Mekanik testler ASTM standartlarına uygun olarak oda sıcaklığında yapılmıştır. Çekme testi sonuçlarına göre nanokil eklemek rijitliği arttırırken çekme dayanımını düşürmüştür. Ayrıca kopma anındaki gerinimi azaltmış olup malzeme kırılma göstermiştir. Bunun nedeninin nanokillerin topaklanması olduğu düşünölüp SEM görüntüleri ile desteklenmiştir. Yorulma testinde de eklenen nanokil ile beraber yorulma dayanımı düşüş göstermiştir. Ağırlıkça %3 nanokil içeren

numune, yorulma dayanımını %6 düşürmüştür. Topaklanmalar, homojen olmayan dağılımlar ve gözeneklilik yorulma çatlak başlangıcına hassas hale gelmiştir. Yapılan incelemede kırılma mekanizmaları eklenen takviye ile değişmediği görülmüştür. Ayrıca, ağırlıkça %3 nanokil içeren numunenin merkezine delik açılmış ve yorulma davranışı incelenmiştir. Sonuçlara göre yorulma dayanımı % 40 düşüş göstermiştir. Ek olarak, kompozit malzemelerin su absorbe etme kapasiteleri incelenmiş olup kil miktarı arttıkça su emişi artmıştır. Bunun nedeninin malzeme içerisindeki kusurlar olduğu öne sürülmüştür. Son olarak ise numuneler saf su içerisinde 60 gün bekletilerek yorulma testi uygulanmıştır. Yalın ve ağırlıkça %3 nanokil içeren numunelerde gerçekleştirilen bu testlerde dayanım %15 düşüş göstermiştir.

Brunbauer ve Pinter (2014) çalışmalarında farklı dizilimlerdeki karbon fiber/ epoksi kompozit malzemeye çekme ve yorulma testi uygulamışlar ve farklı ölçüm teknikleri ile test sırasında gerinim değişimini gözlemişlerdir. Ölçüm için kullanılan dizilimler tek eksenli 0° , 45° , 60° , 90° ve $\pm 45^\circ$ dir. Ölçüm yöntemleri olarak ise strain gauge, mekanik ekstensometre, kamera ve piston uzama miktarını kullanılmıştır. Testlerin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için numune ısınmasına dikkat edilmiştir. Tek eksenli olmayan numunelerde ısınma eğilimi tek eksenli numunelere göre fazladır. Test sonuçlarına göre tek eksenli numuneler, test yönüne ve numune yüzeyinin temizliğine karşı hassastır. Piston uzamasının ölçtüğü gerinim değerinin, numune ile makine arasında rijitlik farkı arttıkça doğruluğu artmaktadır. Optik sistemle gerinim ölçme, çekme testinde tüm dizilimlerde başarılı sonuçlar verirken yorulma testinde desenin sürekli hareket etmesi nedeniyle uygulanamaz. Strain gauge tek eksenli numunelerin testleri için önerilmemiştir. Eksen kaçıklığı, numune yüzeyindeki ilerleyen hasar ölçümü sağlıksızlaştırmıştır. Farklı dizilimler için farklı ölçme yöntemleri önerilmiştir. Bunlar; 0° için piston yer değiştirmesi yanında ilk birkaç bin çevrim için mekanik ekstensometre veya kamera takibi ile hassas rijitlik değeri bulunabilir. Tek eksenli numunelerden 45° ve 60° için yanal doğrultudaki kuvvetleri hassas ölçüm için üç boyutlu load cell kullanılmalıdır. Piston yer değiştirmesi yine takip edilmelidir. Tek eksenli 90° ve $\pm 45^\circ$ numunelerin yorulma testinde mekanik ekstensometre tavsiye edilmiştir.

Borrego ve arkadaşları (2014), üç eksenli ($0^\circ / \pm 45^\circ$) cam fiber kumaş ve epoksi matris içerisine, %1 - 3 oranlarında organik- montmorillonit nanokil ve % 0,5 – 1 oranlarında çoğul duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ekleyerek kompozit plaka üretmişlerdir. Üretilen plakaların statik yükleme ile çekme, üç nokta eğme

ve dinamik yükleme ile çeki-çeki ve üç nokta eğme yorulma özelliklerini incelemişlerdir. Nano takviyenin homojen dağılımını incelemek için Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) ile görüntü alınmıştır. Analizde, nanokilin homojen dağılımı görülürken, karbon nanotüp kötü dağılım göstermiştir. Yapılan statik testlerde nano takviye ilavesi dayanımını % 3 ile 8 arasında düşürmüştür. Üç nokta eğme-yorulma testine göre, %1 nanokil ilavesi yorulma dayanımını arttırırken, %3 nanokil ilavesi düşürmüştür. Benzer durum karbon nanotüp ilavesinde de görülmüştür. Çeki-çeki yorulma testinde nano takviyenin katkısı performansı çok etkilememiştir. %3 nanokil ve %1 karbon nanotüp, yorulma dayanımını %3 düşürmüştür. Diğer takviye oranları yorulma dayanımını bir miktar arttırmıştır. En iyi sonuçlar % 0,5 karbon nanotüp ilaveli numunede görülmüştür. Yorulma testi sırasında, numunenin orta noktasındaki sıcaklık değişimi ölçülmüştür. Sıcaklık artışı 25 °C' nin altında kalarak camsı geçiş sıcaklığına yaklaşmamıştır.

Brunbauer ve Pinter (2015) çalışmalarında klasik lamina teorisini yarı-izotropik dizilimindeki karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin yorulma özelliklerini tespit etmeye uyarlamışlardır. İki farklı dizilimin, elastisite ve kayma modüllerini, poison oranlarını kullanarak formülizasyonu tamamlamışlardır. İlk dizilim çeşidinde, tek eksenli 0°, 45°, 90° lik plakaların mekanik özellikleri kullanılmıştır. İkinci dizilimde ise tek eksenli 0°, 90° ve ±45° lik plakalar kullanılmıştır. Bunun yanında iki çeşit kayma modülü tespit yöntemi kullanılmıştır. Plakaların rijitlik değişimleri, yorulma testinin dört çevrimindeki değerlerle takip edilmiştir. Sonrasında bu değerler yarı-izotropik dizilimdeki plakanın deneysel sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çekme testinden elde edilen bulgulara göre, hesaplanan fiber yönünde elastisite modülü ve poison oranı, deneysel sonuçlardan %7 ve %9 daha fazla bulunmuştur. Bunun nedeni hesaplama yaparken malzemenin ideal malzeme olarak kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır. 2×10^4 çevrimde hesaplanan elastisite modülü deney sonucundan yine yüksek çıkmıştır. Fakat hesaplanan ile ölçülen rijitlik düşüşü uyumlu bulunmuştur. Çevrim sayısı arttırıldığında her iki alternatif hesap yönteminde rijitlik düşüşünü fazla hesaplamıştır. Son olarak $1,5 \times 10^6$ çevrim sayısında, ikinci kayma modülü hesaplama yönteminin sonucu, deneysel sonuca göre sadece % 2 hata ile bulunmuştur. Uygulanan tüm kuvvet seviyelerinde kayma modülünü bulmak için kullanılan ±45° lik numuneler daha gerçekçi sonuçlar vermiştir.

Brunbauer ve arkadaşları (2015) yaptıkları çalışmada tek eksenli karbon/epoksi plakada fiber hacim oranının yorulma davranışına ve hasar mekanizmasına olan etkisini incelemişlerdir. Testler gerçekleştirilmeden önce uygun kürleşme sıcaklığı ve temperlemenin mekanik özellikler üzerindeki etkisi epoksi numuneler üzerinde tespit edilmiştir. Farklı kürleşme şartlarında tüm numunelerin beş saatte kürleştiği ve temperlemenin mekanik özellikleri (elastisite modülü, çekme dayanımı ve maksimum yüzde uzama) değiştirmedeği görülmüştür. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) ve Dinamik Mekanik Analiz (DMA) sonuçlarına göre camsı geçiş sıcaklığı sırasıyla, 93°C ve 97°C bulunmuştur. Termogravimetrik Analize (TGA) göre polimer malzemenin ısıl bozulma sıcaklığı 350-450 °C arasında olurken, karbon fiberin ısıl bozulması 550-750 °C arasındadır. Fiber hacim oranı %30 ve %55 olan tek eksenli 0°, 45°, 90 derecelerdeki numunelerin çekme testi sonuçlarına göre elastisite modülü artan fiber oranı ile birlikte artarken, kopma uzaması azalmaktadır. Epoksi numunelerin çekme dayanımı fiber hacim oranı % 30 olan tek eksenli 90° ve 45° deki numunelerden fazla çekme dayanımı göstermiştir. Ayrıca epoksi numunenin kopma anındaki uzaması CFRP numunelerden birkaç kat fazladır. 0° deki numunenin gerilme – ömür diyagramı (S-N) ve SEM sonuçlarına göre; her iki farklı fiber hacim oranlı numunede benzer eğim görülürken fiber hacim oranı fazla olan numunede daha yüksek yorulma dayanımı görülmüştür. İki numunede de fiber baskın hasar mekanizması görülmüştür. Kırılma patlama şeklinde olmuştur. 45° deki numunelerin yorulma testi ve SEM sonuçlarına göre; iki numune de benzer eğimi göstermiştir. Epoksi numune, %30 fiber hacim oranına sahip numuneye göre daha fazla yorulma dayanımı göstermiştir. Kırılma yüzeylerine göre; fiber hacim oranı düşük olan numunede matris dominant hasar mekanizması olurken, hacim oranı fazla olan numunede fiber kırılmaları ve fiber koparılıp alınması ana kırılma mekanizmasıdır. 90° deki numunelerin yorulma testi ve SEM sonuçlarına göre; her iki fiber hacim oranı için farklı eğimler mevcuttur. Uygulanan yüksek gerilmelerde, fiber oranı yorulma davranışını önemli ölçüde değiştirmemiştir. Fakat düşük gerilmelerde, fiber oranı yüksek olan numune, en az iki kat fazla ömür göstermiştir. Farklılık hasar mekanizmalarında da görülmektedir. Yüksek fiber hacim oranına sahip numunede fiber köprüleme, fiber koparılıp alınması ve kırılma yüzeyine dik fiberler görülürken, düşük fiber hacim oranlı numunelerde fiber boyunca arayüzey ayrılması ve düzlem kırılması görülmüştür. Verilerin saçılma genişliği incelendiğinde, matris yoğunluğu fazla olan numunelerde değerler geniş bir bölgeye yayılmıştır. 0° deki numunenin 5×10^6 çevrimde yorulma dayanımı, çekme dayanımına göre %60' lar seviyesine düşerken, diğer yönlerdeki numuneler %30' lar seviyesine düşmüştür.

Nordin ve arkadaşları (2015), epoksi matristeki nanokil varlığının ve topaklanma boyutunun yorulma ömrüne olan etkisini yaptıkları çalışma ile incelemişlerdir. Nanokil topaklanmasını, kırık yüzeylere elementel analiz yaparak yorumlamışlardır. Epoksi reçine içerisine %1, 3 ve 5 oranında eklenen nanokilin çekme testi sonuçlarına göre; %1 nanokilli numune yalın numune ile yaklaşık olarak aynı dayanımı gösterirken, % 3 ve % 5 takviyeli numunelerin dayanımı, yalın numunenin dayanımının sırasıyla %74 ve %67' si seviyesine düşürmüştür. Fakat bu numunelerde elastisite modülünde çok az artış görülmüştür. Çeki-çeki yorulmasında tüm nanokil ekli numunelerde ömür düşmüştür. Özellikle %3 ve %5 nanokil içeren numunelerde ciddi düşüşler görülmüştür. Kırık yüzeyler optik mikroskopta incelendiğinde, çatlakların kilin topaklandığı zayıf noktalardan başladığı görülmüştür. Yorulma testi uygulanmış numunelerin hem kırık hem de normal kesitine elementel analizle bakıldığında silisyum elementinin topaklanmaları, keskin sınırlar ile görülmektedir. Ayrıca kırık yüzeylerde daha fazla nanokil bulunduğu görülmüştür. 500 x 500 mikronluk bir alan inceleme için alındığında, kil partiküllerinin mikro seviyede topaklanma eğiliminde olduğu görülmüştür. %1 ve %3 nanokil ekli numunelerde topaklanma alan boyutu 32 mikronkare iken %5 nanokil ekli numunede bu alan 44 mikronkareye çıkmıştır. Nanokil miktarı arttıkça, ortalama ve maksimum topaklanma boyutu, topaklanan bölge miktarı ve tüm alana oranı artmaktadır. Ayrıca elde edilen görüntülerden malzemenin kırılmasının sadece topaklanmaya bağlı olmadığı, aynı zamanda topaklanma boyutu ve büyük ölçekteki sayısına bağlı olduğu görülmüştür. Erken kırılmalarda, topaklanmanın maksimum boyutu daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

Helmy ve Hoa (2014) yaptıkları çalışmada değişken kesitli cam fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemeye nanokil ilave ederek yorulma özelliklerini incelemişlerdir. Numunelerin bir ucu 3 laminadan oluşurken diğer uç 2 laminadan oluşmaktadır. Geçiş 10 derecelik açıda olmaktadır. 3 farklı dizilim kullanılmıştır. İlk dizilim, son fiber 90 derece iken ilk fiberin 0 derece olduğu simetrik çapraz tabaka (CPS); ikinci dizilim şekli ise, ilk ve son fiberin 90 derece olduğu simetrik olmayan çapraz tabaka (CPN) ve son olarak 0, 90 ve 45 derecenin mevcut olduğu yarı izotropik (QIS) dizilimdir. Çekme testi sonuçlarına göre; üç dizilimde de nanokil ilavesi ile rijitlik artmıştır. Fakat kırılma gerinim değeri düşmüştür. CPS ve CPN'de dayanım ve rijitlik QIS' e göre % 66 ve % 38 fazladır. Eklenen nanokil ile birlikte bu fark azalmıştır. CPS ve CPN benzer çekme özellikleri göstermişlerdir. CPN' e nanokil ilave edilince rijitlik %7, dayanım %4 artmıştır. Bu mekanik özellikler CPS' de %10 ve %3; QIS' te %11

ve %6 artmıştır. Takviyeli ve takviyesiz numuneler benzer şekilde kırılmıştır. Kırılma çapraz tabakalarda farklı yönlerdeki dizilimler arasında olurken yarı izotropik malzemede 45 ile 0 derece arasından kırılmıştır. Yorulma testleri yüksek gerilmede yapılmıştır. Hasar reçinece zengin bölgede başlamıştır. Çatlak ortadaki ile diğer iki lamina arasında ilerlemiştir. Numunenin ince ucunda delaminasyon başlamış ve son olarak kalın kısımdan numune kırılmıştır. Aynı gerilme yüzdesinde nanokilli numuneler daha fazla ömür göstermişlerdir. En fazla ömür artışı %50 yükte karşılaşılmıştır. Yani nanokil varlığı düşük gerilmede daha etkili olmuştur. CPN dizilimindeki numune en fazla ömrü gösterirken, en az ömrü QIS dizilimindeki numune göstermiştir. Kilin numune ömrünü arttırmasının nedeninin, kil partiküllerinin boşlukları doldurması ve iki lamina arasındaki kırılma dayanımını arttırması gösterilmektedir. Çatlak büyüme hızı değerlendirildiğinde ise CPN' de hızın komşu iki tabakanın aynı doğrultuda olmasından dolayı en yavaş olduğu görülmüştür. Rijitliğin çevrim sayısı ile olan değişimi grafiksel olarak incelendiğinde, takviyesiz numunede düşüş keskin ve belirgindir. 3 bölge göze çarpmaktadır. İlk bölgede matris çatlakları eksen dışı tabakalarda başlarken, 2. Bölgede delaminasyon mevcuttur ve rijitlik düşüşü devam etmektedir. Son olarak ise numunenin kalın bölgesinde delaminasyonun tamamlanması ile birlikte fiber kırılması gerçekleşmiştir. Nano takviyeli numunede matris çatlakları sayısı ve yoğunluğu daha azdır. Dolayısıyla rijitlik düşüşü daha yavaştır.

Raghul ve arkadaşları (2016) yaptıkları derleme makalesinde, cam fiber takviyeli epoksi matrisli kompozitlerde nanokil ilavesinin mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Yapılan araştırmada mekanik özelliklerin belirli bir miktar nanokil eklenmesiyle arttığı görülmüştür. Genel olarak çalışmalarda %1 -7 arasında nanokil eklendiğini fakat en iyi sonuçların %1, 3, 5 oranlarında alındığını tespit etmişlerdir. Eklenen nanokilin, arayüzey kayma dayanımını arttırdığı, termal büyüme katsayısını ise azalttığı görülmüştür. Optimum özellikler %5 nanokil ilavesinde yakalanmış olup daha fazla nanokil katıldığında mekanik özelliklerin kötü etkilendiği görülmüştür.

Nano takviyesinin darbe özelliklerine olan etkisi

Nano takviyenin reçine içerisine katılarak darbe özelliklerine etkisini inceleyen makaleler de mevcuttur. Aşağıda düşük hız darbe testi uygulanmış makaleler özetlenmektedir:

Avila ve arkadaşları (2007), düz dokuma cam fiber kumaş üzerine nanokil ile takviye edilmiş epoksi reçine sürerek darbe özelliklerini incelemişlerdir. Katılan nanokil miktarı reçine ağırlığının %1, 2, 5, 10' u oranındadır. Testler ASTM standartlarına göre yapılmış olup test enerjileri 20, 40, 60, 80 J seviyesinde alınmış ve darbe ucunun numune üzerinden birden fazla sekmesine izin verilmiştir. Test sonuçlarına göre, enerji seviyesi arttıkça sekme sayısı azalmıştır. Nanokil miktarı arttıkça rijitlik artmış fakat kırılma tokluğu ve darbe sönümlene miktarı azalmıştır. Rijitlik artışı %5 nanokilli numune için %11 seviyesindedir. En iyi sonuçlar %5 nanokil ilaveli numunede görülmüştür. Darbe enerjisi 80 J' e getirildiğinde delinme sadece %5 nanokil ilaveli numunede gerçekleşmemiştir. Testler tamamlandıktan sonra numunelere kuvvetli ışık vererek hasar alanları karşı yüzeyinden ölçülmüştür. Ölçümler hem ön hem arka yüzey için yapılmış olup görüntü işleme programı ile boyutları tespit edilmiştir. Numunelerin arka yüzeylerindeki delaminasyon alanları, darbeyi alan ön yüzeylerindeki göre daha fazladır. Çünkü arka yüzey çeki kuvvetine maruz kalmaktadır. 20 J enerji seviyesinde ortalama enerji sönümlene değeri, nano takviye ile beraber %48 artmıştır. Enerji seviyesi sırasıyla 60 J ve 80 J olduğunda bu artış oranı %15 ve % 3 seviyelerinde gerçekleşir. 80 J darbe enerjisinde numunelerin kesit görüntüsü incelendiğinde, takviyesiz numuneden %10 takviyeli numuneye doğru kırılma mekanizması, tabaka içi kırılmadan tabakalar arası kırılmaya değişmiştir. XRD sonuçlarına göre %5 takviyeye kadar nanokil araya alma şeklinde dağılırken %10 takviyede hem araya alma hem de topaklanma görülmüştür.

Iqbal ve arkadaşları (2009), karbon fiber kumaş üzerine nanokil takviyeli epoksi matrisi el yatırma tekniği ile sürerek kompozit malzeme üretmişlerdir. Nanokil miktarı reçine ağırlığına göre %3 ve %5 seçilmiştir. Düşük hızda darbe testleri 5,34 kg kütleli belirli yükseklikten serbest bırakılması ile gerçekleştirilmiştir. Test enerjileri 15, 20, 25 ve 30 J seçilmiştir. Darbe testinden sonra numunelerin artık dayanımı, bası testi ile bulunmuştur. Hem hasarlı hem de hasarsız numunelerin tomografisi çekilerek hasar durumu yorumlanmıştır. Kuvvet – zaman eğrisinde, kuvvetin ilk düşüşü ya da eğimindeki değişim ilk hasarın meydana geldiğini göstermektedir. %3 nanokil ilaveli numune en yüksek hasar direncini göstermiştir. Tepe tepki kuvveti artan darbe enerjisi ile birlikte neredeyse lineer şekilde artmıştır. Sönümlenen enerji miktarları karşılaştırıldığında, %3 nanokil ilaveli numune en çok enerjiyi sönümlemiştir. %5 nanokil ilavesinin daha düşük enerji sönümlemesi, topaklanma yapmasına bağlanmıştır. Tomografi görüntüsüne göre, 15 J enerji seviyesinde ön yüzeyde çapraz hasar şekil oluşurken arka yüzeyde yuvarlak darbe izi görünmektedir. 30 J

enerjide ise 0° de geniş hasar alanı ile birlikte boyuna ayrılma görülmektedir. Nanokil hasar alanını küçültmüştür. En düşük hasar alanı %3 nanokil takviyeli numunede görülmektedir. Darbe sonrası bası testi sonuçlarına göre artan darbe enerjisi ile birlikte artık dayanım tüm numunelerde düşmektedir. Fakat nanokil artık dayanımı yalın numuneye göre arttırmıştır. Artan bu dayanım kayma dayanımı ve matrisin rijitliği ile ilgilidir. Yazar artık dayanımı bulmak için matematiksel formül çıkarmış ve deneysel sonuçlarla benzerlik yakalamıştır. Bası testinden sonra alınan görüntülere göre, yalın numunenin ana kırılma mekanizmasının bası yüküne dik doğrultudaki çatlak ilerlemesi olduğu görülmüştür. %3 nanokil takviyesinin kırılma mekanizması ise yüksek kırılma dayanımı ölçütü olan kalınlık boyunca gerçekleşen birden çok delaminasyondur. Nanokil varlığı kırılma mekanizmasını gevrekten sünek duruma getirmiştir.

Reis ve arkadaşları (2012) düşük hız darbe testini kevlar takviyeli ve nanokil, mantar tozu veya nanokil-mantar tozu karışımı ile güçlendirilmiş epoksi matrisli kompozit malzemeye uygulamışlardır. Takviye oranı ağırlıkça %3 seçilmiştir. Belirli bir yükseklikten ağırlık serbest bırakılarak 6, 12, 21 J' lük darbe enerjisi oluşturulmuştur. Yapılan testlerin hiçbirisinde delinme gerçekleşmemiştir. Artan darbe enerjisi ile birlikte tepe tepki kuvvetleri de artmıştır. En fazla artış 21 J' de yalın numuneye göre %16 daha fazla kuvvet gösteren nanokilli numunede olmuştur. Darbe enerjisindeki artış numunelerdeki yer değiştirme miktarını da arttırmıştır. En fazla yer değiştirme yalın numunede görülmüştür. Bu numunede enerji 6 J' den 12 J' e ve 12 J' den 21 J' e çıkarıldığında yer değiştirme değerleri sırasıyla %26 ve %45 artmıştır. Nano takviye eklenmesi yalın numuneye göre yer değiştirme miktarını düşürmüştür. En iyi sonuçlar nanokil içeren numunede olurken, yalın numuneye göre enerji seviyelerinde sırasıyla %5, %6 ve %11 daha az yer değiştirme göstermiştir. Benzer durum darbe enerjisinin elastik miktarı içinde geçerlidir. Nanokil takviyesi elastik enerji miktarında diğer numuneleri geride bırakmıştır. Yalın numuneye göre %40' lık bir elastik enerji fazlası görülmektedir. Numunelerde delinme olmadığı enerji profil diyagramı vasıtasıyla da kanıtlanmıştır. Saplanma enerjileri, matematiksel denklem oluşturularak ve bu denklemin köklerini bularak tespit edilmiştir. Yalın, mantar tozu ilaveli, nanokil ilaveli ve mantar tozu – nanokil karışımı ilaveli numunelerin saplanma eşik değerleri sırasıyla 30, 34, 43 ve 35 J tespit edilmiştir. Hasar alanı, darbe almış numunenin tahribatsız tomografi görüntüsü ile incelenmiştir. Kil varlığı, hasarı genişlik yönünde yalın numuneye göre %29 ilerletmiştir. Darbe sonrası artık gerilme dayanımı incelendiğinde artan darbe enerjisi ile birlikte dayanımın düştüğü görülmektedir. Yalın numune, en

düşük dayanım değerini gösterirken mantar tozu artık dayanımı arttırmıştır. Fakat en iyi sonucu nanokil ekli numune göstermiştir.

Reis ve arkadaşları (2013), kevlar fiber takviyeli nanokil ile güçlendirilmiş epoksi matrisli kompozit malzeme üreterek numuneyi delmeyecek şiddette (6, 12, 21 J) ağırlık serbest bırakarak düşük hız darbe davranışını incelemişlerdir. Takviye miktarı reçine ağırlığına göre %1,5; %3 ve %6 seçilmiştir. Yapılan tüm testlerde darbe ucu sekmiştir. Sadece yalın numunede tepe kuvvetinden sonra kuvvet bir miktar düşmüş ve bir süre o seviyede sabit kalmıştır. Bunun anlamı numunenin büyük hasarlara uğradığıdır. Darbe ucu ve numune arasında temas zamanı incelendiğinde en fazla temasın yalın numunede olduğu görülmekte ve kil içeriği ile birlikte süre azalmaktadır. Kuvvet – zaman grafiklerine göre test şiddeti arttıkça tepe tepki kuvveti artmaktadır. Ayrıca takviye miktarı ile tepe kuvveti doğru orantılıdır. Yalın numuneye göre %6 takviyeli numune, %23 daha fazla tepe tepki kuvveti göstermiştir. Numunenin sönmülediği enerjiden artanlar sisteme geri verilmektedir. Bu miktar numunedeki hasar büyüklüğü ile doğru orantılıdır. %6 nanokil içeren numune en iyi performansı göstermiştir. 21 J enerji seviyesinde, %6 nanokilli numunenin sisteme geri verdiği elastik enerji yalın numuneye göre %80 fazladır. Numunelerin saplanma eşik enerjisinin tespiti için enerji profil diyagramı (EPD) çizilmiştir. Hiçbir numune saplanma durumu göstermemiş olup sönmülenen enerji polinom fonksiyonu ile tanımlanmıştır. Denklemde sönmülenen enerji ile darbe enerjisinin eşit olduğunda saplanma durumu gerçekleşmektedir. Eklenen nanokil ile birlikte saplanma eşik değeri artmaktadır. En yüksek değere sahip %6 nanokilli numune yalın numuneye göre %42 artış göstermiştir. Numunelere darbe testinden sonra tahribatsız muayene uygulanmıştır. 40 x 40 mm² lik alanda yapılan incelemeye göre eklenen kil hasar alanını genişletmektedir. En iyi sonucu veren %6 nanokil takviyesi hasar alanını yalın numuneye göre %310 arttırmıştır. Nanokil kalınlık yönündeki deformasyonu azaltırken tabaka içi hasarı arttırmaktadır. Bu sav, kuvvet- yer değiştirme eğrisinde de desteklenmektedir. %6 nanokil takviyesi yer değiştirmeyi yalın numuneye göre %12 düşürmüştür. Darbe almış numunelerin artık dayanım özellikleri çekme testi ile bulunmuştur. Darbe enerjisi arttıkça artık dayanım miktarı düşmektedir. En düşük ve en yüksek artık dayanım değerleri sırası ile yalın ve %6 nanokil içeren numunede olmuştur.

Taraghi ve arkadaşları (2014), kevlar fiber üzerine ağırlıkça %0,3; 0,5 ve 1 oranlarında MWCNT ekleyerek oda sıcaklığında ve -40° C' de düşük hız darbe testini gerçekleştirmiştir. Testler 45 J seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Test

sonuçlarına göre MWCNT ilavesi her iki sıcaklık durumunda da sönmölen enerji miktarını arttırmıştır. Eklenen nano katkı ile beraber darbe eğilme rijitliği ve tepe tepki kuvveti artmıştır. Darbe rijitliği oda sıcaklığında daha fazla bulunmuştur. Kuvvet – yer değiştirme eğrisi çizildiğinde oda sıcaklığında %0,5 MWCNT içeren numune saplanma durumu gösterirken diğer numuneler delinmiştir. Düşük sıcaklıkta matris malzemesi kırılğanlaştığı için %0,3 nano takviyeli numune en iyi sonucu göstermiştir. %1 MWCNT takviyeli numunede nano partikülleri topaklanma göstermektedir. Bu yüzden fiber- matris arayüzey özellikleri kötü etkilenmektedir. Bu numunede hasar alanı artmıştır. Diğer numunelerde nano takviye fiber ve matris arasında köprüleme yaptığı için hasar alanı düşmüştür.

Koricho ve arkadaşları (2015) çalışmalarında S-2 dokuma cam fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemeye ağırlıkça %1 oranında nanokil, mikro seviyede cam baloncuk ve ikisinin karışımı olacak şekilde hibrit takviye ilave ederek düşük hız darbe davranışını incelemişlerdir. Yarı izotropik dizilimdeki hibrit takviyeli plakanın dış tabakalarında ölçüsel kararlılığı ve çizik direncinden ötürü mikro cam baloncuk, iç tabakalarında ise esnekliği arttırması ve çatlak ilerlemesini engellemesi için nanokille güçlendirilmiş fiberler yer almaktadır. Darbe testinden önce numunelere darbe ucuyla batma testi uygulanmıştır. Test sonucuna göre numunelerde ilk hasar nanokil içerende olurken en son yalın ve cam baloncuklu numunede olmaktadır. Rijitliği en fazla ve en az olan sırasıyla cam baloncuk içeren ve nanokil içeren numunelerdir. En fazla ve en az reaksiyon tepe kuvveti gösteren numuneler ise nanokilli ve yalın numunelerdir. Hasar boyutu, nüfuz eden sıvı ile incelendiğinde en fazla hasar nanokilli numunede görölmüştür. Nanokil hasarı fiber-matris ara yüzeyinde tutmuş ve kalınlık yönünde ilerletmemiştir. Numunelerin delinme enerjileri karşılaştırıldığında, en yüksek enerji cam baloncuk içeren numunede, en düşük enerji nanokilli numunede görölmüştür. Darbe test enerjileri 108, 162, 212 ve 260 J seçilmiştir. 108 J enerjideki kuvvet-zaman grafiklerine göre yalın ve cam baloncuk içeren numuneler en fazla tepe tepki kuvvetini, nanokil ise en az tepe tepki kuvvetini göstermiştir. Aynı numunelerin 162 J enerjideki testinde de benzer durumla karşılaşmıştır. 212 J enerjide cam baloncuk içeren numune kritik doyma enerji seviyesine ulaşmıştır. Bu numunede, darbe ucunun saplanması durumu gerçekleşmiştir. Takviyelerin etkilerini görmek için sönmölen enerji/darbe enerjisinin değerlerini belirten hasar derecesi karşılaştırılmıştır. Hasar derecesi en fazla nanokil içeren numunede görölmüştür. Bu yayının amacı araçlarda düşük

şiddette darbelere karşı dayanacak parça tespiti olduğu için yazar %1 nanokil ilavesinin bu durum için ideal olduğu sonucunu çıkarmıştır.

Yapılan literatür taramasında dokuma cam fiber kumaşlı, nanokil ile takviye edilmiş epoksi matrisli kompozit malzemenin yorulma ömrünü ve düşük hızda darbe davranışını inceleyen fazla yayın olmadığı görülmüştür. Bu tezde, dokuma cam fiber epoksi kompozit plakalara değişik ağırlık oranlarında ilave edilen nanokilin, mekanik, düşük hızlı darbe ve yorulmaya olan etkileri incelenmiştir. Bu şekilde hangi ağırlık oranlarında darbe dayanımı ve yorulma ömrü yüksek olduğu tespit edilmiştir.



2. KOMPOZİT MALZEMELER ve YORULMA

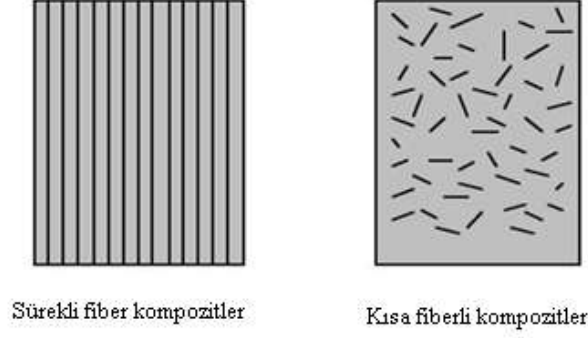
Kompozit malzemeler hakkında birçok tanım yapılmaktadır. Mazumdar' a göre iki veya daha fazla malzemenin birleşmesiyle eşsiz özelliklerde kompozit malzeme oluşmaktadır (Mazumdar, 2002). Strong tarafından yapılan bir başka tanımda ise kompozit malzemeler, takviye malzemeyi kuşatan ve bir arada tutan bağlayıcı veya matrinden oluşan katı formda olan malzemelerdir (Strong, 2008). Kompozit malzemeler kendini oluşturan alt malzemelerin birleşiminden oluşur. Bu alt malzemeler matris ve takviyedir. Bu malzemeler birleşip kompozit haline geldiğinde başlangıç hallerine göre daha iyi özelliklere kavuşmaktadır. Kompozit malzemeler birçok avantajı barındırmalarına rağmen bazı dezavantajlarda göstermektedir. Çizelge 2.1' de kompozit malzemenin sahip olduğu avantaj ve dezavantajlar listelenmektedir (Mazumdar, 2002; Strong, 2008).

Çizelge 2.1. Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları (Strong, 2008).

Avantajları	Dezavantajları
Hafif olması	Malzeme fiyatları
Yüksek özgül rijitliği	Standart numune kalitesi olmaması
Yüksek özgül dayanımı	Bağlantı elemanları
Özelliklerinin yönlendirilebilmesi (anizotropik)	Uzun gelişme süreci
Rahatlıkla karmaşık şekillere biçimlendirilebilmeleri	Metal malzemelerle nadiren direk değiştirilebilirliği
Tüm sistem maliyetlerinin daha ucuz olması	Üretimsel zorlukları (işçi bazlı olmaları, üretim hızının yavaşlığı, çevresel sorunlar)
Kolaylıkla birleştirilebilmeleri	Düşük sünekliliği (bağlantı verimsizliği, metallere göre gerilme artışı daha kritiktir) olması
Yorulma dayanımlarının iyi olması	Zararlı çözücü ve kimyasalları
Sönümlenme özelliklerinin iyi olması	Sıcaklık sınırları
Darbe dirençlerinin iyi olması	Gizli hasarın tespiti
İç enerji depolaması ve serbest bırakılması	Ultraviyole ışıktan etkilenebilmeleri
Termal genleşme katsayılarının düşük olması	
Düşük elektriksel iletkenlikleri	
Radar tarafından görülmemesi	

Genel olarak kompozitler fazlarına göre iki gruba ayrılırlar. İlk grup matris malzemeleridir. Matris malzemeleri de kendi içerisinde sınıflara ayrılır. Organik matrisli kompozitler (OMK), metal matrisli kompozitler (MMK) ve seramik matrisli kompozitler (SMK) olarak. Organik matrisli kompozitler de iki grubun genel adı olarak kullanılmaktadır. Bu gruplar polimer matrisli kompozitler (PMK) ve karbon matrisli kompozitler; diğer adıyla karbon – karbon kompozitleri, olarak adlandırılırlar. Karbon matrisli kompozitler, polimer matrisli kompozitlere ilave karbonizasyon ve yoğunlaştırma uygulanarak elde edilmektedir (Miracle and Donaldson, 2001).

İkinci faz ise takviye adı verilen kompozitte yükü taşıyan elemanlardır. Bu grup şekillerine göre sınıflara ayrılabilir. Genel olarak takviyeleri şekillerine göre sınıflandırırsak; fiberler, parçacıklar, levhalar ve dokumalardır. Dokuma kumaşlar örgülü fiberleri de kapsamaktadır. Tüm ölçüleri yaklaşık olarak eşit olan takviye çeşidi parçacık olarak adlandırılmaktadır. En boy oranı 20 ile 100 arasında olan ve genellikle metal matrisli kompozitlerde kullanılan takviye çeşidi levhalar olarak isimlendirilmektedir (Miracle and Donaldson, 2001). Fiberler uzun ve dairesel yapıdadır. Boylamasına doğrultudaki dayanımları, yanıl doğrultudakine göre daha fazladır. Bu yüzden fiberler kompozit malzemedeki baskın şekilde kullanılan takviye malzemeleridir (Campbell, 2004). Metal matrisli kompozitler, genel anlamda süreksiz takviye fazını içerirler. Örneğin, parçacıklar ve levhalar düşük hacim oranı için “süreksiz” takviye olarak sınıflandırılırlar. Bazı malzemeler (polimerler gibi) içerisinde parçacıklar içermektedir. Bu parçacıklar malzemeyi takviye etmekten ziyade genişletmek için kullanılmaktadır. Bu parçacıklara dolgu maddesi denmektedir. Dolgu parçacıklarının asıl kullanım amacı maliyeti düşürmektir. Bu tarz kompozitler parçacık takviyeli kompozitler olarak sınıflandırılmamaktadır. Eğer takviye fiberlerin boyu kesit ölçülerine göre çok uzunsa, bu malzemeler “sürekli fiber” şeklinde sınıflandırılabilir (Miracle and Donaldson, 2001). Sürekli fiberlerin fiber yönündeki dayanımları matris reçinesinin kendi dayanımından oldukça fazladır. Kompozitlerin özellikleri, fiberin sahip olduğu boyla doğru orantılı olarak etkilenmektedir. Aynı malzemedeki yapılmış sürekli fiberin boyu kısılacak şekilde kesildiğinde özellikleri azalmaktadır (Mazumdar, 2002). Sürekli ve kısa fiberler Şekil 2.1’ de verilmiştir.



Şekil 2.1. Sürekli ve kısa fiberli kompozitler (Mazumdar, 2002).

Fiber seçimi kullanılacağı alan ve üretim yöntemine göre değişmektedir. Sürekli fiber veya uzun fiberler yapısal uygulamalarda kullanılması önerilirken, kısa fiberlerin kullanımı yapısal olmayan uygulamalarda önerilmektedir. Eğer mevcut olan fiberle üretim yöntemi seçimi yapılması gerekiyorsa; enjeksiyon kalıplama ve basınçla kalıplama yöntemlerinde kısa fiberler, filaman sarma ve profil çekme yöntemlerinde sürekli fiberler önerilmektedir (Mazumdar, 2002). Bu tez kapsamında dokuma kumaşlı sürekli fiberler takviye malzemesi olarak kullanılmıştır.

2.1 Takviye Malzemeler

Kompozit malzemenin içerisindeki bileşenlerden bir tanesi takviye veya takviye elemanıdır. Takviyenin görevi kompozit malzemenin mekanik özelliklerini, örneğin dayanım, elastisite modülü ve rijitliğini arttırmaktır. Bunların yanında malzeme türüne bağlı olarak elektrik iletkenliğine veya yalıtkanlığına katkıda bulunur. Yapısal kompozitlerde, fiber formunda olan takviye malzeme gelen kuvvetin %70–90' ını taşımaktadır (Mazumdar, 2002; Wang et al., 2011). Parçacıklar, levhalar ve fiberler gibi çeşitli türde takviye malzemeleri kullanılmaktadır. Diğerleri ile karşılaştırınca fiberler üstün özellikler göstermektedir. Bu yüzden, özellikle uzun fiber formundaki takviyeler pek çok kompozit uygulamasında takviye malzeme olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin bazı mekanik özellikleri, geleneksel döküm malzemelerin sahip olduğu değerlerin birkaç kat üzerindedir. Örnek vermek gerekirse; fiberlerin çekme dayanımı ticari dökme malzemelerin dayanımından daha fazladır. Döküm haldeki grafitin çekme dayanımı 689 MPa iken ticari olarak bulunabilen grafit fiberlerin çekme dayanımı 1700 ile 2800 MPa arasında bulunmaktadır. Bunun yanında E-cam fiberin çekme dayanımı 3450 MPa, aramid fiberin 2800 MPa ve naylon fiberin çekme dayanımı ise 827 MPa' dır. Fakat dökme çeliğin ve

alüminyumun çekme dayanımları sırası ile 2100 ve 620 MPa' dır. Çizelge 2.2' de çok kullanılan fiberlerin ve metallerin mekanik özellikleri verilmiştir (Wang et al., 2011).

Çizelge 2.2. Fiberlerin ve dökme malzemelerin mekanik özellikleri (Mazumdar, 2002).

Malzeme	Çap (µm)	Yoğunluk (ρ) (g/cm ³)	Elastisite Modülü (E) (GPa)	Çekme Dayanımı (σ) (GPa)	Özgül Modül (E/ρ)	Özgül Dayanım (σ /ρ)	% Kırılma uzaması
Fiberler							
E-cam	7	2,54	70	3,45	27	1,35	4,8
S-cam	15	2,50	86	4,50	34,5	1,8	5,7
Grafit, Yüksek modüllü	7,5	1,9	400	1,8	200	0,9	1,5
Grafit, Yüksek dayanımlı	7,5	1,7	240	2,6	140	1,5	0,8
Boron	130	2,6	400	3,5	155	1,3	-
Kevlar 29	12	1,45	80	2,8	55,5	1,9	3,5
Kevlar 49	12	1,45	130	2,8	89,5	1,9	2,5
Dökme malzemeler							
Çelik		7,8	208	0,34-2,1	27	0,04-0,27	5-25
Alüminyum alaşımları		2,7	69	0,14-0,62	26	0,05-0,23	8-16

1990'lerden sonra endüstriden gelen, yüksek dayanım ve yüksek elastisite modülü, küçük boyut, hafiflik ve düşük maliyet taleplerini karşılamak için kompozit şirketleri yeni yöntemler ve malzemeler üzerinde çalışmaya başlamıştır. Bu sebeple yüksek performans sağlayan fiberler geliştirilmiştir. Cam fiberler, karbon fiberler, alümina fiberler, silisyum karbür fiberler genel olarak kullanılan fiber malzemeleridir. Tüm bu inorganik fiberlerin yanında organik fiber olarak aramid fiberler, Poli-P-Fenilenbenzobisoksazol (PBO) fiberler, ultra yüksek moleküler yoğunluklu polietilen fiberler (UHMWPE) kullanılmaktadır. Kompozit malzemedeki gelişmeler ve üretim hızı, takviye fiberlerdeki gelişmelere son derece bağlıdır. Ticari olarak sunulan fiberler iki grupta incelenmektedir (Wang et al., 2011):

- 1) İnorganik fiberler
 - a) Karbon fiberler
 - b) Cam fiberler
 - c) Boron fiberler
 - d) Silisyum karbür fiberler
 - e) Alümina fiberler
- 2) Organik fiberler
 - a) Aramid
 - b) Poli-P-Fenilenbenzobisoksazol
 - c) Polietilen
 - d) Polivinil alkol (Wang et al., 2011)

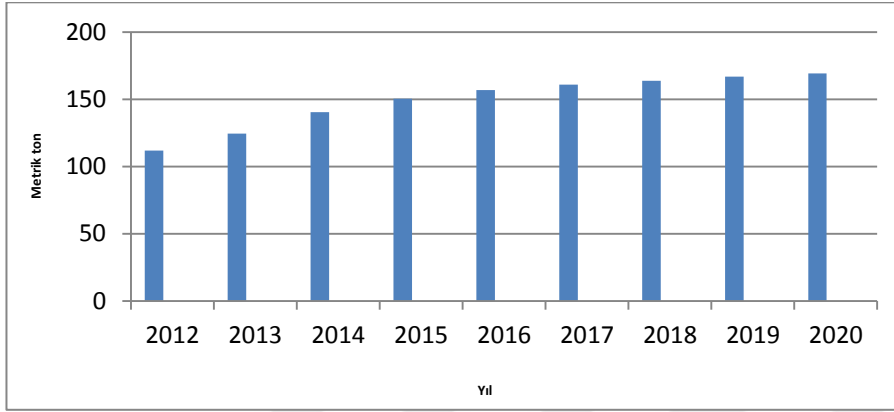
Listelenen fiberler arasında cam fiberler en çok kullanılan ve en ucuz olan takviye malzemesidir. Genel olarak üç çeşit cam fiber kullanılmaktadır. Bunlar; E-cam, C-cam ve S-2 camdır. E-cam ve S-2 camının kilogram fiyatı sırasıyla yaklaşık olarak 2,20 ve 11 dolar civarındadır. Karbon fiberler çeşitli özelliklerde bulunabilir. Şöyle ki düşük ve yüksek dayanımlı, düşük ve yüksek elastisite modüllü gibi. Cam fiberlere göre maliyetleri daha fazladır. Kilogram fiyatları 17,50 ile 132 dolar arasında değişmektedir. Organik fiberlerden olan aramid fiber, cam ile karbonun ortalama maliyetindedir. Kilogram fiyatı 33 ile 44 dolar arasında bulunmaktadır (Mazumdar, 2002).

2.1.1 Karbon fiber

Yüksek toklukları, korozyon dirençleri ve yüksek özgül dayanımları sebebiyle karbon ve grafit, takviye fiber olarak kullanılması çok uygun malzemelerdir. Karbon fiberin, kompozit malzeme içerisinde kendine özgü karakteristiği, yüksek dayanımı ve rijitliğidir. Yüksek performans yapıları, yüksek dayanım ve rijitlik istemektedir. Ayrıca kullanılacak fiberlerin özel şartlarda, örneğin yüksek sıcaklık, nem ve kimyasal maddelere karşı dayanıklı olması istenmektedir. Bu yüzden ki karbon fiber yüksek performans yapılarında kullanılan ana takviye malzemesidir (Composite Material Handbook, 2002; Campbell, 2004).

Karbon fiberler, organik fiberlerin atmosfer korumalı ortamda (N_2 ve Ar gibi) ısıtma işlemi tabii tutulması ile hazırlanırlar. Fiberin içerisindeki karbon oranı % 90 ile %99 arasındadır. Karbon ve grafit fiberleri karbon elementine dayanmaktadır. Bu yüzden “karbon” ve “grafit” isimleri birbirleri yerine

kullanılmaktadır. Fakat iki malzeme arasında keskin bir fark mevcuttur. Aralarındaki en büyük fark grafit fiberlerin daha yüksek sıcaklıkta ısıl ayrışmaya tabi tutulmasıdır. Grafit fiberler en az % 99 karbon içerirken karbon fiberler % 95' ten daha az karbon içermektedir. 1970'lerde karbon fiber pahalı bir malzemedir. Son on senede artan üretim adedi ile birlikte fiyatları önemli ölçüde düşmüştür. Şekil 2.2' de dünya çapında karbon fiber üretiminin 2012 yılından bugüne olan ve 2020 yılına kadar beklenen üretim adetleri gösterilmiştir (Wang et al., 2011; Gibson, 1994).



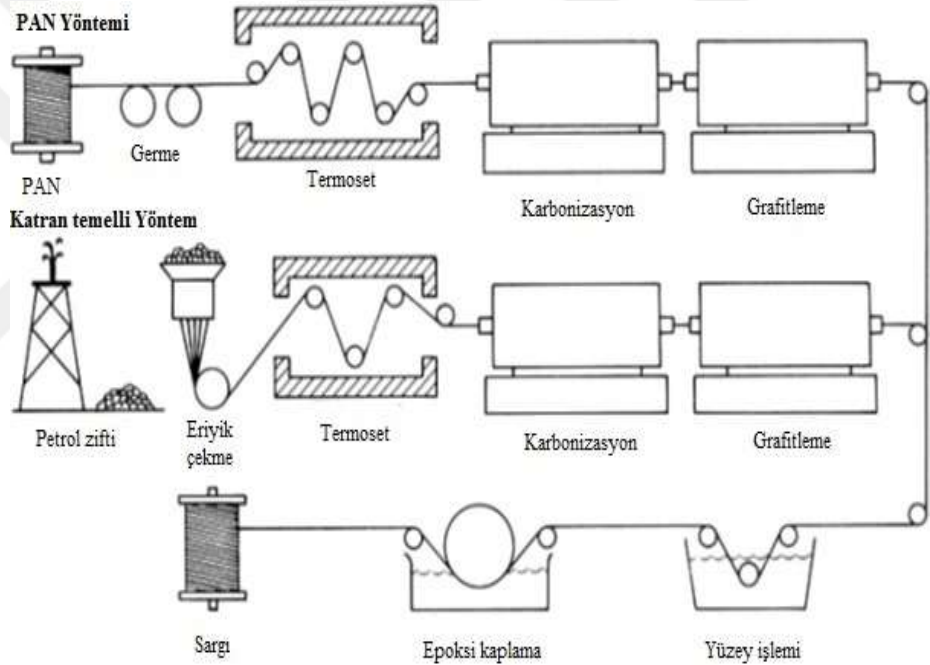
Şekil 2.2. Dünya karbon fiber üretim miktarı (Sloan, 2013).

Şekil 2.2'den görüldüğü üzere, karbon fiberin dünyada üretim adedi yıllar geçtikçe artmaktadır. Ayrıca 2000 yılından önce dünyadaki üretim miktarları incelendiğinde, 1969 senesinde 100 ton olan üretim 1985 senesinde 4700 tona yükselmiştir. 2000 senesinde dünyada 20000 ton olan karbon fiber üretiminin çoğu Japonya' da gerçekleşmiştir. Buna rağmen Amerika Birleşik Devletleri dünyadaki en fazla karbon fiber kullanan ülke olmuştur (Wang et al., 2011).

2.1.1.1 Karbon fiber üretim işlemi

Üç çeşit karbon fiber üretim yöntemi mevcuttur. Üç yöntem de organik fiberlerin ısıl ayrışmaya tabi tutulması ile gerçekleşmektedir. Bu yöntemler; PAN (poliakrilonitril) temelli, katran temelli ve rayon (suni ipek) temelli fiber üretimidir. PAN temelli üretim yönteminde stabilizasyon, karbonizasyon ve grafitleme adımları takip edilir. Başlangıçta yani stabilizasyon aşamasında PAN filamanlar oksidasyon fırınında uzatılır ve 400 °C sıcaklığa çıkarılır. İlk aşama tamamlandıktan sonra karbonizasyon sürecinde, karbon hariç diğer elementler filamanlardan uzaklaştırılır ya da atmosfer korumalı fırında 900 °C' de karbon elementine dönüştürülür. Grafitleme aşamasında sıcaklık 2800 °C' ye yükseltilir

ve kristal yapıdaki karbon, fiber yönünde doğrultulur. Karbon yüzeyinin temizlenmesi ve reçine ile iyi bağ kurabilmesi için fiberler yüzey işlemine tabi tutulur. Son olarak fiber yüzeyi ince bir epoksi katmanı ile kaplanarak ruloya sarılır. Aynı üretim yöntemi rayon temelli karbon fiber üretiminde de kullanılmaktadır. Rayon temelli filaman kullanılmasından dolayı içeriğinde daha az karbon atomu bulunmakta ve özellikleri daha düşük olmaktadır. Katran temelli üretim yönteminde karbon fiber, cam fiberlerde olduğu gibi organik filamanın eriyik petrol veya kömür ziftinin, karbonizasyon ve grafitleme adımlarını takip etmesi ile oluşur. Katran temelli karbon fiber üretim yönteminde de PAN temelliye göre daha az karbon atomu bulunmaktadır (Vasiliev and Morozov, 2001). Şekil 2.3’ te karbon fiber üretim yöntemlerinden olan PAN ve katran temellinin adım adım aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 2.3. PAN ve katran temelli karbon fiber üretim yöntemi (Miracle and Donaldson, 2001).

Genel olarak üretilen fiberlerin mekanik özelliklerine değinecek olursak; PAN yöntemi ile üretilen fiberlerin dayanımı daha yüksektir. Fakat katran temelli fiberler daha yüksek elastisite modülü gösterirler. Bunların tersine rayon temelli karbon fiberler PAN ve katran temelliye göre daha düşük performans gösterirken fiyatları daha ucuzdur. Katran temelli olan karbon fiber kompozitin elastisite modülü, çeliğe göre; elektrik iletkenliği, bakıra göre daha iyidir. Katran temellinin dezavantajı ise düşük kayma dayanımı ve darbe direncidir (Composite Material Handbook, 2002). Üç farklı üretim yöntemiyle üretilmiş karbon fiberin özellikleri Çizelge 2.3’ te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Hammaddesine göre karbon fiberin özellikleri (Wang et al.,2011).

Özellikleri	PAN temelli karbon fiber	Katran temelli karbon fiber	Rayon temelli karbon fiber
Çekme dayanımı (GPa)	2,5~3,1	1,6	2,1~2,8
Çekme modülü (GPa)	207~345	379	414~552
Yoğunluğu (g/cm ³)	1,8	1,7	2,0
Kopma uzaması (%)	0,6~1,2	1	400

2.1.2 Cam fiber

Kompozit malzeme üretiminde en çok kullanılan ve bilindik takviye çeşidi cam fiberlerdir. Cam fiber kompozitlerin çok kullanılma nedenlerinden bazıları tutuşmazlığı, ısıl direnci, yüksek çekme dayanımı, elektrik yalıtımı ve kimyasal dayanımıdır. Bunlara ek olarak fiyatları ucuzdur. Bu sebeple cam fiber kendisini modern endüstrinin vazgeçilmez konumunda bulmuştur (Strong, 2008; Wang et al., 2011).

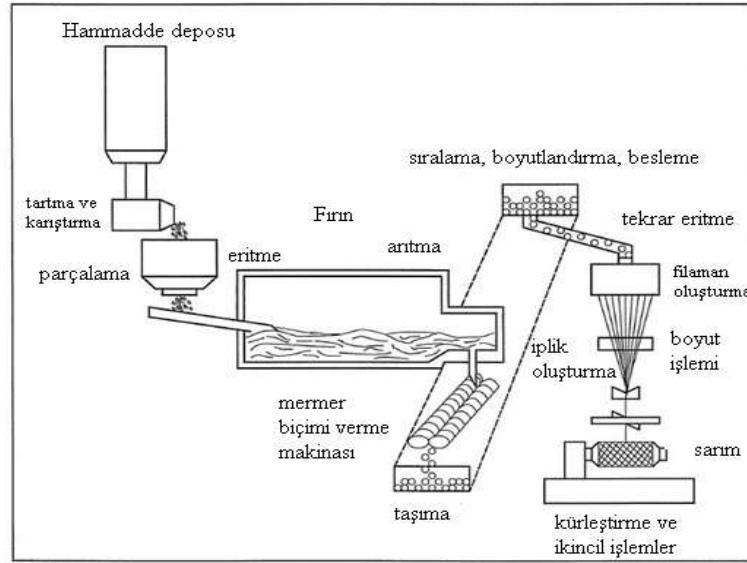
Cam fiberin ilk kullanımı, Rönesans dönemi Venedikli sanatçıların vazo ve dekoratif parçalar gibi ince cidarlı cam objeleri güçlendirmek amacıyla kullanmasına kadar gitmektedir. İkinci dünya savaşı sırasında kritik öneme sahip malzemelerde yaşanan eksiklikler araştırmacıları alternatif bulmaya itmiştir. Cam fiber, reçine ile karıştırılarak ilk modern kompozit üretimi gerçekleşmiştir (Strong, 2008). Kompozit teknolojisinde dört çeşit cam fiber kullanılmaktadır. Bunlar E-cam, S-cam, C-cam ve kuvarstır. Bu çeşitleri içerisinde E-cam fiberler kompozit malzeme üretiminde en çok kullanılanıdır. E-cam fiberler elektrik yalıtımında, dayanım ve düşük maliyet istenen yerlerde kullanılmaktadır. Dayanımları ve modülleri E-camına göre yaklaşık % 30 daha fazla olan S-camları ikinci en çok kullanılan cam fiber çeşididir. Bu özelliklerine ilaveten yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini korumaktadır. Tüm bu yüksek özelliklerinin yanında S-camı, E-camına göre daha pahalıdır. S-camı ileri kompozit uygulamaları olan uzay endüstrisinde kullanılmaktadır. C-camı asit çözeltisi gibi kimyasal etkilerin bulunduğu ortamlarda kullanılmaktadır. Kuvars en pahalı olan türüdür. Bu malzeme, elektrik sinyal geçirgenliği çok iyi olması gereken anten ve füze uçlar gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (Strong, 2008; Composite Material Handbook, 2002; Gibson, 1994). Dört çeşit cam fiber çeşidinin özellikleri Çizelge 2.4' te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Cam fiber çeşitlerinin özellikleri (Vasiliev and Morozov, 2001; Akovali, 2001).

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Filaman Çapı (µm)	Çekme Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)
E- Cam	2,62	5-20	81	3450	4,9
S- Cam	2,50	5-10	89	4590	5,7
C- Cam	2,52	3,8-5	68,9	3310	4,8
Kuvars	2,2	10	74	6000	5

2.1.2.1 Cam fiber üretim işlemi

İnorganik fiberlerden olan cam fiber, silika kumu ve kireç taşı, borik asit, kil ve flüorit gibi ek malzemelerin birleşiminden oluşmaktadır. Bu malzemeler kurutulur ve depoda karıştırılır. Karışım yüksek sıcaklık fırınında eritilir. Genellikle bu eritme işlemi 1260 °C sıcaklıkta yapılmaktadır. Fakat cam içeriğine bağlı olarak bu sıcaklık değişmektedir. Cam fiber üretiminde iki çeşit yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler, mermer metodu (potadan çekme metodu) ve direk eritme metodudur. Şekil 2.4 te mermer metodunun şematik gösterimi verilmiştir (Strong, 2008).



Şekil 2.4. Sürekli filaman cam fiber üretimi (Strong, 2008).

Mermer metodu ilk bulunan yöntemdir. Bu yöntemde bileşen malzemeler parçalayıcı içerisinde birleştirilir ve tamamen karışması sağlanır. Parçalayıcıda karışmış olan malzemeler eritmek üzere fırına gönderilir. Ergimiş cam, makinaya dökülerek soğuması ve küçük cam mermerlerin oluşması sağlanır. Bu mermer yapılar kontrol edilir ve sınıflandırılarak kullanılıncaya kadar saklanır. Fiber üretimi gerektiği zaman, istiflenen mermerler depodan alınarak tekrar eritmek üzere fırına gönderilir. Ergimiş cam, kılavuzdan geçmesi için itilir ve sürekli iplikler oluşturulur. Bu iplikler filaman olarak da adlandırılmaktadır. Kılavuzlar korozyona dirençli platin gibi malzemelerden üretilmektedir. Kılavuz üzerinde 200 ile 1200 adet arasında küçük delikler bulunmaktadır. Sonrasında filamanların sıcaklığı su püskürtülerek veya sadece hava verilerek düşürülmektedir. Üretilen fiberlerin çapları kılavuz delik boyutuna, eriyik camın viskozitesine, sıcaklığa, soğuma hızına bağlıdır. Üretilen fiberleri çevre etkilerden(aşınma ve kırılma gibi) korumak için kaplama veya boyutlandırma işlemi yapılır. Boyutlandırma işlemi fiberler soğumadan da yapılabilir. Daha sonra kompozit üretimi yapılacağına fiber – matris yapışma özelliğini arttırmak için boyutlandırma safhasında fiberlere birleştirici ve kimyasal maddeler eklenebilmektedir. Son olarak fiberler gerdirilir ve makaralara sarımı yapılır. Eğer isteniyorsa üretim sonrası küreleşme gibi ek işlemler uygulanabilmektedir (Strong, 2008).

Direk eritme metodunda, mermer metoduna benzer üretim yöntemi adımları takip edilmektedir. Fark eritmeden sonra mermer formuna getirilmemesinden kaynaklanmaktadır. Mermer formu es geçildiği için eriyik direk olarak kılavuzlara gönderilir. Geri kalan işlemler mermer metodu ile birebir aynıdır (Strong, 2008). Direk eritme metodunda mermer metoduna göre aşağıda listelenmiş avantajları içermektedir.

- Mermer formuna getirme işlemi olmadığı için üretim daha basit ve verimlidir.
- Fırın kapasitesi daha fazladır.
- Üretim adedi daha fazladır.
- Fırın atmosferi, sıcaklığı, basıncı otomatik olarak kontrol edilebildiği için kalite standardı yakalanabilmektedir.
- Artık ürünler kolay bir şekilde geri dönüşüme uğrayabilmektedir (Wang et al., 2011).

2.1.3 Aramid fiberler

Organik fiber çeşitleri arasında aramid en çok kullanılan takviye malzemesidir. Dupont firması tarafından üretilen, Kevlar® ticari ismi bu takviyenin dünya çapında bilinen ismidir. Kevlar haricinde diğer firmaların ürettiği aramid türleri de mevcuttur, fakat satış hacmi düşüktür (Strong, 2008).

Aramid fiberlerin tarihte ilk defa ticari amaçlar için kullanımı 1971 yılında olmuştur. Balistik korunma ve yüksek performans kompozitlerinde takviye olarak kullanılmadan önce aramid; lastik, halat, kablo ve kauçuk içeren ürünlerde kullanılmıştır. Aramid fiberlerin kullanımı kauçuk içeren ürünlerle sınırlı kalmamış, aynı zamanda yarış teknelerinin yelkenleri, koruyucu elbise ve eldivenlerde kullanılmıştır (Strong, 2008).

Kevlar fiberlerin; Kevlar- 29, Kevlar- 49, Kevlar- 68, Kevlar- 100, Kevlar- 119, Kevlar- 129, Kevlar- 149 ve Kevlar M/B isimlerinde çeşitleri mevcuttur (Wang et al., 2011). Kevlar fiberlerin üretiminde birkaç aşama mevcuttur. İlk aşamada fiberler sülfürik asit içeren sıvı kristal çözeltilerden haddede çekilir. Ardından fiberler soğuk su ile yıkanır. Son olarak fiberler gerdirilir ve ısıtılır (Vasiliev and Morozov, 2001). Düşük elastisite modülü ve yüksek tokluk isteyen kompozit malzeme uygulamalarında Kevlar- 29 fiberleri kullanılmaktadır. Bu tür fiberlerin uzama değerleri %4' lere ulaşmaktadır. Kompozit malzemelerde, darbe ve hasar toleransının rijitlikten daha fazla önem arz ettiği durumlarda, özellikle balistik uygulamalarında kullanılmaktadır. Balistik uygulamalar haricinde halat, asbest kullanımı ürünler yerine ve iç lastik ürünlerinde kullanılmaktadır. Kevlar- 49' un elastisite modülü Kevlar-29' dan daha fazladır ve hem termoplastik hem de termoset reçine sistemleri ile beraber kullanılmaktadır. Bu tarz aramid kumaşların kullanım alanları oldukça geniştir. Fiber optik kabloların çekirdeklerinde, yüksek basınçlı esnek hortumlarda, taşıyıcı bantlarda ve kayışlı aktarım sistemlerinde Kevlar- 49 kullanılmaktadır (Composite Material Handbook, 2002). Kevlar- 149 çok yüksek modüllü Kevlar olarak da bilinmektedir (Kopeliovich, 2012). Elastisite modülleri Kevlar- 49' a göre yaklaşık %40 yüksektir (Composite Material Handbook, 2002). Havacılık, özellikle uzay uygulamalarında kendisine yer bulmaktadır (Kopeliovich, 2012). Çizelge 2.5' te çok kullanılan aramid fiberlerin bazı özellikleri listelenmiştir.

Çizelge 2.5. Aramid fiberlerin bazı özellikleri(Miracle and Donaldson, 2001).

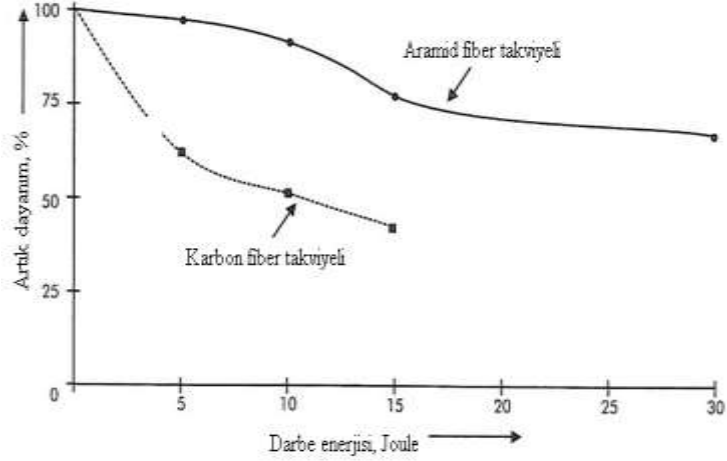
Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Filaman çapı (µm)	Çekme Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (GPa)	Kopma uzaması (%)	Uygun iplik numarası No. filaman
Kevlar 29 (yüksek tokluk)	1,44	12	83	3,6	4,0	134-10000
Kevlar 49 (yüksek modül)	1,44	12	131	3,6-4.1	2,8	25-5000
Kevlar 129 (ultra yüksek modül)	1,47	12	179	3,4	2,0	1000

Dünyada aramid kullanımı hızla artmaktadır. Tüm dünyada yıllık aramid üretim miktarı 36000 ton seviyesine ulaşmıştır. Dupont firması Kevlar ürünüyle beraber dünyadaki en büyük üretici konumundadır. Yıllık üretim miktarları yaklaşık olarak 29250 tondur (Wang et al., 2011).

2.1.3.1 Aramid fiberlerin özellikleri

Aramid fiberlerin özellikleri madde madde sıralanmaktadır:

- Yüksek elastisite modülleri vardır. Kevlar- 49 fiberleri cam fiberlerden iki kat fazla dayanıklıdır.
- Çekme dayanımları yüksektir.
- Gevrek karakter gösterirler. Kopma uzaması değerleri karbon fiberden yüksek, fakat cam fiberden düşüktür.
- Karbon ve cam fiberlere göre yoğunlukları azdır. Bu yüzden özgül dayanımları yüksektir.
- Darbe dayanımı ve toklukları iyidir. Aramid fiber ve karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin darbe tokluğu Şekil 2.5' te verilmiştir (Wang et al., 2011).



Şekil 2.5. Aramid ve karbon fiber takviyeli kompozitlerin darbe tokluğu (Strong, 2008).

- Bası ve burulma özellikleri kötüdür. Bu kuvvetlere maruz kaldıklarında çok kolay şekilde delaminasyona uğrarlar. En büyük dezavantajları bu kuvvetlerdir.
- Tekstil ürünü olarak performansları iyidir. Dayanımlarının %90' ını dokuma sonrasında bile yüksek tokluğu sebebiyle muhafaza ederler. Fakat burulmaya olan hassasiyeti sebebiyle burulma momenti artarsa dayanım değeri düşer.
- Sürünme ve yorulma dayanımları yüksektir (Wang et al., 2011).
- Reçine ile yapışma özellikleri düşüktür. Karbon fiberden bile kötü performans gösterirler.
- Yalıtkanlık özelliklerinin cam fiberlerden daha iyi olmasından dolayı antenlerde kullanılabilirler (Wang et al., 2011).

Kevlar- 49 fiberine ait özellikler maddeler halinde verilmektedir.

- Her yönde ve sıcaklıkta farklı termal genişleme katsayısı göstermektedirler. Örneğin, 100 dereceye kadar aksenal yönde negatif ($-2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) sabit gösterirken sıcaklığın artması ile birlikte sabit $-4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ değerine ulaşır. Fakat yatay yönde termal uzama katsayısı $59 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ' dir. Bu değerler üretim sırasında dikkate alınmalıdır.
- Kuvvetli asitler ve alkali haricinde çoğu organik çözücülerden ve yağlardan etkilenmezler.
- Yapılarındaki çok sayıdaki benzen halkası nedeniyle ultraviyole ışıklara dirençleri düşüktür. Bu yüzden depolanmaları kapalı ve karanlık ortamlardadır.

- Nemli ortamlarda bulundurulmamaları gerekmektedir. Yüksek nem tutma özellikleri vardır. Atmosferden kendi ağırlığının % 6' sını kadar nem çekebilirler.
- Termal kararlılığının yanında ateşe dirençleri ve yanmazlık özellikleri de iyidir. 500 °C deki bozunma sıcaklığına kadar deformasyona uğramazlar (Wang et al., 2011).

2.2 Matris Malzemeleri

Kompozit en az iki bileşenin birleşmesi ile oluşan yeni bir malzemedir. Bu bileşenlerden takviye bir önceki bölümde anlatılmıştır. Bu bölümde matris malzemesinin çeşitlerinden ve görevlerinden bahsedilecektir. Matris, kompozit malzemede belirtilen görevleri yapmaktadır:

- Fiberleri bir arada tutma
- Gelen kuvveti fiberlere iletme
- Kimyasal ve nem gibi çevre etmenlere karşı fiberleri olabilecek zararlardan korumak
- Fiber yüzeyini mekanik bozunmadan (aşınma gibi) korumak
- Yeterli tokluk veya süneklik ve en ideal seviyede çevresel şartlarda performans sağlamak

Matris malzemesinin kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkileri vardır. Örnek vermek gerekirse, bası, tabakalar arası kayma gerilmesi ve düzlem içi kayma özellikleri gibi. Bunlara ek olarak, kompozit malzemenin yük taşıma kapasitesi matris malzemesinden az oranda etkilenmektedir (Mallick, 2007; Akovali, 2001).

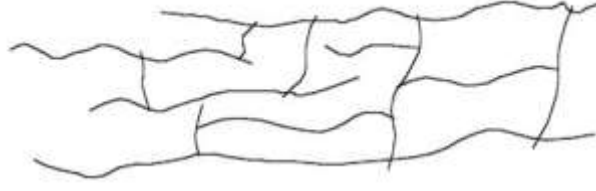
Polimer matrisli kompozitler iki grupta incelenir. Bunlar termoplastikler ve termosetlerdir. Her iki grup türü de fiber takviyeli kompozitlerde matris malzemesi olarak kullanılmaktadır (Mallick, 2007). Termoset ve termoplastik malzemelerin küçük bir kıyaslaması Çizelge 2.6' da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Termoset ve termoplastik matrislerin karşılaştırılması (Baker et al., 2004).

TERMOSET	TERMOPLASTİK
Ana Karakteristikleri	
Kürleştiğinde kimyasal değişime uğrar	Kürleşmeye gerek duymaz
Kırılma gerinimi düşüktür	Kırılma gerinimi yüksektir
Kırılma enerjisi düşüktür	Kırılma enerjisi yüksektir
Çok düşük viskozite değerleri elde edilebilir	Çok yüksek viskozite değeri gösterir
Geri dönüşümsüz prostestir	Nem tutması azdır
Nem muhafaza eder	Organik çözücülere direnci sınırlıdır
Çözücülere karşı dirençlidir	
Avantajları	
Göreceli olarak düşük işleme sıcaklığı	İşleme süresi düşüktür
İyi fiber ıslatılabilirliği	Artıklar tekrar kullanılabilir
Kompleks şekillere getirilebilir	Üretimden sonra ürünler tekrar işlenebilir
Sıvı reçine üretimi uygulanabilir	Hızlı işleme
Sürünmeye dayanıklıdır	Dolapta olmasa bile sınırsız raf ömrü
	Yüksek delaminasyon direnci
Dezavantajları	
İşleme süresi uzundur	Çözücülere direnci azdır
Kürleşme süresi uzundur (yaklaşık 1-2 saat)	İşleme sırasında yüksek sıcaklık (300-400 °C) ve basınç gereklidir
Raf ömrü sınırlıdır (dolapta bekletilmelidir)	Sürünmeye karşı hassastır

2.2.1 Termoset matrisler

Termoset polimerlerin molekülleri çapraz bağ adı verilen rijit, üç boyutlu ağı yapıyla, kimyasal olarak birbirlerine bağlanmıştır. Bu çapraz bağlar molekülün polimerleşme reaksiyonu sırasında ortaya çıkmaktadır. Bu işlem kürleşme adı altında da bilinmektedir. Şekil 2.6' da termoset molekülünün çapraz bağları görülmektedir. Bu reaksiyon tek yönlüdür. Çapraz bağ kurmuş termoset reçine bir daha asla ısı verilip eritilemez (Mallick, 2007). Çapraz bağ sayısı arttıkça malzeme daha rijit ve termal olarak daha kararlı bir yapıya kavuşmaktadır (Mazumdar, 2002). Termoset reçineler polimerleşme reaksiyonuna girmeden veya kürleşmeden önce viskoziteleri düşüktür. Bu yüzden kompozit üretimi düşük sıcaklık ve basınçta gerçekleştirilebilir. Bu özellik termoset reçinelere avantaj sağlamaktadır (Baker et al., 2004). Termoset reçineyi matris olarak içeren kompozit malzemelerin üretim yöntemleri; reçine transfer kalıplama (RTM), filaman sarma ve profil çekme teknikleridir (Mazumdar, 2002).



Şekil 2.6. Termoset molekülünün çapraz bağları (Mazumdar, 2002).

Termoset matrislerde kendi aralarında üç gruba ayrılırlar. Bunlar:

1. Düşük sıcaklık termoset matrislerine polyeşter örnek verilmektedir.
2. Orta sıcaklık termoset matrislerine fenolikler örnek verilmektedir.
3. Yüksek sıcaklık termoset matrislerine poliamid ve bismaleimit örnek verilmektedir.

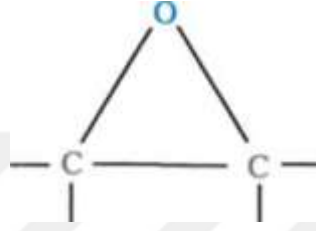
Belirtilen üç çeşit arasında epoksi ve polyeşter, kompozit üretiminde en çok kullanılan termoset matris çeşitleridir. Poliamid ve bismaleimitin kullanımı sınırlıdır (Akovali, 2001). Sıkça kullanılan termoset reçineler ve onların özellikleri Çizelge 2.7' de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Termoset reçinelerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Wang et al., 2011).

Özellikler	Fenol Formaldehit	Polyester Reçine	Epoksi Reçine	Silikon Reçine
Yoğunluk (g/cm ³)	1,30~1.32	1,10~1,46	1,11~1,23	1,70~1,90
Çekme dayanımı (MPa)	42~64	42~71	~85	21~49
Kopma uzaması (%)	1.5~2,0	5	5	1
Elastisite modülü (GPa)	~3,2	2,1~4,5	~3.2	1
Bası dayanımı (MPa)	88~110	92~190	~11	64~130
Esneklik dayanımı (Mpa)	78~120	60~120	~130	~69
Su emişi /24 saat (%)	0,12~0,36	0,15~0,60	0,14	İyi değil
Isıl bozulma sıcaklığı (°C)	78~82	60~100	120	
Termal büyüme katsayısı (10 ⁻⁶ /°C)	60~80	80~100	60	308
Rockwell sertliği /6.35 mm, 100 kg	120	115	100	45
Büzülme oranı (%)	8~10	4~6	1~2	4~8

2.2.1.1 Epoksi reçineler

Kompozit malzeme içerisinde en çok kullanılan reçine türüdür. Çok üstün özelliklere sahiptir. Bu özelliklere örnek vermek gerekirse; yüksek dayanım, düşük büzülme ve güzel yapışmadır. Kullanımları sadece kompozit malzemede matris malzemesi olarak sınırlı değildir. Yapıştırıcı olarak da kullanılmaktadır (Campbell, 2004). Epoksi kimyasal yapısında epoksid grubu içerir. Bu grup içerisinde iki karbon atomu ve bir oksijen atomu mevcuttur. Şekil 2.7’ de bir epoksid grubunun kimyasal yapısı verilmiştir (Chawla, 2013).



Şekil 2.7. Epoksid grubunun kimyasal yapısı (Chawla, 2013).

Epoksi matrisler ve yapıştırıcılar genel olarak bir epoksi grubu ve bir kürleştirici eleman içerir. Fakat bazıları, büyük epoksiler içerir; birden üçe kadar küçük epoksiler ve bir – iki tane kürleşme elemanı içerir. Novalac, amin tabanlı fenoller, cycloaliphatikler küçük epoksilere örnek verilebilir. Küçük epoksilerin ana amacı viskoziteyi kontrol etmek, nem emişini azaltmak, tokluğu arttırmak ve yüksek sıcaklık özelliklerini arttırmaktır. Havacılık endüstrisinde iki büyük epoksi kullanılmaktadır. Bunlar “diglycidyl ether of bisphenol A” (DGEBA) ve “tetraglycidyl methylene dianiline (TGMDA) ya da diğer adıyla “tetraglycidyl-4,4"-diaminodiphenylmethane” (TGGDM)’ dir (Campbell, 2004). Bu malzemeler kompozit malzemeye rijitlik ve daha yüksek camsı geçiş sıcaklığı (T_g) kazandırmaktadır. Epoksinin yüksek işlevselliği ve çapraz bağı bu özellikleri arttırmaktadır (Baker et al., 2004).

Epoksi reçinenin özellikleri çapraz bağ kurarak ve üç boyutlu ağ sistemi oluşturarak maksimum seviyeye ulaşır (Kelly and Zweben, 2000). Rijitlik, dayanım ve camsı geçiş sıcaklığı gibi özellikler çapraz bağ ile artarken tokluk azalmaktadır (Chawla, 2013). Epoksi içerisinde kürleşme elemanı, iki nedenden ötürü kullanılmaktadır. İlki, eş tepkiyen olarak epoksi ile reaksiyon sırasında etkileşime girer. İkinci olarak ise katalizör olarak çapraz bağ sayısını arttırmak için kullanılmaktadır. Kürleşme elemanı çok fonksiyonludur. Basit ve asidik türleri bulunabilmektedir. Basit çok fonksiyonlu kürleşme elemanlarına örnek

olarak birincil ve ikincil aminler, poliaminoamidler ve anhidritlerdir. Polifenoller asidik tür kürleşme elemanına örnek verilebilir. Kürleşme elemanının asidik veya basit türde olmasına bağlı olarak kürleşme, oda sıcaklığında ya da yüksek sıcaklıkta olmaktadır. Diğer bir çeşit kürleşme elemanı ise katalizördür. Dietilen triamine (DETA), üçüncül aminler ve BF₃ kompleksi bu çeşide örnek olarak verilebilir (Akovali, 2001). Uygun kürleşme elemanı seçimi; üretim yöntemine, kürleşme sıcaklığına ve şartlarına, çevresel etmenlere, istenen özelliklere ve tabiki maliyete göre seçim yapılmaktadır (Kelly and Zweben, 2000). Bunlara ek olarak kürleşme elemanı, düşük sıcaklıkta kürleşme hızını arttırmaktadır (Akovali, 2001).

Epoksi reçinelerin özellikleri eklenen katkı malzemeleri ile değişmektedir. Bunlara örnek olarak:

- Kürleşmeden önce seyreltici katılarak viskozite düşürülebilir. Fakat düşük viskoziteli aromatik reçineler hariç bu katkılar maksimum çalışma sıcaklığını düşürmektedir.
- Esneklik kazandıracak katkılar ekleyerek kopma uzaması artırılabilir. Fakat bu katkı elastisite modülünü düşürmektedir.
- Kürleşme sırasında tokluk kazandıracak elemanlar matrise eklenerek çatlak ilerlemesi modifiye edilir. Eskiden bu amacı gerçekleştirmek için reaktif kauçuk kullanılmıştır. Fakat günümüzde yüksek sıcaklıklardan dolayı mühendislik termoplastikleri katkı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda bu katkıların matris reçinesine daha az zararı dokunmaktadır (Baker et al., 2004).

Epoksi reçinelerin avantajları aşağıdaki gibidir:

- Tüm termosetler arasında en düşük büzülme değerine sahiptirler.
- Çoğu kimyasala dirençlidirler.
- Çoğu fiber ve dolgu malzemesine bağlanabilmektedirler.
- Elektriksel ve yorulma özellikleri iyidir (Akovali, 2001).

Bunların aksine eksiklik ve kusurları aşağıdaki gibidir:

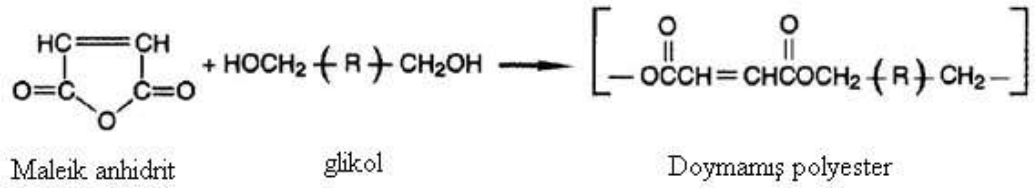
- Fiziksel özellikler ve ölçüleri ağırlığının % 6' sı kadar nem emmesiyle beraber düşmektedir.

- Aynı anda hem yüksek tokluk hem de yüksek sıcaklık direncine sahip olamazlar.
- Ultraviyole ışıklara karşı hassastırlar.
- Polyesterlere göre fiyatları yüksektir (Akovali, 2001).

2.2.1.2 Doymamış polyester reçine

Doymamış polyesterler, termoset reçineler arasında en fazla özelliği olan polimerlerdir (Akovali, 2001). Genellikle polyester ticari amaçlar için kullanılmaktadır. Kompozitlerdeki kullanımı, yüksek performans kompozitleri ile sınırlıdır. Maliyetleri epoksiye göre düşüktür fakat bazı özellikleri; sıcaklıkta çalışılabilirlik, mekanik özellikler ve kürleşme sırasındaki büzülme dirençleri epoksiye göre daha kötüdür (Campbell, 2004).

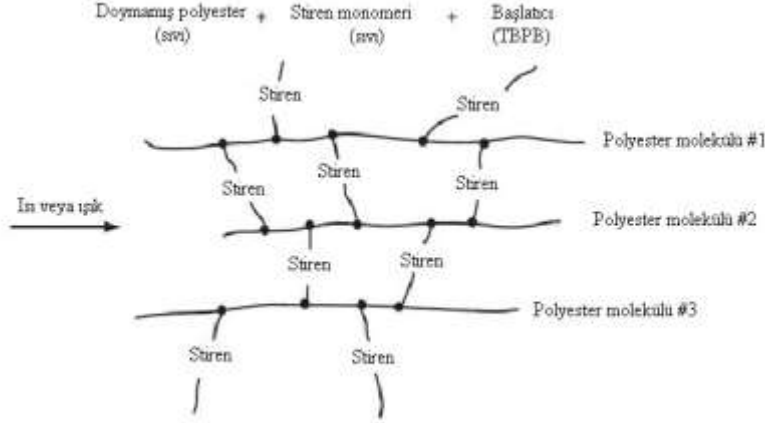
Polyesterler çift bazlı asit ve dihidrik alkolün (glikol veya dihidrik fenoller olarakta bilinir) karışması ile üretilmektedir. Çift bazlı asit, doymamış asit veya anhidrit içerir. Maleik asit bu tür asitlere örnek verilebilir. Doymamış polyesterin kimyasal formülasyonu Şekil 2.8’ de verilmiştir (Baker et al., 2004). Doymamış polyesterin bazı özellikleri şu şekildedir; suya ve çeşitli kimyasallara karşı yeterli dirençtedirler. 80 °C’ ye kadar özelliklerinde düşüş gözlenmez. Polyester kürleşme sırasında %8 büzülme gösterir. Cam fiberlere yapışması iyidir ve son olarak belkide en önemli özelliği ucuzdurlar (Chawla, 2013).



Şekil 2.8. Doymamış polyesterin kimyasal kompozisyonu (Baker et al., 2004).

Üretilen doymamış polyester reaktif seyreltici olan stiren ile karıştırılır. Bu yüzden polyesterin viskozitesi düşüktür ve kolaylıkla baş edilebilir. Seyrelticilerde ayrıca çift karbon bağı (C=C) bulunmaktadır ve çapraz bağı elemanı olarak da görev alır. Polyester molekülünde bulunan, reaktif bölgelerden dolayı “doymamış” ön adı polyesterle beraber kullanılmaktadır. Stiren molekülü polyester molekülünün doymamış noktasından yakalayarak bağı oluşturur. Kürleşme reaksiyonunu başlatmak için sıvı karışıma küçük miktarda katalizör

katılması yeterli olmaktadır. Katalizör olarak organik peroksitler kullanılabilir. Sıcaklık 107 °C ile 163 °C arasında artırıldığında katalizör molekülleri hızlı bir şekilde çözülür ve stiren moleküllerini etkileyerek çift karbon bağına parçalarlar. Sonrasında katı polyester reçinesi oluşmaktadır (Mallick, 2007; Chawla, 2013). Polyester reçinenin kürleşme şeması Şekil 2.9’ da verilmektedir.



Şekil 2.9. Polyesterin kürleşme şeması (Mallick, 2007).

Polyester reçine en az üç bileşenin birleşmesi ile oluşmaktadır. Bunlar polyester, çapraz bağ elemanı; stiren monomeri gibi ve başlatıcıdır. En çok kullanılan başlatıcı kimyasal madde, metil etil keton peroksit (MEKP) veya benzoil peroksit (BzP)' dir (Campbell, 2004). Metil etil keton peroksit, körlük ve cilt yanığı gibi birçok ciddi problem yaratabilmektedir. Ayrıca düzgün şekilde kullanılmadığında patlama yapabilmektedir (Baker et al., 2004). İşlenebilirliği stiren moleküllerinin varlığı ile gelişmektedir (Campbell, 2004).

Polyester malzeme kullanımının avantajları aşağıdaki gibidir:

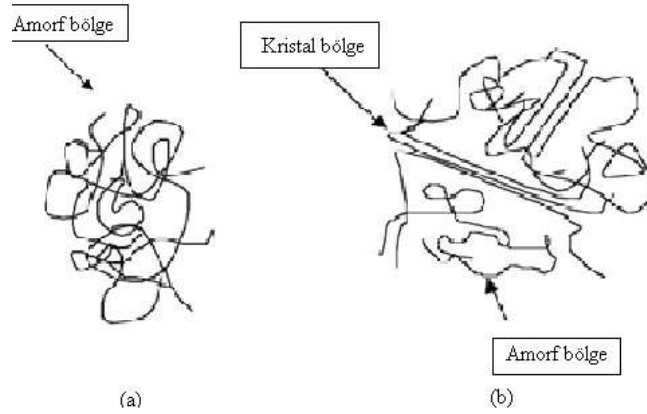
- Viskoziteleri düşüktür ve fiber ıslatabilirliği iyidir.
- Maliyetleri düşüktür ve hammaddeler uzun süre saklanabilir.
- Kürleşme şartları kolaylıkla istenen koşullara getirilebilir.
- Üretimleri kolaydır.
- Çevresel etmenlere dayanıklıdır (Baker et al., 2004).

Bunların yanında polyester malzeme kullanımının dezavantajları ise şöyledir:

- Yüksek ekzotermik reaksiyon gösterirler ve kürleşme sırasında büzülme yüzdeleri yüksektir.
- Düşük fiber – matris bağına sahip olmalarından dolayı mekanik özellikleri zayıftır.
- Seyreltik alkali gibi kimyasallarda dahil olmak üzere kimyasal dirençleri zayıftır.
- Toklaştıracı katkıları yetersiz kalmaktadır.
- Yanabilir ve sağlığa zararlı kanserojen etki gösterebilirler (Baker et al., 2004).

2.2.2 Termoplastik matrisler

Termosetlerin aksine termoplastik reçineler, oda sıcaklığında katı haldedir (Strong, 2008). Termoplastik malzemelerin molekülleri çapraz bağ kuramazlar, dolayısıyla bu malzemeler esneklik ve tekrar şekillendirilebilme özelliği kazanırlar (Mazumdar, 2002). Termoplastiklerin temel özelliği tekrar tekrar kullanılabilirliğidir. Ayrıca ısıl yumuşayabilirlikleri ve ısıl eritilebilirlikleri vardır (Akovali, 2001). Şekil 2.10’ da gösterildiği üzere amorf ve yarı kristalin yapıda bulunabilmektedirler. Amorf termoplastiklerin molekül dizimi rastgele doğrultudur. Fakat moleküllerin organize dizilimleri yarı kristal yapıdaki termoplastiklerin kristal bölgesinde görülmektedir (Mazumdar, 2002).



Şekil 2.10. Polimer molekülünün yapısı (a) amorf ve (b) yarı kristal (Mazumdar, 2002).

Termoplastik kompozit üretimi, termoset kompozit üretiminden daha zordur. Eriyik halde bile olsa termoplastik reçinelerin viskozitesi, termosetlerin viskozitesinden çok daha fazladır. Üretim yöntemlerinde mutlaka eritme ve şekillendirme prosesleri bulunmalıdır. Geleneksel sıvı reçine transferi,  rneğin RTM gibi yöntemlere uygun değildirler (Baker et al., 2004). Üretim yöntemi

olarak en uygun prosesler enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon, termal şekillendirme ve hava basınçlı kalıplamadır (Strong, 2008).

Termoplastik matris malzemesinden beklenen performansa göre çeşitli reçineler bulunabilmektedir. Bunlardan bazıları; termoplastik polyeater, polietilen (PE), polistiren (PS) ve polipropilen (PP)'dir (Akovali, 2001). Çok kullanılan termoplastik çeşitleri ve özellikleri Çizelge 2.8' de verilmiştir.

Çizelge 2.8. Bazı termoplastik reçinelerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Mallick, 2007).

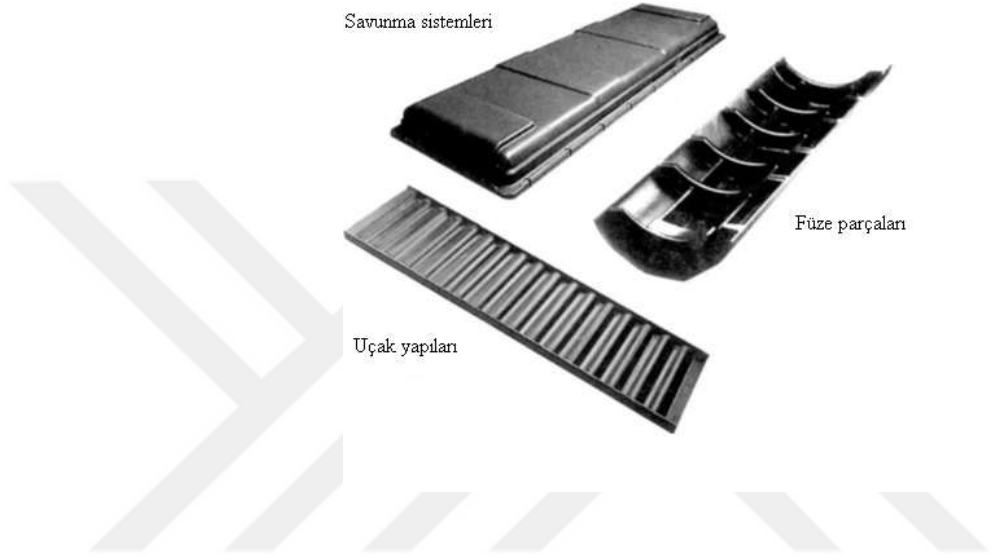
Özellikler	Polieter Eter Keton (PEEK)	Polifenilen Sülfid (PPS)	Polieterimid (PEI)	Poliamid-imid (PAI)
Yoğunluk (g/cm ³)	1,30-1,32	1,36	1,27	1,40
Akma veya Çekme Dayanımı (MPa)	100 (Akma)	82,7 (Çekme)	105(Akma)	185,5(T)
Elastisite Modülü (GPa)	3,24	3,3	3	3,03
Kopma Uzunluğu (%)	50	4	60	12
Poisson Oranı	0,4	-	-	-
Esneklik Dayanımı (MPa)	170	152	150	212
Esneklik Modülü (GPa)	4,1	3,45	3,3	4,55
Kırılma Enerjisi (KJ/m ²)	6,6	-	3,7	3,9

2.3 Kompozit Üretim Yöntemleri

2.3.1 Reçine transfer kalıplama (RTM)

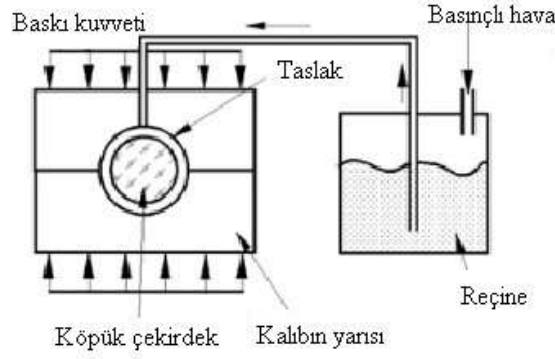
Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi kompozit üretiminde sıklıkla kullanılan sıvı kalıplama metotlarından biridir. Bu yöntem sıvı transfer kalıplama olarak da bilinmektedir. RTM yöntemi kullanılarak net veya nete yakın ürünler üretilebilmektedir. Eşleşen kalıplar sayesinde çok karmaşık yapıların bile üç boyutlu üretimi düşük toleransta ve çok iyi yüzey kalitesinde yapılabilmektedir. RTM yöntemi, orta büyüklükteki hacimlerin üretiminde en uygun maliyetli ve düşük takım ücretli yöntemdir. RTM yöntemiyle kompozit üretimi yaparken fiber yönü kontrol edilebilmektedir. Genel olarak sürekli fiber takviyesi, polimerik kompozit üretiminde kullanılmaktadır (Mazumdar, 2002; Campbell, 2004).

RTM yönteminin gelişmesinde otomotiv ve uzay endüstrisi, denizcilik ve tüketim ürünleri sürükleyici etmenler olmuştur. Kabin duvarları, sandalye ve bank koltukları, su tankları, tekne gövdeleri RTM yöntemiyle üretilen ekipmanlara örnek verilebilir. Şekil 2.11’ de RTM ile üretilmiş bazı parçalar gösterilmektedir (Mallick, 2007; Akovali, 2001). RTM yönteminin yıllık üretim adedi incelendiğinde, 5000 ile 50000 parça arasında olduğu görülmektedir (Mallick, 2007). Bu yüksek miktarda ürünün RTM ile üretilmesinin nedeni stiren gazlarının engellenebilmesindedir (Mallick, 2007; Akovali, 2001).



Şekil 2.11. RTM yöntemiyle üretilmiş parçalar (Mazumdar, 2002).

RTM yönteminde üretilecek olan parçanın kalınlığına bağlı olarak, kuru haldeki birkaç kat sürekli kumaş, kalıbın alt yüzeyine serilmektedir. Kalıbın üst yarısı kapatıldıktan sonra katalizörlü, sıvı haldeki reçine kalıba gönderilmektedir. Reçine kalıbın en alt noktasından sisteme girerek yer çekimine karşı yönde yükselmektedir. Reçine beslemesinin kalıbın alt noktasından yapılmasının nedeni, kalıpta sıkışmış olan havayı minimize etmektir. Ayrıca kalıbın üst yüzeyinde, hava çıkış kanalları bulunmaktadır. Bu sayede kalıp içerisindeki hava, reçinenin itişisi ile beraber sistemden atılmaktadır. Sisteme gönderilen sıvı haldeki reçinenin basıncı 69 ile 690 kPa arasındadır. Reçine kalıbın boşluklarına doğru ilerledikçe kuru haldeki kumaşlar ıslanmaya başlamaktadır. Bu sırada kürleşme kalıbın içerisinde başlamıştır. Kullanılan katalizör sistemine bağlı olarak, kürleşme oda sıcaklığında ya da yüksek sıcaklıkta gerçekleşmektedir. Tüm yüzey ıslanıp ve kürleşme tamamlandıktan sonra kalıp açılmakta ve üretilen parça dışarı çıkartılmaktadır. Genellikle nihai ürün için parça, son bir tıraşlama işlemine tutulmaktadır (Mazumdar, 2002; Mallick 2007). Reçine transfer kalıplama yönteminin şekilsel gösterimi Şekil 2.12’ de verilmektedir.



Şekil 2.12. RTM kalıbı ve şematik parça üretimi (Mazumdar, 2002).

RTM yönteminde en çok kullanılan reçineler, epoksi ve doymamış polyesterdir. RTM yöntemindeki tek engel kullanılacak olan reçinenin viskozitesinin $0,5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ($\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}$)' den daha fazla olmamasıdır. Eğer ki daha yüksek viskoziteli reçine, örneğin bizmalemid reçineler gibi, kullanılacaksa reaktif seyreltici veya ön ısıtma işlemi reçineye kesinlikle uygulanmalıdır (Long, 2005). Parçanın hacmine bağlı olarak kullanılacak olan takviye türü de değişmektedir. Düşük hacimli uygulamalarda dokuma, örme ve keçe kumaş kullanılırken, yüksek hacimli uygulamalarda rastgele fiber taslaklar kullanılmaktadır. RTM yönteminde; karbon, aramid ve en çok da cam fiber kumaşlardan kompozit malzeme üretilmektedir (Mazumdar, 2002).

Çizelge 2.9. Sıvı kalıplama yöntemleri (Campbell, 2004).

Proses Terminolojisi	Proses Özellikleri
Reçine Transfer Kalıplama	<ul style="list-style-type: none"> • Reçine kalıba basınç ile iletilir. • Vakum desteği opsiyoneldir. • Parçanın her iki yüzeyi de çok kalitelidir. • Fiber hacim oranı yüksektir (% 57-60).
Vakum takviyeli RTM (VARTM)	<ul style="list-style-type: none"> • Tek yüzlü kalıp kullanılır. • Basınç uygulaması yoktur, vakum reçineyi taslağa doğru çeker. • Viskozitenin düşük olması istenir. • Kalıptaki yüzey çok kalitelidir. • Ekipmanlar RTM' e göre ucuzdur. • Fiber hacim oranı % 50-55 civarındadır.
Reçineli Film İnfüzyonu (RFI)	<ul style="list-style-type: none"> • Reçine filmi, kalıbın alt yüzeyinde bulunur ve otoklavla ısıtma ve basınçla eritilir. • Kompleks parçalar için eş kalıp gerekmektedir. • Kalıba bağlı olarak yüksek kalite ürünler üretilebilmektedir.

Sıvı kalıplama prosesinin, reçine transfer kalıplama haricinde birkaç çeşidi daha mevcuttur. Vakum takviyeli reçine transfer kalıplama (VARTM) ve reçineli film infüzyonu (RFI) bu grup dahilindedir ve Çizelge 2.9' da kısa birer açıklamaları yapılmaktadır (Campbell, 2004).

Kompozit üretiminde önemli rolü bulunan RTM yönteminin bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Avantajları:

- Net şekle yakın parçalar üretilebilmektedir.
- Üretilmiş parçaların yüzeyleri pürüzsüzdür.
- Boşluk oranı %1' den daha azdır.
- Ürün tasarlama sürecinde esneklik sağlamaktadır. Takviye çeşidi, kat dizilimleri ve çekirdek malzeme isteğe bağlı olarak değiştirilebilmektedir.
- Bu yöntemde iş gücü ihtiyacı daha azdır.
- Stiren salınımı kapalı kalıpla kontrol altında tutulmaktadır.
- Prototip kalıp üretimi göreceli olarak ucuzdur.
- Üretim sırasında genellikle 700 kPa' dan daha düşük basınç gerekir.
- Ürün toleransı çok iyidir (Campbell, 2004).

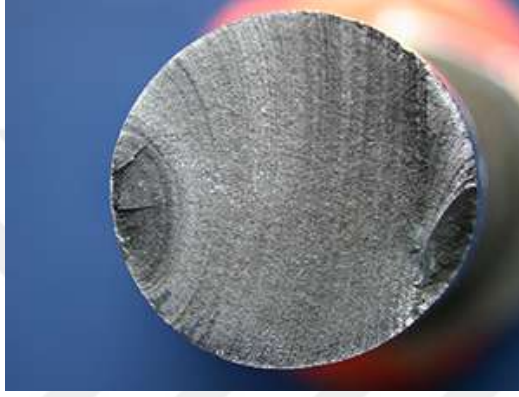
Dezavantajları:

- Üretilen parçaların kalitesi kalıba ve kalıp tasarımına tamamen bağlıdır.
- Büyük hacimlerdeki üretimlerde kalıp maliyeti fazla olabilmektedir.
- Eş ve sızdırmaz kalıp zaruridir.
- Üretilen parça sayısı 5000 ile sınırlı olabilmektedir.
- Kalıp içerisindeki takviyenin hizalaması zordur (Campbell, 2004).

2.4 Yorulma

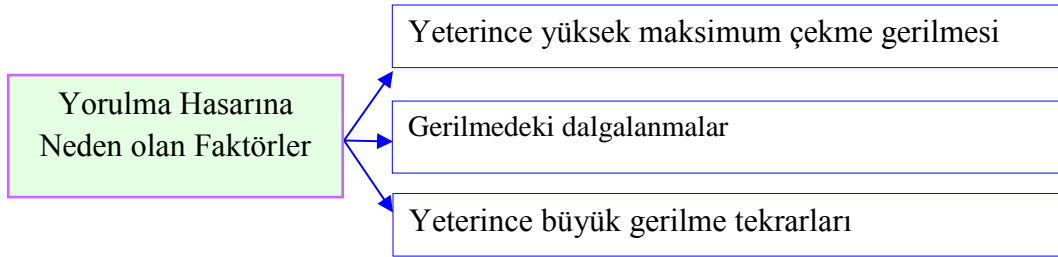
Bir malzemenin tekrarlı yükler altında statik dayanımının altındaki değerlerde herhangi bir uyarı vermeksizin aniden hasara uğramasına yorulma denir. Yorulma hasarı sinsice olmasından dolayı tehlikelidir. Dolayısıyla bir sistemin tasarlanmasında malzemeye ait yorulma değerlerinin bir başka deyişle yorulma karakteristiklerinin elde edilmesi son derece önemlidir.

Yorulma hasarında, malzemede imalat ya da üretimden kaynaklı mikro çatlak ya da mikro boşluklar her bir yükleme tekrarı neticesinde ilerleyerek büyüyerek çatlak oluştururlar. Daha sonra bu çatlaklar zamanla ilerleyerek kritik bir çatlak uzunluğuna ulaşması ve neticesinde statik yük değerinin altındaki bir yük değerinde hasara uğramasıyla sonuçlanır. Yorulma hasarı özellikle metallerde tipik kırılma yüzeyine sahiptir. Kırılma yüzeyi incelendiğinde, midye bir çekirdek ve bu çekirdeğin etrafında midye kabuğunu andıran yorulma çizgileri meydana gelmektedir. Buradaki yorulma çizgileri her bir yüklemedeki çatlakların ilerlemesini gösterir. Şekil 2.13 bir şaftta meydana gelen yorulma hasarını göstermektedir.



Şekil 2.13. Bir şaftta meydana gelen yorulma hasarı (<http://users.metu.edu.tr/bogel/ornekler.html>).

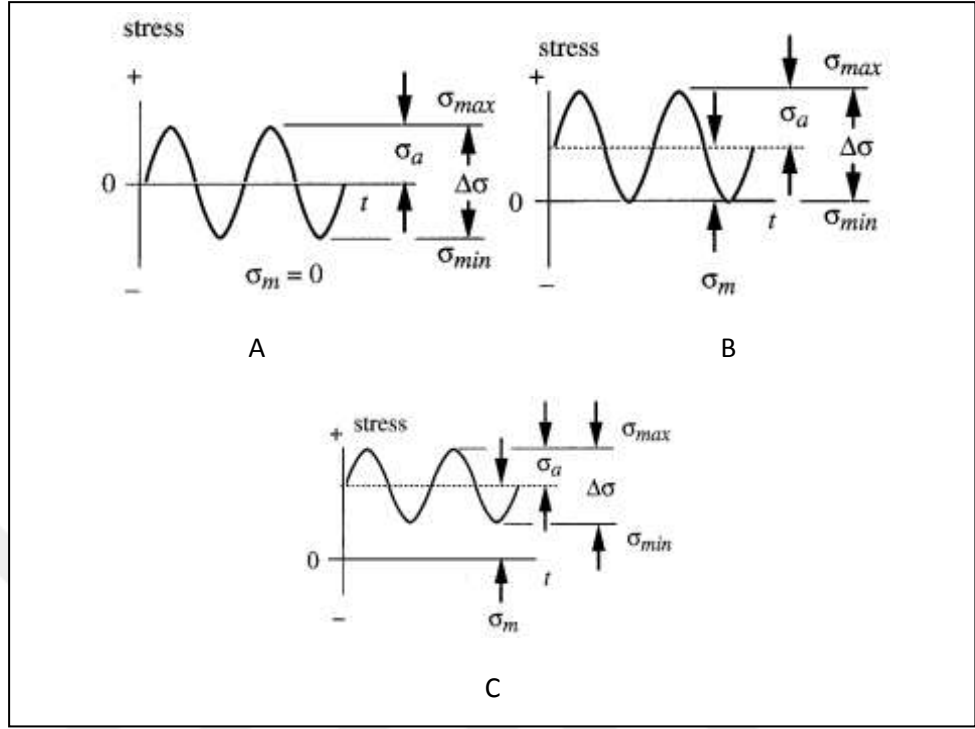
En genel halde, yeterince yüksek maksimum çekme gerilmesi, gerilmedeki dalgalanmalar ve gerilme tekrarları yorulma hasarına neden olmaktadır (Şekil 2.14) Ayrıca, yorulmaya etki eden faktörler arasında, yükleme türü, artık gerilmeler, malzeme geometrisi, sıcaklık, frekans gibi pek çok faktöre bağlıdır.



Şekil 2.14. Yorulma hasarına neden olan faktörler (Alsaran)

Yorulma testlerinde uygulanabilecek çeşitli yükleme türleri vardır. Şekil 2.15' te bu yükleme türlerinden bazıları verilmiştir. Tam değişkenli yüklemelerde kuvvet bir bası bir çeki yükü arasında sinüs eğrisi formu göstermektedir. Sıfır

tabanlı yükleme türünde ise uygulanan minimum gerilme sıfıra eşittir. Son olarak pozitif yüklemede hem alt taban hem de üst taban çeki yükü uygulamaktadır.



Şekil 2.15 Yükleme türleri, A) Tam değişkenli, B) Sıfır tabanlı ve C) Pozitif yükleme (Glinka, 2005).

Yükleme türü R olarak tanımlanan gerilme oranı kullanılarak formül 2.1' deki gibi hesaplanmaktadır. Burada σ_{min} uygulanan alt taban gerilmesini, σ_{max} uygulanan üst gerilme değerini göstermektedir. Ayrıca formül 2.2' de gerilme genliğinin hesaplanması görülmektedir. Son olarak formül 2.3' te ortalama gerilme değerinin hesaplanması verilmiştir.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.1)$$

$$\sigma_{genlik} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.2)$$

$$\sigma_{ort} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.3)$$

3. MALZEME ve METOT

3.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada E-cam fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemeler üretilmiştir. Cam fiberler, Cam Elyaf Sanayii A.Ş.' den temin edilmiştir. Kullanılan E-cam fiberler örgü tipinde olup formu düz dokumadır. Düz dokuma kumaş, hem 0° hem de 90° içerisinde barındırdığı için sadece 0° kuvvetleri değil yanal kuvvetleri de taşımaktadır. Kumaşın kütlesi 200 g/m² dir.

Reçine, epoksi malzeme ve onun sertleştiricisinden oluşmaktadır. Prepreg yani reçine emdirilmiş kumaş kullanılarak üretim yapılmıştır. Reçine sistemi Fibermak A.Ş. firmasından temin edilmiştir ve plaka üretimi bu firmada gerçekleştirilmiştir.

Reçine ve kompozit malzemeyi güçlendirmek, mekanik ve dinamik özellikleri arttırmak bunun yanında reçine-fiber arayüzeyini kuvvetlendirmek amacıyla nanokil kullanılmıştır. Nanokiller ESAN-Eczacıbaşı firmasından temin edilmiştir. Esan 1-140 ürünü, kilin içerisinde bulunan plakalar arası boşluğun nano seviyesinde olması ve kil parçacık uzunluğunun mikron seviyesinde olmasından dolayı tercih edilmiştir. Nanokillere harici yüzey işlemleri uygulanmış ve hidrofilik olan kil parçacıkları hidrofobik yapıya kavuşmuştur.

3.2. Plakaların Üretim Süreci

3.2.1 Matrisin hazırlanması

Kompozit plakaların üretimi, nano takviyeli veya takviyesiz epoksi matrisi hazırlamakla başlamaktadır. İkincil takviye olarak değerlendirdiğimiz nanokiller, epoksi ve sertleştirici karışımının yüzdesi cinsinden hesaplanarak karışıma katılmıştır. Bu çalışmada %0– 0,5– 0,75– 1,25 ve %2 oranında nanokil kullanılmıştır.

Öncelikle Şekil 3.1' de gördüğümüz Labo marka soğutma çevrimi su ile doldurup sıcaklığı 5°C ye ayarlanmıştır. Şekilde görülen cam kap suyun devir daimi ile soğutularak reçine karışımının sıcaklığının yükselmesi önlenmektedir. Nano parçacıklar karışım esnasında kümelenme ve dağılmama isteği içerisinde. Nano partikülleri reçine içerisinde homojen dağıtmak hayati önem arz etmektedir.

Aksi takdirde nano parçacıklar bir bölgede toplanıp o bölgede rijitlik artışına ve gerilme yığılmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla bu bölge gelen kuvvetleri dağıtmada yetersiz kalacak ve kırılma bu bölgeden gerçekleşecektir. Bu nedenle Hielsher UP-400S marka ultrasonik karıştırıcı kullanılmıştır. Karıştırıcı, %70 genlik ve 1 çevrim olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.1. Ultrasonik karıştırıcı ve soğutma çevrimi.

İstenen oranda nanokil, epoksi reçinenin içerisine ilave edilip el ile 10 dakika karıştırılmıştır. Yüzeydeki nanokil partikülleri kaybolmaya başladığında karışım soğutma kabına dökülmüş ve Şekil 3.2' de görüldüğü gibi ultrasonik karıştırıcı probu, reçine içerisine daldırılmıştır. Prob, cam kap tabanından 1 – 1,5 cm yüksekte konumlandırılmıştır. Reçine, sıcaklıkla beraber kendi kendine polimerleşmeye başlayabildiği için 50 °C' nin üstüne çıkmamasına önemle dikkat edilmiştir. Reçine sıcaklığı lazerli termometre ile düzenli olarak kontrol edilmiştir. 3:1 çalışma-dinlenme oranı ile en düşük takviye oranları 30 dakika, en fazla

takviye oranı ise 45 dakika karıştırılmıştır. Ultrasonik karıştırıcıya ara verildiğinde ise karışım çubukla hem karıştırılmış hem de akışkanlığı takip edilmiştir.



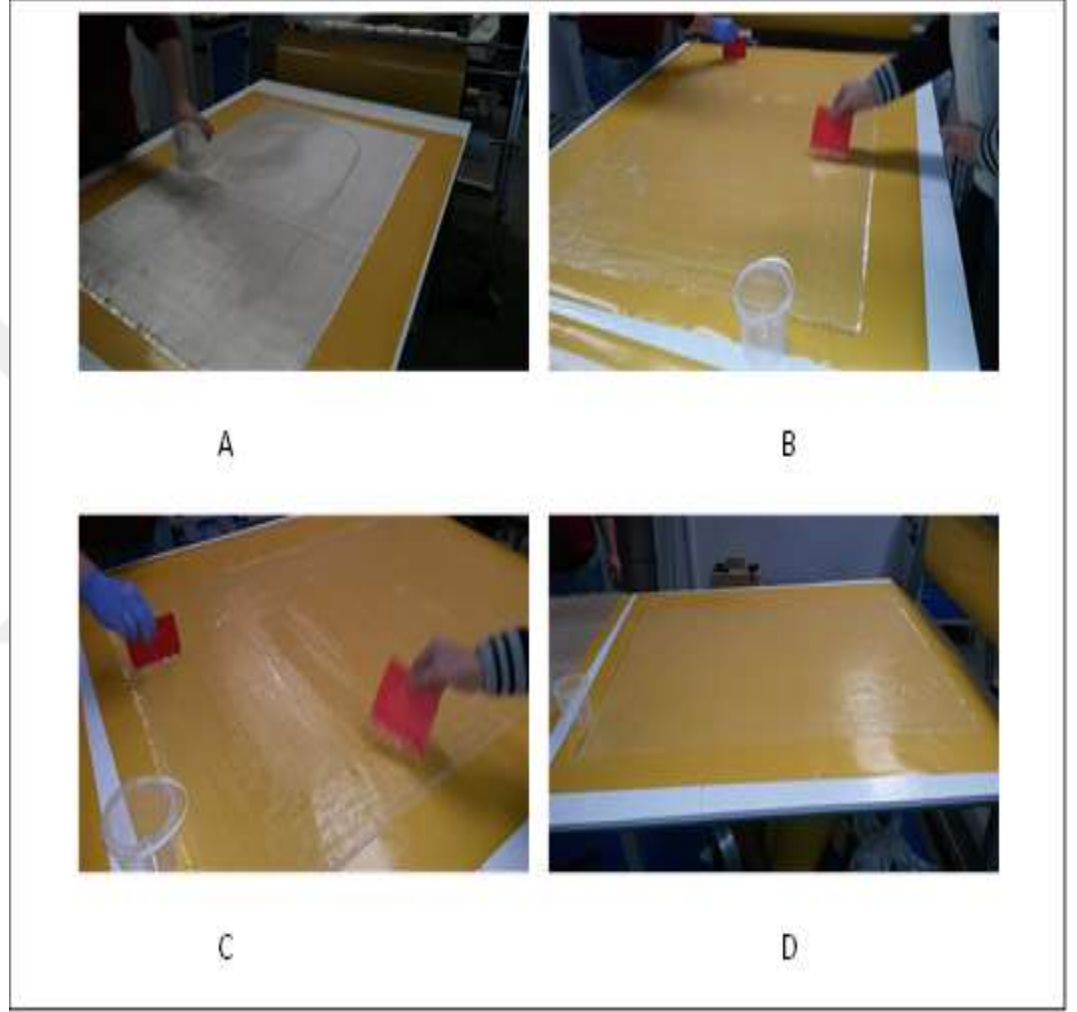
Şekil 3.2. Reçinenin ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılması.

Belirlenen süre tamamlandıktan, karışım renginin homojen bir yapıya kavuşmasından sonra reçine karışımı bir kaba alınmış ve son olarak sertleştiricisi eklenmiştir. Ardından el ile 5 dakika kadar karıştırılmış ve fiber yüzeyine uygulanmaya hazır hale gelmiştir.

3.2.2 Takviyenin hazırlanması

Üretilmek istenen plaka ölçüsü $400 \times 400 \text{ mm}^2$ ve kalınlığı 2 mm'dir. Bunun için 15 kat reçine emdirilmiş kumaşın üst üste dizilmesi gerekmektedir. Düz dokuma kumaşlar, el yatırma tekniği kullanılarak ıslatılmışlardır. Öncelikle kullanılacak olan masanın temiz olması için üzeri beyaz karton kağıtla kaplanmıştır. Kumaşlar rulolardan kesilmeden önce kumaş boyutundan 15 cm uzun yapışmaz ve yanmaz kağıtlar kesilerek kumaşlar bu kağıtların üzerlerine bırakılmıştır. 15 kat kumaş çıkarabilmek için $1250 \times 850 \text{ mm}^2$ lik iki ve $1250 \times 450 \text{ mm}^2$ lik bir adet kumaş kesilmesi yeterlidir.

Önceden hazırlanan reçine karışımı kumaşın üzerine dökülmüştür. Hem nano takviyeli hem de nano takviyesiz plakalar aynı şekilde üretilmiştir. Önce uzun kenar boyunca, sonrasında ise dar kenar boyunda Şekil 3.3’ te görüldüğü gibi reçine kumaşa emdirilir. Islatma işlemi tamamlandıktan sonra kumaşlar en az 1 gün süreyle kurumaya ve havalanmaya bırakılır. Çalışmada kumaşlar tam kuruma olması amacıyla 10 gün kurumaya bırakılmıştır.

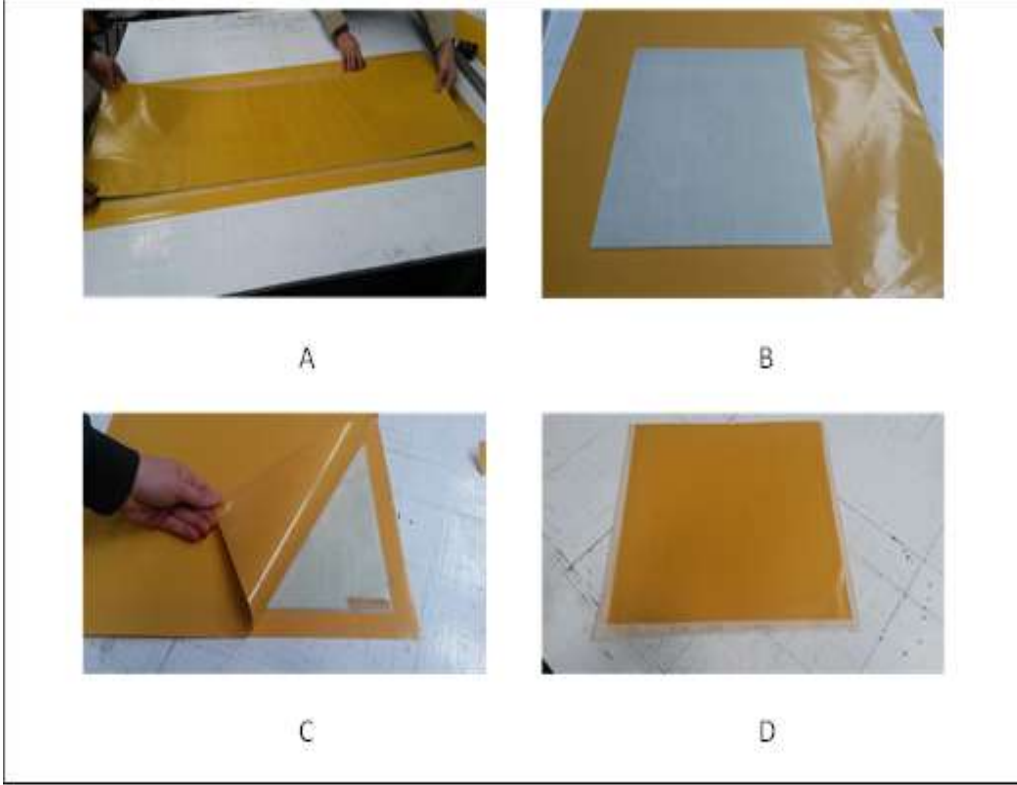


Şekil 3.3. Reçinenin kumaşa sürülmesi, A) Hazırlanan karışımın dökülmesi, B) Uzunluk boyunca reçinenin dağıtılması, C) Kısa kenar boyunca reçinenin dağıtılması, D) Tüm yüzeyin ıslatılmasından sonra kumaşın görüntüsü.

3.2.3 Plakaların üretimi

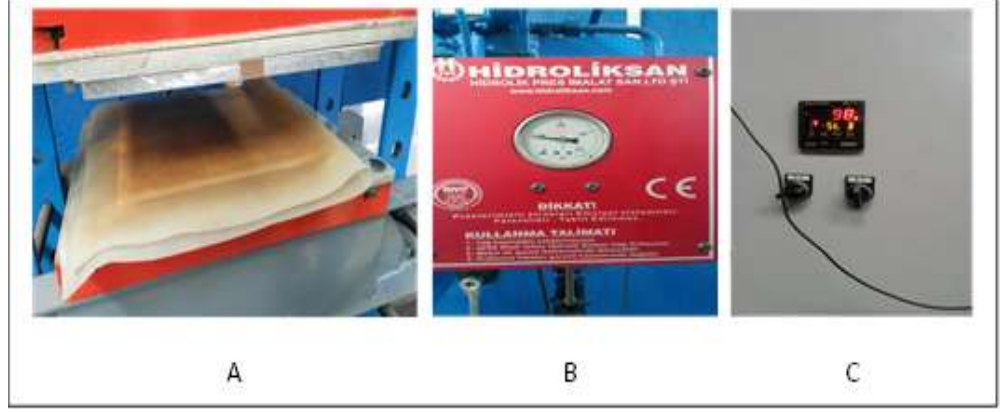
Kuruması tamamlanan kumaşlar, $400 \times 400 \text{ mm}^2$ plaka ölçüsü olacak şekilde kesilir ve üst üste yerleştirilerek 2 mm kalınlık sağlanır. Daha sonra yanmaz kağıtla kenarlarından 4 er cm kalacak şekilde paketlenir. Plakalar

preslendiğinde, fazla reçine plaka ortasından kenarlara doğru akmaktadır ve plakayı terk etmektedir. Bunu önlemek için paketlerin açık kenarları bantla kapatılmış ve zımbalanmıştır. Preslenme anından sonra plakaların karışmaması için içerisindeki nanokil miktarı yazılmıştır. Böylece paket preslemeye hazır hale gelmiştir.



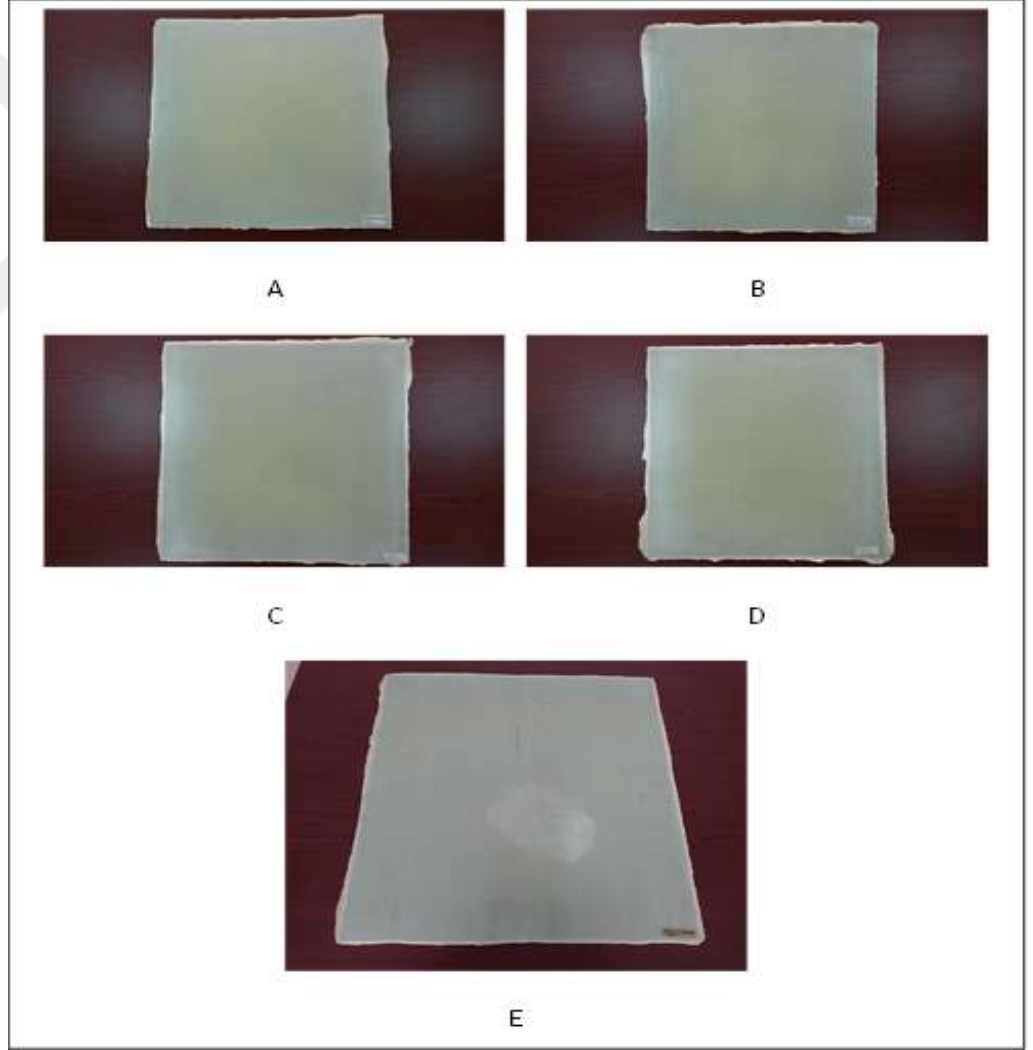
Şekil 3.4. Plakanın preslenmeye hazırlanması, A) Plakanın ölçüye getirilmesi, B) 15 kat kumaşın üst üste yerleştirilmesi, C) Plakanın yanmaz kağıtla kaplanması, D) Preslenmeye hazır plaka.

Paketlenen plakalar hidrolik presin alt tabanına yerleştirilir. Silikon kumaşla üzeri kapatıldıktan sonra pres çalıştırılır ve 100 MPa basınç uygulanır. Daha sonra ısıtıcı açılarak oda sıcaklığından 125°C'ye sıcaklık yükseltilir. Bu sıcaklıkta plakalar, 1 saat mevcut basınçla beraber tutulur. Ardından ısıtıcı kapatılır ve pres yavaş yavaş soğumaya bırakılır. Sıcaklık 50°C civarına gelince termal çarpılma olmayacağı için pres kaldırılır ve plaka alınır. Böylece üretilen plaka kullanıma hazır hale gelmektedir. İlave kürleşme işlemine gerek duyulmamaktadır.



Şekil 3.5. Plakanın preslenmesi, A) hazırlanan paketin hidrolik prese yerleştirilmesi, B) Basınç uygulanması, C) Isıtıcının açılması.

Üretilmiş olan 5 adet takviyeli ve takviyesiz plaka Şekil 3.6' da görülmektedir.

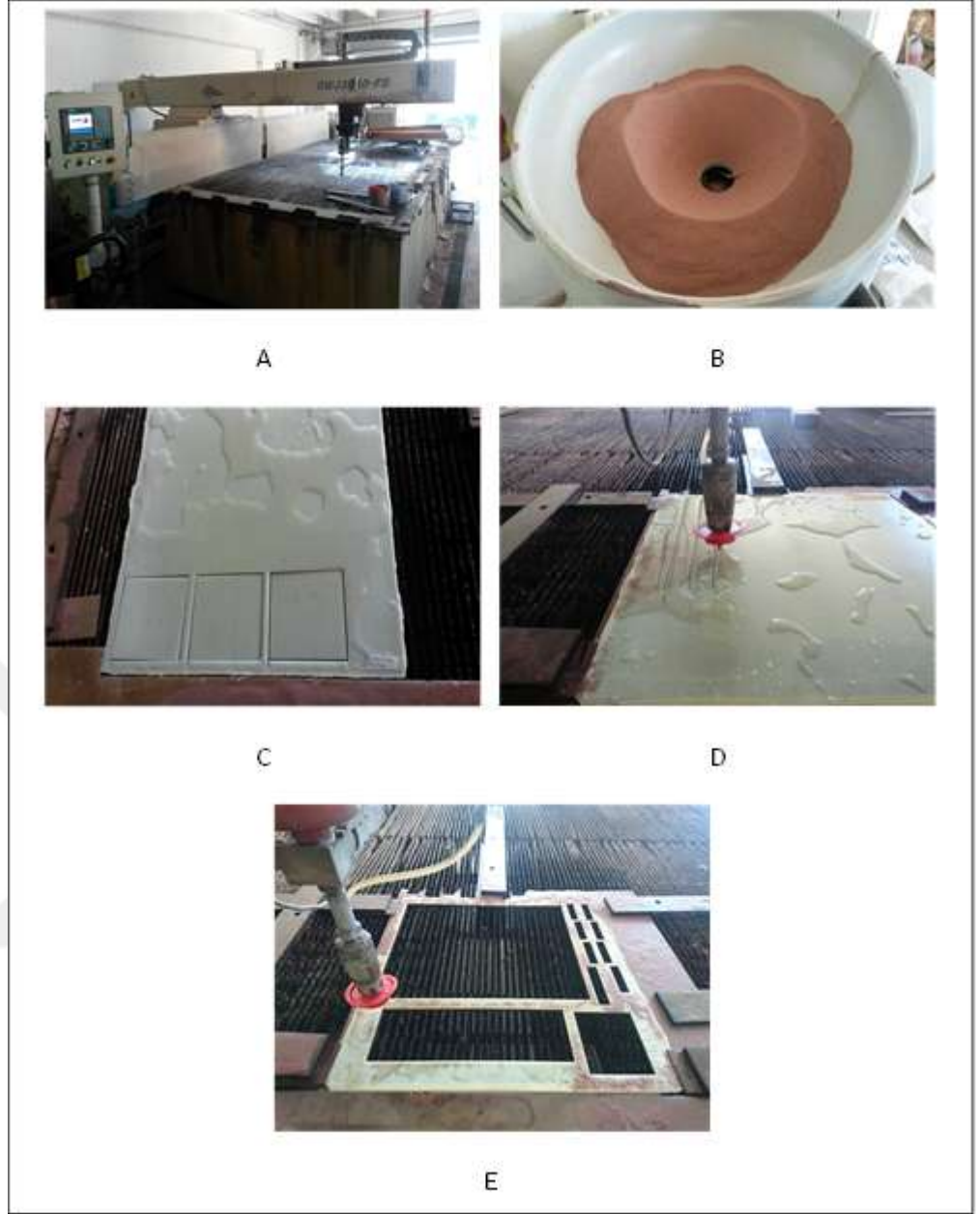


Şekil 3.6. Üretilmiş olan kompozit plakalar; A) Takviyesiz (yalın) plaka, B) %0,5 Nanokilli plaka, C) %0,75 Nanokilli plaka, D) % 1,25 Nanokilli plaka, E) %2 Nanokilli plaka.

3.3 Numunelerin Standartlara Uygun Kesimi

Elinizi su jetinin yanına yaklaştırdığınız zaman yoğunlaştırılmış şekilde akan kuvveti hissedebilirsiniz. Bu kuvvet akışkandaki momentum değişiminden ortaya çıkmaktadır. Su ile kesim yapmanın prensibi buradan gelmektedir. Oluşturulan bu kuvvet istenen geometrinin parçadan kesilmesi için kullanılmaktadır (Kalpakjian and Schmid, 2009).

Kompozit malzemeler kesme işlemine son derece hassastır. Kesim işlemi sırasında ortaya çıkan ısı, kompozit malzemenin camsı geçiş sıcaklığının üstüne çıkarak parçayı kullanılamaz hale getirebilmektedir. Su ile soğutulan disk şeklindeki testere ile kesiminde ısınma problemi ortaya çıkmamaktadır, fakat kesim hızı çok yavaş olmaması durumunda plakalar delaminasyona uğramaktadır. Kompozit parça kesiminde en uygun yöntem, içerisinde aşındırıcı partiküller bulunan su jeti kesimidir. Bu yöntemde kompozit plakalar çok yüksek basınçta kesilerek hem istenen boyutlar düşük tolerans ile yakalanmakta hem de plakalar delaminasyona uğramamaktadır. Çekme, uç nokta eğme, düşük hız darbe testi ve yorulma test numuneleri ASTM standartlarına uygun olarak DARDI marka su jeti ile kesilmiştir. Numune ölçüleri 0,1 tolerans ile kesilmiştir. şekil 3.7' de su jeti ile numune kesimi görölmektedir.



Şekil 3.7. Su jeti ile kesim; A) Kesim makinası, B) Aşındırıcı partiküller, C) Düşük hız darbe testi numunesi kesimi, D) Çekme ve yorulma testleri numunesi kesimi, E) Kesme işleminden sonra plakanın görünümü.

3.4 Gerçekleştirilen Testler

3.4.1 Çekme testi

Takviyeli ve takviyesiz kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini bulmak için ilk olarak çekme testi yapılmıştır. Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan, Şekil 3.8' de gösterilen, 100 kN

kapasiteli Shimadzu AG-IS universal test cihazı ile testler ASTM 3039 (ASTM, 2014) standardında belirtildiği şekilde 2 mm/dakika hızda gerçekleştirilmiştir.

Üretilen plakalardan, standarda uygun 250 mm boy, 25 mm genişlik ve 2 mm kalınlığındaki numuneler kesilmiş ve numunelerin iki ucuna, dört adet cam fiber takviyeli kompozit malzemeden 50 mm uzunluğunda, 2 mm kalınlığında, çene basıncını engelleyecek tab yapıştırılmıştır. Gerinim değerinin doğru tespiti için numunelerin alt ve üst kısmı işaretlenmiş ve kamera ile uzama takibi yapılmıştır.



Şekil 3.8. Shimadzu marka test cihazı ve çekme testinin yapılışı.

Bilgisayar yardımıyla kuvvet ve uzama değerleri sürekli olarak kaydedilmektedir. Testler kopma oluncaya kadar devam etmiştir. Elde edilen verilerden çekme dayanımı (σ), gerinim değeri (ϵ) ve gerilme – gerinim eğrisinin elastik bölgedeki eğiminden elastisite modülü (E) bulunabilmektedir. Çekme dayanımını bulmak için formül 3.1 kullanılmaktadır.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

Bu formülde F, maksimum kuvveti; A ise kesit alanı tanımlamaktadır. Gerinim değeri ise formül 3.2 ile tespit edilmektedir.

$$\epsilon = \frac{(l-l_0)}{l_0} \quad (3.2)$$

Gerinim hesabında numunenin test başlamadan önce işaretlenen uzunluğu (l_0) ve test sırasındaki uzunluğu (l) olarak tanımlanmaktadır.

3.4.2 Üç nokta eğme testi

Kompozit malzemelerin esneklik özellikleri üç nokta eğme testi ile tespit edilmektedir. ASTM 7264 (ASTM, 2015) standardına göre yapılan testlerde numuneler 76,8 mm uzunluğunda ve 14 mm genişliğinde kesilmiştir. 2 mm kalınlığı bulunan numunenin, 32 katı destek noktaları arası mesafe olarak alınmıştır. Her bir takviye değişkeni için testler en az 3 tekrarlı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. İki destek üzerine yerleştirilen numunelere kuvvet sabit 1 mm/dakika hızda, orta noktasından uygulanmıştır. Şekil 3.9' da üç nokta eğme testi düzeneği ve numune yerleştirilmesi görülmektedir.



Şekil 3.9. Üç nokta eğme test düzeneği.

Kuvvet ve yer değiştirme değerleri makine tarafından sürekli kaydedilmektedir. Numunede oluşan eğilme gerilmesi, formül 3.3 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu formülde P, uygulanan kuvveti (N); L, destekler arası mesafeyi (mm); b, numune genişliğini (mm) ve t, numune kalınlığını (mm) temsil etmektedir.

$$\sigma = \frac{3*P*L}{2*b*t^2} \quad (3.3)$$

Ayrıca numuneyi karakterize eden bir başka değer eğilme modülüdür. Eğilme modülü, formül 3.4' te verilen eşitlik çözülerek hesaplanmaktadır. Formülde L, destekler arası mesafeyi (mm); ΔP , lineer bölgedeki kuvvetteki değişim (N); b, numune genişliğini (mm); Δu , lineer bölgedeki yer değiştirme (mm) ve t, numune kalınlığını (mm) belirtmektedir.

$$E_{eğilme} = \frac{L^3*\Delta P}{4*\Delta u*b*t^3} \quad (3.4)$$

3.4.3 Düşük hızda darbe testi

%0,5; 0,75 ve %1,25 nanokil takviyeli ve takviyesiz kompozit malzemelerin düşük hız darbe testleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Testler Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde bulunan ve Şekil 3.10' da görülen Fractovis Plus cihazında gerçekleştirilmiştir. Düşük şiddette darbe testleri, belirli bir yükseklikten ağırlığın serbest bırakılarak, yer çekimi ivmesi ile hızlanıp numuneye çarpması ile gerçekleştirilmiştir. Darbeyi gerçekleştirmiş olan ucun geometrisi yarı küreseldir ve çapı 12,7 mm' dir. Darbe ucu ve onu taşıyan çubukların toplam ağırlığı 4,926 kg' dır.

Numuneler cihazın alt bölümüne darbe ucu merkezden vuracak şekilde yerleştirilmiştir. Numune ölçüleri 100 x 100 mm²' dir. Üzerlerine hareket etmelerini önleyecek 76 mm açıklığı bulunan baskı plakası yerleştirilmiştir. Bu sayede numunelere sabit sınır koşulları uygulanmıştır. Test cihazında bulunan pnömatik sekme durdurucu ile numune yüzeyinden seken darbe ucu tutulmuş ve birden fazla darbenin önüne geçilmiştir.



Şekil 3.10. Düşük hız darbe testi makinası.

Darbe testinde, farklı takviye oranları için sekme (rebounding), saplanma (penetration) ve delinme (perforation) eşik enerjilerinin tespiti için 20, 30, 35 ve 40 J darbe enerjisi uygulanmıştır. Darbe enerjisi, potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşmesi ile bulunmaktadır. Genel olarak kullanılan potansiyel enerji denklemi, formül 3.5' te verilmiştir.

$$E = m * g * h \quad (3.5)$$

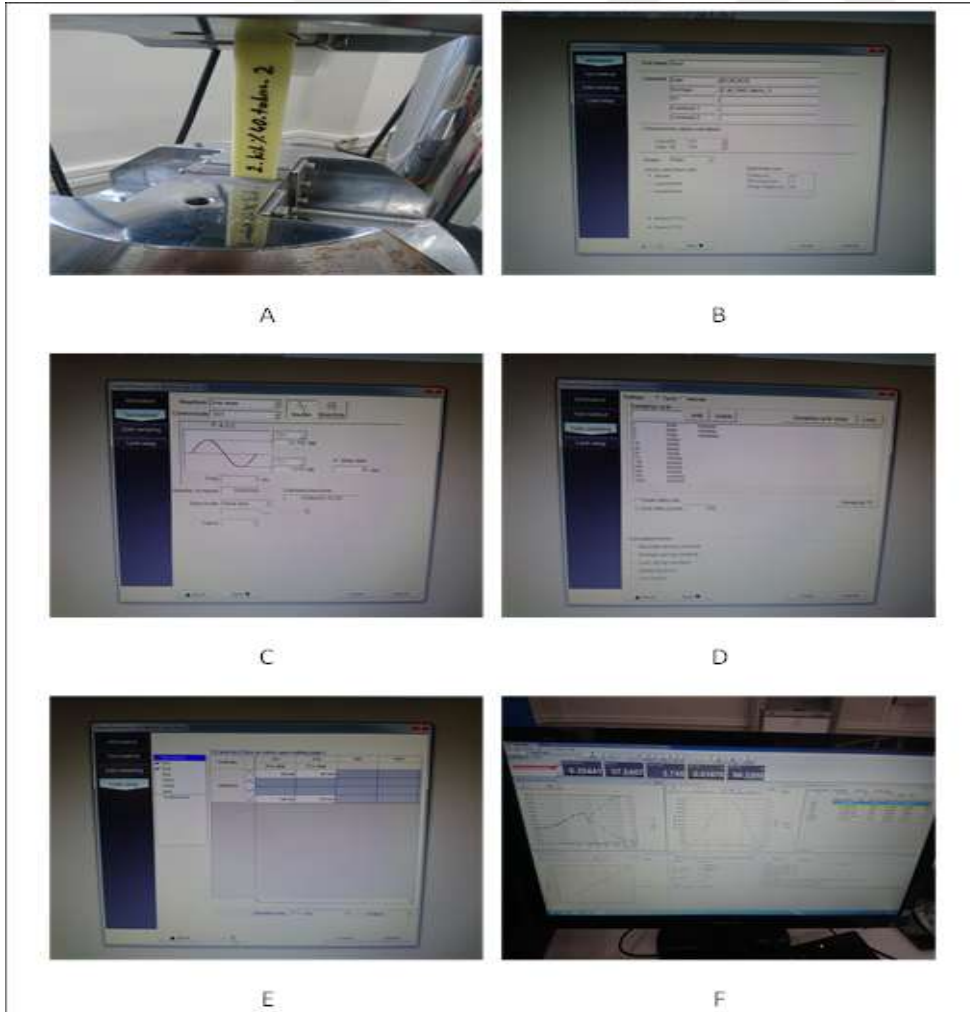
Bu denklemden, m çarpan cismin kütlesini, g yer çekimi ivmesini ve h çarpan cismin numune yüzeyinden olan yüksekliğini tanımlamaktadır. Elde edilen veriler işlenerek numunelerin eşik enerjileri, kuvvet – yer değiştirme, enerji – zaman ve enerji profil diyagramı (EPD) çizilerek yorumlanmıştır. Ayrıca numunelerin darbe sonrası görüntüleri incelenerek hasarı hakkında yorum yapılmıştır.

3.4.4 Yorulma testleri

Kompozit malzemelerin yorulma testleri üç farklı yükleme durumuna göre yapılmaktadır. Bunlar çeki – çeki, çeki – bası ve bası – bası gerilmelerinde yapılan testlerdir. Tez kapsamında çeki – çeki yorulma testleri ASTM 3479' a göre yapılmıştır (ASTM, 2012). Test numunelerinin boyutları çekme numunesinde olduğu gibi 250 mm uzunluğunda, 25 mm genişliğinde ve 2 mm kalınlığındadır. Testlerde metal veya cam fiber takviyeli kompozit malzemedan

tab kullanılmamıştır. Numunelere hidrolik çeneden çok fazla kuvvet gelerek hatalı kırılmaları önlemek için çene basıncı 1 MPa' a ayarlanmıştır.

Malzemelere yorulma testi yapılmadan önce onların statik dayanımlarının bilinmesi gerekmektedir. Çekme testi sonuçlarına göre maksimum gerilmenin %30, 40 ve 50' si alınarak yorulma testleri yapılmıştır. Sabit genlikli sinüs dalgası formunda olan yüklemde, minimum kuvvetin maksimum kuvvete olan oranı (R) 0,1 alınmıştır. Ortalama gerilme, en az ile en çok gerilmenin aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Makinaya girdi olarak kuvvet değerleri girilmiştir. Maksimum ve minimum kuvvet değerleri, hesaplanan gerilmelerin numune kesit alanı ile çarpılması ile bulunmuştur. Numunelerin, yorulma çevrimleri ile ısınmasını önlemek için frekans değeri düşük tutulmuştur. Testler 5 Hz frekansta yapılmıştır. Belirlenen çevrimlerde gerilme, kuvvet ve gerinim değişimleri kayıt altına alınmıştır. Numunelerde kopma gerçekleşinceye kadar testler devam ettirilmiştir. Şekil 3.11' de numunenin cihaza bağlanması ve girdilerin bilgisayar ortamında işlenmesi görülmektedir.



Şekil 3.11. Yorulma testinin başlatılması, A) Numunenin cihaza bağlanması, B) Numune ismi ve boyutlarının girilmesi, C) Kuvvetlerin ve frekansın girilmesi, D) Değerlerin alınacağı çevrim sayılarının belirlenmesi, E) Makinanın kuvvet ve yer değiştirme limitleri ve F) Test sırasında bilgisayar ekranı.

Uygulanan kuvvete karşılık görülen ömür değeri, S – N eğrisi ile çizilmiştir. Bu eğride dikine olan eksen uygulanan gerilme değerini, yatay eksen ise numune ömrünü göstermektedir. Grafik baz alınarak nano takviye varlığının ömrü arttırıp arttırmadığı yorumlanmıştır. Ayrıca sekant modülünün çevrim sayısı ile değişimi grafiği de çizdirilmiş olup rijitlikteki değişimin malzeme türüne ve çevrim sayısına olan ilişkisi yorumlanmıştır.



4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, yalın ve nanokil takviyeli kompozit numunelerin mekanik ve dinamik test sonuçları verilmiştir.

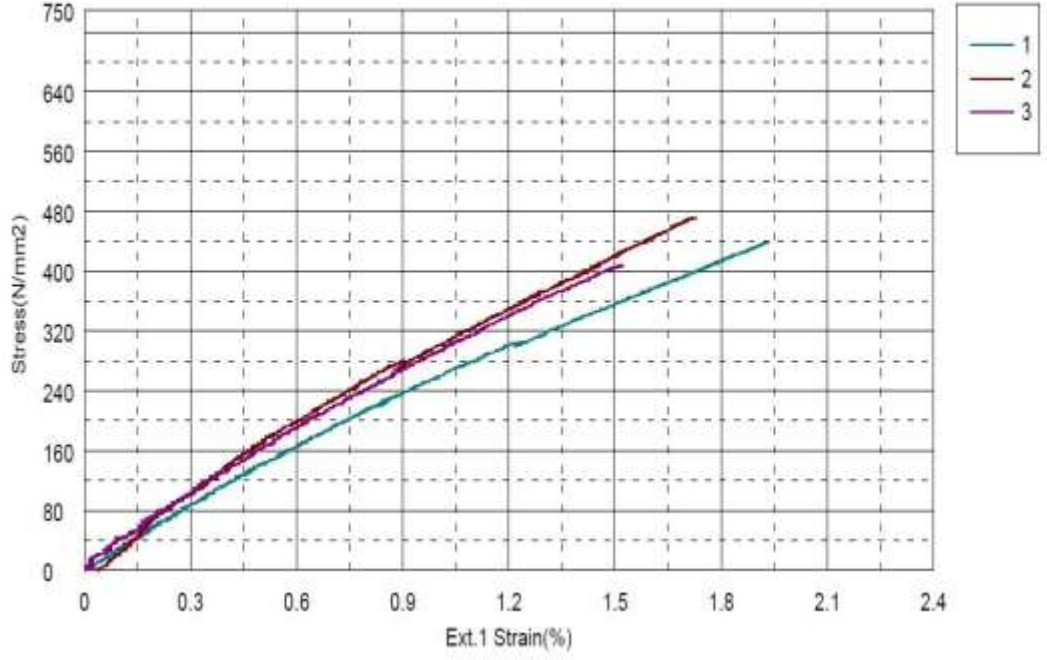
4.1 Çekme Testi Sonuçları

Oda sıcaklığında, 2 mm/dakika hızda gerçekleştirilen çekme test sonuçları Çizelge 4.1' den 4.5' e kadar verilmiştir. Her katkı oranı için testler üç tekrarlı olarak yapılmıştır. Ayrıca Şekil 4.1' den 4.5' e kadar numunelerin gerilme – gerinim grafikleri verilmiştir. Çekme testi sırasında numunelerde kırılma, fiberlerin teker teker koparılarak kırılması şeklinde olmuştur. Numunelere yapıştırılan tab malzemeleri çene basıncının numuneye gelmesini engellemiş olup erken kırılma yani hatalı kırılmaların önüne geçmiştir.

Çizelge 4.1. Yalın numunenin çekme testi sonuçları.

	Maksimum Kuvvet (kN)	Maksimum Gerilme (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)
1	24,050	438,149	30,683	1,926
2	22,040	471,457	30,961	1,827
3	22,525	408,239	32,761	1,604
Ortalama	22,871	439,282	31,468	1,785
Standart Sapma	1,048	31,624	1,128	0,165

Çizelge 4.1' e göre, yapılan çekme testlerinde nano takviye katılmamış numunenin çekme dayanımı ortalama 439 MPa, elastisite modülü yaklaşık 31 GPa bulunmuştur. Numunelerin dayanım ve elastisite modüllerinde çok fazla sapma görülmemektedir ve test sonuçları istikrarlı bulunmuştur. Test sonuçları literatürdeki çalışmalarla uyumlu bulunmuştur.

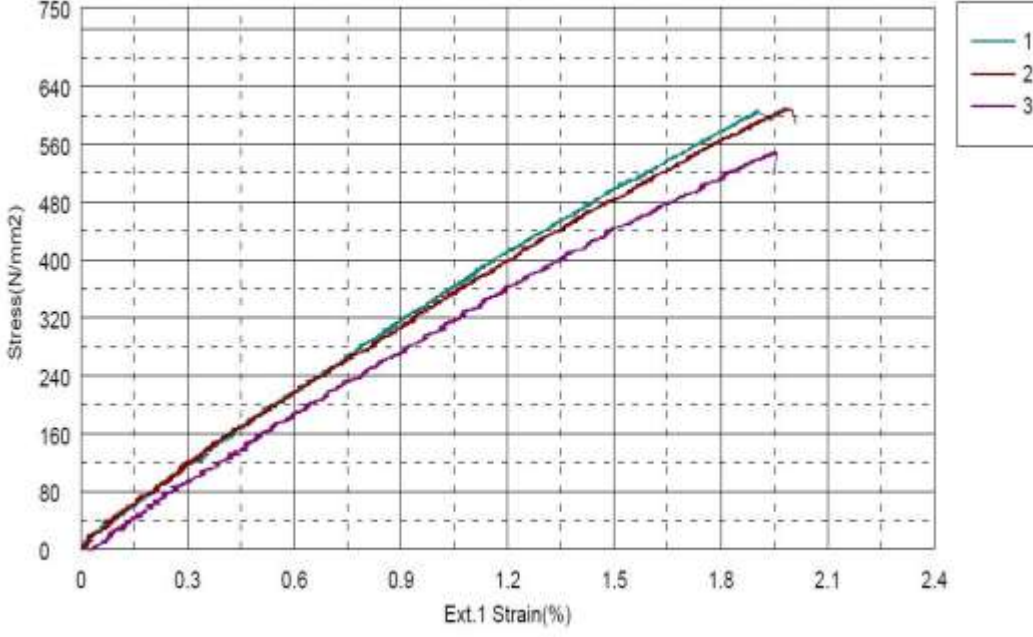


Şekil 4.1. Yalın numunenin gerilme – gerinim grafiği.

Çizelge 4.2. %0,5 nanokil içeren numunenin çekme testi sonuçları.

	Maksimum Kuvvet (kN)	Maksimum Gerilme (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)
1	30,546	609,962	36,278	1,997
2	31,275	609,269	38,528	2,030
3	30,203	548,709	35,842	1,965
Ortalama	30,675	589,313	36,883	1,997
Standart Sapma	0,547	35,166	1,441	0,032

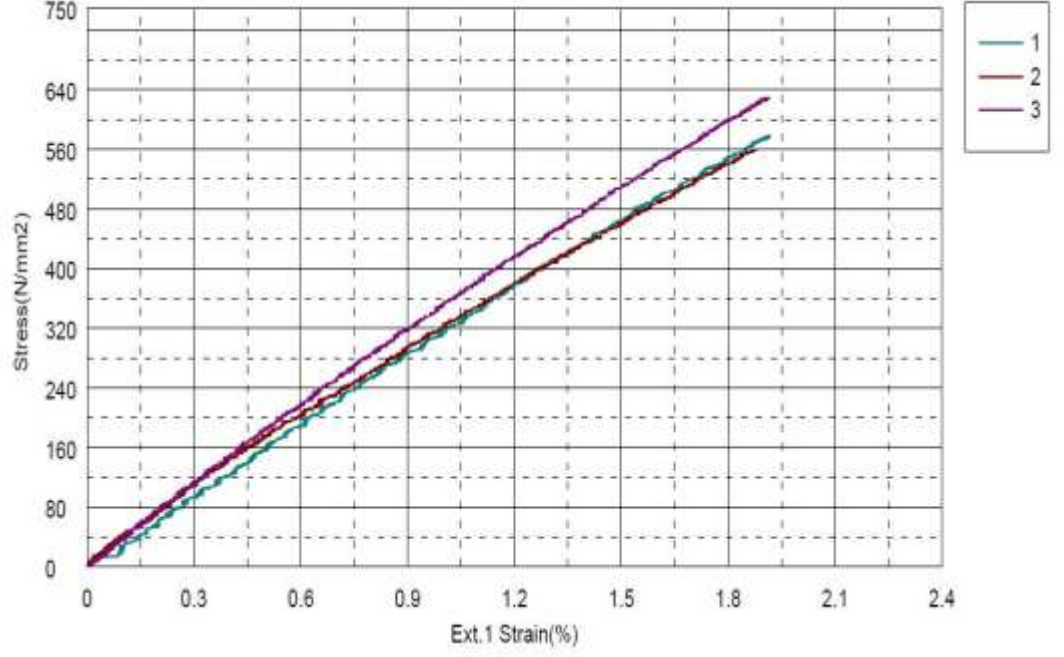
Epoksi reçine içerisine ağırlıkça % 0,5 oranında nanokil ilave edilmesi kompozit malzemenin mekanik özellikleri arttırmıştır. Çekme dayanım değeri 589 MPa' a, elastisite modülü 36 GPa'a yükselmiştir. Eklenen nanokil, reçine – fiber ara yüzey özelliklerini arttırarak kompozite gelen kuvvetlerin fiberlere daha homojen aktarılmasını sağlamıştır. Kompozit malzemelerde kuvvetlerin büyük bir kısmının fiberler tarafından taşınmasından dolayı malzemenin dayanımı artmaktadır. Ayrıca numunelerin gösterdiği kopma uzaması değeri de artmıştır. Dolayısıyla malzemelerin sünekliği artmıştır.



Şekil 4.2. %0,5 nanokil içeren numunenin gerilme – gerinim grafiği.

Çizelge 4.3. %0,75 nanokil içeren numunenin çekme testi sonuçları.

	Maksimum Kuvvet (kN)	Maksimum Gerilme (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)
1	29,318	578,813	31,797	1,914
2	28,731	559,455	34,467	1,801
3	29,781	629,228	35,031	1,907
Ortalama	29,277	589,165	33,765	1,874
Standart Sapma	0,526	36,020	1,727	0,064

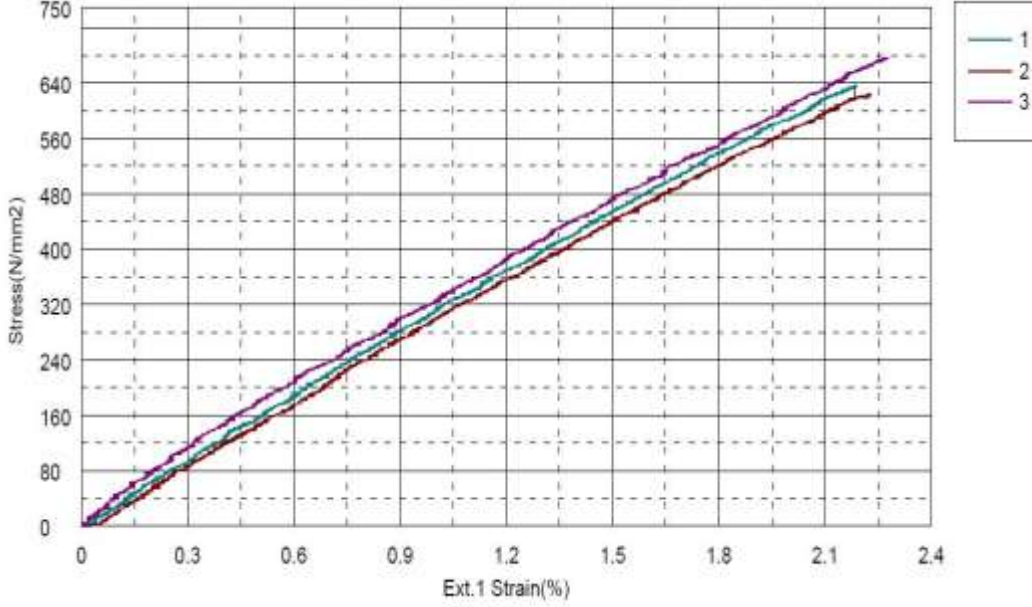


Şekil 4.3. %0,75 nanokil içeren numunenin gerilme – gerinim grafiği.

Takviye oranının bir miktar daha artırılması mekanik özellikleri bir önceki takviye oranına göre çok fazla değiştirmemiştir. Kopma uzaması ve elastisite modülü değeri % 0,5 nanokil ilaveli numuneye göre daha düşüktür. Yine de mekanik özelliklerde, yalın numuneye göre gözle görülür bir artış olmuştur.

Çizelge 4.4. %1,25 nanokil içeren numunenin çekme testi sonuçları.

	Maksimum Kuvvet (kN)	Maksimum Gerilme (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)
1	32,581	636,208	33,649	2,186
2	32,509	623,686	32,023	2,226
3	33,656	676,100	34,296	2,175
Ortalama	32,915	645,331	33,323	2,195
Standart Sapma	0,642	27,372	1,171	0,027



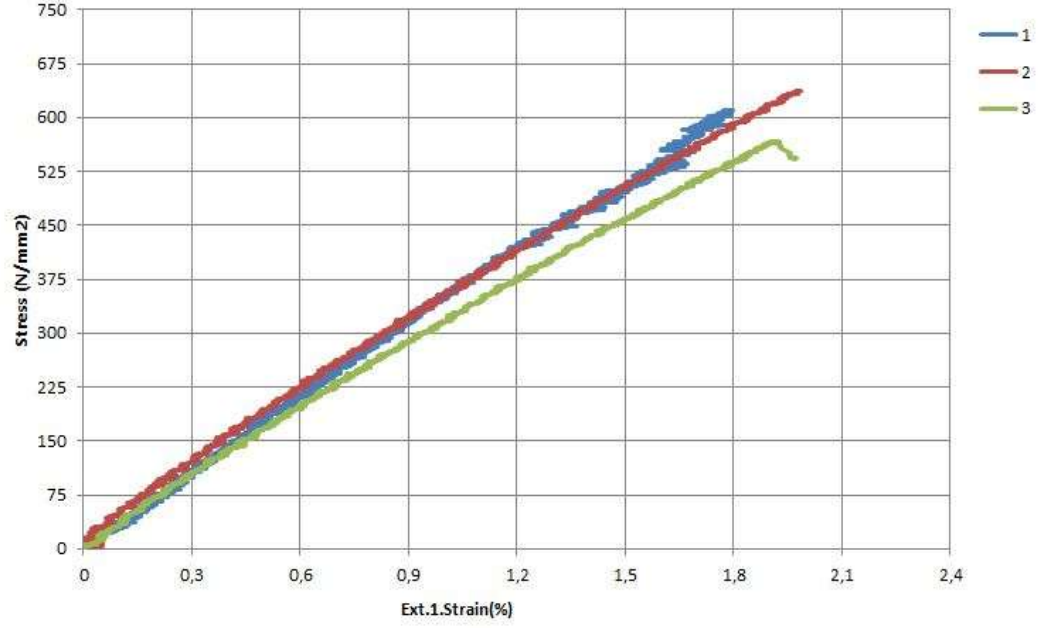
Şekil 4.4. %1,25 nanokil içeren numunenin gerilme – gerinim grafiği.

Artan nanokil varlığı ile birlikte kompozit malzemenin mekanik özellikleri artmıştır. Çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri yalın numuneye göre sırası ile %46 ve %23 artmıştır. Mekanik değerler maksimum seviyeye ulaşmıştır. Nano takviyeli numunenin elastisite modülünde, yalın numunenin sahip olduğu değere göre %6'lık bir artış olmuştur.

Çizelge 4.5. %2 nanokil içeren numunenin çekme testi sonuçları.

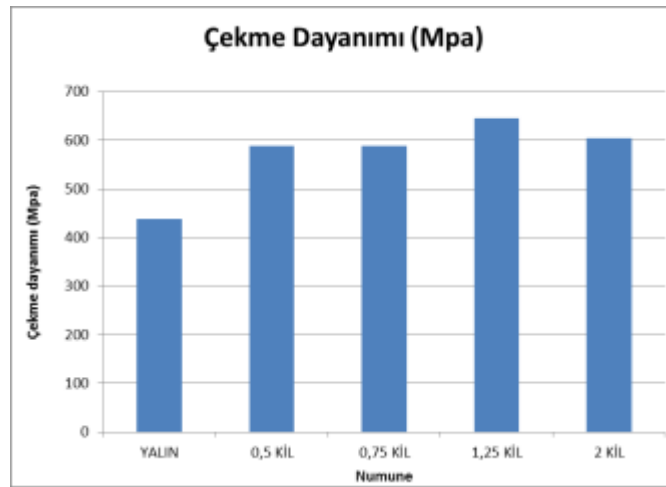
	Maksimum Kuvvet (kN)	Maksimum Gerilme (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)
1	31,171	610,237	34,764	1,781
2	33,003	637,776	35,645	1,981
3	30,815	566,580	33,143	1,967
Ortalama	31,663	604,864	34,517	1,910
Standart Sapma	1,173	35,901	1,268	0,112

Son olarak epoksi matrisli cam fiber takviyeli kompozit malzemenin içerisine reçine ağırlığının %2' si kadar nanokil eklediğimizde yalın numuneye göre özellikler artmıştır. Fakat %1,25 takviyeli numunenin değerlerinden daha kötü sonuçlar ortaya çıkmıştır. Artan nanokil varlığı ile birlikte topaklanmaların başladığı ve kuvvetin homojen dağıtılmayarak gevrek kırılmanın gerçekleştiği görülmüştür. Kopma uzaması değerinde azalma başlamıştır.

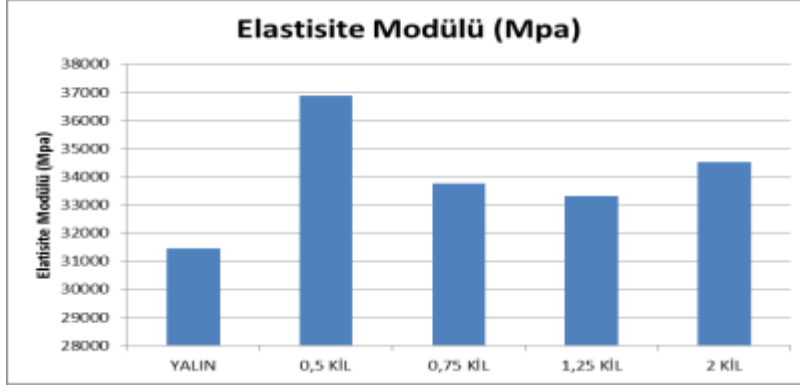


Şekil 4.5. %2 nanokil içeren numunenin gerilme – gerinim grafiği.

Numunelerin çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri karşılaştırması Şekil 4.6 ve 4.7 ve Çizelge 4.6’da verilmiştir. Şekil 4.6 ve 4.7 incelendiğinde, nanokil ilavesinin hem elastisite modülünü hem de çekme dayanımını artırdığı görülmüştür. Maksimum çekme dayanımı %1,25 nanokil içeren numunelerde görülmüştür. Ancak elastisite modülü incelendiğinde maksimum değer %0,5 nanokil içeren numunelerde bulunmuştur.



Şekil 4.6. Ortalama çekme dayanımları grafiği.



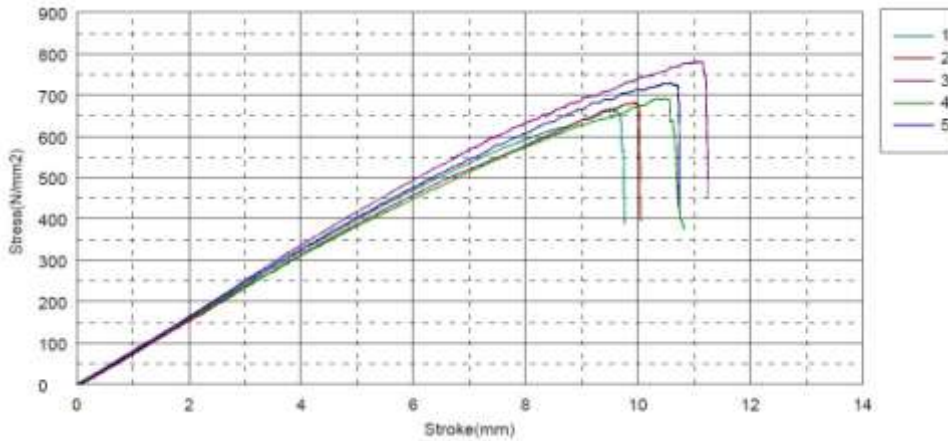
Şekil 4.7. Ortalama elastisite modülü grafiği.

Çizelge 4.6. Yalın ve nanokil içeren numunenin elastisite modüllerinin ve çekme dayanımlarının karşılaştırılması

	Yalın (Takviyesiz)	%0,5 nanokil	%0,75 nanokil	%1,25 nanokil	%2 nanokil
Elastisite Modülü (GPa)	31,468 ± 1,128	36,883 ± 1,441	33,765 ± 1,727	33,323 ± 1,171	34,517 ± 1,268
Çekme Dayanımı (MPa)	439,282 ± 31,624	589,313 ±35,166	589,165 ±36,020	645,331 ±27,372	604,864 ±35,901

4.2 Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

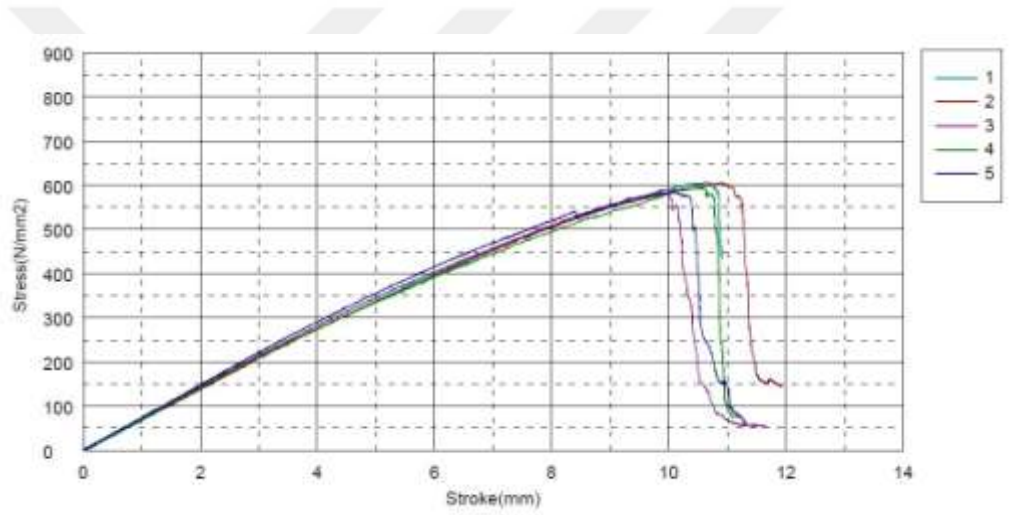
Malzemelerin esneklik özelliklerinin tayini için üç nokta eğme testi yapılmıştır. Yalın, %0,5; 1,25 ve 2 nanokil takviyeli numunelerin gerilme – yer değiştirme grafikleri sırası ile Şekil 4.8’ den 4.11’e kadar verilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.7’ dan 4.10’ a kadar maksimum kuvvet, esneklik dayanımı ve esneklik modülü hesaplanarak tablo halinde verilmiştir.



Şekil 4.8. Yalın numunenin üç nokta eğme davranışı.

Çizelge 4.7. Yalın numunenin esneklik özellikleri.

	U_{max} (mm)	Fmax (N)	σ_{max} (MPa)	Eğilme Modülü (GPa)
1	9,532	429,063	667,645	22,988
2	9,923	430,313	682,629	22,908
3	11,111	437,813	782,038	24,767
4	10,330	462,656	692,523	21,587
5	10,589	434,375	730,042	23,532
Ortalama	10,297	438,844	710,975	23,156
Standart Sapma	0,607	13,752	45,9021	1,149

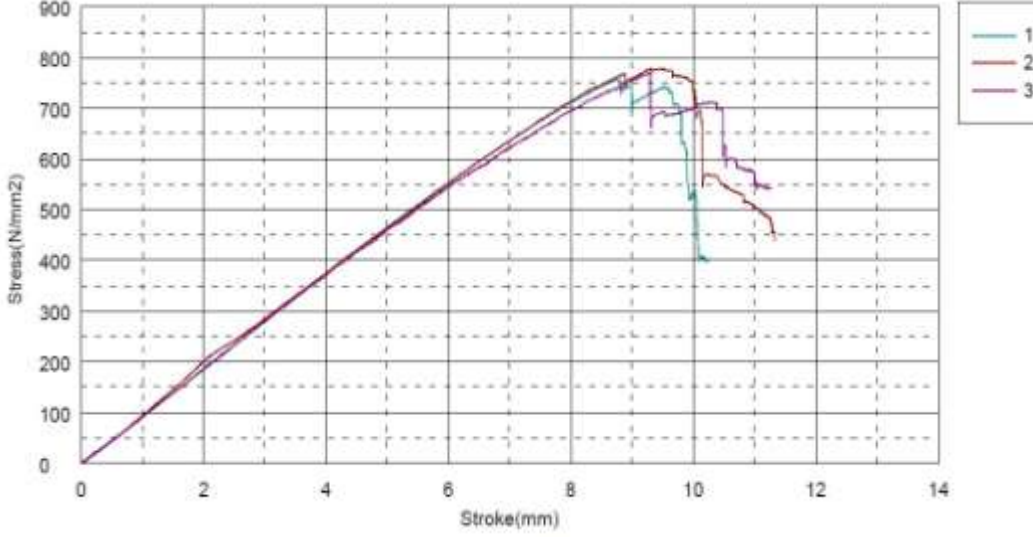


Şekil 4.9. Ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numunenin üç nokta eğme davranışı.

Çizelge 4.8. Ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numunenin esneklik özellikleri.

	U_{max} (mm)	Fmax (N)	σ_{max} (MPa)	Eğilme Modülü (GPa)
1	10,614	351,719	607,987	19,849
2	10,905	323,125	607,270	20,114
3	9,845	334,531	586,241	20,740
4	10,622	304,375	597,872	20,770
5	10,080	310,000	585,950	21,108
Ortalama	10,413	324,750	597,064	20,516
Standart Sapma	0,436	19,094	10,779	0,517

Grafikler ve çizelgeler incelendiğinde ağırlıkça % 0,5 nanokil ilavesi esneklik özelliklerini kötü yönde etkilemiştir. Hem eğilme modülü hem de eğilme dayanım değerleri ciddi düşüşler yaşamıştır.

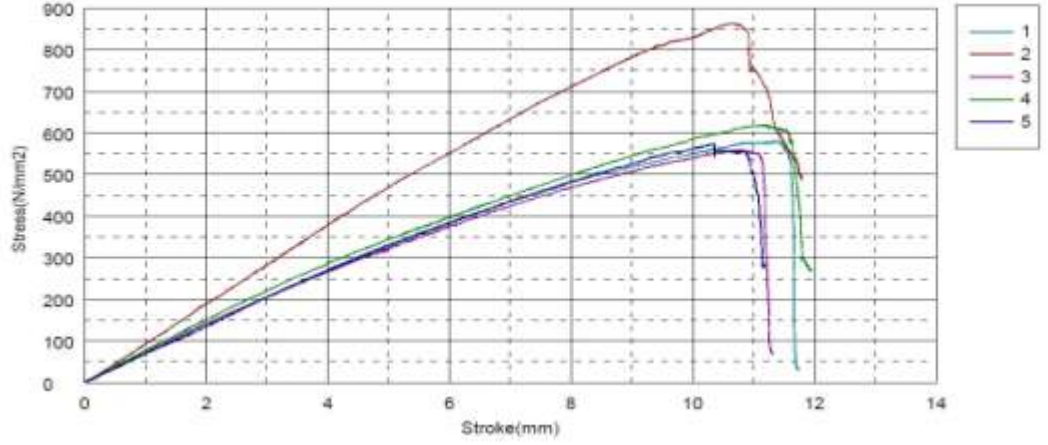


Şekil 4.10. Ağırlıkça %1,25 nanokil içeren numunenin üç nokta eğme davranışı.

Çizelge 4.9. Ağırlıkça %1,25 nanokil içeren numunenin esneklik özellikleri.

	U_{max} (mm)	Fmax (N)	σ_{max} (MPa)	Eğilme Modülü (GPa)
1	8,747	476,719	758,022	28,579
2	9,464	457,969	778,969	28,094
3	9,270	401,250	770,255	30,012
Ortalama	9,160	445,313	769,082	28,895
Standart Sapma	0,371	39,294	10,523	0,997

Reçine içerisine eklenen ağırlıkça %1,25 nanokil kompozit malzemenin esneklik özelliklerini arttırmıştır. En iyi sonuçlar bu numunelerde alınmıştır. Deformasyon miktarı azalırken ve eğilme modülü değeri artmıştır. Bu takviye miktarı çekme testinde de en iyi sonuçları vermiştir. Nanokil, fiber – matris ara yüzey özelliklerinin artmasını ve güçlenmesini sağlamıştır.



Şekil 4.11. Ağırlıkça %2 nanokil içeren numunenin üç nokta eğme davranışı.

Çizelge 4.10. Ağırlıkça %2 nanokil içeren numunenin esneklik özellikleri.

	U_{max} (mm)	Fmax (N)	σ_{max} (MPa)	Eğilme Modülü (GPa)
1	11,410	280,625	581,456	19,327
2	10,662	444,063	864,596	29,603
3	10,791	279,375	560,239	19,262
4	11,144	271,406	620,220	22,089
5	10,350	262,188	575,063	21,551
Ortalama	10,871	307,531	640,315	22,366
Standart Sapma	0,414	76,679	127,319	4,242

Çekme testinde olduğu gibi %2 nanokil katkısı sonuçları olumsuz etkilemiştir. Bu testte dikkat çekici olan ikinci tekrardaki numunenin çok yüksek değerler göstermesidir. Bu reçineye eklenen kilin homojen karışmadığı ve plakanın belirli bölgelerinde toplanarak rijitliği arttırdığını düşündürmektedir.

Çizelge 4.11. Yalın ve nanokil içeren numunelerin eğilme rijitliklerinin ve eğilme dayanımlarının karşılaştırılması

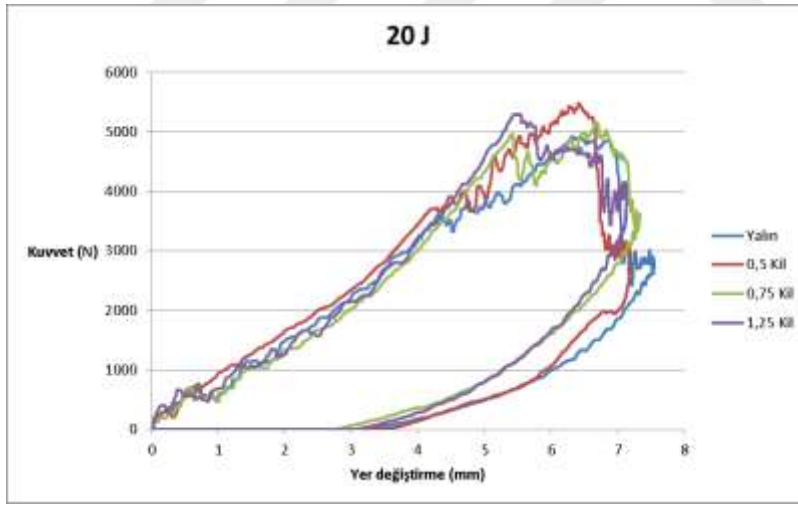
	Yalın (takviyesiz)	%0,5 nanokil	%1,25 nanokil	%2 nanokil
σ_{max} (MPa)	710,975 ±45,902	597,064 ±10,779	769,082 ±10,523	640,315 ±127,319
Eğilme Modülü (MPa)	23,156 ±1,149	20,516 ±0,517	28,895 ±0,997	22,366 ±4,242

Çizelge 4.11’den görüldüğü üzere, ağırlıkça %1,25 nanokil ilavesinde eğilme modülü en büyük değerini almıştır. Aynı zamanda bu numunede maksimum gerilme değeri de katkısız yani yalın numunenin maksimum gerilme değerine göre arttığı görülmektedir. Böylece nanokil katkısının optimum değeri bu katkı miktarında bulunmuştur.

4.3 Düşük Hızda Darbe Testleri Sonuçları

4.3.1 Kuvvet – yer değiştirme eğrileri

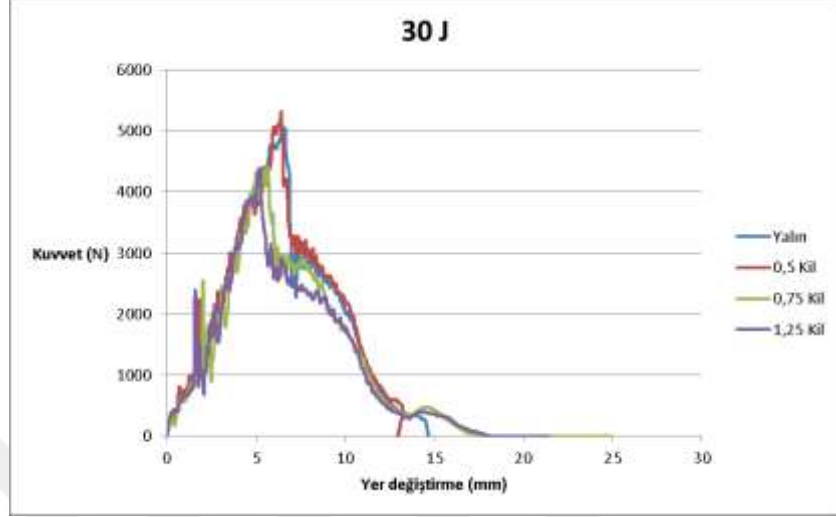
Darbe testleri yalın, %0,5; 0,75 ve 1,25 takviye oranları için 20, 30, 35 ve 40 J enerji seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.12’ den 4.15’ e kuvvet – yer değiştirme grafikleri verilmiştir. Sekme, saplanma ve delinme durumları grafiğe göre yorumlanmıştır. Bu eğrilerde kuvvet, testin başlangıcından itibaren artmakta ve maksimum değere ulaştıktan sonra düşüşe geçmektedir. Bu maksimum kuvvet, numunenin büyük hasarlara uğramadan önce dayanabileceği kuvveti göstermektedir (Iqbal et al., 2009). Bu eğrideki eğim “eğilme rijitliği” olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4.12. Darbe enerjisi 20 J olan numunelerin kuvvet – yer değiştirme grafiği.

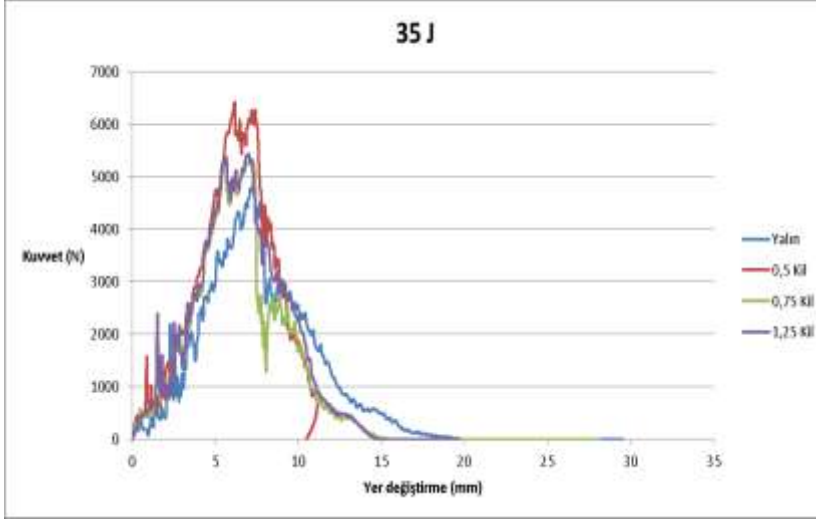
20 J enerji seviyesindeki grafiğe göre en fazla ve en az eğilme rijitliği değeri sırası ile %0,5 nanokil içeren ve yalın numunede görülmüştür. Benzer şekilde maksimum ve minimum tepe tepki kuvvetleri de bu numunelerde görülmüştür. % 0,5 nanokil içeren numune tepe tepki kuvvetini, yalın numuneye göre %10 arttırmıştır. Tüm eğriler kapalı formdadır. Yer değiştirme değerleri tüm numuneler için belirli bir değere ulaştıktan sonra sıfırlanmıştır. Bu darbe ucunun

numuneye çarptıktan sonra sektiğini göstermektedir. Yer değiştirme değerleri karşılaştırıldığında, en yüksek değer yalın numunede olduğu görülürken en az yer değiştirmenin %1,25 nanokil içeren numunede olduğu görülmüştür.



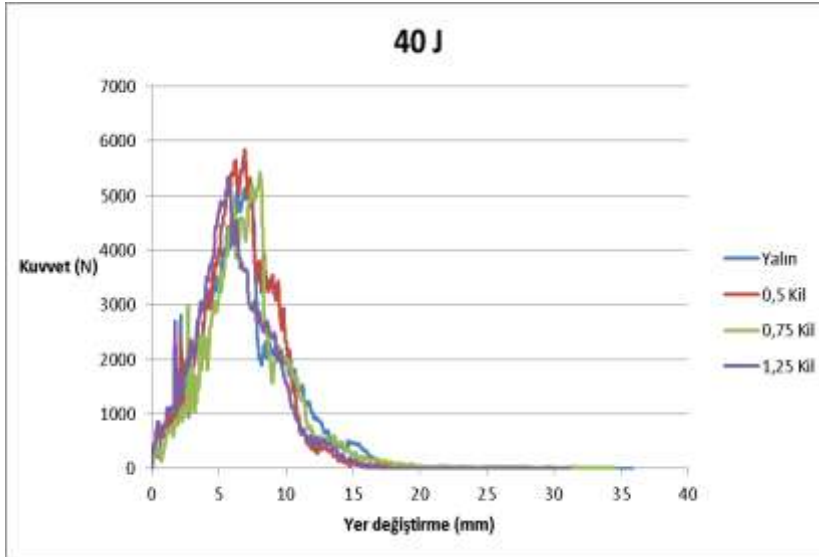
Şekil 4.13. Darbe enerjisi 30 J olan numunelerin kuvvet – yer değiştirme grafiği.

Darbe enerji seviyesi 30 J' e çıkartıldığında yine en fazla eğilme rijitliğinin %0,5 nanokil içeren numunede olduğu görülmüştür. İlginç bir şekilde ağırlıkça % 0,75 ve %1,25 nanokil içeren numunede, tepe tepki kuvveti, artan darbe enerjisine rağmen düşmüştür. Bunun nedeninin karıştırma süresinin yetersiz olmasından dolayı nanokil parçalarının artan miktarı ile birlikte topaklanmaya başladığı ve kompozit plakanın kırılma dayanımını arttırdığı düşünülmektedir. Bu numunelerin çekme testinde gösterdiği elastisite modülü değerleri ile de uyumludur. Maksimum ve minimum tepe tepki kuvvetleri sırası ile %0,5 nanokilli ile %0,75 nanokilli numunelerde görülmüştür. Matris malzemesindeki ilk hasarlar, kuvvetin ilk düştüğü veya eğimin ilk değiştiği anda gerçekleşmiştir. İlk hasarlar matris çatlakları şeklinde 2500 N civarlarında gerçekleşmiştir. Yalın ve ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numunelerin grafikleri belirli bir yer değiştirme değerinde son bulmuştur. Bu eğriden numunelerin saplanma durumu gösterdiği anlaşılmıştır. Diğer iki numunede grafik açık uçlu şekilde sonlanmış ve parçayı delmiştir.



Şekil 4.14. Darbe enerjisi 35 J olan numunelerin kuvvet – yer değiştirme grafiği.

Artan darbe enerjisi ile birlikte yalın numune hariç tüm numunelerin tepe tepki kuvvetleri artmıştır. Yalın numunedeki kuvvetin azalmasının nedeni, numunenin bu kuvveti karşılamaya yetecek dayanıklılıkta olmamasıdır. 35 J enerji seviyesinde, sadece ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numune delinme durumu göstermemiştir. Darbe ucu numuneye çarpmış ve burada saplanıp kalmıştır. Tüm numunelerde artan darbe enerjisi ile birlikte yer değiştirme değeri artmıştır. En düşük yer değiştirme değeri ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numunede görülmüştür.



Şekil 4.15. Darbe enerjisi 40 J olan numunelerin kuvvet – yer değiştirme grafiği.

40 J' luk darbe enerjisinde tüm numuneler delinmiştir. Ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numune 35 J enerjide en fazla tepe tepki kuvvetini gösterdikten

sonra düşüşe geçmiştir. Diğer numunelerin tepe tepki kuvvetleri bir önceki teste göre yükselmiştir. Fakat artım miktarı çok fazla değildir. En fazla tepe tepki kuvveti %0,5 nanokilli numunede görülmüştür. Bu oranda nanokil eklemek tepe tepki kuvvetini %13 arttırmıştır.

Çizelge 4.12. 20 J enerjide tepe tepki kuvvetlerinin karşılaştırılması

Malzeme adı	Kuvvet (N)	Değişim (%)
Yalın	4952,1	
%0,5 Nanokil	5476,5	10,59
%0,75 Nanokil	5167,5	4,35
%1,25 Nanokil	5297,9	6,98

Çizelge 4.13. 30 J enerjide tepe tepki kuvvetlerinin karşılaştırılması

Malzeme adı	Kuvvet (N)	Değişim (%)
Yalın	5105,2	
%0,5 Nanokil	5314,9	4,11
%0,75 Nanokil	4405,1	-13,71
%1,25 Nanokil	4393,7	-13,94

Çizelge 4.14. 35 J enerjide tepe tepki kuvvetlerinin karşılaştırılması

Malzeme adı	Kuvvet (N)	Değişim (%)
Yalın	4813,2	
%0,5 Nanokil	6414,7	33,27
%0,75 Nanokil	5295,1	10,01
%1,25 Nanokil	5428,3	12,78

Çizelge 4.15. 40 J enerjide tepe tepki kuvvetlerinin karşılaştırılması

Malzeme adı	Kuvvet (N)	Değişim (%)
Yalın	5133,5	
%0,5 Nanokil	5842,2	13,80
%0,75 Nanokil	5425,5	5,69
%1,25 Nanokil	5343,3	4,09

Çizelge 4.12- 4.15, sırasıyla 20, 30, 35 ve 40 J enerji değerlerinde tepe tepki kuvvet değerlerini göstermektedir. Ayrıca, bu çizelgelerde yüzde değişimde verilmiştir. Bunun anlamı, örneğin, 40 J enerji seviyesinde, nanokil katkısız numunelerde tepe tepki kuvveti 5,133 kN değeri elde edilmesine rağmen %0,5

nanokil içeren numunede tepe tepki değeri yaklaşık %13 artarak 5,842 kN değerine ulaşmıştır. Yani, nanokil ilavesi kompozit malzemenin darbe davranışını etkilemiştir. Çizelge 4.16 ise tüm enerji seviyelerinde tepe tepki kuvvetlerinin karşılaştırılmasını vermektedir. Bu çizelgelerden tüm enerji seviyelerinde en fazla tepe tepki kuvveti ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numunelerde oluşmuştur. Bu değer büyük olması, malzemenin darbe hasarına karşı daha fazla direndiği ya da bir başka deyişle hasarın bu kombinasyonlar içerisinde en son meydana gelmesi demektir.

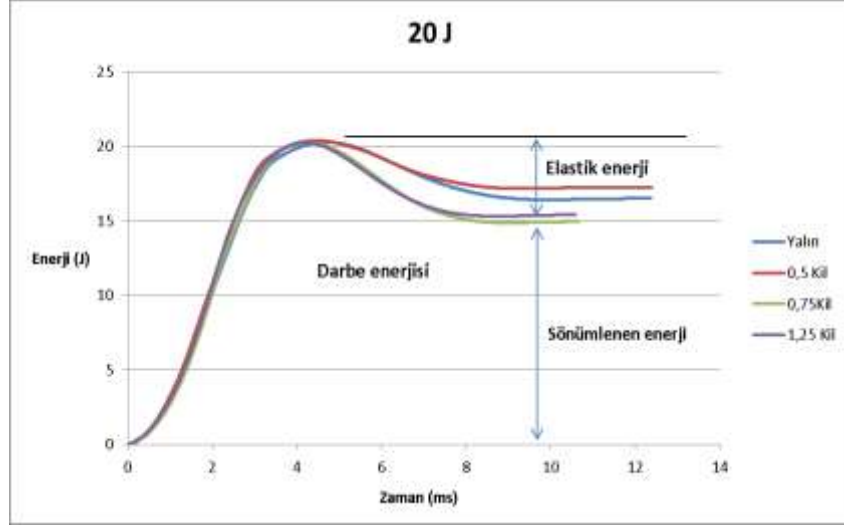
Çizelge 4.16. Tüm enerji seviyelerinde tepe tepki kuvvetlerinin karşılaştırılması

	20 Joule	30 Joule	35 Joule	40 Joule
Yalın	4952,1	5105,2	4813,2	5133,5
%0,5 Nanokil	5476,5	5314,9	6414,7	5842,2
%0,75 Nanokil	5167,5	4405,1	5295,1	5425,5
%1,25 Nanokil	5297,9	4393,7	5428,3	5343,3

4.3.2 Enerji – zaman eğrileri

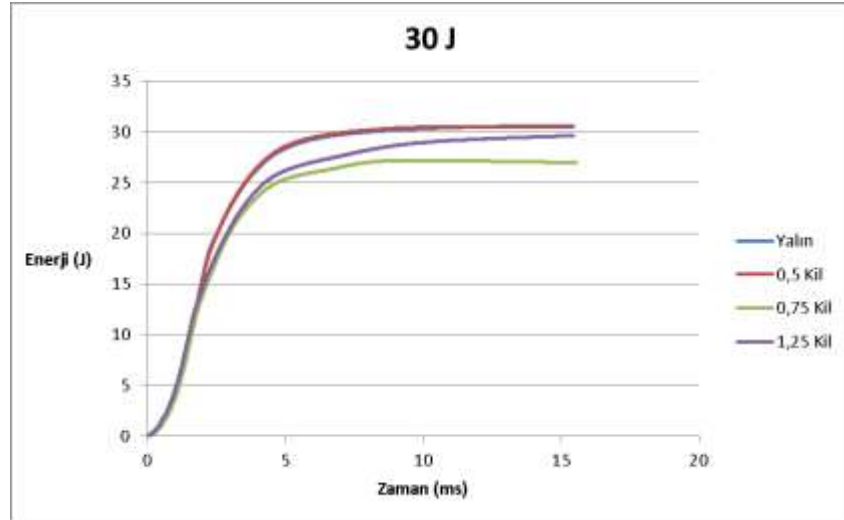
Bu eğri vasıtası ile darbe enerjisinin ne kadarının numune tarafından sönmüldüğü, ne kadarının sisteme geri verildiği tespit edilmektedir. Sönümlenen enerji miktarı, darbe enerjisinden elastik enerji miktarı çıkartılarak bulunmuştur. Elastik enerji, darbe ucunun numuneye çarptıktan sonra sekmesi durumunda ortaya çıkan ve uca geri verilen enerjidir. Elastik enerji miktarının azalması numunenin daha fazla hasar alarak saplanma eşik enerjisine yaklaştığını göstermektedir. Numunelerin enerji – zaman grafikleri Şekil 4.16’ den 4.19’ e kadar verilmiştir.

20 J darbe enerjisinde numunelerin enerji – zaman grafiği Şekil 4.16’ de verilmiştir. Tüm numuneler benzer eğri formu göstermiştir. Numuneler maksimum enerji seviyesini gördükten sonra azalmaya geçmiş ve sabit bir düzlüğe oturmuşlardır. Bu düzlük ile maksimum enerji seviyesi arasındaki fark elastik enerjidir ve sisteme geri verilmiştir. Beklenmedik şekilde en fazla enerjiyi %0,5 nanokil içeren numune sönmülemiştir. Sönümlenen enerji değeri %86’ lar civarındadır. Bu numuneyi %83 enerji sönmüleme değeri ile yalın numune takip etmiştir. En az enerjiyi ise %0,75 nanokil içeren numune gösterirken gelen darbe enerjisinin %75’ ini sönmülemiş, geri kalanını ise sisteme geri vermiştir.



Şekil 4.16. Darbe enerjisi 20 J olan numunelerin enerji – zaman grafiği.

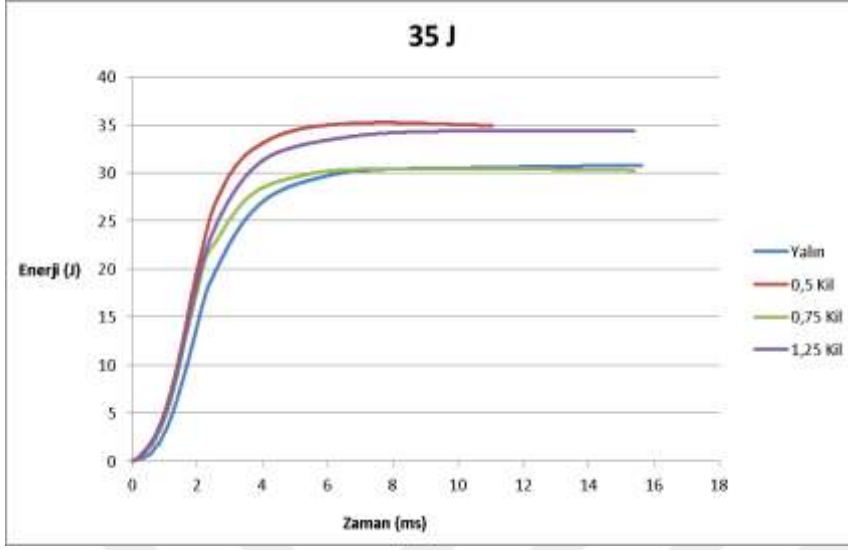
Darbe enerjisinin 30 J seviyesine çıkartılması ile birlikte numunelerin sönümlendiği enerji miktarı artmış, bunun yanı sıra elastik enerji miktarı azalmıştır. Hasar alanı enerji artışı ile birlikte artmıştır. Ağırlıkça %0,75 nanokil içeren numune uygulanan darbe enerjisini sönümleyememiş ve delinmiştir. %1,25 nanokil içeren numune ise sabit düzleşme ulaşamamış ve sönümlenen enerji ile darbe enerjisi eşit olarak testi tamamlamıştır. Bu numune için saplanma durumu mevcuttur. Yalın ve %0,5 nanokil içeren numunelerin darbe davranışı benzer bulunmuştur.



Şekil 4.17. Darbe enerjisi 30 J olan numunelerin enerji – zaman grafiği.

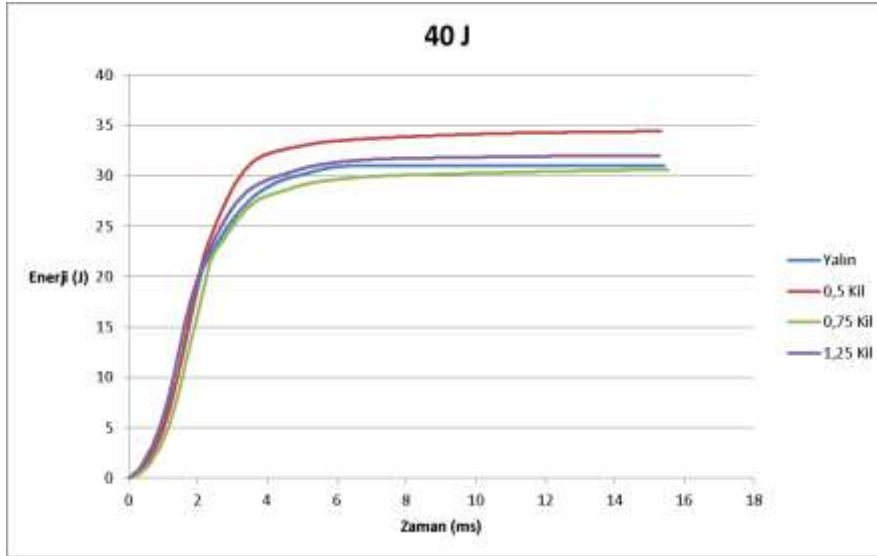
Elastik enerjinin minimuma indiği darbe enerjisi değeri 35 J' dür. Ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numunede darbe enerjisi ile sönümlenen enerji değerleri

birbirine eşit olmuştur. Saplanma durumu bu numune için bu enerji değerinde bulunmuştur. Diğer numuneler yeterli enerjiyi sönümleyememiş ve delinmiştir.



Şekil 4.18. Darbe enerjisi 35 J olan numunelerin enerji – zaman grafiği.

Darbe enerjisinin 40 J' e çıkartılması ile birlikte hiçbir numune bu seviyede enerji sönümleyemeyerek delinmiştir. Elastik enerji sistemde mevcut değildir. Yine de ağırlıkça %0,5 nanokilli numune en fazla darbe enerjisi sönümlemiştir. Ağırlıkça %0,75 nanokilli numune yalın numuneden bile daha düşük enerji sönümlemiştir.



Şekil 4.19. Darbe enerjisi 40 J olan numunelerin enerji – zaman grafiği.

Çizelge 4.17-4.20 tüm enerji seviyelerinde sönümlenen enerji ve elastik enerji göstermektedir. Bu çizelgelerden görüleceği üzere, neredeyse tüm enerji seviyelerinde ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numunelerin daha fazla darbe enerjisini sönümlediği enerji-zaman grafiklerinden görülmektedir.

Çizelge 4.17. 20 J enerji seviyelerinde sönümlenen enerji ve elastik enerji miktarı

Malzeme adı	Absorbe edilen enerji (J)	Elastik enerji (J)
Yalın	16,48	3,52
%0,5 Nanokil	17,23	2,77
%0,75 Nanokil	15,05	4,95
%1,25 Nanokil	15,51	4,49

Çizelge 4.18. 30 J enerji seviyelerinde sönümlenen enerji ve elastik enerji miktarı

Malzeme adı	Absorbe edilen enerji (J)	Elastik enerji (J)
Yalın	30,56	-0,56
%0,5 Nanokil	30,49	-0,49
%0,75 Nanokil	27,09	2,91
%1,25 Nanokil	29,46	0,54

Çizelge 4.19. 35 J enerji seviyelerinde sönümlenen enerji ve elastik enerji miktarı

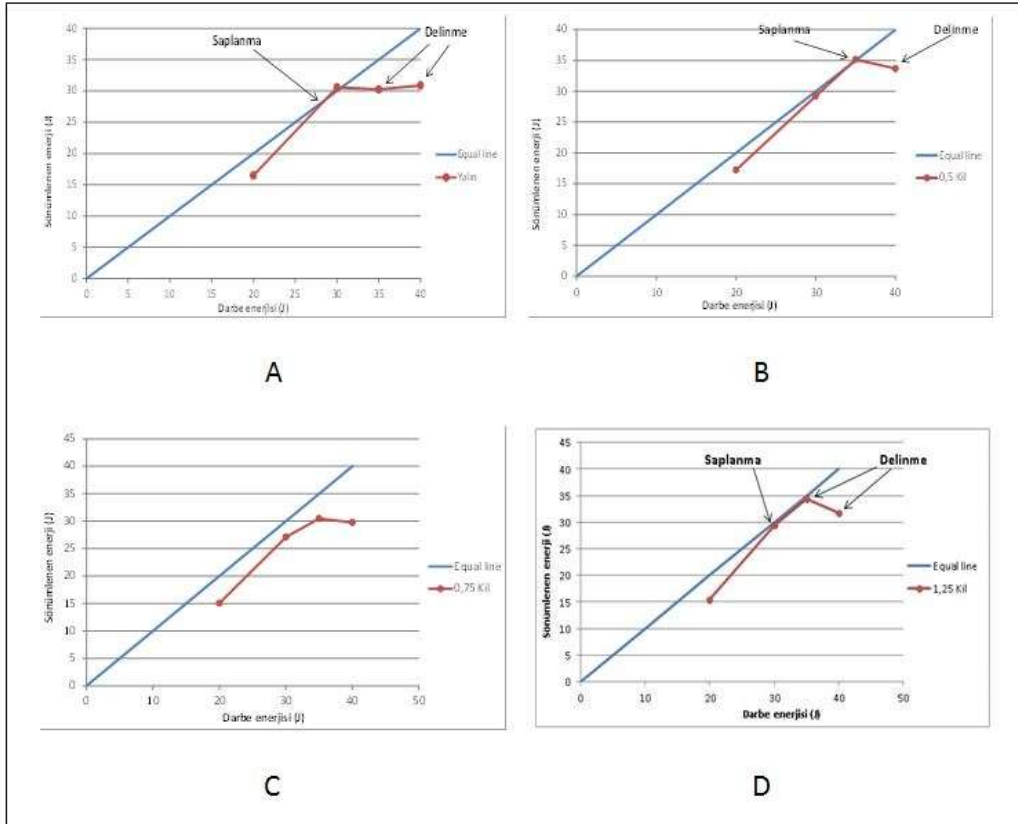
Malzeme adı	Absorbe edilen enerji (J)	Elastik enerji (J)
Yalın	30,2504	4,7496
%0,5 Nanokil	35,1514	-0,1514
%0,75 Nanokil	30,483	4,5170
%1,25 Nanokil	34,4496	0,5504

Çizelge 4.20. 40 J enerji seviyelerinde sönümlenen enerji ve elastik enerji miktarı

Malzeme adı	Absorbe edilen enerji (J)	Elastik enerji (J)
Yalın	30,8801	9,1199
%0,5 Nanokil	33,6858	6,3142
%0,75 Nanokil	29,7908	10,2092
%1,25 Nanokil	31,7111	8,2889

4.3.3 Enerji profil diyagramları

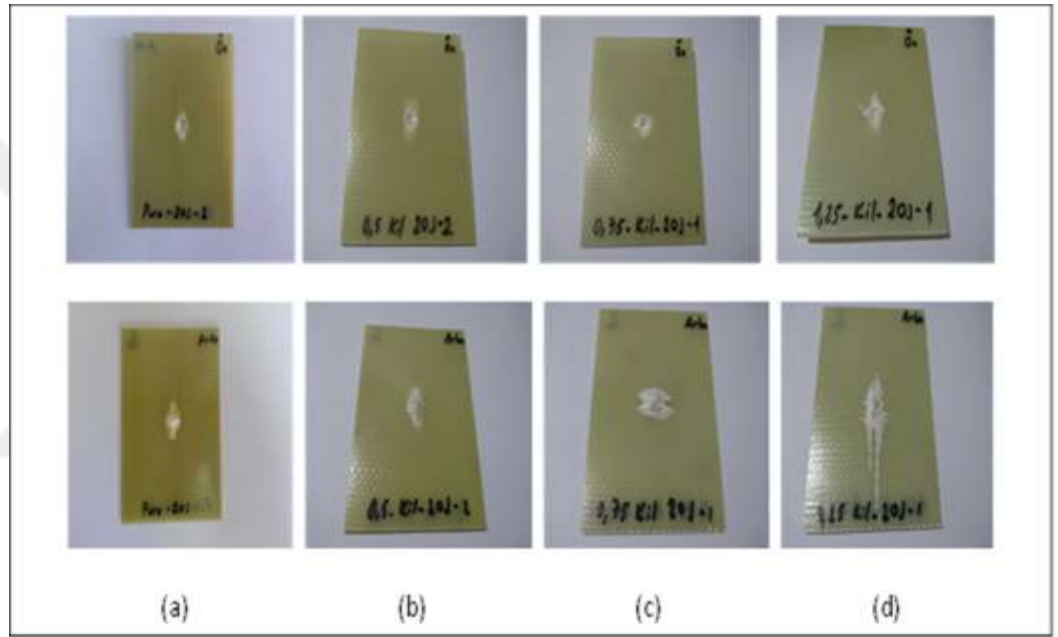
Enerji profil diyagramı, numunelerin saplanma ve delinme eşik enerjilerinin tespiti için yararlı bir veridir. Bu diyagramın yatay ekseninde darbe enerjisi değerleri, dikey ekseninde ise sönmülenen enerji değerleri mevcuttur. Ayrıca bu iki değere eşit olan bir doğru çizilmektedir. Numunelerin test içerisinde gösterdikleri değerler grafik üzerine işaretlenir. Ne zaman bu değerler, eşit çizgi ile ilk defa kesişirse bu nokta saplanma eşik enerjisidir. Saplanma eşik enerjisinden yüksek darbe enerjilerinde numuneler delinmektedir. Şekil 4.20’ de farklı takviye oranları için enerji profil diyagramı verilmiştir. Daha önceki kısımlarda belirtildiği üzere ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numunenin saplanma eşik enerjisi diğer numunelerden daha yüksek çıkmıştır. Yalın numune 27 J seviyesinde saplanma eşik enerjisi gösterirken %1,25 nanokilli numune 30 J seviyesinde eşik enerji göstermiştir. En yüksek eşik enerjisi ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numunede 35 J seviyesinde görülmüştür. Tüm bunların yanında ağırlıkça %0,75 nanokil içeren numunede belirgin bir eşik enerjisi değeri tespit edilememiştir. Tüm değerler eşit çizginin altında yer almış ve çizgiyle asla kesişmemiştir.



Şekil 4.20. Çeşitli takviye oranları için enerji profil diyagramları.

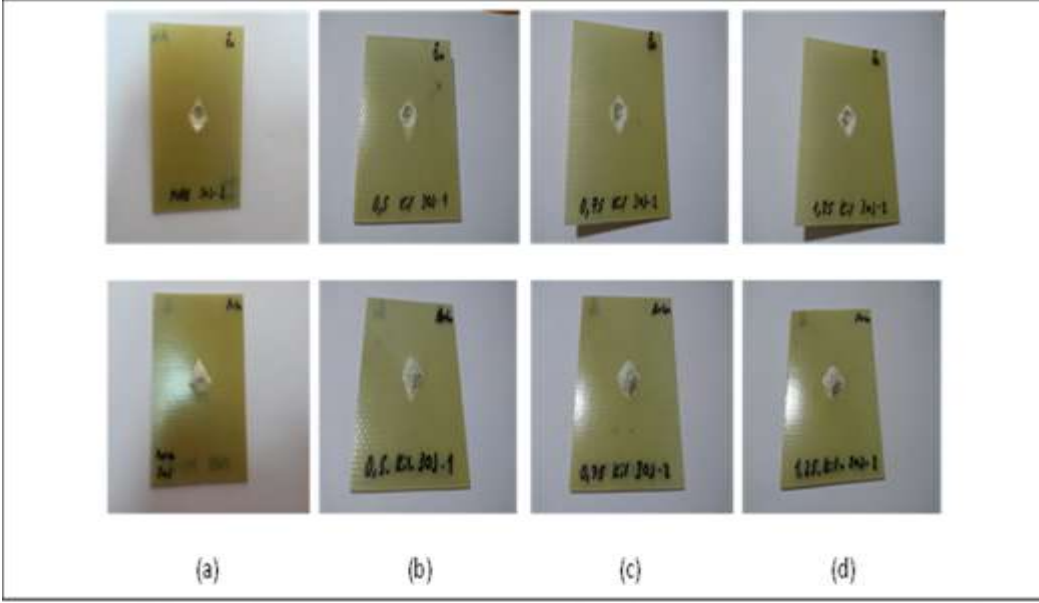
4.3.4 Darbe hasarının karakterizasyonu

Şekil 4.21' den 4.23' e kadar yalın ve nanokil takviyeli kompozit plakaların 20, 30 ve 40 J darbe enerjilerindeki hasar mekanizmaları göz ile muayene edilmiştir. 20 J enerji seviyesinde, nanokil içeren numunelerin ön yüzeyinde dairesel şekilde hasar oluşmuştur. Çeki kuvvetine maruz kalan arka yüzeyde ise sadece Şekil 4.21 d' deki %1,25 nanokil içeren numunede boylamasına fiber ayrılmaları ve geniş hasar alanı görülmektedir. Bu durum kuvvet – yer değiştirme eğrisi ile uyumlu bulunmuştur. Hiçbir numunede delinme meydana gelmemiştir. Fakat istenen enine çatlaklar da görülmemiştir.



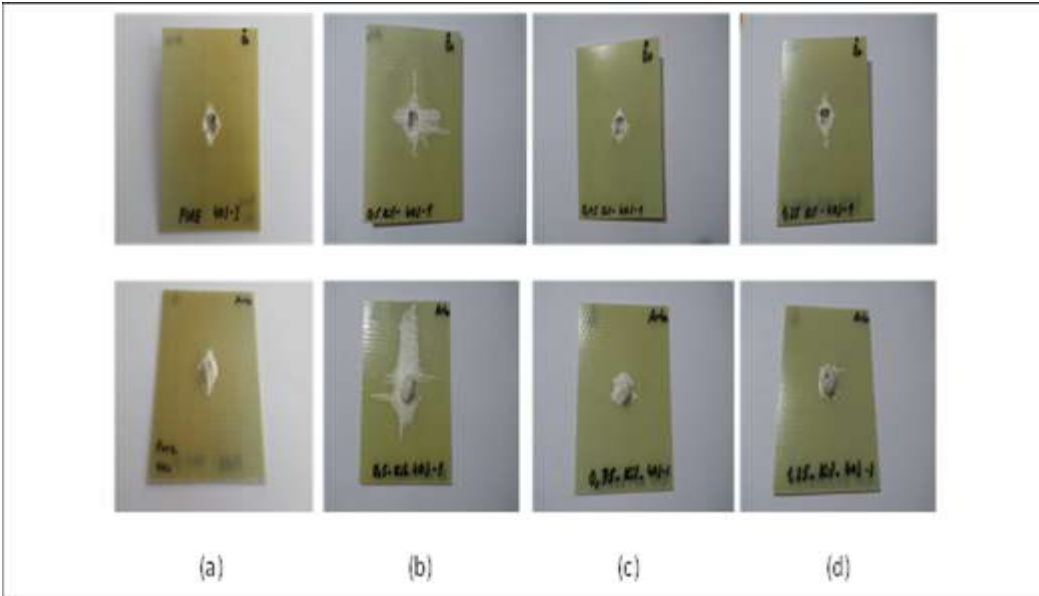
Şekil 4.21. Çeşitli takviye oranları için 20 J darbe enerjisinde ön ve arka yüzeylerdeki hasarlar.

Darbe enerjisi 30 J seviyesine çıkartıldığında delaminasyon alanı artmıştır. Numunelerin her iki yüzeyinde dairesel hasar görülmektedir. En büyük hasar alanı %0,5 nanokil içeren numunede olmuştur. Şekillere göre karıştırma süresinin yetersizliği burada da görülmektedir. Numunelerin kırılma dayanımı artmıştır.



Şekil 4.22. Çeşitli takviye oranları için 30 J darbe enerjisinde ön ve arka yüzeylerdeki hasarlar.

40 J enerji seviyesinde, tüm numuneler gelen darbeyi sönmüleyememişler ve delinmişlerdir. Fiber kırılmaları ve delaminasyon ana hasar mekanizmasıdır. Ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numune, gelen darbeyi öncelikle enine doğrultuda hasar oluşturarak sönmülemeye çalışmış daha sonra kalınlık yönünde iletmiştir. Diğer numuneler dairesel şekilde hasar göstererek delinmiştir.

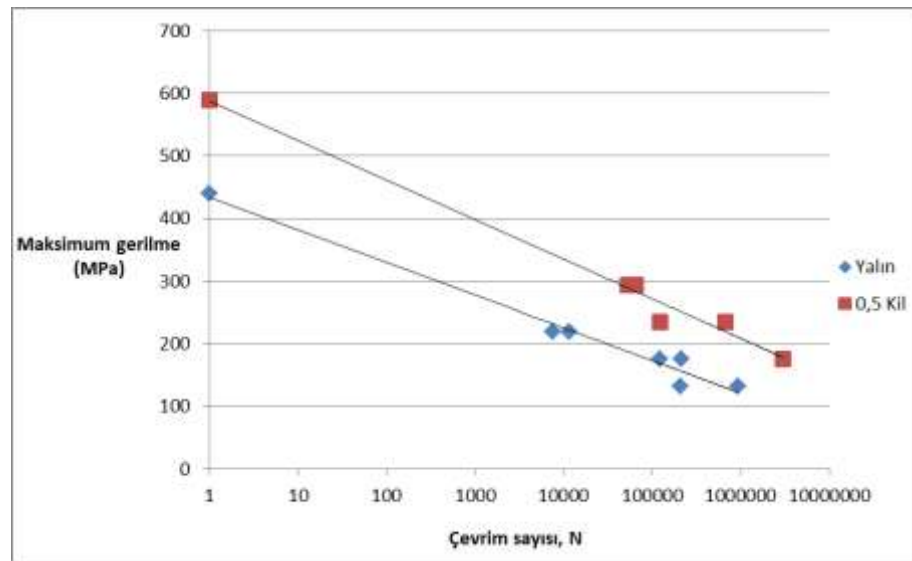


Şekil 4.23. Çeşitli takviye oranları için 40 J darbe enerjisinde ön ve arka yüzeylerdeki hasarlar.

4.4. Yorulma Testi Sonuçları

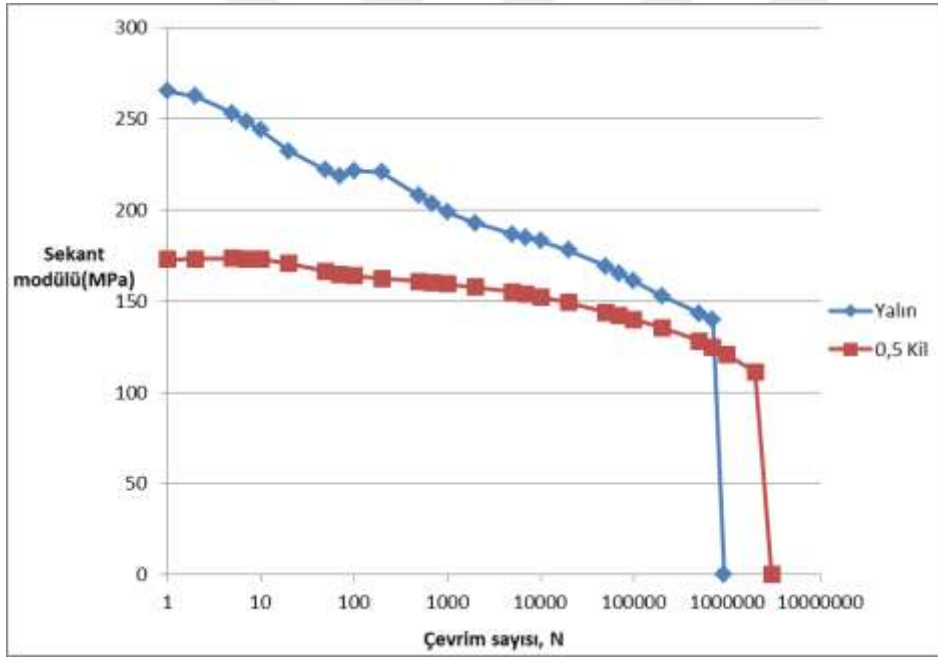
Çeki – çeki yorulma testleri oda sıcaklığında gerilme oranı $R=0,1$ olacak şekilde üç farklı gerilme değerinde gerçekleştirilmiştir. Testlerin frekans değeri 5 Hz alınmıştır. Frekans bir saniye sürede, sinüs eğrisinin iki tepe noktası aralığını aldığını göstermektedir. Testlerimizde saniyede 5 çevrim yükleme yapılmıştır. Frekansın 5 seçilmesinin nedeni numunedeki fiberlerin gelen dinamik yükler altında ısınıp erken kırılmasını önlemek içindir. Testler kırılma gerçekleşinceye kadar devam ettirilmiştir. Çene basıncı erken kırılmaları önlemek için 1 MPa uygulanmış ve numunelere tab yapıştirilmamıştır. Sekant modülü hesaplanırken iki çene arası uzaklık ölçüm mesafesi olarak alınmıştır. Şekil 4.24’ te yalın ve ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numunelerin S-N eğrisi verilmiştir.

Şekil incelendiği zaman ilk çevrim olarak verilen değerler statik çekme testi sonucu olduğu görülmektedir. Gerilme değerleri, numunelerin çekme dayanımlarının %50, 40 ve 30’ u seviyesinde alınmıştır. Eklenen nanokil yorulma ömrünü arttırmıştır. Tüm numuneler içerisinde en fazla ömür, statik testin %30’ u gerilme uygulanan, ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numunede görülmüştür. Numune 2979830 çevrimde kırılmıştır. Sadece bu numunede milyon çevrim değeri aşılmıştır. Yalın ve %0,5 nanokil içeren numunelerin eğimleri yaklaşık olarak eşittir. Test sırasında fiberlere aksel yönde uygulanan yükten dolayı kuvvete dik yönde yerleşik bulunan fiberler hareket etmekte ve kuvvet yönünde düzelme eğilimindedirler. Kırılma bu fiberlerin bu harekete zorlanıp zamanla matris çatlaklarının büyümesi dolayısıyla olmuştur.



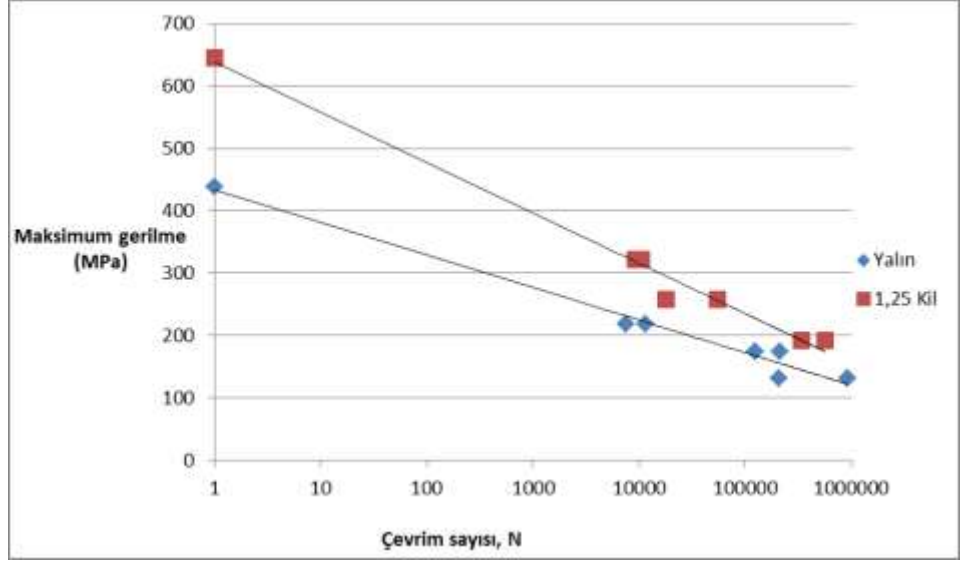
Şekil 4.24. Yalın ve %0,5 nanokilli numunenin S-N eğrisi.

Şekil 4.25’ te bahsi geçen numunelerin rijitliklerindeki değişim grafiksel olarak verilmiştir. Grafiğe göre yalın numunenin rijitliği, çevrimsel yükün başladığı anda %0,5 nanokil içeren numuneye göre daha fazladır. Çevrim sayısı arttıkça her iki malzeme grafiği de azalan bir seyir göstermektedir. Fakat yalın numunenin düşüş hızı nanokil takviyeli numuneye göre oldukça fazladır. Yorulma hasarları, kompozit malzemelerde matris içerisinde çatlak oluşumu şeklinde başlamaktadır. Zamanla bu çatlaklar birleşerek büyümekte, delaminasyona ve fiber kırılmalarına neden olmaktadır. Nano killerin plaka şeklindeki morfolojilerinden dolayı yüzey alanları çok büyüktür. Nanokil reçine içerisine katıldığı zaman, reçinede başlayan çatlakların birleşimini geciktirmekte ve ömrü arttırmaktadır. Bu yüzden rijitlik düşüşü nano takviyeli malzemede daha düşük olmuştur. Malzemelerin ömrü tamamlanmak üzereyken rijitliklerinde hızlı düşüş olmuş ve numuneler kırılmıştır.



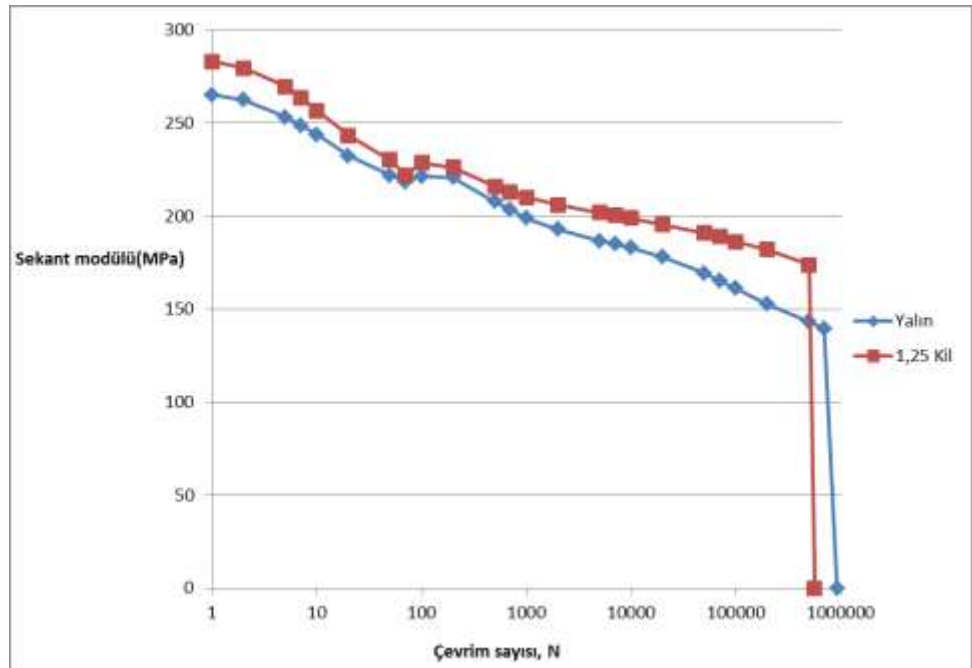
Şekil 4.25. Yalın ve %0,5 nanokilli numunelerin rijitlik değişimi.

Şekil 4.26’ daki S-N eğrisine göre reçine içerisine eklenen %1,25 nanokil yorulma ömrünü yalın numuneye göre kötü yönde etkilemiştir. Grafiğin eğimlerine bakıldığı zaman nano takviyeli malzeme daha dik bir eğim göstermektedir. Yorulma karakteristiğindeki kötüleşmenin nedeni olarak nanokilin reçinenin serbest hacmini azalttığı ve hareket alanını daralttığı ve dolayısıyla parçanın kırılma dayanıklılığını arttırdığı düşünülmektedir.



Şekil 4.26. Yalın ve %1,25 nanokilli numunenin S-N eğrisi.

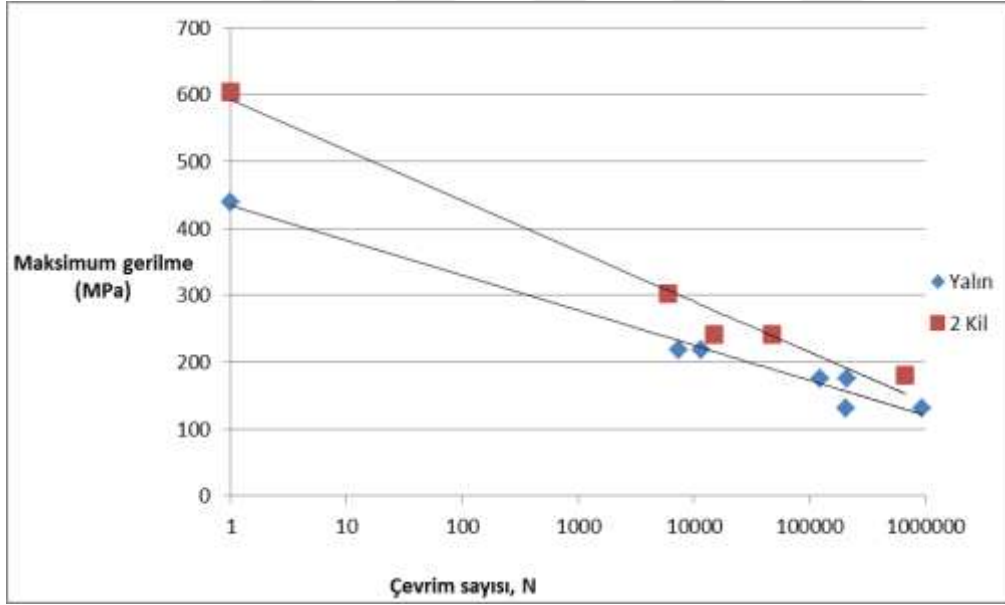
Şekil 4.27' de bu iki malzemenin rijitlik değişimleri grafiksel olarak gösterilmiştir. %1,25 oranında nanokil içeren malzemede rijitlik değeri kırılmaya yaklaşıncaya kadar yalın numuneye göre daha yüksek seyretmiştir. Grafikler karakteristik olarak benzemektedir. Nanokilli numune rijitlik düşüşüne daha uzun süre dayanmış fakat gevrek malzeme karakteristiği olarak ani kırılma gözlenmiştir. Reçine çatlakları nano killerin topaklandığı bölgelerde başlamış ve hızla ilerleyerek fiber kırılmasına neden olmuştur.



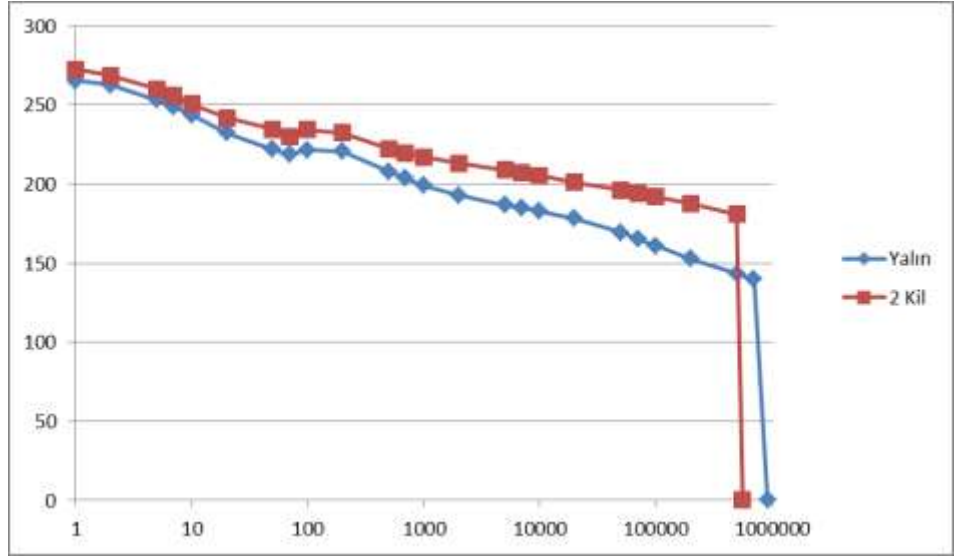
Şekil 4.27. Yalın ve %1,25 nanokilli numunelerin rijitlik değişimi.

Şekil 4.28’ de yalın ve %2 nanokil ekli numunelerin S-N eğrisi görülmektedir. Eklenen nanokil eğimi arttırmıştır. Yalın numuneye göre tüm gerilme seviyelerinde daha az çevrim sayısı göstermiştir. Eklenen nanokil reçinenin viskozitesini arttırmış ve fiberlerin ıslatılabilirliğini azaltmıştır. Şekil 3.6’ da %2 nanokil ekli plakanın orta noktasında ıslanmamış fiberler göze çarpmaktadır. Fiberler yeteri kadar ıslanmadığı için kuvvet aktarımı istenilen oranda olmamıştır. Bu yüzden nanokil takviyesinin etkisi beklendiği seviyeye ulaşmamıştır.

Şekil 4.29’ da ise yalın ve %2 nanokil takviyeli kompozit malzemenin çevrim sayısı ile birlikte rijitliğindeki değişim verilmiştir. Grafik, Şekil 4.27 ile benzerlik göstermektedir. Çevrim sayısı 100 olana kadar numunelerde hasar başlamış ve rijitlik önemli ölçüde düşmüştür. Daha sonra düşüş hızı azalmış ve sabit bir hal almıştır. En son olarak ise keskin bir düşüşle numune kırılmıştır. Nanokil ekli numunelerde rijitlik azalması daha yavaş gerçekleşmiştir.



Şekil 4.28. Yalın ve %2 nanokilli numunenin S-N eğrisi.



Şekil 4.29. Yalın ve %2 nanokilli numunelerin rijitlik değışimi.

5. DEĞERLENDİRME

Bu tezde, dokuma cam kumaş ve epoksi kompozit malzemede, epoksi reçine içerisine ağırlıkça değişik oranlarda (%0,5- 0,75- 1,25 ve 2) nanokil ilavesinin mekanik ve yorulma dayanımına olan etkisi incelenmiştir. Bunun için, çekme deneyi, üç nokta eğme deneyi, düşük hız darbe deneyi ve çeki-çeki yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu deneylerde, optimum nanokil değeri elde edilmeye çalışılmıştır. Yapısı itibariyle nanokilin bir arada bulunma eğilimi nedeniyle epoksi reçine içerisine ilave edilen nanokiller ultrasonik karıştırıcı yardımıyla epoksi reçine içerisinde homojen dağılması sağlanmıştır. Ultrasonik karıştırma işleminde, ses dalgaları yardımıyla topaklanan nanokiller epoksi reçine içerisinde birbirinden ayrılarak epoksi reçine içerisinde dağılmışlardır. Elle yatırma yöntemi ile yalın yani nanokil katkısız ve ağırlıkça değişik oranlarda nanokil içeren kompozit plakalar üretilmiştir. Kompozit plakalarda delaminasyon olayının meydana gelmemesi için tüm numuneler su jeti ile gerekli hassasiyet gösterilerek kesilmiştir. ASTM standartlarına uygun üretilen numuneler çekme deneyi, üç nokta eğme deneyi, düşük hız darbe deneyi ve çeki-çeki yorulma deneylerine tabi tutulmuşlardır. Çalışma boyunca gerçekleştirilen deneyler ve analizler sonrasında elde edilen sonuçları şu şekilde sıralanabilir:

- Çekme deneyi'nde nanokil ilavesinin elastisite modülünü artırdığı görülmüştür. %0,5 nanokil içeren numunelerde elastisite modülü yalın yani nanokil katkısız numunelere kıyasla yaklaşık %17 artmıştır. Benzer şekilde, %0,75- 1,25 ve %2 nanokil içeren numunelerde elastisite modülleri sırasıyla, yaklaşık %7, %5 ve %9 oranında artmıştır. Buna göre, bu oranlar içerisinde maksimum elastisite modülü nanokil katkısız numunelere kıyasla %0,5 nanokil içeren numunelerde elde edilmiştir.
- Çekme deneyi'nde nanokil ilavesi çekme dayanımını artırmıştır. %0,5 nanokil içeren numunelerde çekme dayanımı yalın yani nanokil katkısız numunelere kıyasla yaklaşık %34 artmıştır. Benzer şekilde, %0,75-1,25 ve %2 nanokil içeren numunelerde çekme dayanımları sırasıyla, yaklaşık %34; %46 ve %37 oranında artmıştır. Maksimum çekme dayanımı, %1,25 nanokil içeren numunelerde elde edilmiştir.
- Üç nokta eğme deneylerinde ise, %1,25 nanokil içeren numunelerde eğilme modülü, nanokil katkısız numunelere kıyasla yaklaşık %24 artmıştır. Ancak, %0,5 ve %2 nanokil içeren numunelerde eğilme modülü,

nanokil katkısız numunelere kıyasla sırasıyla yaklaşık %11 ve %3 azalmıştır. Bu azalmanın nedeni nanokilin epoksi reçine içerisinde homojen bir şekilde karışmaması yani topaklanma göstermesi olarak düşünülmektedir.

- Düşük hız darbe testlerinde nanokil ilavesi kompozit malzemenin darbe davranışını etkilemiştir. 20, 30, 35 ve 40 J enerji değerlerinde tepe tepki kuvvet değerleri, ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numunelerde en fazla oluşmuştur. Bu değer büyük olması, malzemenin darbe hasarına karşı daha fazla direndiği ya da bir başka deyişle hasarın bu kombinasyonlar içerisinde en son meydana gelmesi demektir.
- Düşük hız darbe testlerinde enerji-zaman grafiklerinden görüleceği üzere, neredeyse tüm enerji seviyelerinde ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numunelerin daha fazla darbe enerjisini sönümlediği görülmektedir.
- Düşük hız darbe testlerinde enerji-profil diyagramı incelendiğinde, ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numunenin saplanma eşik enerjisi diğer numunelerden daha yüksek çıkmaktadır. %0,5 nanokil içeren numunenin saplanma eşik enerjisi 35 Joule olarak tespit edilmiştir. %1,25 nanokilli numunenin saplanma eşik enerjisi 30 Joule iken yalın numunenin saplanma eşik enerjisi 27 Joule olarak bulunmuştur.
- Çeki – çeki yorulma testlerinde nanokil ilavesi kompozit malzemenin yorulma davranışını etkilemiştir. Çeki-çeki yorulma testleri oda sıcaklığında gerilme oranı $R=0,1$ olacak şekilde numunelerin çekme dayanımlarının %50, 40 ve 30' u seviyesinde üç farklı gerilme değerinde gerçekleştirilmiştir. Testlerin frekans değeri 5 Hz alınmıştır. Eklenen nanokil yorulma ömrünü arttırmıştır. Tüm numuneler içerisinde en fazla ömür, statik testin %30' u gerilme uygulanan, ağırlıkça %0,5 nanokil içeren numunede görülmüştür. Numune 2979830 çevrimde kırılmıştır.

Sonuç olarak, nanokil ilavesi kompozit malzemenin darbe ve yorulma davranışını olumlu yönde değiştirmiştir. Ancak, ağırlıkça katkı oranlarında incelendiğinde, %0,5 nanokil içeren numunelerin elastisite modülünün, %1,25 nanokil içeren numunelerin çekme dayanımı ve eğilme modülünün maksimum olduğu tespit edilmiştir. Düşük hız darbe ve yorulma davranışında ise %0,5 nanokil içeren numuneler en iyi sonuçları vermektedir.

Bu çalışmada, nano takviyeli kompozit plakaların özelliklerindeki değişimlerin, nano takviyesiz numuneye göre karşılaştırılması (pozitif, negatif, değişmedi veya incelenmedi şeklinde) Çizelge 5.1’ de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Nano takviyenin kompozit plaka üzerindeki etkileri

	%0,5 Nanokil	%0,75 Nanokil	%1,25 Nanokil	%2 Nanokil
Çekme dayanımı	+	+	+	+
Elastisite modülü	+	+	+	+
Eğilme dayanımı	-	incelenmedi	+	-
Eğilme modülü	-	incelenmedi	+	-
Düşük hız darbe testi saplanma eşik enerjisi	+	-	Kayda değer artış görülmedi	incelenmedi
Yorulma ömrü	+	incelenmedi	-	-

Bu bulgular ışığında, nanokil katkılı kompozit malzemelerin özelliklerinin arttığı görülmüştür. Bu malzemeler düşük şiddette darbelere maruz kalan araç kapıları, tekne dış gövdeleri, surf tahtaları ve kompozit kasklarda kullanılabilir. Ayrıca yorulma ömründe görülen artış dolayısıyla rüzgar türbini kanatları nanokil ile güçlendirilebilir.

6. ÖNERİLER

Dolgu malzemesi olarak kullanılan nanokil, kompozit malzemede büyük önem arz etmektedir. Eklenen küçük miktarda nano takviye sonuçları kayda değer oranda arttırmaktadır. Ağırlıktan büyük kazançlar sağlamanın yanında mekanik özelliklerde de iyileşmeler mevcuttur. Şüphesiz ki bilim insanları kompozit malzemeyi geliştirme ve onun mekanik özelliklerinin tespiti üzerine çalışmalar yapacaklardır.

Yeni yapılacak olan çalışmalara verilebilecek öneriler aşağıda maddeler halinde listelenmiştir:

- Nanokilin reçine ile karışımı problemler barındırmaktadır. Nano partikülleri homojen dağıtmak, özellikleri arttırmanın birinci koşuludur. Bu yüzden nano partiküller termoset reçinelerle karıştırılırken, çok yüksek hızlı parçalayıcı karıştırıcı ile ultrasonik karıştırıcıdan önce karıştırılmalıdır.
- Nanokilin havadan nem alıp tutma özelliği bulunmaktadır. Bu yüzden nanokil reçine ile karıştırılmadan önce bir süre ısıtılmalı ve vakumlu kaptaki tutulmalıdır.
- Artan nanokil miktarı viskoziteyi arttırmaktadır. Bu yüzden reçine içerisine viskoziteyi düşüren katkı malzemeleri katılmalıdır.
- Darbe testleri yapıldıktan sonra tahribatsız muayene veya akustik yöntemlerle kompozit numunelerin delaminasyon genişlikleri incelenebilir.
- Nanokil, reçine içerisine katılarak homojen karışma durumu SEM ile kontrol edilebilir.
- Kırık yüzeyler SEM veya TEM ile görüntülenerek kırılma mekanizmaları hakkında ayrıntılı bilgi edinilebilir.
- Tüm testler oda sıcaklığında değil negatif sıcaklıkta da tekrarlanarak düşük sıcaklıklarda nanokil katkısının etkileri incelenebilir.
- Nanokil içeren kompozit malzemeler belirli bir süre suda bekletilerek özelliklerdeki bozulmalar karşılaştırılabilir.
- Nanokilin tutuşabilirlik özellikleri incelenebilir.
- Yorulma testlerinde gerilme değerleri değiştirilebilir veya yükleme türü değiştirilebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akovali, G.**, 2001, Handbook of Composite Fabrication, Rapra Technology LTD., United Kingdom, 196 p.
- Alsaran, A.**, Hasar Analizi Ders Notu, Erzurum Atatürk Üniversitesi.
- Altstädt, V., Götz, C. and F. W. Fabris**, 2011, Fatigue behavior of polymer nanocomposites, 18th International Conference on Composite Materials.
- ASTM Standart D3039/D3039M – 14**, Reapproved, 2014, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Pennsylvania, 13 p.
- ASTM Standart D7264 / D7264M – 15**, Reapproved, 2015, Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Pennsylvania.
- ASTM Standart D3479/D3479M – 12**, Reapproved, 2012, Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials, Pennsylvania, 6 p.
- Avila, A.F., Soares, M.I. and Neto, A.S.**, 2007, A study on nanostructured laminated plates behavior under low-velocity impact loadings, *International Journal of Impact Engineering*, 34: 28–41.
- Baker, A., Dutton, S. and Kelly, D.**, 2004, Composite Materials for Aircraft Structures, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Virginia, 597 p.
- Borrego, L.P., Costa, J.D.M., Ferreira, J.A.M. and Silva, H.**, 2014, Fatigue behaviour of glass fibre reinforced epoxy composites enhanced with nanoparticles, *Composites: Part B*, 62: 65–72.
- Bozkurt, E., Kaya, E. and Tanoğlu, M.**, 2007, Mechanical and thermal behavior of non-crimp glass fiber reinforced layered clay/epoxy nanocomposites, *Composites Science and Technology*, 67: 3394–3403.
- Böger, L., Sumfleth, J., Hedemann, H. and Schulte, K.**, 2010, Improvement of fatigue life by incorporation of nanoparticles in glass fibre reinforced epoxy, *Composites: Part A*, 41: 1419–1424.
- Brunbauer, J. and Pinter, G.**, 2014, On the strain measurement and stiffness calculation of carbon fibre reinforced composites under quasi-static tensile and tension-tension fatigue loads, *Polymer Testing*, 40: 256 – 264.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Brunbauer, J. and Pinter, G.**, 2015, Fatigue life prediction of carbon fibre reinforced laminates by using cycle-dependent classical laminate theory, *Composites: Part B*, 70: 167–174.
- Brunbauer, J., Stadler, H. and Pinter, G.**, 2015, Mechanical properties, fatigue damage and microstructure of carbon/epoxy laminates depending on fibre volume content, *International Journal of Fatigue*, 70: 85–92.
- Campbell, F.C.**, 2004, *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, Elsevier Ltd., Oxford, 512 p.
- Chawla, K.K.**, 2013, *Composite Materials: Science and Engineering*, Springer Science+Business Media, New York, 542 p.
- Chowdhury, F.H., Hosur, M.V. and Jeelani, S.**, 2006, Studies on the flexural and thermomechanical properties of woven carbon/nanoclay-epoxy laminates, *Materials Science and Engineering A*, 421: 298–306.
- Composite Material Handbook**, 2002, *Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design, and Analysis*, Department of Defense, 3rd Volume.
- Ferreira, J.A.M., Borrego, L.P., Costa, J.D.M. and Capela, C.**, 2013, Fatigue behaviour of nanoclay reinforced epoxy resin composites, *Composites: Part B*, 52: 286–291.
- Ferreira, J.A.M., Reis, P.N.B., Costa, J.D.M. and Richardson, M.O.W.**, 2012, Fatigue behaviour of Kevlar composites with nanoclay-filled epoxy resin, *Journal of Composite Materials*, 47: 1885–1895.
- Gibson, R.F.**, 1994, *Principles of Composite Material Mechanics*, McGraw-Hill, Inc., New York, 425 p.
- Glinka, G.**, 2005, *Mechanical Design 1 Ders Notu*, Waterloo Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü
- Hasar Analizi Laboratuvarı, <http://users.metu.edu.tr/bogel/ornekler.html> (Erişim tarihi: 11.08.2016)
- Helmy, S. and Hoa, S.V.**, 2014, Tensile fatigue behavior of tapered glass fiber reinforced epoxy composites containing nanoclay, *Composites Science and Technology*, 102: 10–19.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Iqbal, K., Khan, S.-U., Munir, A. and Kim, J.-K.**, 2009, Impact damage resistance of CFRP with nanoclay-filled epoxy matrix, *Composites Science and Technology*, 69: 1949–1957.
- Jin, L., Jin, B.C., Kar, N., Nutt, S., Sun, B. and Gu, B.**, 2013, Tension-tension fatigue behavior of layer-to-layer 3-D angle-interlock woven composites, *Materials Chemistry and Physics*, 140: 183 – 190.
- Kalpajian, S. and Schmid, S.R.**, 2009, *Manufacturing Engineering and Technology*, Pearson Education, Inc., 1180 p.
- Kavitha, N. S. and Prakash, R.V.**, 2013, Investigation of scaling effects on post-fatigue residual strength of nanoclay added GFRP composites, Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 62916.
- Kelly, A. and Zweben, C.**, 2000, *Comprehensive Composite Materials*, Elsevier Ltd.
- Khan, S.U., Munir, A., Hussain, R. and J.-K. Kim**, 2010, Fatigue damage behaviors of carbon fiber-reinforced epoxy composites, *Composites Science and Technology*, 70: 2077–2085.
- Kopeliovich, D.**, 2012, “Kevlar (aramid) fiber reinforced polymers” http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=kevlar_aramid_fiber_reinforced_polymers (Erişim tarihi: 06.08.2016)
- Koricho, E.G., Khomenko, A., Haq, M., Drzal, L.T., Belingardi, G. and Martorana, B.**, 2015, Effect of hybrid (micro- and nano-) fillers on impact response of GFRP composite, *Composite Structures*, 134: 789–798.
- Long, A.C.**, 2005, *Design and Manufacture of Textile Composites*, Woodhead Publishing Limited in association with The Textile Institute Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 476 p.
- Loos, M.R., Yang, J., Feke, D.L., Manas-Zloczower, I., Unal, S. and Younes, U.**, 2013, Enhancement of fatigue life of polyurethane composites containing carbon nanotubes, *Composites: Part B*, 44: 740–744.
- Mallick, P.K.**, 2007, *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, by Taylor & Francis Group, LLC, Florida.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Manjunatha, C.M., Taylor, A.C., Kinloch, A.J. and Sprenger, S.,** 2010, The tensile fatigue behaviour of a silica nanoparticle-modified glass fibre reinforced epoxy composite, *Composites Science and Technology*, 70: 193–199.
- Mazumdar, S.K.,** 2002, *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, CRC Press LLC, Florida.
- Miracle, D.B. and Donaldson, S.L.,** 2001, *Composites*, ASM International, ASM Handbook, 21st Volume.
- Nordin, M.N.A., Matsuda, Y., Tokuno, K. and Goda, K.,** 2015, Electron probe microanalyzer evaluation of fatigue fracture surface of nanoclay–epoxy composite materials, *J Fail. Anal. and Preven.*, 15: 445–456.
- Raghul, K.S., Nandakumar, D. and Jeyakumar, R.,** 2016, Mechanical behaviour of glass fiber/epoxy modified with nano composites: a review, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 5: 6p.
- Reis, P.N.B., Ferreira, J.A.M., Zhang, Z.Y., Benameur, T. and Richardson, M.O.W.,** 2013, Impact response of Kevlar composites with nanoclay enhanced epoxy matrix, *Composites: Part B*, 46: 7–14.
- Reis, P.N.B., Ferreira, J.A.M., Santos, P., Richardson, M.O.W. and Santos, J.B.,** 2012, Impact response of Kevlar composites with filled epoxy matrix, *Composite Structures*, 94: 3520–3528.
- Sloan, J.,** 2013, “Market Outlook: Surplus in carbon fiber's future?” <http://www.compositesworld.com/articles/market-outlook-surplus-in-carbon-fibers-future> (Erişim tarihi: 06.08.2016)
- Strong, A.B.,** 2008, *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications*, Society of Manufacturing Engineers, Michigan, 620 p.
- Taraghi, I., Fereidoon, A. and Taheri-Behrooz, F.,** 2014, Low-velocity impact response of woven Kevlar/epoxy laminated composites reinforced with multi-walled carbon nanotubes at ambient and low temperatures, *Materials and Design*, 53: 152–158.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Toumi, R.B., Renard, J., Monin, M. and Nimdum P.,** 2013, Fatigue damage modelling of continuous E-glass fibre/epoxy composite, *Procedia Engineering*, 66: 723 – 736.
- Vasiliev, V.V. and Morozov, E.V.,** 2001, Mechanics and Analysis of Composite Materials, Elsevier Science Ltd., Oxford, 412 p.
- Wang, R.-M., Zheng, S.-R. and Zheng, Y.-P.,** 2011, Polymer Matrix Composites and Technology, Woodhead Publishing Limited and Science Press Limited, Cambridge, 555 p.
- Xu, Y. and Hoa, S.V.,** 2008, Mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy/clay nanocomposites, *Composites Science and Technology*, 68: 854–861.

ÖZGEÇMİŞ

Hasan Yavuz ÜNAL 1989 yılı İzmir doğumludur. Türkiye Cumhuriyeti vatandaşıdır. İlköğretimini 2004 yılında Muğla Dumlupınar İlköğretim Okulu'nda, orta öğrenimini 2008 yılında İzmir Konak Anadolu Lisesi'nde tamamlamıştır. 2008 yılında başladığı Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2013 senesinde bitirmiştir. Aynı yıl yüksek lisans eğitimine İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamıştır. 2015 senesinde Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'na yatay geçiş yapmıştır. 2015 yılından beri Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Mekanik Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

