
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

KARBON NANOTÜP KATKILI ALUMİNA/EPOKSİ NANO KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE DÜŞÜK HIZLI DARBE DENEYİNE CEVABI

Sezer PIÇAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2015

Sezer PIÇAK tarafından hazırlanan " KARBON NANOTÜP KATKILI ALUMİNA/EPOKSİ NANO KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE DÜŞÜK HIZLI DARBE DENEYİNE CEVABI " adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY ÇOKLUĞU ile Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Yusuf USTA
Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum ...……

İkinci Danışman: Prof. Dr. Ahmet AVCI
Makine Mühendisliği, Selçuk Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum ...……

Başkan : Prof. Dr. İbrahim USLAN
Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylamıyorum ...……

Üye : Prof. Dr. Rahmi ÜNAL
Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylamıyorum ...……

Üye : Doç. Dr. Ahmet GÜRAL
Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum ...……

Tez Savunma Tarihi: 28/01/2015

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……..…….
Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

KARBON NANOTÜP KATKILI ALUMİNA/EPOKSİ NANO KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE DÜŞÜK HIZLI DARBE DENEYİNE CEVABI

(Yüksek Lisans Tezi)

Sezer PIÇAK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2015

ÖZET

Yalıtım malzemesi olarak kullanılan alümina kumaş elyaflar yüksek sıcaklıkta kullanabilmesine ve ısıl iletkenlikleri düşük olmasına rağmen rijit değildir. Nem absorbsiyon ve geçirgenlik oranları yüksektir. Bu çalışmada seramik ısı yalıtım örtüsü epoksi reçine ile kompozit haline getirilerek rijit, mukavemetli, nem geçirgenliği ve su absorbe etme özelliği düşük yeni bir kompozit yalıtım levhası tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Levhanın ısıl yalıtımının iyileştirilmesi amacıyla kapalı hücre yapılı köpük epoksi matris oluşturulmuştur. Yeterli oranda boşluk muhtevası ve morfolojisi oluşturmak için, alümina elyaflı dokuma takviye malzemesi olarak seçilmiş ve uygun reçine matris mikroyapısı elde etmek için Vakum İnfüzyon Yöntemi (VARTM) kullanılmıştır. Gözenekli matris mikroyapısının mekanik özelliklerini ve ısıl direncini arttırmak için epoksi reçine matrise ağırlıkça %0,1; %0,3; %0,5; %0,7; %1 oranlarında Çok Cidarlı Karbon Nano Tüp (ÇCKNT) ilavesi yapılmıştır. Reçine içerisinde ÇCKNT miktarı arttıkça nanokompozit malzemelerin gözenek miktarının da arttığı belirlenmiştir. Viskozite %50 artınca ısıl yalıtkanlık %28 artmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme, eğme, düşük hızlı darbe ve Dinamik Mekanik Analiz (DMA) deneyleri yapılmıştır. %0,1 ÇCKNT katkılı kompozit numunelerin çekme dayanımlarının katkısız kompozit numuneye göre yaklaşık olarak %42 oranında, eğme dayanımlarının ise yaklaşık olarak %50 oranında artış gösterdiği belirlenmiştir. Darbe deneylerinde karbon nanotüp etkisinin darbe dayanımını iyileştirdiği gözlemlenirken, DMA ile kompozitlerin camsı geçiş sıcaklıklarında artış gözlenmiştir. Isıl özelliklerin belirlenmesi için ısıl yalıtkanlık testleri yapılmıştır. Isıl yalıtkanlık testlerinde ÇCKNT katkılı numunelerin ısıl iletkenliklerinin yaklaşık olarak %28 daha düşük olduğu görülmüştür. Yakma deneyleri yapılarak elyaf hacim oranları belirlenmiş. Sonuç olarak yalıtım battaniyesi olarak kullanılan alümina kumaşların özellikleri ile üretilen kompozitlerin ısıl-mekanik özellikleri belirlenmiş ve bu özellikleri kıyaslanarak tartışılmıştır.

Bilim Kodu	:	914.1.093
Anahtar Kelimeler	:	İzolasyon plakası, karbon nanotüp, nano kompozit, DMA, mekanik özellikler, çekme-eğme-düşük hızlı darbe deneyleri, ısıl iletkenlik, içyapı analizi, yakma deneyi
Sayfa Adedi	:	107
Danışman	:	Doç. Dr. Yusuf USTA
İkinci Danışman	:	Prof. Dr. Ahmet AVCI

MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON NANOTUBE ADDED ALUMINA/EPOXY NANOCOMPOSITES AND RESPONSE TO LOW VELOCITY IMPACT TEST

(M. Sc. Thesis)

Sezer PIÇAK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2015

ABSTRACT

Although Alumina fabrics that are used as an insulation material has hot strength and thermal conductivity, they are not rigid. Their moisture absorbtion and permeability rates are high. In this study, design and manufacturing of a new composite insulation material which is rigid, resisting and has low rates of moisture absorbtion and permeability is achieved by turning the heat insulation cover into composite material using epoxy resin. In order to enhance the heat insulation of the plate, a closed cell structured foam epoxy matrix is prepared. Alumina fiber weave is chosen as a reinforcement material so as to provide sufficient amount of cellular structure. VARTM is used to provide a convenient resin matrix microstructure. By determining appropriate production parameters, aimed porous structure and sufficient mechanical properties are obtained. In order to increase the mechanical properties and heat resistance of the porous matrix microstructure, MWCNT is added to epoxy resin 0,1%; 0,3%; 0,5%; 0,7%; 1% by weight. It is observed that the porosity of nanocomposite materials increases when amount of MWCNT increase. As viscosity increased by 50%, amount of terhmal insulation increased by 28. To obtain the mechanical properties of the composite material; tensile test, bend test, low velocity impact test and Dynamic Mechanical Analysis (DMA) are carried out. It is obtained that tensile strength of 0,1% MWCNT added composite material increased approximately 42% compared to material without MWCNT. Similarly, bending strength of the MWCNT added composite material increased 50% compared to material without MCNT. Impact tests indicate that the effect of MWCNT on composite material is improvement of impact resistance of the material. By investigating the results of DMA, it is obtained that glass transition temperature increased. In order to determine heat properties; heat conductivity tests are carried out. In heat isolation tests, it is observed that heat conductivity of MWCNT added composite materials is approximately 28% lower. Fiber volume ratio is determined by carrying out burning tests. As a result, properties of alumina fabric which is used as an insulation blanket is defined and thermal-mechanical properties of the manufactured composite material is obtained. These properties are discussed by comparing each material.

Science Code	:	914.1.093
Key Words	:	Isolation plate, carbon nano tube, nano composite, DMA, mechanical properties, tensile-bending-low velocity impact tests, thermal conductivity, internal structure analysis, burning test
Page Number	:	107
Supervisor	:	Doç. Dr. Yusuf USTA
Co-Supervisor	:	Prof. Dr. Ahmet AVCI

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez danışmanlığımı üstlendiği için Doç. Dr. Yusuf USTA'ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez konumu belirleyen ve tez çalışmam sürecinde deneysel çalışmalarımı takip ederek beni yönlendiren 2. Danışmanım Prof. Dr. Ahmet AVCI hocama teşekkürlerimi sunuyorum. Prof. Dr. Ahmet AVCI tezimin yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında tüm sorumluluğu üstlenmiştir. Bu tez kampsamında üretilen kompozit malzemelerin tüm malzemeleri Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği anabilim dalı tarafından karşılanmış ve tüm üretim-test süreçleri Selçuk Üniversitesinde gerçeklenmiştir. Bu imkanları bana sağladığı için 2. Danışmanım Prof. Dr. Ahmet AVCI hocama bir ömür minnettar kalacağım.

Çalışmalarım süresince hiçbir bilgi aktarımını benden esirgemeyen ve Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR hocama teşekkürlerimi sunuyorum.

Düşük hızlı darbe testlerinin gerçekleştirilmesinde ve grafiklerinin yorumlanmasında yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Memduh KARA'ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez çalışmalarım süresince hiçbir bilgi aktarımını esirgemeyen Yrd.Doç.Dr. Volkan ESKİZEYBEK'e teşekkür ederim.

Tezim sürecince nano kompozitlerin üretim aşamasında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Osman ÖZTÜRK, Arş. Gör. Okan DEMİR ve Arş. Gör. Halil Burak KAYBAL hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışmamdan ötürü Öncelikli Alanlar Bursu kapsamında tez dönemi boyunca desteklendiğim için TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Son olarak, en büyük dayanağım canım kardeşim Rabia PIÇAK'a ve Annem Nafiye PIÇAK ile Babam Yusuf PIÇAK'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xvi

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 5

3. KOMPOZİT MALZEMELER 9

3.1. Fiber Takviyeli Kompozitler 9

3.1.1. Matris 9

3.1.2. Fiberler 11

3.2. Nanokompozitler 14

4. DÜŞÜK HIZLI DARBE DENEYİ VE HASAR ANALİZİ DENEYİ . 16

4.1. Çarpıçmanın Sıkışma Ve Geri Bırakma Aşamaları 40

4.2. Normal Temas Kuvvetinin İşi 21

4.3. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı 21

4.4. Tabakalı Kompozit Malzemelerde Darbe Sonucu Oluşan Hasar Modları 22

4.4.1. Matris hasarı 23

4.4.2. Deleminasyon 24

Sayfa

4.4.3. Elyaf hasarı 25

4.4.4. Nüfuziyet 27

4.4.5. Elyaf matris ara yüzey ayrılması 29

4.5. Düşük Hızlı Darbe Testinin Dinamiğinin İlkeleri 29

4.6. Kuvvet-Çökme Diyagramları 32

4.7. Kuvvet-Zaman Diyagramları 33

4.8. Absorbe Edilen Enerji-Zaman Diyagramları 34

4.9. Hız-Zaman Diyagramları 34

5. KOMPOZİT MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU 37

5.1. Çekme Ve Üç Noktadan Eğme Deneyleri 37

5.1.1. Fiber takviyeli kompozitlerde hasar mekanizmaları 37

5.1.2. Fiber takviyeli kompozitlerde toklaştırma mekanizmaları 38

5.2. Dinamik Mekanik Analiz Deneyleri 40

5.3. Isıl İletkenlik Deneyleri 42

6. MALZEME YÖNTEM 45

6.1. Malzemeler 45

6.2. Epoksi Reçine İçerisine Karbon Nanotüplerin Katılması 46

6.3. Vakum İnfüzyon Yöntemi İle Nanokompozit Levha Üretimi 48

6.4. Çekme Deneyleri 52

6.5. Üç Noktadan Eğme Deneyleri 53

6.6. Düşük Hızlı Darbe Deneyi 54

6.7. Dinamik Mekanik Analiz 54

6.8. Isıl İletkenliz Analizi 54

6.9. Yakma Deneyleri 55

Sayfa

7. ARAŞTIRMA VERİLERİ VE TARTIŞMA 57

7.1. Çekme Deneyleri Sonuçları 57

7.2. Çekme Numuneleri Kırılma Yüzeyi SEM Analizleri 60

7.3. Üç Noktadan Eğme Deneyleri Sonuçları 64

7.4. Düşük Hızlı Darbe Deneyi Sonuçları 67

5.1.1. Kuvvet-zaman diyagramları 68

5.1.1. Kuvvet-çökme diyagramları 73

5.1.1. Absorbe edilen enerji-zaman diyagramları 79

5.1.1. Hız-zaman eğrileri 81

5.1.1. Düşük hızlı darbenin hasar analizi 83

7.5. Yakma Deneyleri Sonuçları 86

6.9. Dinamik Mekanik Analiz Sonuçları 88

6.9. Isıl İletkenlik Analizi 89

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 95

KAYNAKLAR 97

ÖZGEÇMİŞ 107

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Çeşitli matrislerin genel özellikleri 3

Çizelge 3.2. Çeşitli fiberlerin özellikleri 14

Çizelge 3.3. Nanokompozitlerin önemli özellikleri 16

Çizelge 6.1. Alumina elyafların teknik özellikleri 46

Çizelge 7.1. Çekme deneyi sonucu elde edilen sayısal veriler 59

Çizelge 7.2. Üç noktadan eğme deneyi sonucu elde edilen sayısal veriler 66

Çizelge 7.3. Yakma deneyi sonucu elde edilen sayısal veriler 86

Çizelge 7.4. DMA deneyi sonucunda elde edilen sayısal veriler 88

Çizelge 7.4. AFTK'lerin ısıl iletkenlik değerleri 88

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Lockheed martin F-35 Lightning II savaş uçağındaki kompozit yapılar..... 10

Şekil 3.1. Fiber takviyeli kompozitlerde tercih edilen farklı türlerde fiber yapıları 12

Şekil 3.2. Reçine, elyaf ve kompozitin çekme gerilmesi-şekil degişimi şematik gösterimi 12

Şekil 3.3. Fiber takviyeli kompozitlerde CNT takviyesinin şematik gösterimi..... 16

Şekil 3.4. İki cidarlı karbon nanotüp 17

Şekil 3.5. a) TCKN armchair formu b) TCKN zigzag formu c)TCKN helical formu ... 17

Şekil 3.6. FTK'lerde kullanılan genel takviye türleri/geometrileri ve yüzey alanı/hacim oranları 19

Şekil 4.1. (a) İzafi yer değiştirme δ'nın (b) zamanın (t) fonksiyonu olarak normal temas kuvveti F 21

Şekil 4.2. Hasar modları 25

Şekil 4.3. Matris çatlakları (a) çekme çatlağı (b) kayma çatlağı 26

Şekil 4.4. (a) Çam ağacı (b) ters çevrilmiş çam ağacı görünümlü hasar mekanizması .. 26

Şekil 4.5. Darbe uygulanan yüzeye göre hasar yayılışı (a) Cam yüzeyden (b) Aramid yüzeyden..... 28

Şekil 4.6. *M* kütleli bir parçacığın hızındaki P*(t)* impulsundan kaynaklanan değişim ... 30

Şekil 4.7. Tipik kuvvet-zaman değişimi 31

Şekil 4.8. Kuvvet-Çökme (F-d) eğrileri 33

Şekil 4.9. Kuvvet-Zaman (F-t) eğrileri 33

Şekil 4.10. Absorbe edilen enerji-zaman eğrileri..... 34

Şekil 4.11. Hız-zaman grafiği 35

Şekil 5.1. Kompozitlerde hasar tipleri a) düzlem içi hasar, b) tabaka ayrılması, c) mikro burkulma, d) tabaka ayrılma burkulması 38

Şekil 5.2. Epoksi matris toklaştırılma mekanizması şematik gösterimi 38

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.3. ÇCKNT'lerin muhtemel kırılma mekanizmaların tanımlanması 39

Şekil 5.4. ÇCCNTler ile takviye edilmiş epoksi yapıştırıcılarda tokluk mekanizmalarının SEM görüntüsü 40

Şekil 5.5. Liner viskoelastik bir malzemenin mekanik yüklemeye cevabı 40

Şekil 5.6. Kompleks modül E^*, depolama modülü E', kayıp modülü E'' ve kayıp faktörü tan δ formülasyonu 41

Şekil 5.7. İdeal elastik malzemenin gerilme-gerinme diyagramı 42

Şekil 5.8. Isı akış metoduna göre ölçüm yapan deney cihazı çalışma prensibi 43

Şekil 6.1. Epoksi diglisidil ether bisfenol A'nın moleküler yapısı 45

Şekil 6.2. KNT'lerin epoksi reçine içerisinde dağıtılmasında kullanılan uçlu sonikatör 48

Şekil 6.3. En genel halde VARTM ile kompozit parça üretiminin şematik gösterimi ... 49

Şekil 6.4. Hibrit nanokompozit üretiminde kullanılan sıcaklık ve basınç kontrollü VARTM ünitesi ve bileşenleri 50

Şekil 6.5. VARTM üretim işleminde malzeme üretiminde kullanılan yardımcı bileşenlerin yerleşiminin şematik gösterimi 50

Şekil 6.6. VARTM yöntemi ile üretilmiş AFTK'ler..... 51

Şekil 6.7. Şematik olarak çekme numunelerinin boyutları ve tek eksenli çekme yüklemesine maruz bırakılmış bir tabakalı nanokompozit numunesi. 52

Şekil 6.8. Şematik olarak eğme numunelerinin boyutları ve üç noktadan eğme yüklemesine maruz bırakılmış bir tabakalı nanokompozit numunesi 53

Şekil 6.9. Düşük hızlı darbe test cihazı 54

Şekil 7.1. AFTK'lerin çekme deneyi sonucu elde edilen çekme eğrileri 57

Şekil 7.2. AFTK'lerin çekme deneyi sonucu ağırlıkça %0, %0,1;%0,3; %0,5; %0,7; %1 ÇCKNT katkı oranlarına göre (sırasıyla soldan sağa) elde edilen çekme mukavemeti değerleri 58

Şekil 7.3. AFTK'lerin çekme deneyi sonucu ağırlıkça %0, %0,1; %0,3; %0,5; %0,7; %1 ÇCKNT katkı oranlarına göre (sırasıyla soldan sağa) elde edilen elastiklik modülü değerleri 59

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.4. AFTK'lerin çekme deneyi sonucu ağırlıkça %0, %0,1;%0,3; %0,5; %0,7; %1 ÇCKNT katkı oranlarına göre (sırasıyla soldan sağa) elde edilen şekil değiştirme değerleri 59

Şekil 7.5. AFTK'lerin üç noktadan eğme deneyi sonucu elde edilen σ-ε eğrisi 65

Şekil 7.6. AFTK'lerin üç noktadan eğme deneyi sonucu, ağırlıkça %0, %0,1; %0,3; %0,5; %0,7; %1 ÇCKNT katkı oranlarına göre (sırasıyla soldan sağa) elde edilen şekil değiştirme değerleri 65

Şekil 7.7. AFTK'lerin üç noktadan eğme deneyi sonucu ağırlıkça %0, %0,1;%0,3; %0,5; %0,7; %1 ÇCKNT katkı oranlarına göre (sırasıyla soldan sağa) elde edilen eğme elestiklik modülü değerleri 66

Şekil 7.8. AFTK'lerin üç noktadan eğme deneyi ağırlıkça %0, %0,1; %0,3; %0,5; %0,7; %1 ÇCKNT katkı oranlarına göre (sırasıyla soldan sağa) elde edilen şekil değiştirme değerleri 67

Şekil 7.9. Ağırlıkça ÇCKN katkısız AFTK'lerin farklı enerji seviyelerinde F-t diyagramları kıyaslaması 69

Şekil 7.10. Ağırlıkça %0,1 AFTK'lerin temas kuvvetlerinin farklı enerji seviyelerinde kıyaslaması 70

Şekil 7.11. Ağırlıkça %0,3 AFTK'lerin farklı enerji seviyelerinde F-t diyagramları kıyaslaması 70

Şekil 7.12. Ağırlıkça %0,5 AFTK'lerin temas kuvvetlerinin farklı enerji seviyelerindeki değişimi 71

Şekil 7.13. Ağırlıkça %0,7 AFTK'lerin temas kuvvetlerinin farklı enerji seviyelerindeki değişimi 71

Şekil 7.14. Ağırlıkça %1 AFTK'lerin temas kuvvetlerinin farklı enerji seviyelerindeki değişimi 72

Şekil 7.15. 20 J enerji seviyesinde AFTK'lerin F-t diyagramları kıyaslaması 72

Şekil 7.16. 25 J enerji seviyesinde AFTK'lerin F-t diyagramları kıyaslaması 73

Şekil 7.17. 30 J enerji seviyesinde AFTK'lerin F-t diyagramları kıyaslaması 73

Şekil 7.18. ÇKNT katkısız AFTK'lerin farklı enerjilerde kuvvet-çökme diyagramları kıyaslaması 74

Şekil 7.19. Ağırlıkça %0,1 ÇCKNT katkılı AFTK'lerin farklı enerjilerde kuvvet-çökme diyagramları kıyaslaması 75

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.20. Ağırlıkça %0,3 ÇCKNT katkılı AFTK'lerin farklı enerjilerde kuvvet-çökme diyagramları kıyaslaması 75

Şekil 7.21. Ağırlıkça %0,5 ÇCKNT katkılı AFTK'lerin farklı enerjilerde kuvvet-çökme diyagramları kıyaslaması 76

Şekil 7.22. Ağırlıkça %0,7 ÇCKNT katkılı AFTK'lerin farklı enerjilerde kuvvet-çökme diyagramları kıyaslaması 76

Şekil 7.23. Ağırlıkça %1 ÇCKNT katkılı AFTK'lerin farklı enerjilerde kuvvet-çökme diyagramları kıyaslaması 77

Şekil 7.24. 20 J enerji seviyesinde AFTK'lerin kuvvet-çökme diyagramları kıyaslaması 77

Şekil 7.25. 25 J enerji seviyesinde AFTK'lerin farklı enerjilerde kuvvet-çökme diyagramları kıyaslaması 78

Şekil 7.26. 30 J enerji seviyesinde AFTK'lerin farklı enerjilerde kuvvet-çökme diyagramları kıyaslaması 78

Şekil 7.27. Enerji-zaman değişimi 79

Şekil 7.28. Ağırlıkça % 0 katkılı numunenin farklı enerji seviyelerinde Enerji-zaman değişim grafiği 79

Şekil 7.29. 20 J enerji seviyesinde tüm numunelerin enerji- zaman değişimleri 80

Şekil 7.30. 20 J enerji seviyesinde absorbe edilen enerji miktarları 80

Şekil 7.31. Katkısız numunenin hız zaman grafiği 81

Şekil 7.32. Ağırlıkça %0,1 katkılı numunenin hız zaman grafiği 82

Şekil 7.33. Ağırlıkça %0,3 katkılı numunenin hız zaman grafiği 82

Şekil 7.34. Ağırlıkça %0,5 katkılı numunenin hız zaman grafiği 82

Şekil 7.35. Ağırlıkça %0,7 katkılı numunenin hız zaman grafiği 83

Şekil 7.36. Ağırlıkça %1 katkılı numunenin hız-zaman grafiği 83

Şekil 7.37. AFTK'lerin DMA sonucu elde edilen kayıp modülü sıcaklık eğrileri 88

Şekil 7.38. AFTK'lerin ısıl iletkenlik değerleri 89

Şekil 7.39. MGS-L285 epoksi reçinenin viskozite değerleri 90

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.39. Epoksi reçineye KNT ilavesi ile viskozite değişimi..... 91

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Polikarbonat matris içerisinde ağırlıkça %1 ÇCKNT'lerin dağılımı a) polimer matris içerisinde ÇCKNT kümelenmeleri b) homojen dağılım. 10

Resim 7.1. Üretilen nanokompozit malzemelerin çekme deneyleri ardından kırılma yüzeyleri SEM fotoğrafları a)ağırlıkça ÇCKNT katkısız b)ağırlıkça %0,3 ÇCKNT katkılı 60

Resim 7.2. Üretilen nanokompozitlerin çekme deneyleri ardından kırılma yüzeyleri SEM fotoğrafları ağırlıkça a) %0,3 ÇCKNT Katkılı b) ÇCKNT Katkısız c) %0,1 ÇCKNT katkılı d) %1 ÇCKNT katkılı e) ÇCKNT katkısız f) %0,3 ÇCKNT katkılı 62

Resim 7.3. Üretilen nanokompozit malzemelerin çekme deneyleri ardından sıyrılmış fiber yuvalarının SEM fotoğrafları ağırlıkça a) ÇCKNT katkısız b) %0,3 ÇCKNT katkılı 63

Resim 7.4. Üretilen tabakalı nanokompozit malzemelerde a) ağırlıkça %0,3 ÇCKNT katılı epoksi içerisinde ÇCKNT'lerin homojen dağılım ve matristen sıyrılmış KNT'ler b) ağırlıkça %1 ÇCKNT katkılı epoksi matris içersinde kümelenmiş ÇCKNT'ler ve küme etrafındaki matris morfolojisi c) ve d) Kümelenmiş KNT'lerin boyutlandırılması 64

Resim 7.5. 20J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testi sonrasında AFTK'lerin kesitlerine ait mikroskop görüntüleri a) ÇCKNT katkısız b) ağırlıkça %0,3 ÇCKNT katkılı numune 84

Resim 7.6. Düşük hızlı darbe testi sonrası AFTK'lerin kesitlerine ait mikroskop görüntüleri a)ÇCKNT katkısız b)ağırlıkça %0,3 ÇCKNT katkılı numune . 31

Resim 7.7. 30 J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe sonrası AFTKlerin a) ağırlıkça %0,3 ÇCKNT katkılı numunenin hasar resmi ön yüzeyi b) arka yüzeyi c) ÇCKNT katkısız numunenin hasar resmi ön yüzeyi d) arka yüzeyi e) ÇCKNT katkısız numunelerin kesit yüzeyi f) ağırlıkça %0,3 ÇCKNT katkılı numunenin kesit yüzeyi 86

Resim 7.8. a) Yakma sonrası deney numunesi b) yakma öncesi deney numunesi 87

Resim 7.9. Ağırlıkça a) %0 b) %0,5 c) %1 d) %1,5 KNT katkılı kompozitlerde mikro boşlular..... 91

SİMGELER VE KISALTMALAR

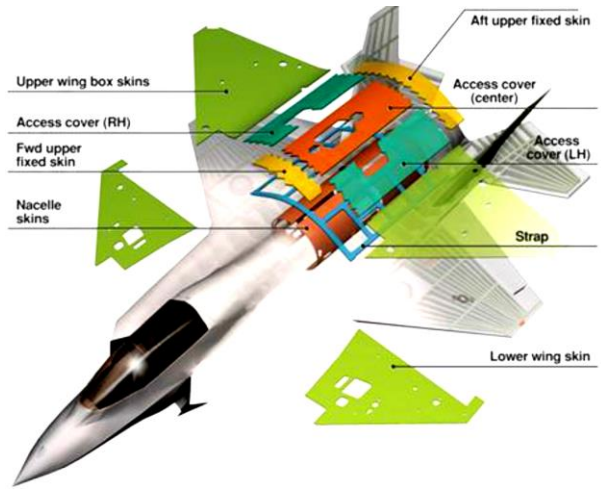
Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
m^3	metre küp
^oC	Santigrat derece
m^2	Metrekare

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AFTK	Alumina fiber takviyeli kompozitler
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
ÇCKNT	Çok cidarlı karbon nanotüp
PA	Poliamid
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TCKNT	Tek cidarlı karbon nanotüp
VARTM	Vakum infüzyon yöntemi
YT	Yakma testi

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler iki veya daha fazla bileşenin bir araya getirilerek oluşturulan heterojen malzemelerdir. Kompozit malzemelerin avantajı kompoziti oluşturan her bir malzemenin özelliklerine kıyasla kompozitin daha üstün özelliklere sahip olmasıdır. Kompozit malzemeler matris ve takviye elemanlarından oluşur. Genellikle matris epoksi tipi polimer reçinelerden oluşurken takviye elemanları fiber ve nanoparçacıklar olabilir. Kompozit malzemeler yüksek rijitlik/yoğunluk oranları ve yüksek fiziksel özelliklerinin yanı sıra istenilen iletkenlik özelliklerine göre de üretilebilirler. Bu özellikleri onları havacılık, haberleşme, uzay, deniz, otomotiv, yapı ve rüzgâr enerjisi gibi alanlarda dikkat çekici hale getirmektedir. Bu uygulama alanlarının birçoğunda geleneksel olarak kullanılan metal ve ağaç malzemelerin yerini kompozit malzemeler almaktadır. Böylece daha güçlü ve hafif yapılar elde edilmektedir. Bunun en çarpıcı örneği havacılık sektöründe göze çarpmaktadır. Son teknoloji uçakların iniş takımı, kanatları, motor destek yapıları ve genel yapılarındaki kompozit malzeme oranı gitgide artmaktadır. Bell Boeing V-22 Osprey uçağı bunun için çarpıcı bir örnektir. Bu uçağın ağırlığının %50'sini kompozit malzemeler oluşturmaktadır [1]. Bunun sebebi kompozit malzemenin düşük yoğunluğa sahip olmasıdır. Bu da yakıt tüketimini azaltarak ekonomik katkı sağlamaktadır. Havacılık uygulamalarında ki kompozit kullanımının miktarını Şekil 1.1'deki F-35 savaş uçağında görülebilir.



Şekil 1.1. Lockheed martin F-35 Lightning II savaş uçağındaki kompozit yapılar [2]

Gün geçtikçe insanların çok amaçlı malzeme ihtiyaçları da artmaktadır. Çok amaçlı malzeme ihtiyacı, nanoparçacık takviyeli kompozitlerin geliştirilmesi için malzeme biliminde büyük bir merak uyandırmış ve geniş bir çalışma sahasına olanak sağlamıştır. Nanoparçacıklar, fiber takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde takviye malzemeleri olarak yaygın birşekilde kullanılmaktadır. Nanoparçacıklar kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirdiği gibi uygun nanoparçacık seçilerek elektriksel ve ısıl iletkenlik özellikleri de geliştirilebilir. Karbon Nanotüpler (KNT) üstün özellikleri (büyük boy/çap aranı, yüksek elastiklik modülü, yüksek elektriksel ve ısıl iletkenlik) sayesinde nanoparçacıklar içinde katkı malzemesi olarak tercih sebebi olmaktadır [3-7]. KNT'ler yüksek rijitliğe ve dayanıma [8-11], 1300 m^2/g'a kadar ulaşabilen özgül yüzey alanına ve birkaç binlere ulaşabilen boy/çap oranına sahip olmaları nedeniyle polimer kompozitlerin takviyesi için kullanılabilecek önemli yapılardır. Sahip oldukları grafitik yapıları sayesinde KNT'ler, aynı zamanda yüksek ısıl iletkenliğe, yarı-metal veya metal gibi davranabilen elektriksel iletkenliğe sahiptirler [12]. Bu özellikler dikkate alındığında, KNT'lerin takviye malzemesi olarak polimerlerin içerisinde kullanılmasından dolayı mekanik özellikleri veya iletkenlik özellikleri geliştirilmiş çok amaçlı malzemeler elde edilmektedir [13].

KNT'lerin sahip oldukları bu özelliklerinden etkin bir şekilde faydalanabilmek için, KNT'ler polimer reçineler içerisinde homojen bir şekilde dağıtılmalıdır. Ancak, KNT'ler büyük yüzey alanlarına sahip olmalarından dolayı birbirlerini güçlü Van der Waals bağları ile çektikleri için polimer içerisindeki dağılımları güçtür. Diğer taraftan, KNT'lerin yüzey alanlarının büyük olması polimerler ile iyi bir bağ oluşturarak etkin bir gerilme aktarımının gerçekleştirilebilmesini sağlar. KNT'lerin yüzey alanlarının büyüklüğü çaplarına ve cidar sayılarına bağlı olup en büyük özgül yüzey alanına tek cidarlı karbon nanotüpler (TCKNT) sahiptir. İlaveten, TCKNT'ler çok cidarlı karbon nanotüpler (ÇCKNT) ile kıyaslandığında daha büyük boy/çap oranlarına sahiptir. TCKNT'ler yüzey alanlarını azaltmak için genellikle kümeler veya yönlenmiş demetler halinde olmayı tercih ederler [14]. Bu da reçine içerisinde homojen olarak dağıtılabilmesini zorlaştırır.

ÇCKNT'ler daha büyük çaplara sahip eş merkezli cidarlardan oluşup; yüzey alanları 200 m^2/g'dan daha azdır. Bu sebeple, ÇCKNT'lerin dağıtılabilirliği daha kolaydır. Düşük yüzey alanına sahip oldukları için reçine içerisinde gerilme aktarımı açısından etkinlikleri azalır. Ek olarak, eş merkezli cidarlar arasındaki gerilme aktarımı nispeten zayıf olan Van der Waals bağları ile gerçekleştiği için ayrıca bir dezavantaja sahiptirler [15a].

Literatürde KNT'leri polimerler içersinde uygun bir şekilde dağıtabilmek için birçok yöntem kullanılmıştır [15b-16]. Ama bu yöntemlerin birçoğunda ya küçük kapasitelere sahip oldukları ya da yeterince güçlü olmadıkları için etkinlikleri istenilen düzeylerde değildir. KNT'leri epoksi reçineler içinde dağıtmak için kullanılan en yaygın yöntem sonikasyon işlemidir. Sonikasyon işlemi ile ses dalgaları sayesinde KNT kümecikleri dağıtılır ve epoksi içerisinde homojen bir dağılım elde edilir. Fakat bu yöntem küçük hacimli reçinelerde KNT dağıtımı için geçerlidir. Ek olarak, literatürde ses dalgalarının KNT'lerin kırılmalarına sebep olarak boy/çap oranlarını düşürdüğüne dair çalışmalar mevcuttur [17-18]. KNT'lerin yüksek boy/çap oranlarına sahip olmaları verimli bir yük aktarımını sağlayacağı için, polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi açısından oldukça önemlidir. Ayrıca KNT'lerin yönlendirilmesi de kompozitin özelliklerine etki etmektedir. Dağıtma işleminden sonra çeşitli işlemler uygulanarak KNT'ler istenilen yönde yönlendirilmektedir [18].

Kompozit malzemeler ısıl yalıtım malzemeleri içerisinde de büyük bir öneme sahiptir. Son yıllarda elyaf takviyeli ve partikül katkılı kompozitlerin ısıl iletkenlik katsayılarının belirlenmesi üzerine bir çok çalışma yapılmaktadır [19-23a]. Yalıtım malzemeri, ısıl iletkenlik katsayıları düşük, mekanik hasara karşı dirençli, neb absorbe etme direnci yüksek, yanmaya karşı dirençli ve düşük yoğunluklu olmalıdırlar . Kompozit malzemelerin tasarımı yapılırken bu özellikler dikkate alınarak tasarlanıp üretilmelidir.

Pravuram ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada epoksi reçineye cam elyaf takviyesi ve partikül katkısı ile yalıtım plakası imal etmişlerdir. Yaptıkları incelemelerde kompozit malzemenin hem mekanik özelliklerinde hemde ısıl iletkenlik katsayılarında artış olduğunu gözlemlemlemişlerdir [19]. Rosa ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sandiviç yalıtım kompozitlerinin çevreye olan etkilerini, kompozit kalınlıklarını ve bu bu kalınlığın iletkenlik katsayılarına etkilerini incelemişlerdir [21]. Kandare ve arkadaşları yaptıkları çalışmada karbon fiber/epoksi kompozitlere grafen ve gümüş partikülleri takviyesi yaparak ısıl ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan araştırmalar sonucunda grafen ve gümüş partüküllerin ilavesiyle kompozit malzemelerin ısıl iletkenlik katsayıların ve mekanik özelliklerinde artış gözlemlemişlerdir [22].

Bu çalışmanın amacı, yüksek korozyon dirençleri, düşük ısıl iletim katsayısı gibi özelliklerine sahip olan alümina fiberler epoksi reçine ile kompozit haline getirilerek rijit, nem geçirgenliği ve su absorbe etme özelliği düşük, darbe direnci yüksek, düşük yoğunluklu

ve düşük kalınlıklı yeni bir kompozit yalıtım levhası tasarımı ve üretimi gerçekleştirmektir. Yapılan literatür çalışmasında alumina fiber/epoksi kompozitlere rastlanmamıştır. Bu itibarla, bu tezde üretilen alumina fiber/epoksi kompozitler ilk olacaktır. ÇCKNT katkısı ile kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilnmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma ile matrise ağırlıkça %0,1; %0,3; %0,5; %0,7; %1 ÇCKNT takviyeli ve takviyesiz Alumina Fiber Takviyeli Kompozitler (AFTK) üretilip düşük hızılı darbe deneyine cevabı, ısıl ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. ÇCKNT/alumina fiber/epoksi nano kompozitlerin üretilmesinde Vakum İnfüzyon Yöntemi (VARTM) kullanılmıştır. Üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için çekme, eğme ve Dinamik Mekanik Analiz (DMA) deneyleri uygulanmıştır. Darbe dirençlerini belirlemek için ise düşük hızlı darbe deneylerine maruz bırakılmıştır. ÇCKNT'lerin alümina fiber yüzeyindeki ve epoksi içerisindeki varlığı, dağılım gibi etkenlerin çekme, eğme ve darbe dayanımı üzerine etkileri araştırılmıştır. Taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ile alümina fiber yüzeylerindeki ÇCKNT'lerin dağılımları incelenmiştir. Bunlara ek olarak üretilen kompozitlerin karakterizasyonu için ısıl iletkenlik ölçümü ve Yakma Testi (YT) gerçekleştirilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kompozitler otomotiv sektörü, uçaklar, rüzgar türbinleri ve özel görevler beklenen birçok sektörde kullanılmaktadır. Tabakalı kompozitlerin ana amacı uygun bileşenlerle bir araya getirilerek çalışma şartlarına karşı yüksek dayanımlı araçlar üretmektir. Kompozitlerin mekanik özellikleri ile elektriksel ve ısıl özelliklerini istenilen yapıya ulaştırmak için takviye malzemeleri kullanılmaktır. KNT'ler yüksek ısıl ve elektriksel iletkenliğe sahiptir [23]. KNT'lerin elektriksel ve ısıl özellikleri bakıra göre daha iyidir [24]. Ayrıca elastiklik modülü 1 TPa'dan daha büyüktür ki bir çelikle mukayese edildiğinde neredeyse 5 kat, mukavemet açısından ise 100 kat daha fazladır [6]. KNT'lerin yaklaşık 4 gr/cm3 olan düşük yoğunluğu ve yüksek mukavemeti sayesinde çekme mukavemetleri 48 000 kNm/kg seviyelerine kadar ulaşabilmektedir ki bu yüksek karbonlu çeliklerde yaklaşık olarak 154 kNm/kg'dır. [23].

KNT'nin reçineye ilavesi sonucunda mekanik özelliklerde iyileşme sağladığı birçok araştırmacı tarafından ortaya konulmuştur. Iwahori , Epoksi reçineye ağırlıkça kattıkları yüzde 5 oranında ilave edilen KNT'lerin matrisin çekme dayanımını %6,6, eğme dayanımını %2,9 ve elastikiyet modülünü %14 geliştirdiğini ortaya koymuşlardır [25]. Xu ve arkadaşları ise yaptıkları çalışmada epoksi reçineye ağırlıkça %0,1 KNT ilavesinin elastikiyet modülünü %20 oranında artırdığını ortaya koymuşlardır. Qian ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada polistren matrise ağırlıkça %1 oranında kattıkları KNT ilavesi ile elastikiyet modülünü %42 oranında, çekme dayanımını ise %25 oranında artırmışlardır [26].

Polimer matrisi oluşma sürecinde birçok fiziksel ve kimyasal olaylar meydana gelmektedir. Bu olaylar eş zamanlı gerçekleştiği gibi yüksek fiber hacim ağırlık oranına ulaşılması için ve hava boşluklarının en aza indirilebilmesi için üretim doğru şekilde gerçekleştirilmelidir [27]. Ancak reçinenin viskozitesi ve kürleme zamanındaki olumsuzluklar uygun üretimi sınırlandırmaktadır. Birçok araştırmacı kompozit içerisinde oluşabilecek hava boşluklarının VARTM esnasında akış kontrolü ile azaltılabileceğini ve homojen dağıtılabileceğini göstermişlerdir [23]. Bu bilgiler ışığında VARTM ile üretilen kompozitlerde üretim hatalarının en aza indirilmesi yapılan çalışmalar üzerinde sağlıklı değerlendirme yapılabilmesi için hayati önem taşımaktadır. KNT'lerin takviye elemanı olarak kullanıldığı birçok çalışmanın sonuçları arasında farklılıklar vardır [24, 28-30]. Bir çalışmada elastisite modülünün iki katına çıkarıldığı gösterilirken [28], başka bir çalışmada ise azaldığı

belirtilmiştir [24]. Kompozit malzemelerin makroskobik özellikleri sadece fiber ve matris tarafından belirlenmez. Bu iki bileşen arasındaki ara yüzey özellikleri de önemli rol oynar [31]. Kompozite uygulanan kuvvet fiber ve matris arasındaki ara yüzeyden aktarılır, bu yüzden fiber/matris ara yüzey kayma dayanımı kompozitlerde tokluk ve dayanımı etkileyen önemli bir faktördür [32]. ÇCKNT'lerin ilavesi ile mekanik özelliklerin literatürde farklılık göstermesi, matris, karbon nanotüp ve fiberler arasındaki karmaşık ilişkilerin bir göstergesi olabilir. Ayrıca KNT'lerin reçine içerisinde yönlendirilmesi kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini arttırdığı saptanmıştır [33]. KNT'lerin ağılıkça %0,3 oranından daha büyük oranlarda kullanılmasının kompozit malzemenin çekme dayanımlarını azalttığı ve bunun sebebinin de KNT'lerin topaklanması olduğu belirlenmiştir [34].

Kompozit malzemeler kullanım ömrü süresince darbe kaynaklı hasarlara maruz kalırlar. Havacılık sektöründe, bakım çalışanları bakım esnasında kompozit yapıların üzerine bakım aletlerini düşürebilirler veya uçuş esnasında bir uçağa uçan bir kuş çarpabilir. Benzer şekilde rüzgâr türbinleri çalışma esnasında uçan bir kuşun çarpma veya rüzgârın getirdiği bir cismin çarpma etkisine maruz kalabilirler. Bu düşük hızlı darbeler gözle görülemese bile yıkıcı etkiler yaratabilirler. Darbe kaynaklı hasarlar fiber takviyeli kompozitlerde metallere kıyasla daha etkin rol almaktadır [23]. Bu yüzden çeşitli darbe yükleri altında kompozit malzemelerin davranışları üzerine çalışmalara odaklanılmıştır.

Dinamik yükleme altındaki kompozit malzemeleri karakterize etmek için ilk çalışmalar Rotem ve Lifshits (1971), Lifshits (1976) ve Sierakowski ve ark. (1971) tarafından yapılmıştır [35,36]. Sierakowski ve Chaturvedi (1997) ve Abrate (1998) çeşitli darbe modeli ve muayene yöntemlerinde ilerlemeler kaydetmişlerdir [37, 38]. Abrate, yaptığı çalışmalarda darbe uygulanan malzemede tabaka ayrılmaları oluyorsa düşük hız, malzemede delinme meydana geliyorsa yüksek hız olarak adlandırılması sonucunu bulmuştur [37]. Whittingham ve arkadaşları ön gerilme altındaki karbon fiber/epoksi tabakaların düşük hızlı darbe cevabını araştırmışlardır [38]. Ön gerilme altındaki numunede oluşan vurucu dalma miktarı, vurucu delme miktarı, yutulan enerji ve en büyük darbe kuvveti deneysel olarak tespit edilmiştir [39]. Belingardi ve Vadori karbon elyaf/epoksi kompozit malzemelerde plaka kalınlığının düşük hızlı darbe davranışına etkilerini araştırmışlardır [40]. Üç farklı kalınlıktaki deney numunelerine yarı-statik ve dinamik darbe yüklemesi yapılmıştır. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri çıkarılarak numunelerin farklı darbe hızlarındaki enerji yutma kabiliyetlerini araştırmışlardır. Mitrevski ve arkadaşları farklı vurucu geometrilerinin

kompozit malzeme üzerindeki darbe etkilerini incelemişlerdir [41]. Karbon-epoksi tabakalara yarı küresel, konik ve sivri vurucularla darbeler uygulamışlardır. Kuvvet-zaman değişimini ve numunelerin yuttuğu enerji miktarlarını deneysel olarak tespit ederek vurucu geometrilerinin etkilerini değerlendirmişlerdir. Yapılan bir diğer çalışmada ise vurucu uç ölçülerinin darbe etkisini büyük ölçüde etkilediği saptanmıştır [124]. Düşük sıcaklıklarda (-40 ^{o}C) yapılan deneylerde kevlar/epoksi kompozitleri %0,3 KNT ilavesi ile enerji absorbsiyonu %34 artırıldığı görülürken, %0,5 KNT ilavesinde ise %35 artış gözlenmiştir [42]. Oda sıcaklığında yapılan çalışmalarda ise 5 farklı enerji seviyesinde ağırlıkça farklı oranlarda KNT katkısının etkisi araştırılmış ve ağırlıkça %1,5 katkı oranındaki kompozitlerde enerji absorbsiyonun %50 arttığı saptanmıştır [43].

Jingwen ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda ağırlıkça %0,1 ÇCKNT katkılı cam fiber/epoksi kompzitlerin oda sıcaklığında ısıl iletkenliklerini yaklaşık olarak 0,45 W/mK olarak saptamışlardır [19]. Ayrıca ÇCKNT katkısının reçine viskozitesini arttırdığını göstermişlerdir [19].

Pravuram ve arkadaşları yaptığı çalışmada ısıl iltkenlitkenliği yaklaşık olarak 0,15 W/mK olan epoksi reçineye cam elyaf takviyesi yaparak ürettiği tabakalı kompozitlerin ısıl iletkenliğini yaklaşık olarak 0,5 W/mK saptamıştır. Aynı kompozitlere ağırlıkça farklı oranlarda alimunyum nitirt partikülleri ilavesi yapıldıktan sonra ölçtükleri ısıl iletkenlik değerlerinin arttığınıda göstermiştir [44].

Yao ve arkadaşları yaptıkları çalışmada cam fiber/epoksi kompozitleri alumina nano partikül takviyesi le ürettikleri kompozitlerin ısıl iletkenlik katsayısını yaklaşık olarak 0,65 W/mK olarak saptamışlardır. Ayrıca aynı çalışmada nano partikülleri fonksiyonelleştirerek ısıl iletkenlik katsayılarına etkilerini araştırmışlardır [45].

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler; bir birinden fiziksel ve kimyasal olarak farklı en az iki bileşenin bir araya getirilmesiyle üretilen ve daha üstün özellikler taşıyan mühendislik ürünleridir. Kompozit malzemeleri, en üstün özelliklere ulaştırabilmek için çalışmalar durmaksızın devam etmektedir. Birçok araştırma kapsamında kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, hasar davranışları ve iletkenlikleri üzerine yoğunlaşılmıştır.

3.1. Fiber Takviyeli Kompozitler

Fiber takviyeli kompozitler, bir matris ile takviye elemanı olan fiberlerin bir araya getirilmesiyle meydana gelir. Matris metal, seramik, termoplastik veya termoset polimer malzeme olabilir. Takviye elemanı olarak kullanılan fiberler ise genellikle cam, karbon ve polimerlerden üretilir. Kompozit malzemenin üretim yönteminin belirlenmesinde kullanılan polimer reçine önemli bir rol oynar.

3.1.1. Matris

Matris, kompozitin yapı bütünlüğünü sağlayan ana bileşendir. Çeşitli matrislere ait özellikler Çizelge 3.1'de sunulmuştur. Matris çeşidi malzemenin kullanılacağı amaca uygun olarak seçilir. Bu bölümde matris çeşitleri incelenecektir.

Çizelge 3.1. Çeşitli matrislerin genel özellikleri [46]

Matris	Yoğunluk ($Mg\ m^{-3}$)	Poission Oranı	Çekme Dayanımı MPa	Elastiklik Modülü (GPa)	Termal genleşme ($10^{-6}\ K^{-1}$)	Termal İletim (W/mK)
Epoksi Reçine (Termoset)	1.1-1.4	0.4	35-100	2-6	60	0.1
Polyester (Termoset)	1.2-1.5	0.37	40-90	2-5	100-200	0.2
Nylon 6.6 (Termoplastik)	1.14	0.3	60-70	1.4-2.8	90	0.2
Polypropilen (Termoplastik)	0.9	0.3	20-40	1-1.4	47	0.2
Al (Metal)	2.7	0.33	200-600	70	24	130-230
Mg (Metal)	1.8	0.35	100-300	45	27	100
Ti (Metal)	6.5	0.36	300-1000	110	9	6-22
SiC (Seramik)	3.4	0.2	400	400	4	50
Al_2O_3 (Seramik)	3.8	0.25	500	380	8	30

Polimer matrisler

Polimer reçineler genellikle kompozit malzemelerin matris fazını oluştururlar ve malzemeyi bir arada tutarken yapısal olarak da basma ve kayma dayanımı gibi mekanik özelliklerde belirleyici rol oynarlar. Polimerler yüksek moleküler ağırlığa sahip organik bileşikler olup monomer adı verilen birimin sürekli tekrarlanması ile oluşurlar. 10^3 ila 10^6 monomer kimyasal reaksiyonlar sonucu bir araya gelerek polimerleri oluştururlar. Polimer reçineler termoplastikler ve termosetler olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar.

Termoplastikler*:* Termoplastikler, uzun hidrokarbon moleküllerinden oluşur ve bu moleküller birbirlerine zayıf Van der Waals bağları ve mekanik kilitlenmeler ile bağlıdırlar. Termoplastikler bu bağların, kovalent bağlara göre oldukça zayıf olmasından dolayı kolaylıkla eritilebilirler. Ayrıca sıcaklığın artması halinde mekanik kilitlenme etkisi de azalacağı için termoplastik reçinelerin viskoziteleri kolaylıkla azaltılabilir. Dolayısıyla termoplastikler sıcaklıkla tekrar şekil verilebilen plastik türüdür. Yüksek molekül ağırlığına sahiptirler.

Termosetler: Termoset plastikler de yine uzun hidrokarbon zincirlerinden oluşmuştur. Ancak, termosetlerde uzun molekül zincirleri de birbirlerine kovalent bağlar ile bağlanmıştır. Bu fark termosetler ile termoplastikleri birbirinden ayıran en önemli farklılıktır. Bu nedenle termosetler üç boyutlu karmaşık katı yapıya sahip olup, termoplastiklere göre daha rijit, dayanıklı ve daha az sünek davranış sergilerler [47]. En çok kullanılan termosetler epoksi, polyester ve fenolik reçinelerdir. Polyester reçineler farklı mühendislik malzemeleri ve kompozit uygulamalarında kullanılabilirler. Epoksi reçineler ise daha dayanıklı ve daha rijit olduğu için kompozit yapılar ve yapıştırıcılarda kullanılır. Epoksi reçineler genellikle iyi termomekanik, elektriksel ve kimyasal direnç özelliklerine sahiptir [48].

Metal matrisler

Metal matrisler genel olarak alüminyum, magnezyum ve titanyumdan oluşmaktadır. Metaller sıklıkla mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi için diğer elementlerle alaşım oluşturulurlar. Oluşturulan bu alaşımların iyileşen mekanik ve ısıl özellikleri mikroyapı incelemeleriyle açıkça saptanabilir. Metallerin matris malzemesi olarak tercih

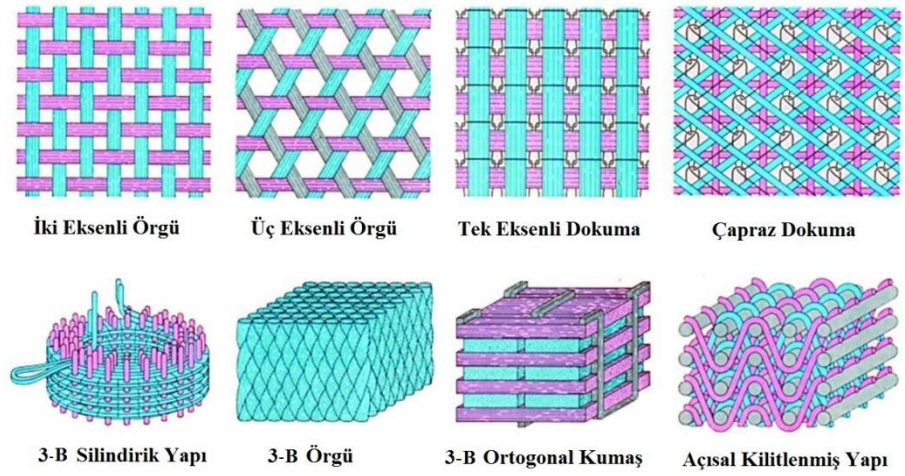
edilmesinin ana nedenleri ise yüksek süneklik ve izotropik yapılarıdır. Polimerlerin aksine metallerde takviye elemanlarının sertliğe katkısı çok azdır. Ancak takviye elemanları metallerde sürünme performansı, aşınma direnci ve termal çarpılma gibi özelliklerini iyileştirir [49]. Bu üç metalin oksijen ile reaksiyon eğilimleri çok yüksek olması oksidasyon ihtimalini artırır ve özellikle matris ile takviye elemanı arasındaki bağlantıyı olumsuz yönde etkiler [46].

Seramik matrisler

Seramik matrisli malzemeler düşük yoğunluklu olmalarından ve yüksek sıcaklıklara dayanmalarından dolayı tercih sebebi olmaktadırlar. Seramik matrisli malzemeler düşük tokluk ve düşük kopma uzamalarından dolayı liflerle takviye edilerek kullanılırlar. Yüksek elastiklik modüllerine sahiptirler. Seramik matrisli kompozitler sürekli fiberler, süreksiz fiberler ve partikül ilavesiyle üretilebilirler. Seramik matrisli kompozitlerde genellikle 4 temel seramik kullanılır; SiC, Si_3N_4, Al_2O_3 ve ZrO_2'dir. Bu seramikler yapı içerisinde kristal tanelerinin rastgele dağılmasından oluşurlar [46].

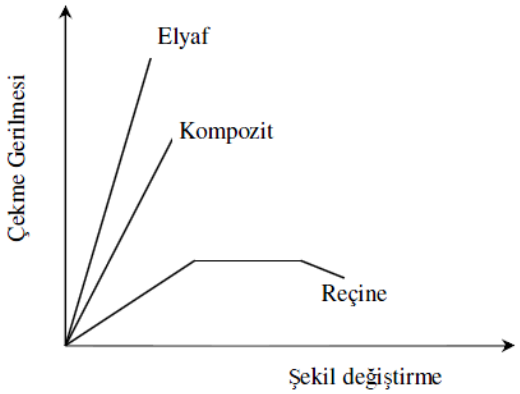
3.1.2. Fiberler

Fiberler takviye elemanları olarak kullanılırlar ve kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynarlar. Çoğunlukla bir çözelti veya eriyiğin eğrilmesi yöntemi ile elde edilir. Fiberler alümina, silisyum dioksit, cam, karbon ve polimerlerden üretilebilir. Fiberler hem sürekli hem de kırpılmış olabilirler. Kırpılmış elyaflar ile üretilen kompozitler, elyafların boy/çap oranına göre kısa fiber veya uzun fiber takviyeli olarak sınıflandırılır. Boy/çap oranı 100'den küçük olanlar kısa fiber takviyeli, büyük olanlar uzun fiber takviyeli kompozitler olarak adlandırılır. Sürekli fiberler içeren kompozitlerde fiberler fitil, iplik, demet veya tel şekillerinde kullanılır. Kumaşlar, sürekli fiber ağlarından yapılır. Demetler çoğunlukla eliptik kesite sahiptir ve 100 ila 48 000 adet fiberin bir araya gelmesi ile oluşur. Demetlerin istenilen Şekilde örülmesi veya dokunması ile kumaşlar üretilir. Demetlerin kesit alanları veya kalınlıkları milimetrik boyutlardadır. Demetler çok farklı şekillerde bir araya getirilerek kumaş türlerini meydana getirirler. Bu farklı kumaş türlerinden bazıları Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Fiber takviyeli kompozitlerde tercih edilen farklı türlerde fiber yapıları [50]

Matris takviyesi olan elyafların, Şekil 3.2'de görüldüğü gibi matrisin mukavemet ve rijitliğini artırarak kompozitin temel yapısal özelliklerini etkilemektedir. Elyaflarda istenilen özellikler, yüksek elastiklik modülü ve mukavemet, düşük yoğunluk, kimyasal uyumluluk ve üretim kolaylığıdır. Kompozit üretilirken elyaf seçimi, üretim tekniği, üretim esnasında elyafların matris tarafından ıslatılabilmesi, yönlendirilmeleri ve elyaf hacmi kompozitin fiziksel ve mekanik özelliklerinde etkilidir. Elyafların ince çaplı olarak üretilmesinin bir sonucu olarak yapısal hata olasılıkları en aza indirildiğinden büyük kütlesel yapılara göre mukavemet ve elastik modülleri daha yüksektir [51].



Şekil 3.2. Reçine, elyaf ve kompozitin çekme gerilmesi-şekil degişimi şematik gösterimi [51]

Bu çalışmada örgü alümina fiberler takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Alumina fiberler üstün ısıl dayanım ve ısıl yalıtkanlık özelliklerine sahiptir. AFTK'ler diğer Fiber Takviyeli Kompozitlerden (FTK), krojenik sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara kadar daha düşük ısıl iletkenliğe sahiptir [52]. Düşük ısıl iletkenlik katsayılarının yanısıra yüksek dayanım ve

sertlikleriyle ön plana çıkmaktadırlar [53]. Bu özellikleri yüzünden birçok yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklık uygulamalarında yalıtkan olarak kullanılırlar. Alumina elyaflar günümüzde termal şok dirençleri sebebiyle diferansiyel taramalı kalorimetre cihazlarında, cam eritme ocaklarında yalıtkan olarak, hidrojen yakıt hücrelerinde conta olarak kullanılmaktadırlar. Alumina elyafların diğer elyaflara nazaran tercih edilmesinin bir diğer sebebi yüksek sıcaklıklarda korozyon dirençleridir [54]. Ancak günümüzde yüksek maliyetleri sebebiyle kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanımları çok kısıtlıdır.

Karbon fiber takviyeli kompozitler, yüksek performanslı yarış araçlarından, gelişmiş havacılık ekipmanlarına kadar geniş bir kullanım alanı mevcuttur. Bunun sebebi yüksek dayanım, düşük yoğunluk, düşük termal genleşme katsayısına sahip olmalarıdır [55]. Karbon fiber takviyeli kompozitler, 1020 çelik konstruksiyonlardan 5 kat daha dayanıklı ve 1/5'i ağırlığında, 6061 alüminyum konstrüksiyonlardan da 7 kat daha dayanıklı, 2 kat daha sert ve 1,5 kat daha hafiftirler. Ayrıca karbon fiberlerinin yorulma davranışı bilinen tüm metallerden daha iyidir. Ancak inorganik bir malzeme olan karbon lifleri nem, açık hava, baz ve zayıf asitlerden oda sıcaklığında etkilenmemekte, fakat yüksek sıcaklıklarda oksidasyondan oldukça fazla etkilenmektedirler [56].

Cam fiberler, polimer kompozitlerde kullanılan toplam takviye elemanlarının çok büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Cam fiberler, yüksek termal dirence, yalıtım özelliklerine, polimer fiberlere nazaran daha yüksek elastiklik modülüne (ancak karbon ve alümina fiberlerden daha düşüktür), düşük termal uzama katsayısına ve mükemmel performans/fiyat oranına sahiptir [46].

Alümina fiberlerin performans/fiyat oranı düşük olduğundan, özellikle endüstriyel uygulamalarda kullanımı azdır. Literatürde alumina fiberler hakkında kısıtlı bilgi olmasının temel nedeni yüksek maliyetleridir. Çalışmalar çok küçük boyutlarda yapıldığı için daha çok kimyasal özellikleri incelenebilmektedir. Mekanik özelliklerin incelenmesinde büyük miktardaki malzeme ihtiyacı çalışma olanağını sınırlamıştır ve literatürde alumina fiber takviyeli kompozit uygulamalarına rastlanmamıştır. Bu olumsuzluklara rağmen alümina fiberlerin yüksek ısıl dirençlerinden faydalanabilmek için son zamanlarda kimyasal bileşiminde yüksek silisyum dioksit oranlarında fiberler üretilmiştir. Bu fiberlerin imalatında yüksek maliyet miktarını düşürmek amaçlanmıştır ve başarılı olunmuştur. Üretim amaçları

fırın ve yüksek sıcaklıklarda çalışan araçların yalıtımı sağlamak içindir. Çizelge 3.2'de alümina, karbon ve cam elyafların bazı özelliklerini karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 3.2. Çeşitli fiberlerin özellikleri [46]

	Elastiklik Modülü (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Yoğunluk ($g/cm^{3)}$	Isıl İletkenlik (W/mK)	Isıl Dayanım (ºC)
Alumina Fiber	300	2000	2.5	0,1	3000
Karbon Fiber	350	2740	1.7	80	600
S-Cam Fiber	85	4750	2.5	1.4	650
E-Cam Fiber	76	2000	2.55	1.04	550
Kevlar 29	64	2860	1.44	0.04	200
Kevlar 49	36	3000	1.44	0.04	250

Fiber takviyeli kompozitlerin avantajları genel olarak aşağıdaki gibi sıralabilir;

1) Yüksek mukavemet ağırlık oranı
2) Korozyon direnci
3) Amaca uygun üretilebilirler.
4) Yerine üretildikleri malzemelere oranla maliyetleri daha düşük olabilir.
5) Daha uzun ömürlü olmalarından dolayı yenileme maliyetleri düşüktür.

3.2. Nanokompozitler

Nanoteknoloji temelde, moleküler boyutta çalışarak, moleküler yapısı yenilenmiş büyük yapılar elde etmeyi amaçlar. Malzemelerin makro boyuttaki özellikleri nano boyuta inildiğinde farklılıklar göstermektedir. Nano kompozitler, bir matris içerisinde nano boyutlarda parçacıkların dağıtılması ile oluşan yapılardır [57].

Nano kompozitler, bir matris içerisinde nanometre büyüklüğünde parçacıkların dağılması ile oluşan malzemelerdir. Nanometrik boydaki taneciklerin dispersiyonu ile elde edilen nano kompozitlerin mekanik, termal, optik ve fiziko kimyasal özelliklerinin saf polimerlere ve konvensiyonel kompozitlere oranla daha üstün olması sağlamaktadır. Nano kompozitlerin malzemeye getirdiği diğer üstünlükler elastiklik modülünün artması, yapıyı güçlendirmesi,

ısı direncini arttırması, malzemenin gaz geçirgenliğinin engellenmesi, yanıcılığın azaltılması olarak sıralanabilir [57].

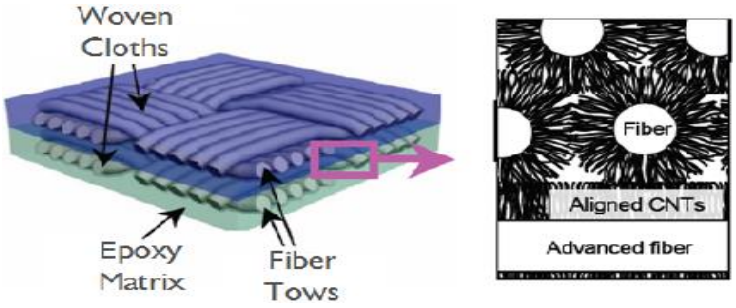
Polimer nanokompozitler konusunda ilk çalışmalara 1987 yılında Toyota Araştırma Laboratuvarlarında başlanmış ve geliştirilen Naylon-6/doğal kil (montmorillonit) nanokompozitinin, poliamid (PA) ve konvansiyonel dolgularla hazırlanan PA kompozitlere göre birçok fiziksel üstünlükleri olduğu saptanmıştır [58]. 1989 yılında bu çalışmanın sonuçlarının yayınlanmasından sonra tüm dünyada polimer nanokompozit çalışmaları hızla yaygınlaşmış ve farklı yapıdaki polimerlerin ve dolgu maddelerinin nanokompozit yapısı ve özelliklerine etkilerinin araştırılması yönünde büyük bir ivme kazanmıştır.

Polimer nanokompozit olarak adlandırılan malzemeler; polimer çerisinde dağıtılmış nano boyutlu organik yada anorganik, doğal yada sentetik ikinci bir faz veya katkı maddesi içeren yapıları tanımlamakta ve nano dolgulu polimer kompozitler yada anorganik-organik hibrit malzemeler olarak da adlandırılırlar.

Polimer nanokompozitlerin takviyesinde kullanılan nano dolgu maddeleri farklı türde, yapıda ve geometride olabilmektedirler. Bunlardan en çok kullanılanlar doğal ve sentetik killer, karbon malzemeler (nano boyutlu karbon siyahı, tek ya da çok duvarlı karbon nanotüpler, exfoliated grafit tabakaları vs.), nano boyutlu çeşitli metaller, metal tuzları ve metal oksitler, amorf silika, polihedral silisyum bileşikleri (silsesquioxane vs.) ve selüloz lifleri olarak sıralanabilir [59].

Malzemenin izotropik ya da anizotropik karakteri nano dolgunun şekli ve dağılımı ile belirlenir. Nano boyutlu dolgu maddelerinin en karakteristik özelliği, yüksek yüzey alanları nedeniyle kompozit malzemede, polimer ile dolgu arasındaki ara yüzey etkileşimlerini arttırmalarıdır. Böylece nanokompozit malzemelerde, az miktarda (ağırlıkça %3-5) nano dolgu ile çok daha fazla geleneksel dolgu maddesi (ağırlıkça %20-40) kullanılarak dahi ulaşılamayan üstün fiziksel özellikler sağlanmış olur. Dolgu parçacıklarının nano boyutlarda olmasından dolayı nanokompozitler yüksek alan/hacim oranlarına sahiptir ve çok düşük kil yoğunluklarında bile fazlar arası etkileşim alanı çok geniş olduğundan fiziksel ve mekanik özelliklerinde çok önemli artışlar görülebilmektedir [60].

Tabakalı kompozit malzemelerin mikro yapıları incelendiğinde, tabaka ayrılması ve çatlak ilerlemesinin temel sebebi olan mikro çatlaklar gözlemlenebilir. Bu hasar mekanizmasının önüne geçebilmek için kompozitlerde ikinci takviye elemanı olarak nano yapılar kullanılır [61]. Şekil 3.3'de fiber takviyeli nano kompozitlerin iç yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Fiber takviyeli kompozitlerde CNT takviyesinin şematik gösterimi [62, 63]

Nanokompozitlerin önemli avantajları olduğu gibi dezavantajlarıda mevcuttur. Çizelge 3.3'de nanokompozitlerin avantaj ve dezavatjları tablo halinde verilmiştir.

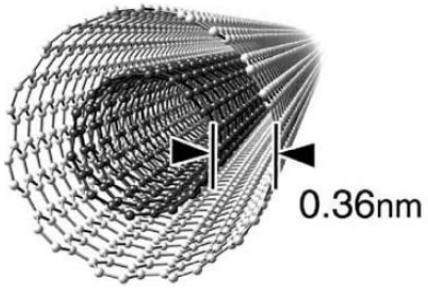
Çizelge 3.3. Nanokompozitlerin önemli özellikleri [64]

Avantajlar	Dezavantajlar
Mekanik Özellikler (Yüksek çekme ve eğme dayanımı , darbe direnci, tokluk)	Viskoziteyi artırarak üretim sürecini zorlaştırır.
Gazlara karşı güçlü bariyer olma	Matrise homojen dağıtımı zordur.
Alev geciktirici etki	Çökelme ve topaklanma gibi davranışlar.
Rijitlik	
Termal iletkenlik	
Elektriksel iletkenlik	
Kimyasal direnç	

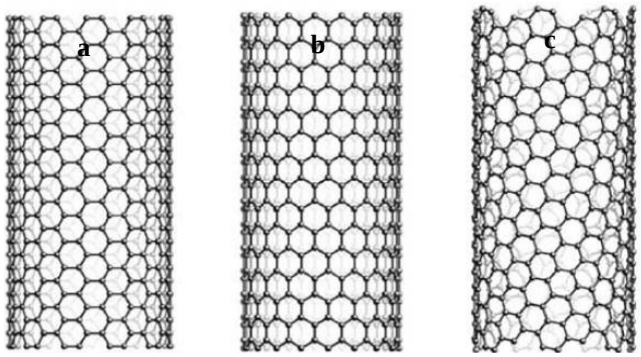
3.2.1. Karbon nanotüpler

Grafen bir levhanın tüp şekline yuvarlanması ile KNT'ler oluşturulur (Şekil 3.4.). Grafit C-C sp^2 bağlarından oluşur. Bu bağlar elmasın sahip olduğu C-C sp^3 bağlarından daha güçlüdür. Bu fark C-C sp^2 bağlarının daha kısa olmasından kaynaklanır. Ancak, grafit tabakaları arasındaki zayıf olan Van der Waals bağları, grafit tabakalarının birbirleri üzerlerinden kolaylıkla kaymasına izin verir. Literatürde cidar sayılarına göre üç çeşit karbon nanotüp tanımlanmıştır; TCKNT'ler, iki cidarlı karbon nanotüpler ve ÇCKNT'ler. TCKNT'ler, ÇCKNT'lere göre daha dayanıklıdırlar çünkü sadece bir grafit tabakasının

yuvarlatılması ile oluşur [63]. ÇCKNT'ler ise iç içe geçmiş eş merkezli tüplerden oluşur ve bu tüplerin birbirleri içinden kayabilme olasılıkları dayanımlarını olumsuz yönde etkiler [126]. Örnek bir ÇCKNT yapısı Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Ayrıca yapılarına görede KNT'ler sınıflandırılabilir. KNT'lerin Şekil 3.5'de armchair, zigzag ve helical yapıları gösterilmiştir.



Şekil 3.4. İki cidarlı karbon nanotüp [66]



Şekil 3.5. a) TCKN armchair formu b) TCKN zigzag formu c)TCKN helical formu [66]

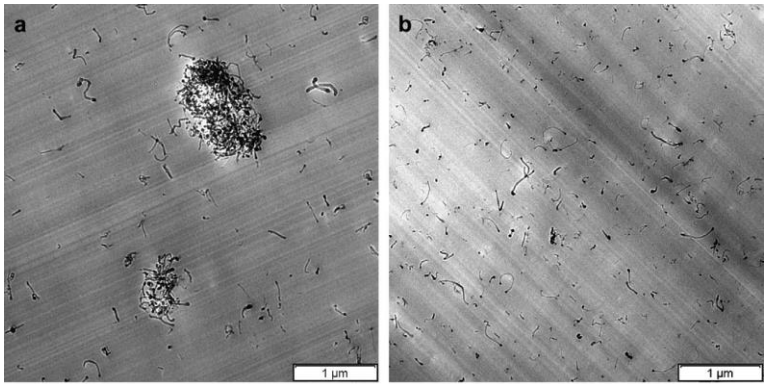
KNT'ler boy/çap oranı yüksek, hafif, dayanıklı, yüksek termal ve elektriksel iletkenliğe sahip malzemelerdir. KNT'lerin özellikleri çaplarına, boylarına, yönlenmelerine, yüzeysel özelliklerine bağlıdır [65].

Günümüzde, KNT'lerin büyük miktarlarda üretimi için ark-deşarj, lazer buharlaştırma ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin çoğu vakum altında veya çeşitli gaz ortamlarında gerçekleştirilmektedir. İlk büyük miktarda KNT üretimi ark deşarj yöntemi ile gerçekleşmiştir [67]. Halen günümüzde KNT üretiminde en çok tercih edilen yöntemdir. Grafit elektrotlar arasında gerçekleşen ark boşalması ile açığa çıkan yüksek sıcaklıklar nedeniyle grafit elektrot buharlaşır. Yeniden oluşan yapılarda KNT içeriği ağırlıkça %30 civarındadır [68]. Lazer buharlaştırma yönteminde, yüksek sıcaklara ısıtılan ve asal gaz ile doldurulmuş bir reaktör içerisine yerleştirilen grafit kaynağı lazer ile

buharlaştırılır. KNT'lerin toplanabilmesi için reaktör cidarlarının su ile soğutulması gerekir. Kobalt ve nikel gibi katalizörler kullanılarak TCKNT üretimi gerçekleştirilebilinir [69]. CVD günümüzde ticari amaçlı KNT üretiminde tercih edilen bir yöntemdir. Kobalt, nikel ve demir gibi katalizörler ile kaplanmış yüzeyler kuartz bir tüp fırın içerisinde ön ısıtma ile yaklaşık 700 ºC civarına ısıtılır. Tüp fırın içerisinden amonyak, azot veya hidrojen gibi taşıyıcı gazlar ile birlikte karbon kaynağı içeren asetilen, etanol, etilen ve metilen gibi gazlar geçirilir. Nanotüpler metal katalizörler üzerinde karbon içeren gazın bozunması ile büyütülürler [70].

KNT'ler üstün özellikler taşımasına rağmen uygulamalarında birçok zorluk mevcuttur. KNT'lerin polimer matris içerisinde homojen bir şekilde dağıtılması, nanotüplerin matris tarafından ıslatılabilmesi, adezyon gibi etkenler, karbon nanotüplerin takviye elemanı olarak göstereceği performansı etkileyen belirleyici unsurlardır [71].

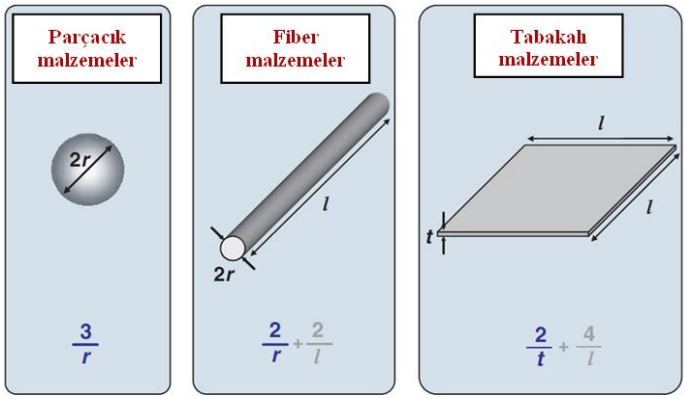
KNT'lerin yük dağılımında etkin rol oynayabilmesini sağlamak için KNT'ler homojen olarak dağıtılmalıdırlar. Karbonnanotüplerin homojen dağıtılması ile gerilme yığılmalı bölgeler de azaltılabilir [72]. Resim 3.1'de polikarbonat matris içerisine homojen ve homojen olmayan durumlarda dağıtılmış KNT'lere ait geçirimli elektron mikroskobu fotoğrafları verilmiştir. Saf KNT'lerin topaklanma eğilimi Van der Waals kuvvetlerinin etkisi yüzündendir. Bu kümelenme KNT'lerin mekanik özellikleri artırımını azaltacaktır [73-74]. Dağılımı etkin bir şekilde gerçekleştirebilmek için birçok fiziksel ve kimyasal metot kullanılmaktadır. Bunlar, ultrasonikasyon [75], kayma etkisi ile karıştırma, yüzey aktifleştiren madde (surfactant) kullanma [76], karbon nanotüp yüzeylerinin fonksiyonelleştirilmesi [77], plazma polimerizasyon [78] olarak örnek verilebilir. Metot belirlenmesinde ise; kullanılan polimerin türü ve viskozitesi etkin rol oynamaktadır [79].



Resim 3.1. Polikarbonat matris içerisinde ağırlıkça %1 ÇCKNT'lerin dağılımı a) polimer matris içerisinde ÇCKNT kümelenmeleri b) homojen dağılım [80]

3.2.2. Nano parçacıklar

Mikro boyuttan nano boyuta geçen nanoparçacıkların fiziksel özelliklerinde büyük değişiklikler oluşur. Nanoparçacıkların yüzey alanı hacimlerine oranla muazzam derecede büyüktür [81]. Nano yapıdaki bir parçacık aynı bileşime sahip olduğu daha büyük boyutlardaki parçacıklardan farklı özelliklere sahip olacaktır. Bu durumda parçacıklar ve fiberler boyutu açısından, birim hacim için yüzey alanı malzemenin çapı ile ters orantılıdır. Bu yüzden, küçük çaplardaki malzemeler birim hacim için büyük yüzey alanlarına sahiptir [81]. Kompozitlerde kullanılan takviye malzemelerine ait genel geometriler ve yüzey alanı hacim oranları Şekil 3.6'da fiber takviyeli kompozitlerde kullanılan genel takviye türleri/geometrileri ve yüzey alanı/hacim oranları [82] verilmiştir. Fiber ve tabakalı malzemeler için, yüzey alanı/hacim oranı denklemdeki birinci terim tarafından belirlenir. İkinci terim (2/l ve 4/l) çok küçük bir etkiye sahiptir ve genellikle ihmal edilir. Bu nedenle, sayısal olarak bakıldığında parçacığın çapında, tabakanın kalınlığında ve fiberin çapında mikro boyuttan nano boyuta bir azalma sağlandığında, yüzey alanı/hacim oranı küp derecesinde ([alan/hacim]^3) değişecektir [82]. Bu malzemeler genelde geometrilerine göre adlandırılırlar [83].



Şekil 3.6. FTK'lerde kullanılan genel takviye türleri/geometrileri ve yüzey alanı/hacim oranları [81]

Son zamanlarda sağladıkları pozitif etkilerden dolayı nanoparçacıklar araştırmalara konu olmaktadır. Nanometre boyutundaki bu parçacıkların yüzey alanları 1000 m^2/g'ı bulabilmektedir [84]. Bu büyük yüzey alanları yükün matristen nanoparçacığa transferini kolaylaştırır ve sonuçta matrisin mekanik özellikleri iyileştirilmiş olur [71].

4. DÜŞÜK HIZLI DARBE DENEYİ VE HASAR ANALİZİ

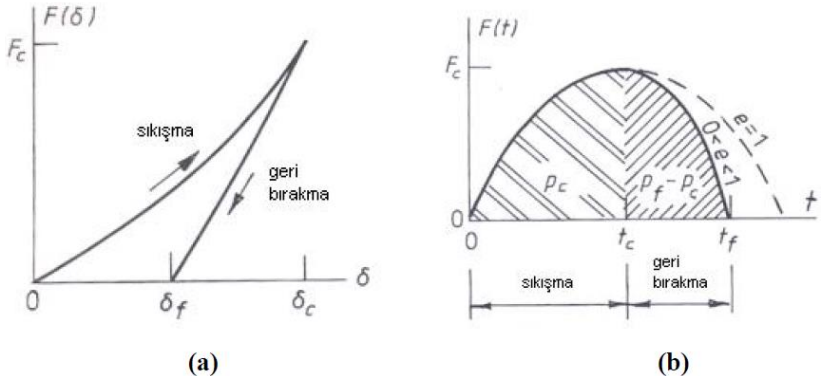
Çarpışan 2 cismin temas alanı küçük ise basınç yükselir. Temasın her anında temas alanında basınç yerel deformasyon ve nüfuziyet (indentation) meydana getirir. Darbenin her anında ara yüzey veya temas basıncı çarpışan cisimlerde zıt yönlerde tepki bileşke kuvvetine sahiptir. Böylece cisimlerin birbirine geçmesine karşı bir direnç kuvveti oluşur. Artan nüfuziyet ile direnç kuvveti de artar böylece cisimlerin hızlarında azalma meydana gelir. Darbe esnasında cisimlerin hızı iş olarak cisimlere hapsedilir ve hız sıfıra düşer. Sonuç olarak sıkışma esnasında biriktirilen enerji cisimleri birbirinden ayırmaya zorlar ve izafi bir hızla birbirlerinden ayrılırlar [85].

Darbe esnasında meydana gelen deformasyonlar malzemenin sertliğine bağlı olduğu gibi temas başlangıcındaki izafi çarpma hızına da bağlı bir fonksiyondur. Düşük hızlı çarpmalarda düşük basınç küçük deformasyon bölgeleri oluşturur. Yüksek hızlarda ise temas alanının yakınlarında plastik şekil değiştirmelerden dolayı büyük deformasyonlar vardır. Bu büyük deformasyonlar, krater oluşturma (cratering) ve dalma (penetration) şeklinde büyük belirginlikte olup kolaylıkla gözlenebilir [85].

4.1. Çarpışmanın Sıkışma ve Geri Bırakma Aşamaları

Çarpışan cisimlerin ilk temasından sonra şekil değiştirebilen parçacık sıkıştırıldıkça temas kuvveti $F(t)$ yükselir. Şekil değiştirebilen parçacığın batması veya sıkışması δ olarak tanımlanır. Çarpışan cisimlerin kompliyansı hakkında ayrıntılı bilgiye girmeden, δ'yı direk elde etmenin bir yolu yoktur. Kompliyans hıza bağımlı ise en büyük batma ve en büyük kuvvet izafi hızın normal bileşeninin sıfır olduğu anda meydana gelir. Şekil 4.1a. normal temas kuvvetini batma δ'nın bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Şekil 4.1b. bu kuvveti zamanın bir fonksiyonu olarak gösterirken sonraki grafik temas süresinin yaklaşımın başlangıç aşaması veya sıkışma aşaması ile takip eden geri bırakma aşamasına ayrılmasını göstermektedir. Sıkışma sırasında, kinetik enerji temas kuvvetleri yardımıyla deformasyon iç enerjisine dönüştürülür. Eşit ve zıt yöndeki temas kuvveti şekil değiştirebilen parçacığın iç deformasyon enerjisini artıran bir iş yaparken, temas kuvveti çarpışan cisimlerin başlangıçtaki normal izafi hızlarını düşüren bir iş yapar. Temas noktasının normal izafi hızı sıfır olduğunda sıkışma aşaması sona erer ve geri bırakma başlar. Takip eden geri bırakma

aşaması sırasında, iç enerjisinin elastik kısmı bırakılır. Sıkışma sırasında biriktirilen elastik zorlanma enerjisi geri bırakma sırasında cisimleri birbirinden ayırmaya zorlayan bir kuvvet doğurur. Bu kuvvet tarafından yapılan iş, kinetik enerjinin bir kısmını yerine koyar [85].



Şekil 4.1. (a) İzafi yer değiştirme δ'nın (b) zamanın (t) fonksiyonu olarak normal temas kuvveti F [85]

Sıkışma sırasındaki şekil değiştiren bölgenin kompliyansı, geri bırakma sırasındakinden daha büyüktür. Bu nedenle temas son bulduğunda şekil değiştirebilen parçacığın bir kalıcı sıkışması δ_f bulunur [85].

Çarpmadan sonra herhangi bir *t* zamanında temas kuvveti *F*'nin normal bileşeninin Şekil 4.1b'deki eğrinin altında kalan alana eşit olan bir impulsu vardır [85].

4.2. Normal Temas Kuvvetinin İşi

Normal temas kuvvetinin sıkışma ve geri bırakma aşamalarında yaptığı iş, sıkışma esnasında uygulanan impuls p_c ile ayrılmadaki son impuls p_f arasında bir bağıntı verir. Sıkışma süresince normal temas kuvveti şekil değiştirebilen parçacık üzerinde bir iş yapar (gerçekte, temasın başlangıç noktası civarındaki Şekil değiştiren küçük bölgede). Bu iş parçacığı deforme eder ve iç enerjisini yükseltir. Şüphesiz, parçacığı sıkıştıran kuvvetin bir eşi olan fakat zıt yöndeki kuvvet sıkışma esnasında normal izafi hareketin kinetik enerjisini düşürür. Parçacığın sıkışmasında yutulan enerjinin bir kısmı, geri bırakma sırasında eski haline gelebilir. Enerjinin eski haline gelebilen bu kısmı elastik zorlanma enerjisi olarak bilinir [85]. Kuvvetin impuls'un türevi $dp = Fdt$ ile bağıntılı olduğu hatırlanarak *F* kuvvetinin normal bileşeninin sıkışabilir parça üzerinde yaptığı iş *Wd* hesaplanabilir:

$$W_d = \int_0^t F v dt' = \int_0^p v dp' \tag{4.1}$$

4.3. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı

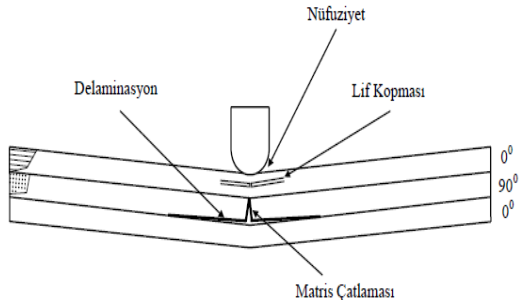
Darbe, bir malzeme veya yapı üzerine düşük, orta ve yüksek hızlarda çok kısa bir süre içerisinde uygulanan anlık dış kuvvet olarak tanımlanır. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı Şekillerde olabilir. Genel olarak, darbeler düşük hızlı ve yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar, fakat bu kategoriler arasında açık bir geçiş yoktur. Yapılan araştırmalar bu geçişin belirlenmesinde henüz net bir sonucun elde edilemediğini göstermektedir. Bu konuda yapılmış çalışmalardan bir kısmı düşük hızlı darbeyi, hedefin ve çarpan cismin rijitliğine, malzeme özelliklerine ve çarpan cismin kütlesine bağlı olarak 1 ila 10 m/s arasında değişen hızlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır [86]. Düşük hızlı darbeye en basit örnek olarak kompozit malzeme üzerine imalat veya bakım esnasında kaza sonucu bir parçanın düşmesi verilebilir. Düşük hızlı darbeler normal olarak çarpışma temas anında malzeme içyapısında deformasyon oluşturan darbelerdir. Bazen düşük hızlı darbe, düşük enerjili darbe olarak da adlandırılır. Düşük hızlı darbede, malzemenin içyapısında darbeye karşı cevap verebilmek için gerekli olan temas süresi yeterlidir. Bu nedenle hedefin dinamik yapısal cevabı çok büyük bir öneme sahiptir [87]. Yüksek hızlı darbeler ise balistik limitte olan darbelerdir ve deneysel olarak darbe hızı yaklaşık 74,1 m/s'ye kadar olan hız olarak belirlenmiştir [88]. Yüksek hızlı darbe için de, bir uçağın havalanması veya havaalanına inmesi esnasında, uçak gövdesine bir taş parçasının çarpmasını örnek verebiliriz. Böyle bir darbede de küçük bir ağırlığa sahip parçanın yüksek hızla çarpması durumu söz konusudur. Böyle yüksek hızlı bir darbe söz konusu olduğunda, eğer parça yüksek bir hıza sahip ise kompozit malzemeye saplanabilir veya delip geçebilir. Darbeye karşı olan cevap malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımları durumunda darbeye karşı malzemenin cevabı; elastik uzama ve plastik Şekil değiştirme şeklinde meydana gelir ve darbe hasarı, çoğunlukla, çarpma yüzeyinde başladığı anda kolay bir Şekilde tespit edilebilir. Darbe hasarı, metal malzemelerde genellikle bir tehlike işareti olarak kabul edilmez, çünkü metaller plastik Şekil değiştirebilme kabiliyetlerinden dolayı, büyük miktarda enerjiyi soğurabilir. Metaller sabit bir gerilme durumunda yapı sertleşmeden önce çok büyük uzamalarda akabilirler, bu nedenle oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz. Kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbe gören

yüzeyde olabileceği gibi darbeye maruz kalmayan yüzeyde de meydana gelebilir, içyapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde başlayabilir. Bu nedenle kompozit malzeme veya yapı üzerine gelebilecek düşük veya yüksek hızlı darbelerin, malzeme veya yapıda meydana getirebileceği hasarı önceden tahmin etmek, simülasyonunu yapmak ve bunlara ait dinamik özelliklerin (enerji absorbe etme kabiliyeti, kırılma tokluğu, hasar mekanizmaları, mukavemet düşüşü ve çentik hassasiyeti) belirlenmesi gerekmektedir [89b].

4.4. Tabakalı Kompozit Malzemede Darbe Sonucu Oluşan Hasar Modları

Kompozit malzemelerde kalınlık boyunca bir takviye olmadığından enine yüklemeye (tabaka veya elyafa dik yükleme) karşı çok hassastırlar. Tabakalı kompozit malzemede en büyük darbe hasarı da enine doğrultuda meydana gelir. Çünkü kompozit malzemeler kalınlık doğrultusunda tabaka düzleminde olduğundan daha zayıftırlar. Enine darbeye maruz kalan kompozit malzemelerde, meydana gelen hasarlardan dolayı toplam yük taşıma kapasitelerinde büyük düşüşler meydana gelir. Kompozit malzemelerin bu darbe yüklerine karşı göstermiş oldukları cevap çok karmaşıktır. Bu, kompozit malzemeyi meydana getiren her bir bileşenin kendi özellikleri kadar imalat parametrelerine de bağlıdır. Ayrıca, darbeye verilen cevap çarpan cismin geometrisine, hızına ve kütlesine de bağlıdır. Her biri enine darbenin toplam etkisini ölçme de belirleyicidir. Darbe yüklemesi altında çarpan cismin gözle görülemeyen veya zayıf şekilde seçilebilen nüfuziyetine kadar değişebilen farklı Şekillerde hasar modları mevcuttur. Düşük hızlı darbeler tabakalar üzerinde gözle görülen hasarlar oluşturmayabilirler. Fakat tabaka içerisinde, matris çatlaması, delaminasyon, elyaf kopması şeklinde hasarlara sebep olabilirler. Bu da mukavemette önemli derecede bir düşüşe sebep olur. Rijitlikte azalma da mümkündür fakat genellikle ihmal edilebilir seviyededir. Tabakalar arası gerilmeler (kesme ve normal) tabakalar arası mukavemetin düşük olmasından dolayı ilk kopmalara sebep olan gerilmelerdir. Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılacak enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönümleyebilmesi için oluşacak hasar modlarını belirleyecektir [87]. Genel olarak bir kompozitin darbeye maruz kalmasıyla meydana gelen darbe hasarı matris çatlağı, delaminasyonlar ve elyaf hasarlarını içerir. Düşük hızlı darbede, matris çatlağı ile başlayan hasar, farklı elyaf yönlendirme açılarına sahip tabakalar arasında delaminasyonların (tabakalar arası ayrılma) meydana gelmesine sebep olur. Kompozite uygulanan darbe enerjisinin artmaya devam etmesiyle delaminasyonlar ve en sonunda elyaf hasarları meydana gelerek, vurucunun numuneye

saplanması ve en sonunda da numunenin vurucu tarafından delinmesi meydana gelir [90]. Şekil 4.2'de, çeşitli hasar kademelerine ait şematik bir resim görülmektedir.



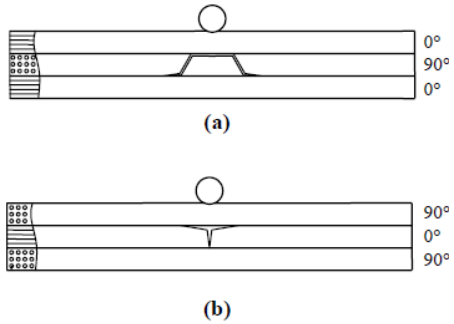
Şekil 4.2. Hasar modları [88]

Düşük hızlı darbe deneylerinde aşağıdaki durumlar gözlemlenir [90];

Matris modu : Darbe uygularken çatlaklar liflere paralel ilerler.
Elyaf modu : Yükle birlikte lifin kopması sonucu lifin duruşu değişir.
Nüfuziyet : Darbe ucu kompozit malzemeye saplanır.
Delaminasyon : Tabakalar birbiri üzerinde kayarak içyapı bozulur.

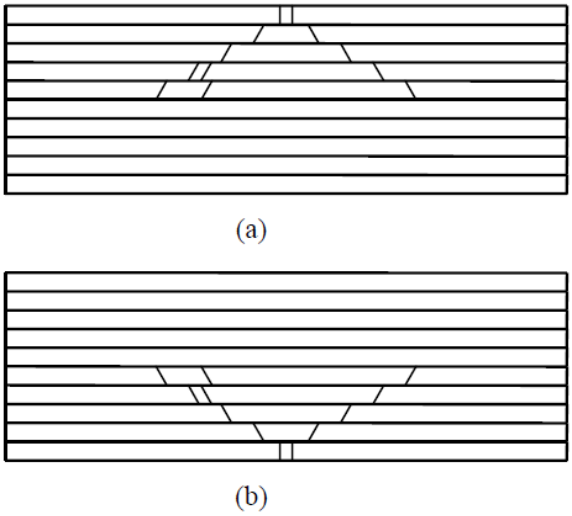
4.4.1. Matris hasarı

Matris hasarı, düşük hızlı darbe deneyinde meydana gelen ilk hasardır ve matris çatlaması şeklinde meydana gelir. Tek yönlü liflerden oluşmuş tabakalarda genellikle lif doğrultusuna paralel düzlemlerde matris çatlakları oluşur. İki tür matris çatlağı vardır: çekme ve kayma çatlağı (Şekil 4.3). Düzlem için normal gerilmeler tabakanın enine kayma mukavemetini aştığı zaman çekme çatlakları oluşur. Kayma çatlakları orta düzlemden belli bir açıda bulunurlar ki bu durum enine kayma gerilmelerin bu tür çatlakların oluşumunda önemli rolü oynadığını göstermektedir. Kalın tabakalı kompozitlerde yüksek yerel gerilmeler nedeniyle matris çatlakları vurucunun çarptığı ilk katmanda meydana gelir. İnce tabakalı kompozitler için, kompozitin arka yüzündeki eğme gerilmeleri en alt katmanda matris çatlağına neden olur. Bu da matris çatlakları ve delaminasyonları başlatır.



Şekil 4.3. Matris çatlakları (a) çekme çatlağı (b) kayma çatlağı [90]

Kalın tabakalı kompozitlerde yüksek yerel gerilmelerden dolayı çatlaklar vurucunun çarptığı yüzeyde başlar. Hasar mekanizması yukarıdan aşağıya bir çam ağacı şeklinde ilerler (Şekil 4.4 a). İnce tabakalı kompozitlerde ise alt yüzeyde ki eğilme gerilmeleri en alt katmanda matris çatlağına neden olur ve ters çevrilmiş çam ağacı şeklindedir (Şekil 4.4 b).



Şekil 4.4. (a) Çam ağacı (b) ters çevrilmiş çam ağacı görünümlü hasar mekanizması [37]

Matrisin hasarına neden olan ilk kinetik enerji matrisin mekanik özelliklerine bağlıdır. Ancak takviye elemanı elyafların özelliklerinden veya elyafların oryantasyonundan bağımsızdır. Griffin, aynı matris malzemesinde 5 farklı elyaf için yaptığı çalışmada hasar başlangıç enerjisinin aynı olduğunu ve hasarın matris ağırlıklı olduğunu belirlemiştir [89].

Genel olarak yapılan çalışmalar darbe direncinin matrisin tokluğuna bağlı olduğunu göstermiştir. Tokluk malzemenin şekil değiştirme enerjisi, kayma çatlaklarına karşı gösterdiği direnç ve gerilme yoğunluğunu azaltma kabiliyetinin ölçüsüdür. Yapılan deneylerde termoplastik malzemelerin tokluklarının daha yüksek olduğu belirlenmiştir [91].

Bu yüzden termoplastik malzemelerde daha az matris çatlağı meydana gelir ve çatlak yayınımı daha azdır diyebiliriz. Ayrıca bu kompozitler kırılmada daha yüksek şekil değiştirmeye sahip olduklarından daha yüksek darbe yüklerine direnç gösterirler. Bu kompozitlerde daha az delaminasyon meydana gelmesinden dolayı yüksek darbe enerjileri sonrası bası mukavemetine sahiptirler [92].

4.4.2 Delaminasyon

Delaminasyon, farklı elyaf yönlendirmelerine sahip tabakalar arasında meydana gelen ayrılmadır ve tabakanın mukavemetini önemli derecede düşürür. Tabakalı kompozit malzemede katmanlar arasındaki farklı elyaf yönlenmeleri sebebiyle bu katmanların eğme rijitlikleri değişkenlik gösterir. Tabakalar arasındaki bu eğme rijitlik farklılığı ve eğme kaynaklı kayma gerilmeleri delaminasyonun en önemli sebebini oluşturur. Delaminasyona etki eden faktörler malzeme özellikleri, sıralanma düzeni ve tabaka kalınlığı gibi faktörlerdir. Kara yaptığı çalışmada delaminasyon için bazı noktaları vurgulamıştır [89b]:

- Çeki ve bası artık mukavemetleri hasar büyüklüğünün artışı ile azalır ve bununla nonlineer olarak ilişkilidir.
- Delaminasyon hasarı büyüklüğü darbe enerjisinin artmasıyla artar ve vurucu hızının bir sınır değeri olan, numunenin delinmesine ulaşılana kadar artar. İki tip sınır değeri gözlemlenmektedir, bir tanesi darbe enerjisine göre bir tanesi de darbe hızına göredir. Bunlar görülebilir hasar için düşük bir sınır değer ve maksimum hasar bölgesi boyutu için bir üst sınır değeri temsil ederler.
- Hasarın belirlenmesindeki gerçek ilişki, malzeme sayısına ve geometrik parametrelere bağlı olabilir. Bunlarda, elyaf, matris ve elyaf-matris arasındaki mukavemet, çatlak hassasiyeti, kırılma tokluğu, tabaka dizilim sırası, tabakalar arası mukavemet, sınır şartları, malzemeye özgü sönümleme ve diğer faktörler olarak sıralanabilir.

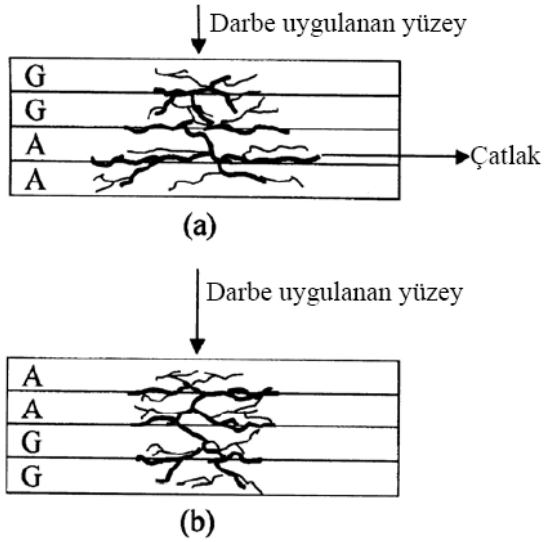
4.4.3. Elyaf hasarı

Matris çatlaması ve delaminasyondan sonra elyaf kopması meydana gelir. Yüksek yerel gerilmeler ve nüfuziyetin neden olduğu etkiler çarpan cismin temas ettiği yüzeyde

gerçekleşir. Elyaf hasar yüksek eğme gerilmeleri yüzünden darbeye maruz kalmayan tarafta da meydana gelebilir [93].

Hasar toleransının geliştirilmesinde ve hasar kontrolünde elyaf türü etkin rol oynamaktadır. Örneğin, eşit darbe enerjilerinde bir kompozitin enerji soğurabilme kabiliyeti, elyafların elyaf kırılma oranına ve artık mukavemete bağlıdır. Bu sebeple kompozit üretiminde kırılma esnasında kırılma Şekil değişimine sahip bir elyaf, tok bir reçine veya dokunmuş bir elyaf kullanılarak tabakalar arasında uyumlu bir düzen sağlanırsa bu kompozitin darbe direnci geliştirilmiş olur [91].

Aramid/cam kompozitlerde, darbe uygulanan veya uygulanmayan yüzeylerde aramid elyaf bulunması durumlarını araştırmışlardır [93]. Lokal gerilmeler yüzünden kalın kompozitlerde darbe hasarı darbe yüzeyine yakın yerlerde başlar. Alttaki tabakaların hasarı engellemesinden dolayı darbe yüzeyindeki tabaka tam hasara uğramaz. Çünkü hasarın büyük bir kısmını alttaki tabakalar karşılar. Kompozit darbesinde hasar darbe noktasından başlar ve alt tabakalara doğru yayılarak ilerler. Aramid alt tabakalarda olduğu zaman darbe enerjisinin büyük bir kısmını absorbe eder (Şekil 4.5a). Eğer aramid tabakalar darbe uygulanan yüzeyde olursa ve hemen altında da gevrek yapıdaki cam tabakalar bulunursa, bu cam tabakalar aramid tabakalar arasında yayılma eğiliminde olan deformasyonu sınırlayıcı bir etki yapar ve deformasyonun yayılmasını engeller (Şekil 4.5b).



Şekil 4.5. Darbe uygulanan yüzeye göre hasar yayılışı (a) Cam yüzeyden (b) Aramid yüzeyden [94]

Yapılan çalışma sonucunda epoksi matrisli cam-aramid-karbon elyaf takviyeli kompozitlerin özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1) Tüm kompozit numuneleri için hasardan sonra mukavemet azalması rijitlik azalmasından daha büyük olur.
2) Kompozitler için artık mukavemet faktörleri, elyaf dizilim sırası, kompozit türü ve darbe hızıdır.
3) Elyafların matristen ayrılmasını elyafların kırılma şekil değiştirmesi ile ilişkilendirebiliriz. Elyaf matris arasındaki yapışma mukavemeti elyaf kırılma şekil değiştirmesine bağlıdır. Eğer bu üç kompozit için sıralanacak olursa; cam/epoksi>aramid/epoksi>karbon/epoksi olarak sıralamak mümkündür.
4) Delinme dirençlerinin sıralaması ise aramid/epoksi>karbon/epoksi> cam/epoksi olur.

4.4.4. Nüfuziyet

Çarpan ucun delme miktarını ifade eder. Elyaf hacim oranlarının aynı olduğu farklı boyutlardaki malzemelerde çarpan cismin nüfuziyet alanı yaklaşık olarak aynıdır.

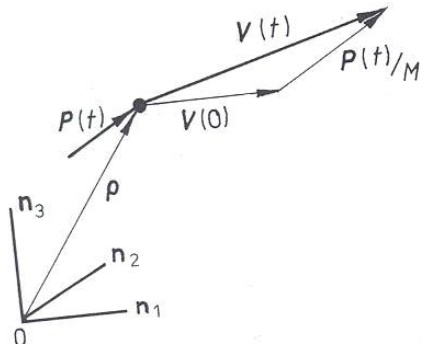
4.4.5. Elyaf matris ara yüzey ayrılması

Elyaf ve matris ara yüzeyi arasındaki bağın kopması düşük hızlı darbeye maruz kalan kompozit malzemelerde görülen hasarlardan biridir. Bu nedenle kompozit hasarının kontrol edilmesinde elyaf-matris ara yüzeyi, kompoziti meydana getiren elyaf ve matris bileşenleri kadar önemlidir. Elyaf matris ara yüzeyindeki ayrılma matristen elyafa yük aktarılmasını azaltır veya ortadan kaldırabilir. Elyaf matris ara yüzeyindeki ayrılma çekme gerilmelerinden dolayı çoğunlukla darbe görmeyen alt tabakalarda meydana gelir.

4.5. Düşük Hızlı Darbe Testinin Dinamiğinin İlkeleri

Parçacık Dinamiği: Dinamiğin birçok ilkesinin en temel hali bir parçacığın dinamiğidir. Bir parçacık, boyutları ihmal edilebilen veya sonsuz küçük olan bir cisimdir. Parçacık, gerek katı gerekse Şekil değiştirebilen cisimler için darbe dinamiğini geliştirmek üzere kullanılacak olan bir yapı taşıdır. *M* kütlesine sahip bir parçacık V hızıyla hareket ediyorsa

*M*V momentumuna sahiptir. Eğer bir parçacığa F bileşke kuvveti etki ediyorsa, bu durum Newton'un ikinci kanuna göre momentumda bir değişikliğe yol açar.



Şekil 4.6. *M* kütleli bir parçacığın hızındaki P*(t)* impulsundan kaynaklanan değişim

Bir parçacığın momentumundaki değişimi Newton'un II. Kanununa göre; ona etki eden kuvvetle orantılıdır ve doğrultusu etki eden kuvvetle aynı doğrultudadır.

$$\frac{d(M\mathbf{V})}{dt} = \mathbf{F} \qquad (5.\ 1)$$

Burada kütle sabit olduğundan integral alınarak denklem 5.2 elde edilir.

$$\mathbf{V}(t) - \mathbf{V}(0) = M^{-1}\int_0^t \mathbf{F}(t').dt' \equiv M^{-1}\mathbf{P}(t) \qquad (5.\ 2)$$

Burada düşük hızlı darbe için başlangıç şartları t= 0 iken F_i= 0'dır ve buradan denklem 5.2 elde edilir. Denklemde g yerçekimi ivmesini (m/s), F_i ise temas kuvvetini temsil etmektedir.

$$v = \sqrt{2gh} \qquad (5.\ 3)$$

Darbe sırasındaki temas kuvvetleri Fi, Newton'un II. kanununa göre aşağıdaki Şekilde hesaplanır.

$a_i = F_i/m$ (5. 4)

Burada F_i ölçüm sisteminden alınan $4x10^{-5}$ sn aralıklarla alınan kuvvet değerleridir. a_i ise bu zaman aralığı için gerekli olan ivme değeridir. (Kara, 2006) yaptıkları çalışmada düşük hızlı darbe için ivmenin zamanın lineer fonksiyonu olarak kabul edilebileceğini göstermişlerdir. Bu durumda

$$a(t)=kt+c \qquad (5.\ 6)$$

Burada k ve c birer katsayı olup her zaman artışı için $\Delta t=t_i-t_{i-1}$ değeri yeniden hesaplanmalıdır burada k ve c değerleri aşağıdaki şekilde bulunabilir [90].

$$k=(a_i-a_{i-1})/(t_i-t_{i-1}) \qquad (5.\ 8)$$

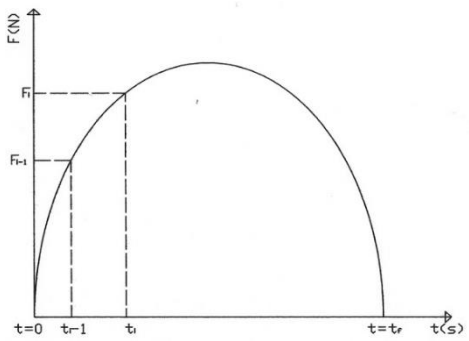
$$c=(t_i a_{i-1}-t_{i-1}a_i)/(t_i-t_{i-1}) \qquad (5.\ 9)$$

Bu durumda

$$dV(t)=a(t)dt;\ \int_{Vi-1}^{V} dV(t)=\int_{ti-1}^{t} a(t)dt \qquad (5.\ 10)$$

$$dS(t)=V(t)dt;\ \int_{Si-1}^{Si} dS(t)=\int_{ti-1}^{ti} V(t)dt \qquad (5.\ 11)$$

Denklemleri yazılabilir.



Şekil 4.7. Tipik kuvvet-zaman değişimi

Darbe sırasında meydana gelen impuls aşağıdaki Şekilde ifade edilebilir.

$$J=\int_{0}^{tf} F(t)dt \qquad (5.\ 12)$$

Absorbe edilen enerji ise

$$W = \int_0^{sf} F(s)ds \qquad (5.\ 13)$$

Serbest düşmeye bırakılan ağırlığın ilk hız sıfırdır;

$$v = \sqrt{2gh} \qquad (5.\ 14)$$

h yüksekliğinde vurucu kütlesinin sahip olduğu potansiyel enerji ise;

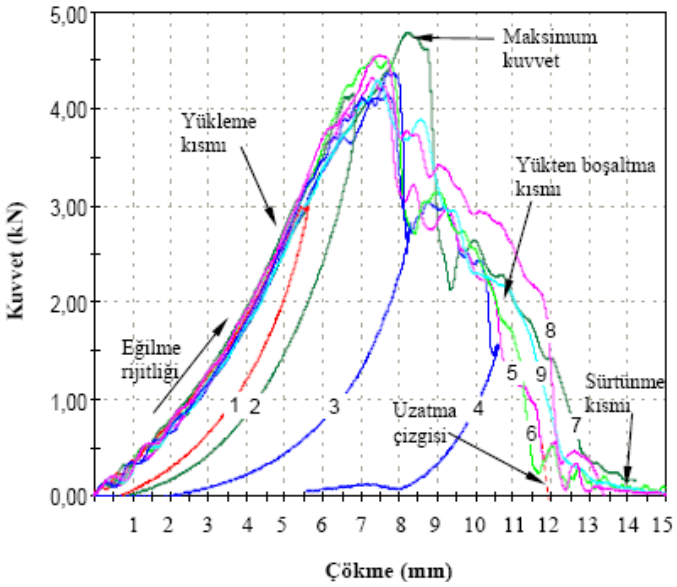
$$E_p = m.g.h \qquad (5.\ 15)$$

Düşük hızlı darbe testi sayesinde malzemelerin düşük hızlı darbe deneyine karşı direncini gösteren birçok diyagram elde edilebilmektedir. Bu grafikler, kompozitlerin darbe davranışlarını gösteren vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi, vurucu ucunun numuneye saplanması ve vurucunun numuneyi delip geçmesi (penetrasyon) durumları ifade etmektedir. Bu durumlara ait açıklamalar aşağıdaki bölümlerde yapılmıştır [95].

4.6. Kuvvet-Çökme Diyagramları

Kuvvet-çökme (yer değiştirme) (*F-d*) eğrileri numuneye ait darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden bir tanesidir. Şekil 4.8'de artan darbe enerjisi ile kuvvetin çökme karşı cevabını gösteren bir *F-d* grafiği görülmektedir. Her eğri yükleme esnasında bir kuvvetin artma kısmına, ulaşılan bir maksimum kuvvet değerine ve yükten boşaltmada da bir azalma kısmına sahiptir. Kuvvet-çökme eğrisinde artan kısmı darbe yüküne karşı numunenin göstermiş olduğu dirençten dolayı eğilme rijitliği olarak adlandırılır. Artan darbe enerjisi altında oluşan bu eğriler kapalı tip ve açık tip eğri olarak iki kısma ayrılır. Kapalı tip eğri, vurucunun numuneye temas etmesinden sonra vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesiyle oluşur. Yani uygulanan darbe enerjisinin bir kısmı numune tarafından yutulmuş ve yutulamayan enerji de vurucunun geri sekmesi için geri verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere ilk 3 numune için oluşan eğriler kapalı tip eğrilerdir. Darbe enerjisi arttırıldığında, geri sekme kısmı azalırken kapalı tip eğri genişler ve çökme de artar. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi numune 4, kapalı tip bir eğri olmasına rağmen kapalı tip eğriden açık

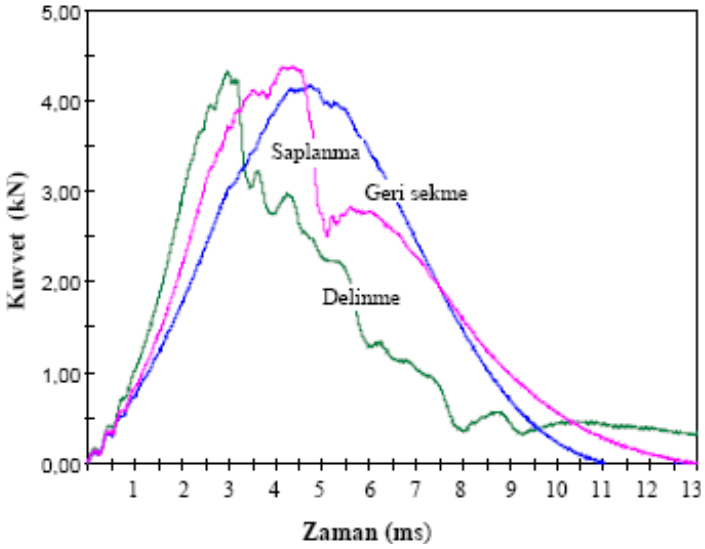
tip eğriye geçiş noktasında bulunmaktadır ve darbe enerjisinin daha da arttırılmasıyla eğri tipi kapalı tipten açık tip eğriye dönüşür. Eğer bir eğri açık tip ise ya vurucu numuneye saplanmıştır ya da numune delinmiştir. Buna göre numuneye saplanan vurucu numune kalınlığı boyunca aşağı doğru hareket eder ve artık numune yüzeyinden geri sekme meydana gelmez. Buradan numunede ya saplanma ya da delinme meydana geldiği söylenebilir.



Şekil 4.8. Kuvvet-Çökme (F-d) eğrileri [95]

4.7. Kuvvet-Zaman Diyagramları

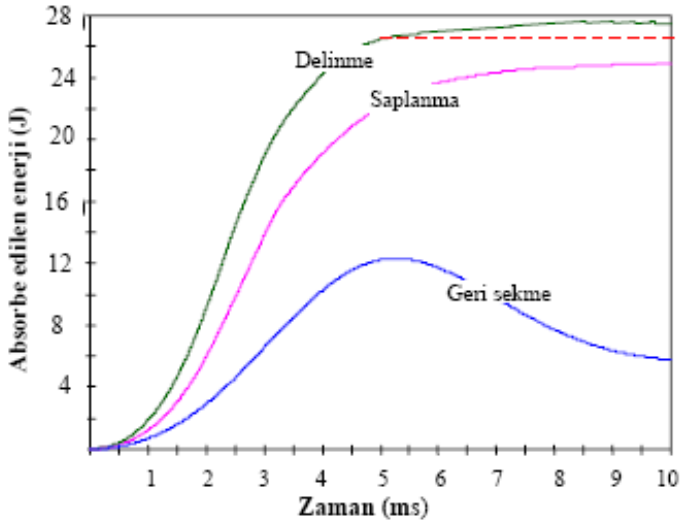
Bu diyagram sayesinde numunede saplanma, delinme, geri sekme durumları gözlemlenebilir. Şekil 4.9'da vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi, saplanması ve numuneyi delip geçmesi kuvvet-zaman diyagramı üzerinde gösterilmiştir. Temas kuvvetinde meydana gelen ani düşmeler kompozit numunelerde meydana gelen delinme, elyaf kopması veya delaminasyonları ifade edebilir.



Şekil 4.9. Kuvvet-Zaman (F-t) eğrileri [95]

4.8. Absorbe Edilen Enerji-Zaman Diyagramları

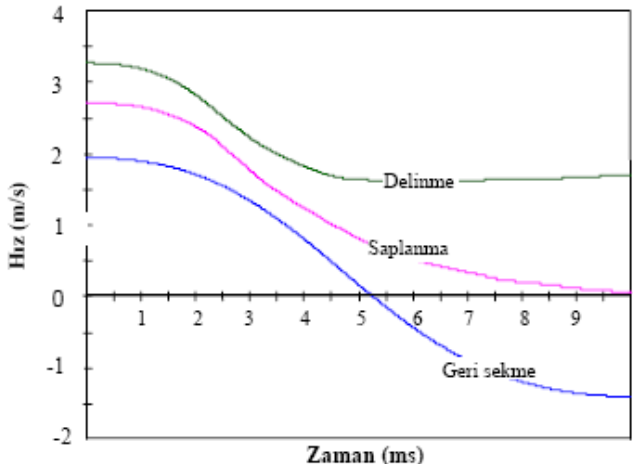
Şekil 4.10'da numune yüzeyinden geri sekme, vurucu ucunun numuneye saplanması ve vurucunun numuneyi delip geçmesi gibi üç özel duruma ait Absorbe edilen enerji-zaman (*Ea-t*) grafiği görülmektedir. Absorbe edilen enerji, kuvvet-çökme (*F-d*) eğrisinin altında kalan alandan hesaplanmaktadır. Vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi durumunda vurucunun sahip olduğu enerjinin hepsi numune tarafından absorbe edilemez ve absorbe edilemeyen darbe enerjisi de vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi için harcanır. Vurucunun numuneye saplanması durumunda ise vurucunun sahip olduğu darbe enerjisinin hepsi numune tarafından absorbe edilir ve eğrinin son kısmı şekilden de görüldüğü üzere hemen hemen yatay olarak devam eder. Vurucunun numuneyi delip geçmesi durumunda ise, vurucu ile numune arasındaki sürtünme kısmının altında kalan alanın da darbe cihazının programı tarafından hesaplanan absorbe edilen enerji miktarına katılmasından dolayı eğrinin yukarı doğru yönlendiği görülmektedir. Bu sürtünme kısmının altında kalan alanın toplam absorbe edilen enerji miktarından çıkarılması gerekir. Buna göre, numune tarafından absorbe edilen enerji değeri ise Şekilde görülen kesikli çizginin yaklaşık olarak denk geldiği enerji değeridir [95].



Şekil 4.10. Absorbe edilen enerji-zaman eğrileri [95]

4.9. Hız-Zaman Diyagramları

Şekil 4.11'de numune yüzeyinden geri sekme, vurucu ucunun numuneye saplanması ve vurucunun numuneyi delip geçmesi gibi üç özel duruma ait hız-zaman (*V-t*) grafiği görülmektedir. Artan darbe enerjisi altında yapılan darbe testlerinde, ilk başta belli bir hıza sahip olan vurucunun numune ile ilk temasından sonra hızı azalır. Vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi durumunda, yukarı doğru hareket eden vurucu negatif bir hıza sahip olur.



Şekil 4.11. Hız-zaman grafiği [95]

Vurucunun numuneye saplanması durumunda ise, belli bir hız ile numuneye çarpan vurucunun numuneye saplanmasından dolayı tekrar yukarı doğru geri sekmesi meydana

gelmediğinden hız sıfırlanacaktır. Vurucunun numuneyi delip geçmesi durumunda ise belli bir hız ile numuneye saplanıp kalınlık boyunca ilerleyen vurucunun hızını yavaşlatan durum, vurucu ve numune arasındaki sürtünmedir. Bunun sonucunda da geri sekme meydana gelmediğinden vurucu pozitif bir hıza sahip olacaktır [95].

5. KOMPOZİT MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU

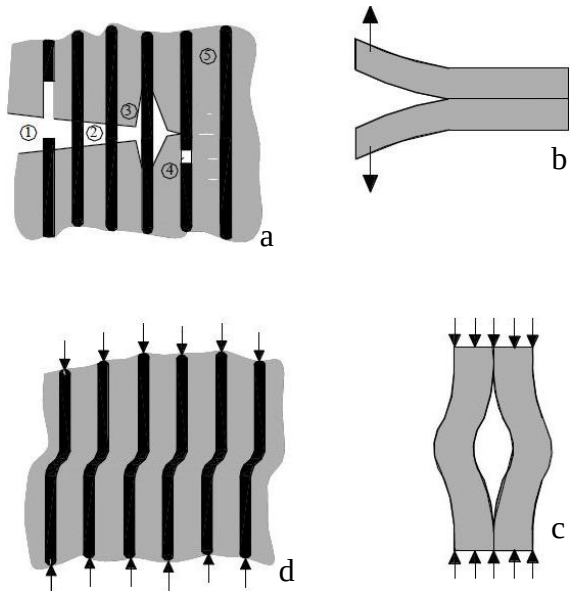
Bu bölümde çekme deneyleri, üç noktadan eğme deneyleri, düşük hızlı darbe deneyleri, dinamik mekanik analiz deneyleri ve ısıl iletkenlik deneylerinin değerlendirme kriterleri ve bu deneylere ait diyagramların nasıl elde edildiği hakkında bilgi verilecektir.

5.1. Çekme ve Üç Noktadan Eğme Deneyleri

Polimer matrisli kompozitlerin çekme ve üç noktadan eğme davranışlarını etkileyen faktörler; kompozit malzemenin bileşenleri, üretim yöntemi, tabakaların yönleri, numune hazırlama safhası, numunenin koşullandırılması, deneyin yapıldığı ortam şartları, numunenin uygun bağlanması ve konumu, deney hızı, sıcaklık, numunenin içerdiği boşluk miktarı, takviyenin hacimsel oranıdır [79]. Bu tez çalışmasında tüm imalat parametreleri sabit tutulup ağırlıkça farklı oranlarda ÇCKNT (%0,1; %0,3; %0,5; %0,7; %1) kullanılarak AFTK nano kompozitler imal edilmiştir. ÇCKNT'ler AFTK'lerin çekme ve üç noktadan eğme deneylerinde mukavemet ve şekil değiştirme büyüklüklerinde değişiklere neden olmaktadır . Bu değişimler matriste meydana gelen hasar mekanizmalarıyla açıklanabilir.

5.1.1. Fiber takviyeli kompozitlerde hasar mekanizmaları

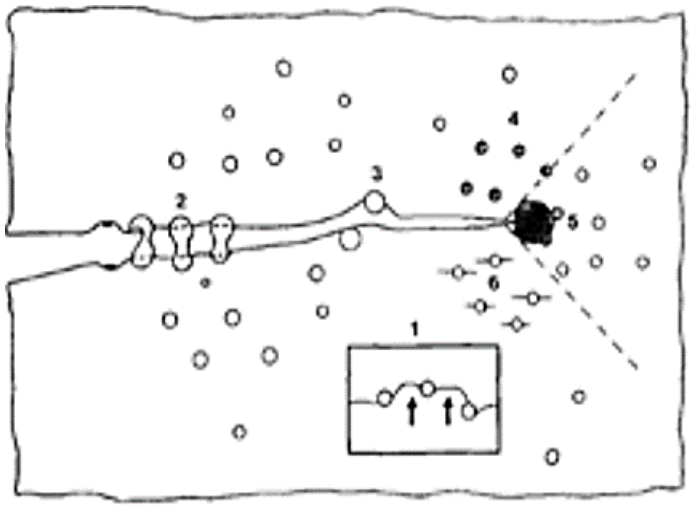
Tabakalı kompozit malzemeler, metalik malzemelere göre farklı hasar tiplerine sahiptir. Şekil 5.1.'de fiber takviyeli kompozitlerde meydana gelebilecek hasar türlerini göstermektedir. Çekme yükü altında kompozit tabakada Şekil 5.1.a'da gösterildiği gibi matriks çatlağı, fiber köprüsü, fiber kopması, fiber sıyrılması ve fiber-matriks ayrılması hasarlarının birkaçı meydana gelebilir. Düzlem dışı gerilmeler Şekil 5.1.b'de görüldüğü gibi tabaka ayrılmasına sebep olabilir. Şekil 5.1.c'de ise basma yüklemesiyle oluşan fiberlerin mikro burkulması gösterilmiştir. Kompozit malzemede tabaka ayrılması olmuş bölge veya boşluk mevcutsa, Şekil 5.1.d'de gösterildiği gibi basma yükü etkisiyle makroskobik tabaka ayrılması burkulması meydana gelebilir [96].



Şekil 5.1. Kompozitlerde hasar tipleri a) düzlem içi hasar, b) tabaka ayrılması, c) mikro burkulma, d) tabaka ayrılma burkulması [96]

5.1.2. Fiber takviyeli kompozitlerde toklaştırma mekanizmaları

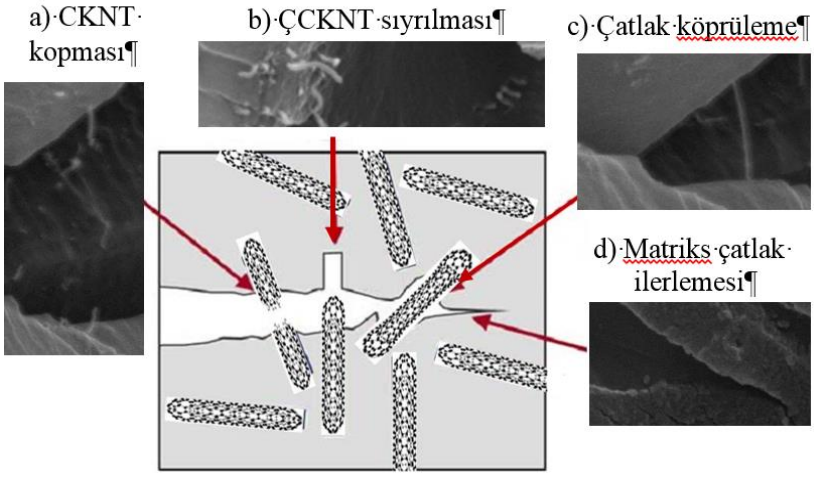
Epoksi reçineye yapılan nano partikül ilavesinin nasıl tokluk artışı sağladığı ve matrisi nasıl modifiye ettiği Şekil 5.2'de açıklanmıştır. Literatürde birçok araştırmacı, gevrek bir malzemeye parçacıkların eklenmesi ile kırılma enerjisinin artmış olduğunu gözlemlemişler ve bu tokluk artışını gerçekleşen bir dizi mekanik olaya atfetmişlerdir.



Şekil 5.2. Epoksi matris toklaştırılma mekanizması şematik gösterimi [97]

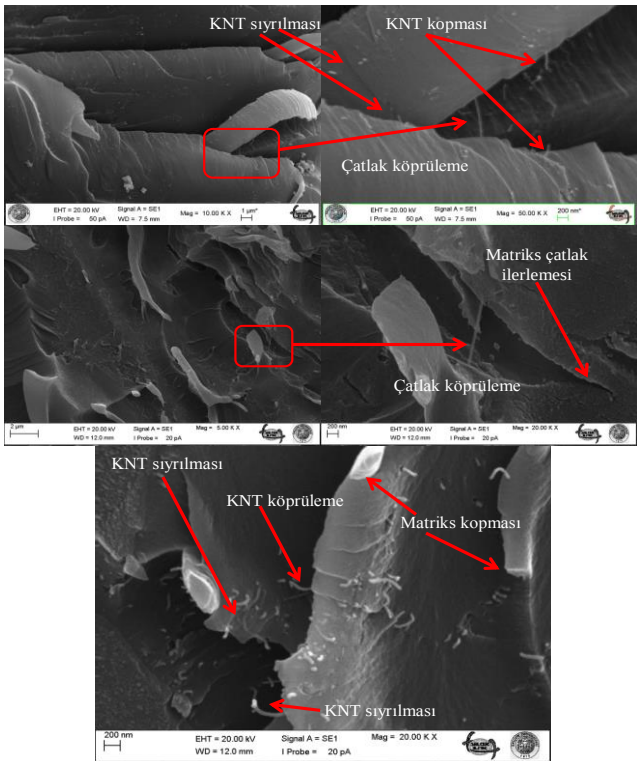
Raymond, epoksi matrisin termoplastik partiküllerle tokluğunun arttırılması üzerine yaptıkları çalışmada bu mekanizmaları Şekil 5.2'deki gibi şematik olarak açıklamıştır [97].

Bu gösterimde çatlak pinleme (crack pinning) olarak adlandırılmakta ve bu mekanizmada çatlağı içinden geçirmeyen rijit parçacıklar çatlağı durdurarak veya kendi üzerinden basamak atlatarak daha fazla enerji absorblanmasını sağlamaktadır. Parçacığın çatlağı kapamaya çalışan bir yay gibi davrandığı [98] parçacık köprülenmesi (particle bridging) olarak adlandırılan 2 numaralı mekanizmada ise epoksi reçineye ilave edilen parçacığın esneyerek yırtılması ile tokluğun arttığı açıklanmıştır [99]. Çatlak saptırma (crack path deflection) olarak gösterilen 3 numaralı mekanizmada ise çatlak parçacıkla karşılaşıp, çatlak ana düzleminin sapması ve yüzey alanının artması ile enerji artışına sebep olmaktadır. Ara yüzey yapışmasının az olduğu durumlarda gözlenen parçacık sıyrılması (debonding) 4 numaralı mekanizma, çatlağın kollara ayrılarak dallanması (bifurcation) 5 numaralı mekanizma ve mikro çatlak oluşumu 6 numaralı toklaştırma mekanizmalarıda Şekil üzerinde şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.3. ÇCKNT'lerin muhtemel kırılma mekanizmaların tanımlanması [121]

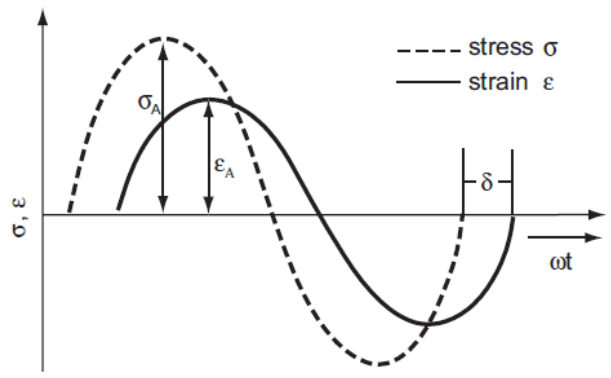
Şekil 5.4'de Ekrem yaptığı çalışmada [121] karbon nanotüplerin reçine tokluğunda artışa sebep olduğunu belirlemiş ve bu artışın sebeplerini SEM görüntüleri yardımıyla açıklamıştır.



Şekil 5.4. ÇCCNTler ile takviye edilmiş epoksi yapıştırıcılarda tokluk mekanizmalarının SEM görüntüsü [100]

5.2. Dinamik Mekanik Analiz Deneyleri

DMA; zaman ve sıcaklığa bağlı olarak değişken yük altında malzemede meydana gelen mekanik değişimleri kayıt altına alır. Bu testte uygulanan mekanik yük genliği belirlenebilir bir deformasyona neden olur. Şekil 5.5'de bu değişim gösterilmiştir. Ayrıca bu grafik ile E^*,G^*, K^*, ve L^* büyüklükleri belirlenebilir. Bu büyüklükler detaylı olarak ASTM D 4092 [101] standartından incelenebilir.



Şekil 5.5. Liner viskoelastik bir malzemenin mekanik yüklemeye cevabı [102]

Kompleks modül E^* gerilmenin gerinime oranıdır ve rijitliği temsil eder. Kompleks modül depolama modülü (real part) ve kayıp modülünden (imaginary part) oluşur. Şekil 5.6'daki formüllerden faydalanılarak kompleks modül hesaplanır. Bu büyüklükler malzeme özelliklerine uygulanan frekansa ve ölçüm şartlarına bağlıdır.

$$|E^*| = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_A}$$

$$|E^*| = \sqrt{[E'(\omega)]^2 + [E''(\omega)]^2}$$

$$E'(\omega) = |E^*| \cdot \cos\delta$$

$$E''(\omega) = |E^*| \cdot \sin\delta$$

$$\tan\delta = \frac{E''(\omega)}{E'(\omega)}$$

Şekil 5.6. Kompleks modül E^*, depolama modülü E', kayıp modülü E'' ve kayıp faktörü tan δ formülasyonu [102]

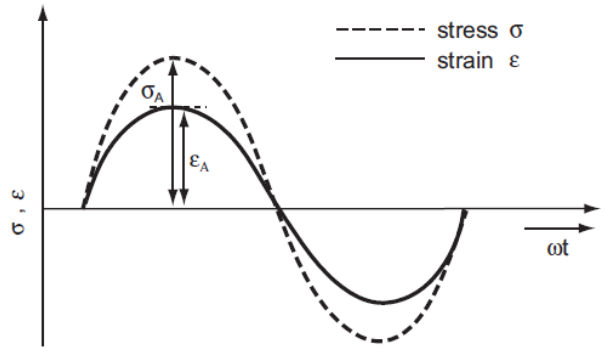
ISO 6721-1'e göre depolama modülü viskoelastik malzemelerde rijitliği ve yükleme çevrimi boyunca depolanan enerjiyi ifade eder [103].

Kayıp modülü ise yükleme esnasında kaybedilen enerjiyi temsil eder. Bu enerji titreşim esnasında meydana gelen iç hasarlar ya da iç sürtünmelerden dolayı oluşan ısı kaybından meydana gelir. Genellikle MPa ile ifade edilir [103].

Depolama modülü elastik özellikleri değerlendirmede, kayıp modülü ise viskoelastik özellikleri değerlendirme kullanılır.

Kayıp faktörü, kayıp modülünün depolama modülüne oranıdır. Kaybedilen enerjiyi açıklar. Ve viskoelastik bir sistemdeki iç sürtünmeleri temsil eder. Kayıp faktörünün büyüklüğü malzemenin daha az elastik olduğunu gösterir. Başka bir değişle kayıp faktörü düşük olan malzeme daha elastiktir kanısına varılabilir.

Şekil 5.7'de liner elastik bir malzemenin gerilme deformasyon diyagramı verilmiştir. Gerilme ve deformasyon faz açısı 0 dır. Yani kompleks modül gerilmenin gerinmeye oranına eşittir (δ=0, bu yüzden cos 0=1; sin 0=0 dolıyası ile E^*=E'). Çelik liner elastik malzemeler için çoğunlukla örnek gösterilebilir.



Şekil 5.7. İdeal elastik malzemenin gerilme-gerinme diyagramı [102]

5.3. Isıl İletkenlik Deneyleri

Isıl iletkenlik değeri malzemenin fiziksel bir özelliği olup, birim uzunluğundaki bir maddenin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının 1 ºC olması durumunda birim yüzey alanından geçen ısı miktarı olarak tanımlanır. Bütün maddelerin ısıl iletkenlik değerleri farklı olup en düşük ısıl iletkenlik değerleri gazlarda, en büyük değerler ise saf metallerde görülmektedir. Bir katının ısıyı enerji olarak depolamasıyla katının sıcaklığı ve boyutları artar. Katı malzeme ısıtıldığında ısıyı hem soğurur hem de yayar. Malzemenin ısıyı soğurması ısı kapasitesi olarak adlandırılır. Diğer bir sonuç olan ısıyı yayması veya ısıyı iletmesi termal iletkenlik olarak bilinir [104].

Ölçüm prensibi Şekil 5.8'de görülen ısı akış metre metodundaki temel mantık, bir ısıl direnç boyunca sıcaklık düşüşünü ölçerek ısı akısını hesaplamaktır. Bunun için bir elektrik rezistansı boyunca meydana gelen voltaj düşmeleri analiz edilerek neticeye varılır. Bu iş için ya sertifikalı bir rezistans ya da ısı akış sensörü kullanılır. Çoğu ısı akış sensöründe ısıl çifte seri bağlı ince bir seramik veya plastik plaka vardır. Plaka boyunca meydana gelecek olan voltaj düşmesiyle sıcaklık düşmesi orantılıdır. Isı akış sensörleri genellikle ısı akısı iyi bilinen bir kararlı hal ortamında kalibre edilmişlerdir. Tasarım olarak sıcak plaka düzeneğine çok benzerlik göstermekle beraber oradaki sıcak plaka yerine burada ısı akış sensörleri kullanılmaktadır. İnce bir tel, aynı özellikte iki refraktör plaka arasına yerleştirilerek ölçüm yapılır. Sabit bir elektrik gücü tel vasıtasıyla onu çevreleyen refraktöre iletilir ve telin sıcaklığı izlenir. Eğer refraktör yüksek ısıl iletkenliğe sahipse tel sıcaklığı düşük, yalıtkanlığı fazla olursa tel sıcaklığı yüksek olur [105].



Şekil 5.8. Isı akış metoduna göre ölçüm yapan deney cihazı çalışma prensibi

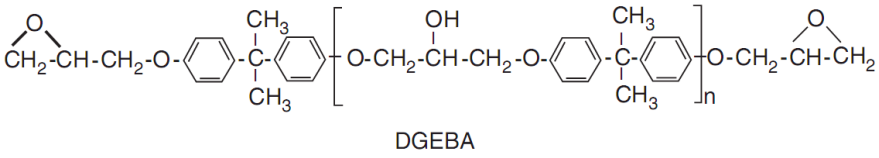
Isı akış metre metodu genellikle izolasyon malzemeleri, polimerler, yapı elemanları, cam ve seramikler için kullanılır. Isı akış metre metodu için sıcaklık limiti 200 ^{o}C, mukayeseli metot için ise 1300 ^{o}C‘ dir. Düşük sıcaklıklarda hata payı %3 civarında iken yüksek sıcaklıklarda bu oran %10 ile %20 arasında değişmektedir [105].

6. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma; ÇCKNT/epoksi karışımının hazırlanması, epoksi veya ÇCKNT/epoksi karışımının kalıp üzerindeki cam fiber yığınları içerisine gönderilmesinden oluşmaktadır. KNT'lerin sahip oldukları büyük özgül yüzey alanları nedeniyle epoksi reçine içerisindeki dağılımı zorlaşmaktadır. Ayrıca, KNT'lerin ilavesi ile epoksi reçinelerin viskoziteleri artmakta ve fiber yığını içerisine gönderilen epoksi reçineler fiber yığınlarının sebep olduğu filtreleme etkisi nedeniyle üretim güçleşmektedir. Bu bölümde, yukarıda bahsi geçen üretim süreçleri ve üretilen tabakalı nano kompozitlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan test yöntemleri tanımlanmıştır.

6.1. Malzemeler

Bu çalışmada epoksi matrisli kompozitler üretilmiş ve incelenmiştir. Termoset bir polimer olan epoksi; epoksid monomerinin poliamid sertleştiriciler ile reaksiyonu sonucunda oluşmasıdır. Ayrıca epoksi reçineler kaplama ve yapıştırıcı olarak da kullanılabilir. Çevreye karşı bozulma direnci ve mekanik dayanımları açısından epoksi reçineler göze çarpmaktadır. Özellikle birçok çözücü ve kimyasala karşı olan dirençleri ve çok çeşitli yüzeylere kolaylıkla bağlanabilmesi epoksi reçineleri önemli bir bağlayıcı sınıfına sokar. Epoksid monomerlerin ve poliamidlerin polimerleşmeden önce yüksek viskoziteye sahip olmasına rağmen vakum infüzyon yönteminde en sık kullanılan reçine türüdür. Ayrıca kürleşme esnasında epoksi reçinelerin düşük büzülme oranlarından dolayı iç gerilme minimuma düşürülür [125]. Şekil 6.1'de bu çalışmada kullanılan doymamış bir epoksi türü olan diglisidil ether bisfenol A'nın moleküler yapısı verilmektedir.



Şekil 6.1. Epoksi diglisidil ether bisfenol A'nın moleküler yapısı [106]

Bu çalışmada tercih edilen epoksi reçine ticari olarak bulunabilen ve Momentive firması tarafından sağlanmış olan MGS-L285 laminasyon reçinesidir. Bu reçine düşük viskoziteli ve iki fazlı olup (%80-90 diglisidil eter bisfenol A ve %10-20 alifatik diglisidil eter karışımı)

kürleştiricisi ise yine Momentive firması tarafından sağlanan MGS-H285 (%70-90 sikloalifatik amin ve %10-30 polioksil alkil amin karışımı) dir. Kürleme işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilir ve jelleşme zamanı firmanın belirttiği oranlarda kullanıldığında (60:40) yaklaşık 30 dakikadır. Bu reçine VARTM yöntemi ile fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde tercih edilen reçine grubundadır.

Tez çalışmasında kullanılan ÇCKNT'ler düşük maliyetleri ve epoksi reçineler içerisindeki homojen dağıtılabilirliğinin kolay olması sebebiyle tercih edilmiştir. TIMESNANO firmasından tedarik edilen ÇCKNT'lerin saflığı %95'den büyüktür, 30 nm dış çapta ve 10 ila 30 μm uzunluğa sahiptir.

Bu tez çalışmasında kullanılan alümina elyaflar yüksek korozyon direnci, yüksek ısıl direnç ve düşük ısıl iletkenlikleri sebebiyle takviye elemanı olarak tercih edilmiştir. Çizelge 6.1'de kullanılan alümina elyafların teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 6.1. Alümina elyafın teknik özellikleri

Maksimum çalışma sıcaklığı	1260
Firma-Kod	Huolongwool- HLGX-211
Çap (μm)	3～5
Al_2O_3（%）	≥47
Al_2O_3＋SiO_2（%）	≥97
Al_2O_3＋SiO_2＋ZrO_2（%）	-
Fe_2O_3（%）	≤1. 0
K_2O+Na_2O（%）	≤0,5

6.2. Epoksi Reçine İçerisine Karbon Nanotüplerin Katılması

Bu işlem, KNT'lerin reçine içerisinde homojen bir Şekilde dağıltılma çabasıdır. Polimer reçine içerisinde KNT'lerin dağıtılması için birçok kimyasal ve fiziksel metot vardır. Bu tez çalışmasında KNT'lerin homojen dağıtılması için ultrasonikasyon metodu kullanılmıştır.

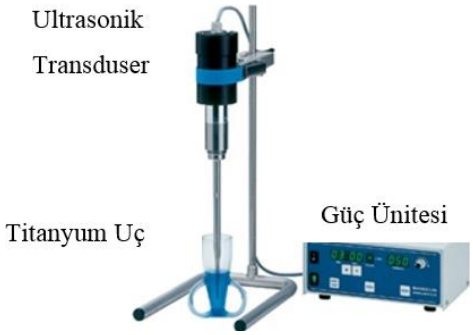
Fiziksel dağıtım yöntemleri ile KNT'lerin yüksek viskoziteli polimerler ile (özellikle termosetler) KNT'leri birbirinden ayıracak büyük kayma kuvvetleri oluşturulmalıdır. Bu

gibi durumlarda ekstrüzyon en çok kullanılan yöntemdir. Ekstrüder besleyicisinin içine KNT'ler pelletler halinde atılır ve ekstrüder yardımı ile polimer ile karıştırılır. Ayrıca polimerin sıcaklığı arttırılarak viskozitesi düşürülür. Bu sıcaklık kullanılan polimerin kimyasal özelliklerini bozacak eşik değerini geçmemelidir. Ayrıca, ekstrüder hızı arttıkça karışımın homojenliği artmaktadır [79].

Karbon nanotüpler düşük veya orta düzeyde viskoziteye sahip reçineler ile ultrasonikasyon metoduyla karıştırılabilir. İşlem esnasında basınç dalgaları sıvı ortam içinde yayılır. Böylece yüksek ve alçak basınç bölgeleri oluşur. Ses frekansı bu bölgelerin yoğunluğunu belirler. Düşük basınç bölgelerinde, yüksek şiddetli ses dalgaları küçük vakum boşluklarının oluşmasına neden olabilir. Bu baloncuklar kritik hacime ulaştıklarında daha fazla enerji yutamazlar ve yüksek basınç bölgesinde sesli bir şekilde patlarlar. Bu olaya ultrasonik kavitasyon adı verilir [79]. Bu patlama ile yüksek sıcaklık ve basınç açığa çıkar. Ayrıca bu baloncuklar patladığında yüksek hızlı sıvı jetlerini oluşturur [107]. Bu sıvı jet akımları yeteri kadar enerjiye sahip olursa karbon nanotüpleri bir arada tutan bağ kuvvetini yener ve sıvı içerisinde dağılımını sağlar.

Ultrasonikasyon, içine karbon nanotüp atılmış bir sıvı içeren kabın ultrasonik banyoya koyulması veya ultrasonik dalga yayabilen bir metal çubuğun bu kabın içine daldırılması ile sağlanabilir [107].

Bu tez çalışmasında, KNT'lerin epoksi içinde homojen bir Şekilde dağıtılabilmesi için uçlu sonikasyon yöntemi kullanılmıştır. İlk olarak, ÇCKNT/epoksi karışım oranının ağırlıkça belirlenen oranlarda olması için uygun miktarda ÇCKNT ve epoksi reçine tartılmıştır. Epoksi reçine miktarı üretimi planlanan nanokompozit tabakanın hacimsel oranının istenilen değerde olması esasına dayanılarak hesaplanmıştır. Daha sonra, karbon nanotüpler aseton içerisinde 2 dakika boyunca uçlu sonikasyon (Şekil 6.2) ile dağıtılmıştır. Bu süspansiyon epoksi reçineye ilave edildi ve 10 dakika daha uçlu sonikasyon ile karıştırılmıştır.



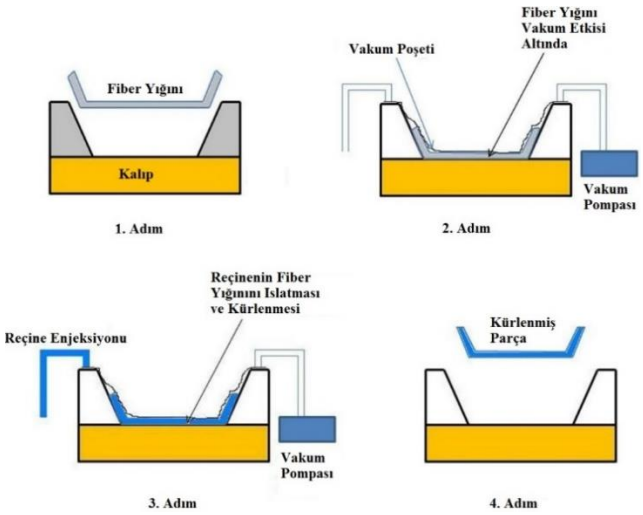
Şekil 6.2. KNT'lerin epoksi reçine içerisinde dağıtılmasında kullanılan uçlu sonikatör

Sonikasyon sırasında, sonikasyon süresi ve sonikatör ucun epoksi reçine içerisine ne kadar daldırıldığına bağlı olarak karbon nanotüplerin boyları kısalmakta ve karışımın sıcaklığı artmaktadır. Uçlu sonikasyonda, eğer sonikasyon süresi uzun ise (5'dk dan fazla), ucun karışım yüzeyinin hemen altında konumlandırılması karışım sıcaklığının kontrolü açısından önemlidir. Fakat bu sıcaklık artışı epoksi viskozitesini düşüreceği ve oluşabilecek hava kabarcıklarını azaltacağı için istenilen bir durumdur. Bu çalışmada, sonikasyon süresi 5'dk seçilmiştir. Karışım işlemi tamamlandığında karışım sıcaklığı yaklaşık 50 ºC civarına ulaşmaktadır. Daha sonra karışımda bulunan asetonun tamamını uzaklaştırmak için numuneler 70 ºC sıcaklığındaki vakumlu fırında 24 saat bekletilmiştir. KNT içermeyen numunelerin üretiminde oluşabilecek farklılıkları önlemek için saf epoksiye de aynı işlemler uygulanmıştır.

6.3. Vakum İnfüzyon Yöntemi İle Nanokompozit Levha Üretimi

Vakum İnfüzyon Yöntemi (VARTM) sıvı kalıplama yöntemi olup, reçinenin fiber yığınlarına vakum altında emdirilmesi temelinde çalışır. Reçine kalıp içerisinde oluşturulan vakum ile kalıp içerisine çekilir. Düşük maliyetli, zaman tasarrufu sağlayan, tek yüzeyli bir kalıp ile gerçekleştirilebilen ve oda sıcaklığında da üretim yapılmasına imkân veren bir yöntemdir. Bu yöntemin amacı, fiberler arasındaki boşlukların sıvı reçine katılaşmadan önce reçine ile doldurulmasıdır [108]. Şekil 6.3'de VARTM tekniğinin sıralaması görsel olarak eklenmiştir. Sıralama şu şekildedir:

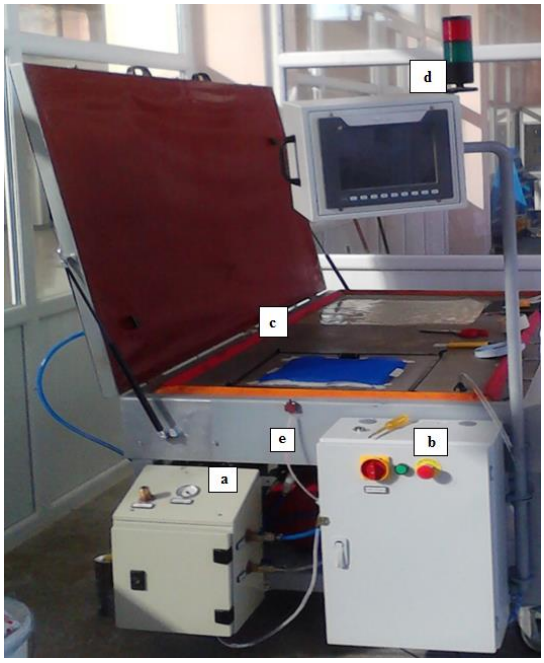
1. Kalıbın hazırlanması ve fiberlerin kalıp üzerine serilmesi
2. Kalıbın vakum torbası ile kaplanması ve vakum sağlanması
3. Reçinenin kalıp içine emdirilmesi
4. Kalıpta reçine emdirilmiş parçanın kürlenmesi



Şekil 6.3. En genel halde VARTM ile kompozit parça üretiminin şematik gösterimi [109]

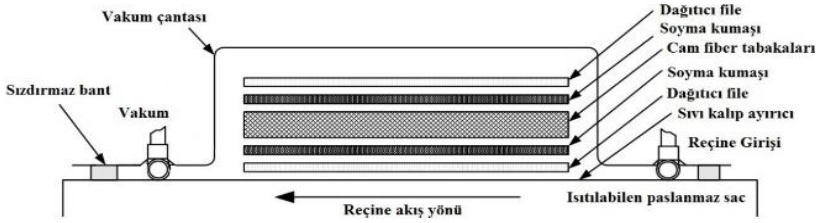
KNT'lerin epoksi reçine içerisinde homojen olarak dağıtılması ne kadar önemliyse reçinenin elyaflara başarıyla emdirilmesi de o kadar önemlidir.

VARTM'in tabakalı kompozitlerin üretiminde tercih edilme sebebi özellikle kompozit içerisinde oluşabilecek hava boşluklarının önüne geçebilmesi [110], ucuz olması ve büyük boyutlarda uygulanabilmesidir. Literatürde bu yöntem farklı adlar ile bulunabilir [127]. Temel uygulama mantığı kuru fiberlerin basınç altında reçine ile ıslatılması esasına dayanır. Nanokompozit üretiminde kullanılan vakum infüzyon ünitesi Şekil 6.4'de gösterilmiştir. Vakum infüzyon ünitesi basit olarak sıcaklığı ve vakum basıncını kontrol edilebilen ünite, paslanmaz çelik sac ve vakum pompasından oluşmaktadır.



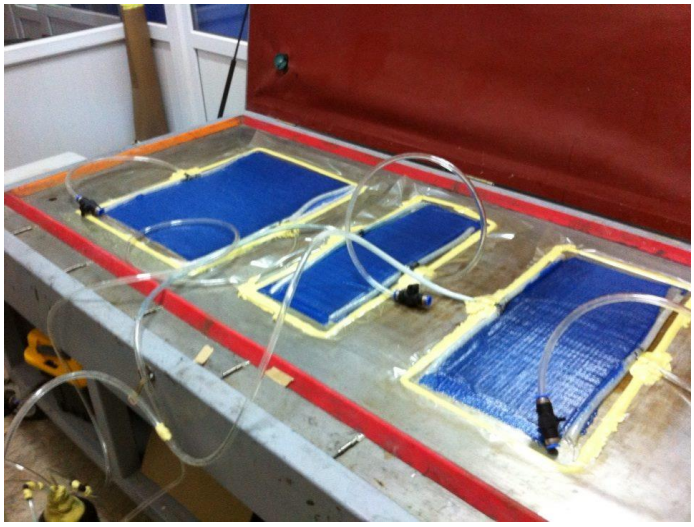
Şekil 6.4. Hibrit nanokompozit üretiminde kullanılan sıcaklık ve basınç kontrollü VARTM ünitesi ve bileşenleri a) sıcaklık ve basınç sensörleri panosu b) elektrik kontrol paneli c) sıcaklığı kontrol edilebilen çelik satıh d) dokunmatik kontrol paneli e) vakum pompası

Bu yöntemde, paslanmaz çelik saç üzerinde kalıplamanın yapılacağı bölge öncelikle kalıp temizleyicisi ile temizlenir. Temizlenen bölgeye kalıp ayırıcı sürülür ve kalıp ayırıcının katılaşması için 10 dakika beklenir. Kalıp ayırıcı katılaştıktan sonra üzerine dağıtıcı file ve soyma kumaşı serilir. Bu tabakaların üzerine, uygun ölçülerde kesilen iki tabaka örgü alümina kumaşı yerleştirilir. Alumina elyaf yığınının üzerine tekrar soyma kumaşı ve dağıtıcı file serilir. Reçine enjeksiyonunun yapılacağı giriş ve vakum yapılacağı çıkış spiralleri yığınların etrafına yığın uzunluğunda kesilerek yerleştirilir. Son olarak vakum çantası oluşturularak alümina elyaflar epoksi katılmasına hazır hale getirilir. Bu tabakalama işlemi şematik olarak Şekil 6.5'te gösterilmektedir.



Şekil 6.5. VARTM üretim işleminde malzeme üretiminde kullanılan yardımcı bileşenlerin yerleşiminin şematik gösterimi [51]

Epoksi veya ÇCKNT/epoksi karışımı alümina elyaf içine gönderilmeden önce kürleştiricisi üretici firma tarafından belirlenen oranda katılır ve 2 dakika boyunca el ile karıştırılır. Reçine emdirilme işleminden önce vakum torbası içindeki hava 0,8 bar vakum uygulanarak çekilir. Ayrıca, epoksi veya ÇCKNT/epoksi karışımının viskozitesini azaltmak için paslanmaz çelik sac ön ısıtma ile 50 ^{o}C' ye ısıtılır. Fiber yığını, içindeki havanın tamamen boşaltılabilmesi için 5 dakika vakum altında bekletildikten sonra vakum 0,3 bar'a düşürülür. Daha sonra, emme girişi açılarak epoksi veya ÇCKNT/epoksi karışımı fiber yığını içeresine gönderilir. Bu esnada vakumun 0,15 bar' a düşmesine izin verilerek alumina fiber tabakalarının rahatlamasına ve dolayısı ile tabakalar arasındaki mesafenin açılmasına imkân verilerek epoksi veya KNT/epoksi karışımının tabakalar arasına daha kolay nüfuz edilmesi sağlanır. Epoksi veya ÇCKNT/epoksi karışımı boşlukları doldurması için 10 dakika beklenir. Üretilen nanokompozit levha kademeli olarak 70 ^{o}C'de 1 saat ve 120 ^{o}C'de 4 saat kürlenir. Şekil 6.6'de vakum altında reçine emdirilmiş elyaflar görülmektedir.



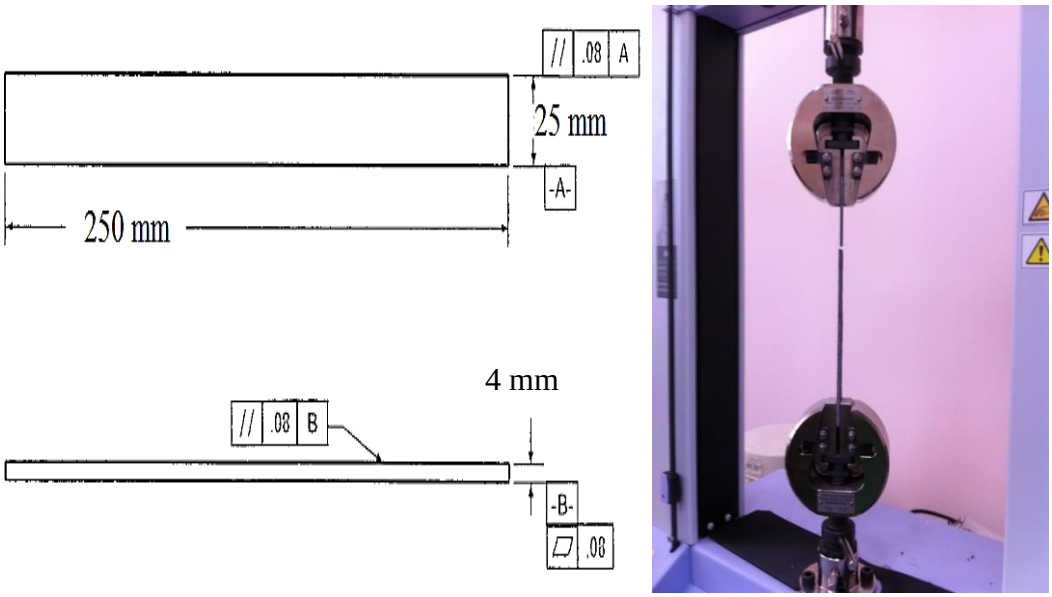
Şekil 6.6. VARTM yöntemi ile üretilmiş AFTK'ler

VARTM ile ÇCKNT katkılı numuneler ve katkısız kompozit numuneleri üretilmiştir. İlk numunelerde ÇCKNT ilavesi yoktur. Diğer numunelerde ise ağırlıkça %0,1; %0,3; %0,5; %0,7 ve %1 oranında ÇCKNT ilavesi mevcuttur. Bu numunelerin mekanik, termomekanik ve termal özellikleri incelenmiştir.

6.4. Çekme Deneyleri

Bu çalışmada üretilen nanokompozitlerin tek eksenli çekme etkisi altındaki dayanım ve çekme elastisite modülünün bulunabilmesi için ASTM D 3039/D 3039M-14 standardına uygun olarak çekme deneyleri yapılmıştır [111]. Selçuk Üniversitesi'nde bulunan Shimadzu AGS-X Universal Tensile Tester çekme test cihazıyla deneyler gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, ASTM D 3039/D 3039M-14 standardına uygun olarak hazırlanan numunelerin genişlikleri 25 mm, boyları ise 250 mm dir. Numunelerin kalınlıkları en az 3,5 mm olmak üzere değişkenlik göstermektedir. İlgili standartta belirtildiği üzere, numunelerin çekme çenesi ile temas eden yüzeyleri zımpara kâğıdı ile sarılarak hem numuneler çene baskısından korunmuş hem de çeneler ile numuneler arasındaki temas alanı arttırılarak numunelerin kayması engellenmiştir. Her bir numune türü için en az beş numune çekme deneyine maruz bırakılmıştır. Çekme deneylerinde çekme hızı ilgili standarda uygun olarak 2 mm/dk olacak şekilde çekme deneyleri yapılmıştır.



Şekil 6.7. Şematik olarak çekme numunelerinin boyutları ve tek eksenli çekme yüklemesine maruz bırakılmış bir tabakalı nanokompozit numunesi

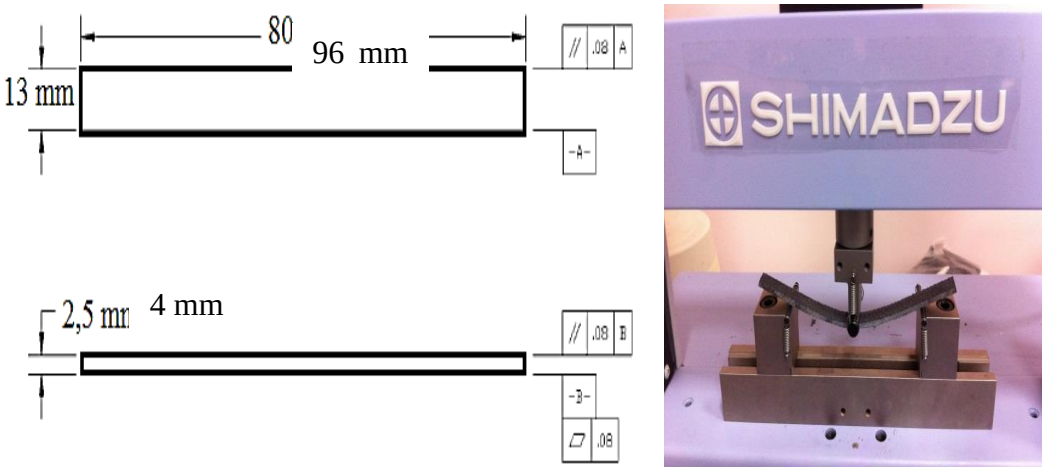
Her bir numuneye uygulanan yük P ve yer değiştirme δ değerleri anlık olarak kayıt edilmiş ve numunelerin çekme dayanımları hesaplanmıştır.

6.5. Üç Noktadan Eğme Deneyleri

Bu çalışmada üretilen nano kompozitlerin eğme dayanımı özelliklerinin ve eğme elastisite modülünün bulunabilmesi için ASTM D 7264/D 7264M-07 standardına uygun olarak üç noktadan eğme deneyleri yapılmıştır [112]. Eğme deneyleri Şekil 5.7'de verilen Shimadzu çekme cihazında gerçekleştirilmiştir.

Tabakalı kompozit malzemelerin eğme özellikleri, numunenin hangi yüzeyinin basma gerilmesi etkisi altında olduğuna göre değişir. Her ne kadar üretilen tabakalı kompozitlerin simetrik olduğu düşünülsede, küçük değişiklikler tarafsız eksenin kaymasına neden olabilir ve tabakalı kompozitin simetrik olmayan davranış sergilemesi söz konusu olabilir. Tabakalı kompozitlerde eğme davranışı, kalınlığa, deney yapılan ortamın şartlarına ve deney hızına bağlı olarak değişebilir. Bu bağlamda her numune için yukarıda belirtilen şartların aynı olması elde edilecek deney bilgilerinin sağlıklı yorumlanabilmesi açısından oldukça önemlidir.

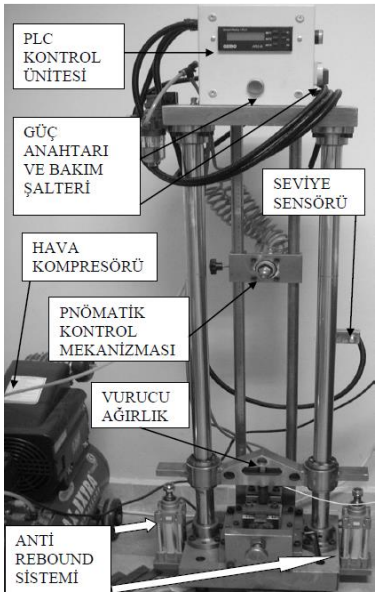
Bu çalışmada, ASTM D 7264/D 7264M-07 standardına uygun olarak hazırlanan numunelerin genişlikleri 13 mm olup kalınlık/mesnetler arası açıklık oranı 1/32 olarak alınmıştır. Her numune türü için en az 5 numune eğmeye maruz bırakılmıştır.



Şekil 6.8. Şematik olarak eğme numunelerinin boyutları ve üç noktadan eğme yüklemesine maruz bırakılmış bir tabakalı nanokompozit numunesi

6.6. Düşük Hızlı Darbe Deneyi

Bu çalışmada üretilen nanokompozitlerin düşük hızlı darbe davranışlarının belirlenmesi için ASTM D7136/D7136M – 12 standardına uygun olarak düşük hızlı darbe deneyleri yapılmıştır [113]. AFTK'lerin düşük hızlı darbe cevaplarının araştırılması için Selçuk Üniversitesinde özel olarak imal edilmiş düşük hızlı darbe test cihazı kullanılmıştır. Düşük hızlı darbe test cihazı Şekil 6.9'da görülmektedir. Deneylerde kullanılan cihaz ile değişik darbe enerji seviyelerinde ya da değişik darbe hızlarında darbe deneyleri yapılabilmektedir.



Şekil 6.9. Düşük hızlı darbe test cihazı

6.7. Dinamik Mekanik Analiz

Dinamik Mekanik Analiz (DMA) malzemelerin reolijik özelliklerini belirlemede kullanılan bir test metodudur. Deney Metravib marka DMA 01 DB cihazında gerçekleştirilmiştir. Camsı geçiş sıcaklılarını bulmak için ASTM D7028-07 standardından faydalanılmıştır [101].

6.8. Isıl iletkenlik Analizi

Bu çalışmada alümina elyafların ve üretilen tüm kompozitlerin termal iletkenlikleri ölçümleri Lasercomp fox 314 ısıl iletkenlik cihazı kullanılarak ısı akış metre metodu ile yapılmıştır.

6.9. Yakma Deneyleri

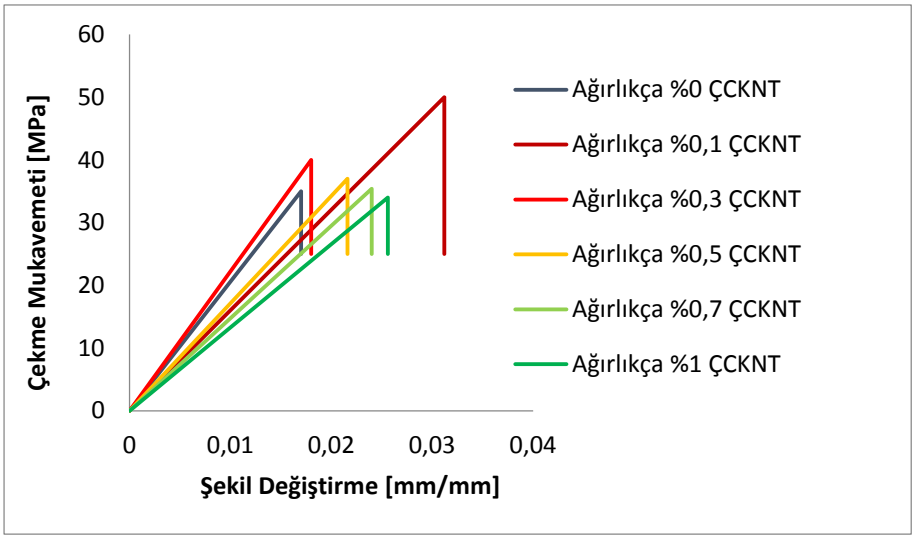
Deneylerde kullanılacak olan nano kompozitlere ait elyaf ve matris hacim oranlarının belirlenmesi amacıyla ASTM D 2584 standardına göre yakma deneyleri gerçekleştirilmiştir [114]. Yakma testi için 3 adet standartlara uygun 100*50 mm boyutlarında deney numunesi kesilmiştir. Bu numuneler hassasiyeti 0,01 mg olan hassas terazi ile tartılmıştır. Yakma numuneleri önceden 600 ^{0}C ısıtılmış fırında reçine tamamen yok olana kadar yakılmıştır. Geriye kalan alümina elyaf tekrar hassas terazide tartılarak kalan kütle belirlenmiştir. Kompozitin kütlesinden elyafın kütlesi çıkartılarak reçine kütlesi belirlenmiştir.

7. ARAŞTIRMA VERİLERİ VE TARTIŞMA

Bu bölümde vakum infüzyon yöntemi ile üretilen nanokompozitlerin çekme, eğme ve darbe deneylerinden elde edilen sonuçlar grafikler halinde verilmiş ve tartışılmıştır. Çekme deneyleri sonucunda kırılan numunelerin kırılma yüzeyleri incelenerek deneylerde elde edilen sonuçlar ile ilişkilendirilmiştir.

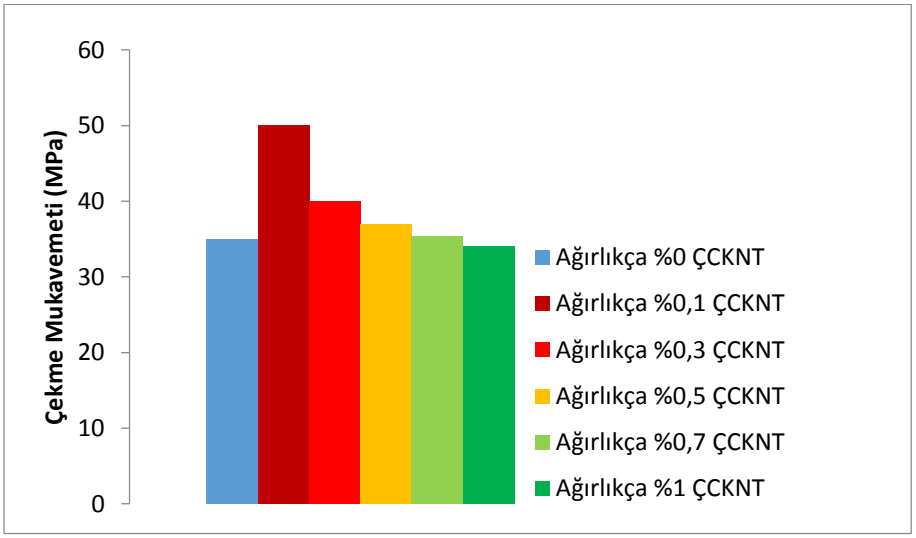
7.1. Çekme Deneyleri Sonuçları

Çekme deneyleri sonucunda elde edilen tipik çekme mukavemeti-şekil değiştirme grafiği Şekil 7.1'de verilmiştir. Çekme mukavemeti-şekil değiştirme grafiğinde görüldüğü gibi ÇCKNT'lerin epoksi matrise ilavesi kompozit malzemenin çekme mukavemeti davranışı etkilemektedir. ÇCKNT katkılı tabakalı nanokompozit malzemeler içerisinde en yüksek çekme dayanımını ağırlıkça %0,1 olan nanokompozitte görülmüştür. Artış yaklaşık olarak %42'dir. ÇCKNT ilavesinin çekme mukavemetini artırdığı literatürde yapılan çalışmalarda da gözlemlenmiştir [24-26, 32, 115]. Bu değerden daha büyük ilavelerde çekme dayanımı gitgide düşmektedir. Bunun temel nedeni özellikle VARTM ile üretilen kompozitlerde ağırlıkça %0,1 ilavesi üzerindeki miktarlarda kompozitte meydana gelen ÇCKNT topaklanması olarak tahmin edilmektedir [71-74]. Bu topaklanma hem ÇCKNT'lerin büyük yüzey alanlarından dolayı aralarında oluşan Van der Wals çekim kuvvetinden hem de akış esnasında dokuma kumaşın filtreleme etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu kümelenmeler matris içerisinde çatlak gibi davranış gösterirler ve malzemenin çekme mukavemetini düşürürler [72].



Şekil 7.1. AFTK'lerin çekme deneyi sonucu elde edilen çekme eğrileri.

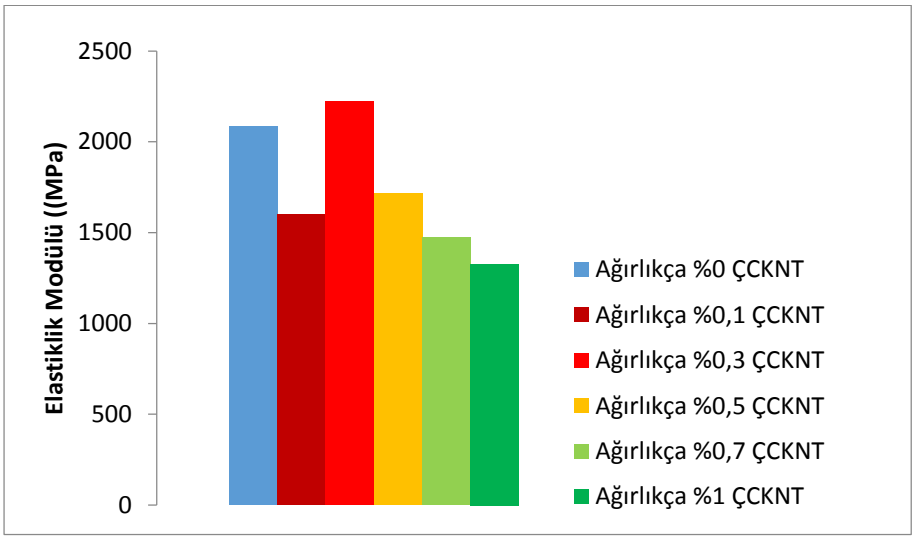
Üretilen tabakalı nanokompozitlerin çekme mukavemeti-şekil değiştirme grafiklerinden çekme dayanımı, elastisite mödülü ve şekil değiştirme miktarında ki değişimleri sayısal olarak incelenmiştir. Şekil 7.2'de görüldüğü gibi ÇCKNT katkısız numunelerin çekme dayanımı 35 MPa ağırlıkça %0,1 katkılı olan numunenin ise 50 MPa dır. ÇCKNT'ler epoksi matris içerisinde katıldığında çekme mukavemetinde yaklaşık %42 artış meydana gelmiştir.



Şekil 7.2. AFTK'lerin çekme deneyi sonucu ağırlıkça %0, %0,1; %0,3; %0,5; %0,7; %1 ÇCKNT katkı oranlarına göre (sırasıyla soldan sağa) elde edilen çekme mukavemeti değerleri

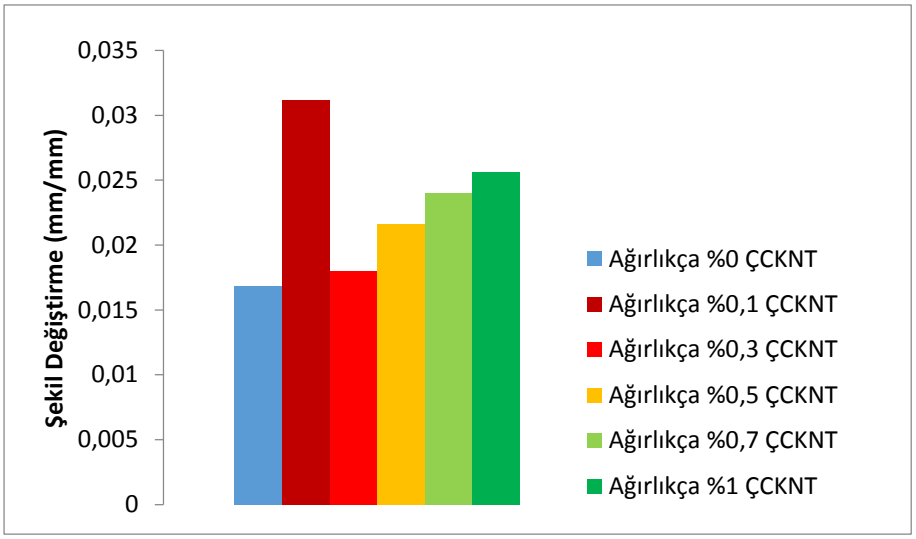
AFTK'lere ait tek eksenli çekme deneyinden elde edilen verilere göre hesaplanan elastikiyet modülleri Şekil 7.3'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ÇCKNT katkısız

kompozitlerin çekme elastikiyet modülü 2083 MPa olarak hesaplanmıştır. Ağırlıkça %0,1 ÇCKNT katkılı tabakalı nanokompozitlerin ise 1602 MPa belirlenmiştir. ÇCKNT katkısından sonra nanokompozitin elestikiyet modülleri yaklaşık %30 oranında düşmüştür. ÇCKNT'lerin elastik modülleri çok yüksek olmasından dolayı kompozitlerin elastklik modüllerinde artış beklense de şekil değiştirme miktarındaki yüksek artış elastiklik modülündeki azalmaya neden olmuştur.



Şekil 7.3. AFTK'lerin çekme deneyi sonucu ağırlıkça %0, %0,1; %0,3; %0,5; %0,7; %1 ÇCKNT katkı oranlarına göre (sırasıyla soldan sağa) elde edilen elastiklik modülü değerleri

AFTK'lere ait şekil değiştirme miktarları Şekil 7.4'de gösterilmektedir. Şekil 7.4'den ÇCKNT'lerin şekil değiştirme miktarlarını arttırdığı açıkça görülmektedir. Katkısız kompozitin şekil değiştirme miktarı 0,0168 (mm/mm) iken ağırlıkça %0,1 ÇCKNT katkılı kompozitin 0,0312 olarak belirlenmiştir. Bu artış yaklaşık olarak %85 dir. Bu sonuçlara göre, ÇCKNT'ler tabakalı kompozitlere ilave edildiğinde şekil değiştirme miktarlarını arttırmıştır.



Şekil 7.4. AFTK'lerin çekme deneyi sonucu ağırlıkça %0, %0,1; %0,3; %0,5; %0,7; %1 ÇCKNT katkı oranlarına göre (sırasıyla soldan sağa) elde edilen şekil değiştirme değerleri

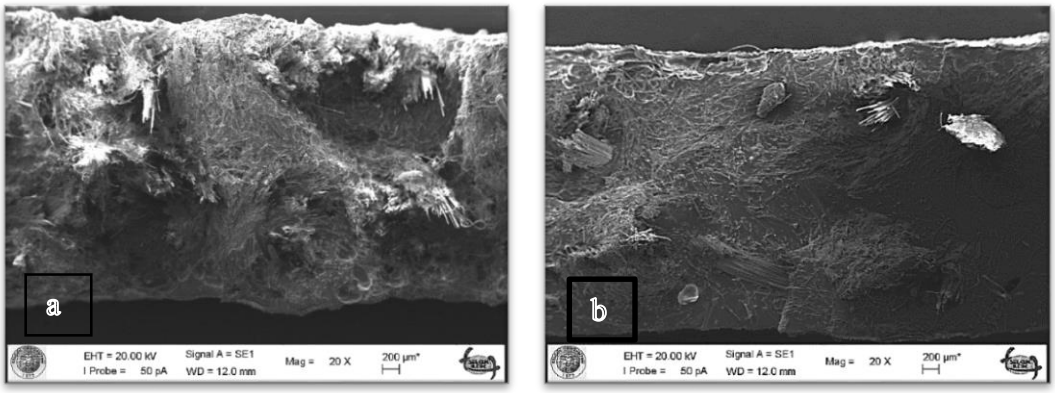
Deneysel karşılaştırmalar açıkça bizlere ÇCKNT'lerin tabakalı kompozit malzemenin çekme davranışını etklediğini göstermiştir. ÇCKNT'ler epoksi matris içerisine katıldığında hem kopma dayanımının hem de şekil değiştirme miktarının artmasını sağlamıştır. Çizelge 7.1'de çekme deneyi sonucunda elde edilen sayısal veriler toplu halde verilmiştir.

Çizelge 7.1. Çekme deneyi sonucunda elde edilen sayısal veriler

Ağırlıkça ÇCKNT Oranı [%]	**Çekme Mukavemeti [MPa]**	**Çekme Elastiklik Modülü [MPa]**	**Şekil Değiştirme [mm/mm]**
%0	35	2083	0,0170
%0,1	50	1682	0,0312
%0,3	40	2222	0,0180
%0,5	37	1712	0,0216
%0,7	35,4	1487	0,0240
%1	34	1328	0,0256

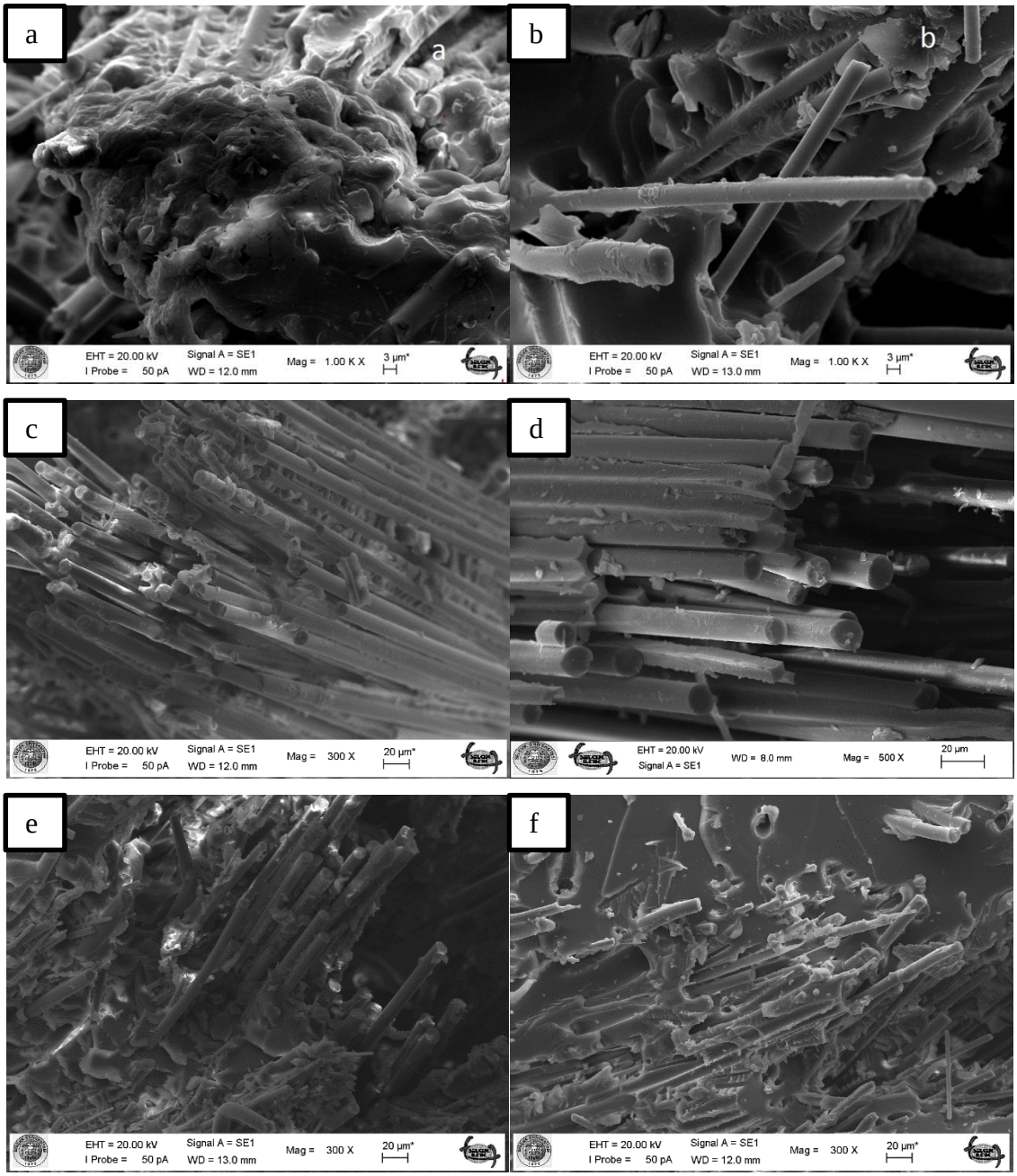
7.2. Çekme Numuneleri Kırılma Yüzeyi SEM Analizleri

Resim 7.1'de ÇCKNT katkılı ve katkısız numunelerin kırılma yüzeylerine ait sem görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.1a'da ÇCKNT katkısız numunenin kırılma yüzeyinde derin matris kopmaları açıkça görülmektedir. Şekil 7.1b'de ise yüzeyin daha az hasara uğradığı görülmektedir. Bunun temel nedeninin ÇCKNT katkısı ile matris elyaf bağlantısının daha iyi sağlandığı düşünülmektedir.



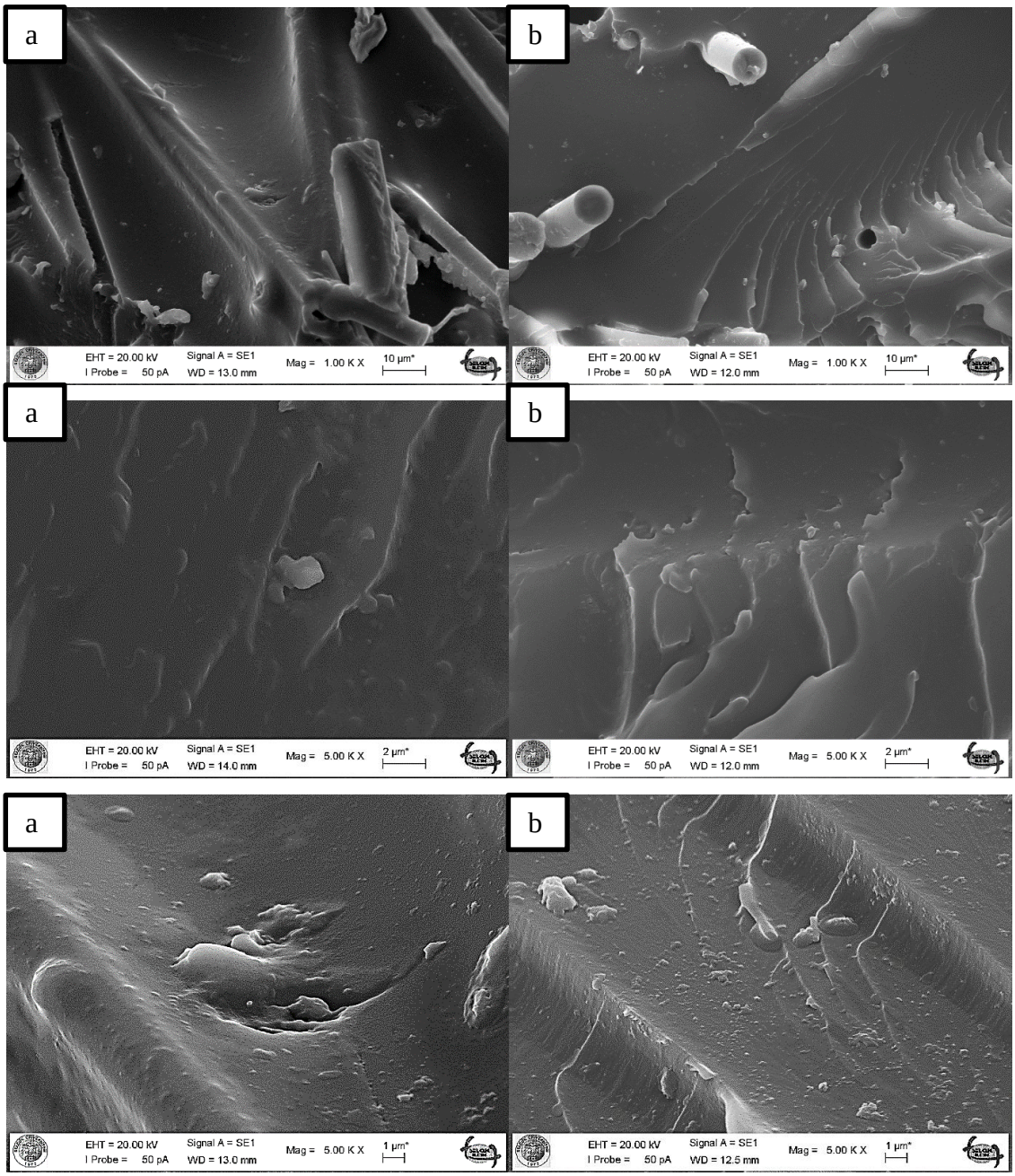
Resim 7.1. Üretilen nanokompozit malzemelerin çekme deneyleri ardından kırılma yüzeyleri SEM fotoğrafları a) ağırlıkça ÇCKNT katkısız b) ağırlıkça %0,3 ÇCKNT katkılı

Çekme deneyleri esnasında sıyrılan fiberlerin yüzey morfolojisi çekme deneyi esnasında yutulan enerjinin belirlenmesi için önemlidir. Resim 7.2e. ve Resim 7.2f'de sırasıyla ÇCKNT katkısız ve ÇCKNT katkılı numunelerin çekme deneyi ardından matris içerisinden sıyrılan fiberlere ait SEM görüntüleri verilmiştir. Fiberlerin yüzeyleri ne kadar pürüzlü olursa yutulan enerji o kadar artmış demektir [79]. Resim 7.2a ve Resim 7.2b'de fiberler üzerinde kalan epoksi miktarları görünmektedir. Resim 7.2b'de elyafların kolayca sıyrılması ve üzerindeki epoksi artıklarının çok az olması hasarın kolay gerçekleştiği sonucunu ifade etmektedir. Resim 7.2a'da görülen epoksi yoğunlaşması ve sıyrılmanın azalması hasarın zorlaştığına işarettir. Bu hasar zorlaşması, ÇCKNT'lerin fiber ile epoksi matris arasındaki ara yüzey tutunmasını arttırdığının göstergesidir. Bu tespit epoksi ile ÇCKNT'ler arasındaki kimyasal etkileşimden dolayı (kovalent bağlar ile) yapışmanın etkin bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Ma ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarda aynı sonuca işaret etmektedir [116]. Artan fiber pürüzlülüğü ve sıyrılma gerçekleşirken mekanik kilitlenme ile nanokompozitin şekil değiştirme miktarı artmıştır. Literatürde de araştırmacılar benzer sonuçlara ulaşmışlardır [117-118]. Resim 7.2c ve Resim 7.2d ise farklı oranlarda ÇCKNT katkılı numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Resim 7.2c'de ağırlıkça %0,1 katkılının numunenin sem görüntülerinde fiberlerin arasına reçinenin daha çok girdiği açıkça görülmektedir. Bunun temel nedeninin ÇCKNT katkısı ile reçinenin viskozitesinin artması olduğu düşünülmektedir. Sadeghian yaptığı çalışmada KNT katkısı arttıkça epoksi reçinenin viskozitesinin arttığını göstermiştir [113].



Resim 7.2. Üretilen nanokompozitlerin çekme deneyleri ardından kırılma yüzeyleri SEM fotoğrafları ağırlıkça a) %0,3 ÇCKNT Katkılı b) ÇCKNT Katkısız c) %0,1 ÇCKNT katkılı d) %1 ÇCKNT katkılı e) ÇCKNT katkısız f) %0,3 ÇCKNT katkılı

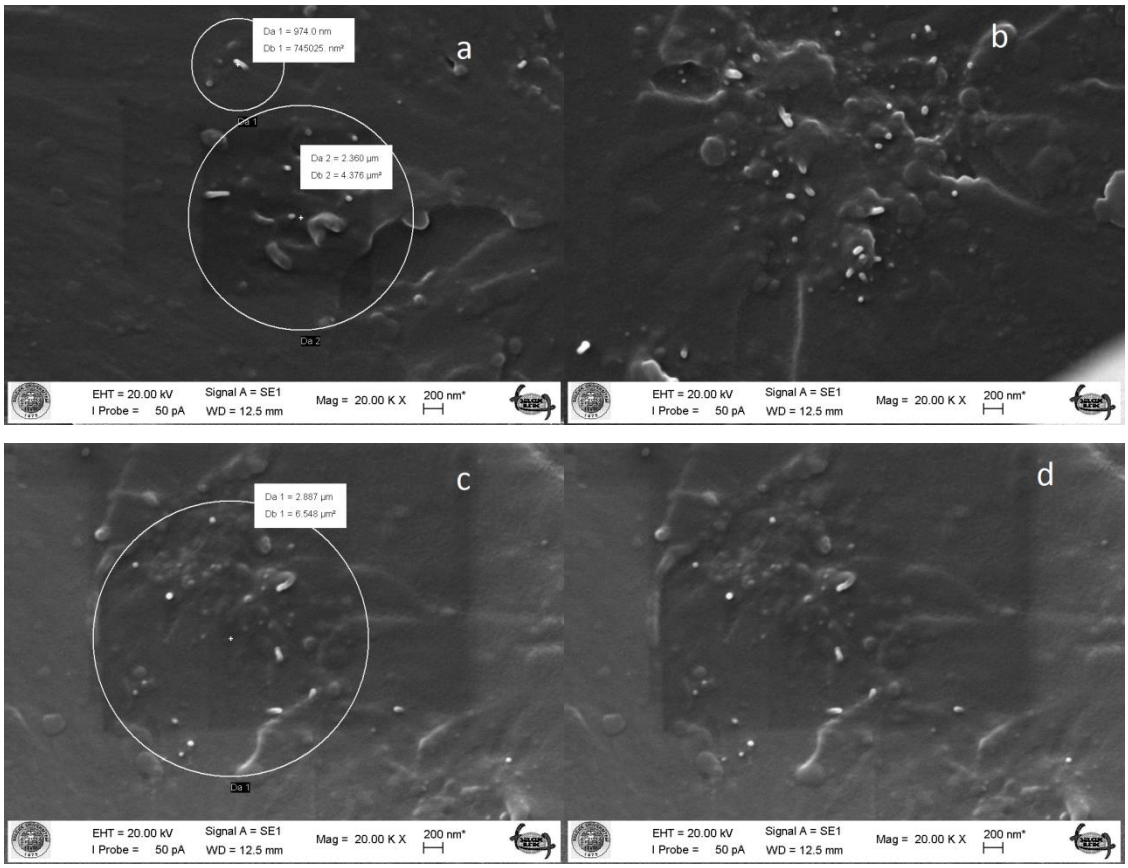
Resim 7.3'de ÇCKNT katkılı ve katkısız numunelere ait kırılma yüzeyi analizlerinde farklılıklar görünmektedir. Ağırlıkça %0,3 ÇCKNT katkılı numunenin kırılma yüzeyindeki dalgalanmaların yoğunluğu dikkat çekmektedir. Bu dalgalanmaların her biri matris tarafından yutulan enerjiyi ifade etmektedir. Eskizeybek yaptığı çalışmada nehir yatağına benzettiği bu dalgalanmaların kırılma esnasında yutulan enerjiyi temsil ettiğini göstermiştir [79].



Resim 7.3. Üretilen nanokompozit malzemelerin çekme deneyleri ardından sıyrılmış fiber yuvalarının SEM fotoğrafları ağırlıkça a) ÇCKNT katkısız b) %0,3 ÇCKNT katkılı

Şekil 7.4a'da ki SEM görüntülerinde, kırılmış matris yüzeyinde homojen dağılmış ve kırılma sırasında epoksi matristen sıyrılmış ÇCKNT'ler görülmektedir. Epoksi matris içerisinde ÇCKNT'ler birbirlerinden ayrılmış şekilde gözlenmektedir. Bu durum matris içerisindeki dağılımın istenilen homojenlikte olduğunu göstermektedir. Sıyrılan ÇCKNT'lerin sıyrılma uzunlukları incelendiğinde birkaç mikrona kadar ulaştıkları gözlenmiştir. Ancak genelde ÇCKNT'ler epoksi matris içinden 1 µm gibi küçük uzunluklarda sıyrıldıkları belirlenmiştir.

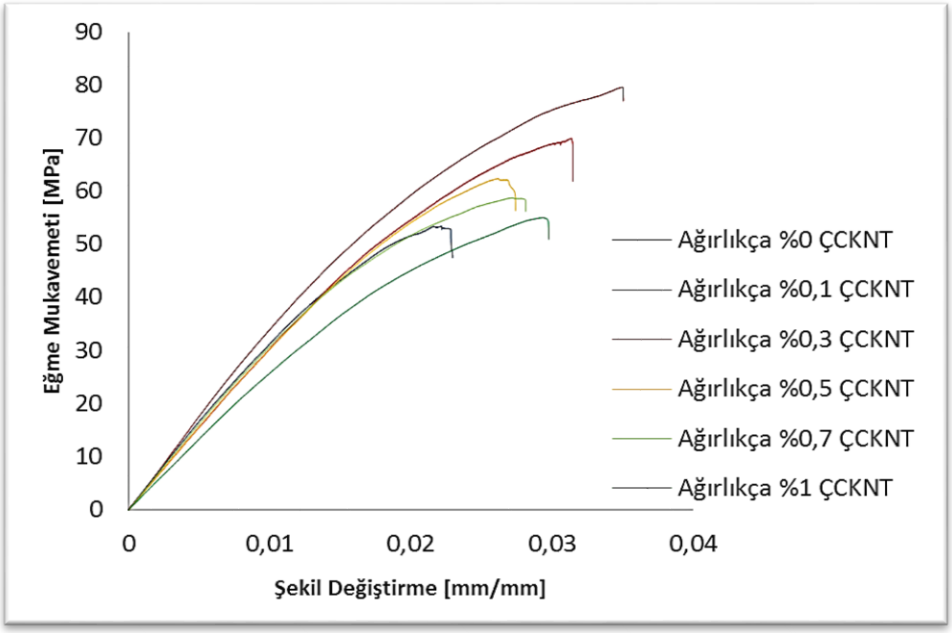
Bu gözlem ile ÇCKNT'ler ile epoksi matris arasındaki kimyasal etkileşimin oldukça güçlü olmasından dolayı sıyrılamayarak kırılma ile hasara uğradıklarını göstermektedir. Resim 7.4b'de ise ağırlıkça %1 ÇCKNT katkılı epoksi içinde ÇCKNT'lerin kümelendiği görülmektedir. Bu kümelenme malzemelerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. ÇCKNT yığınının büyüklüğü yaklaşık 3-4 µm kadar olup yığını çevreleyen matrise ait dalgalanmalar ve pürüzlülükler kırılma sırasında yutulan enerji bakımından önemlidir. ÇCKNT yığını çevresindeki dalgalanmalar çatlağın düzlem değiştirmek zorunda kalması sonucu ortaya çıkmıştır. Bu durum ile kırılma sırasında çatlağın alacağı yol artırılarak ilerlemesi için gerekli enerji artmış ve dayanım yükselmiştir.



Resim 7.4. Üretilen tabakalı nanokompozit malzemelerde a) ağırlıkça %0,3 ÇCKNT katılı epoksi içerisinde ÇCKNT'lerin homojen dağılım ve matristen sıyrılmış KNT'ler b) ağırlıkça %1 ÇCKNT katkılı epoksi matris içersinde kümelenmiş ÇCKNT'ler ve küme etrafındaki matris morfolojisi c) ve d) Kümelenmiş KNT'lerin boyutlandırılması

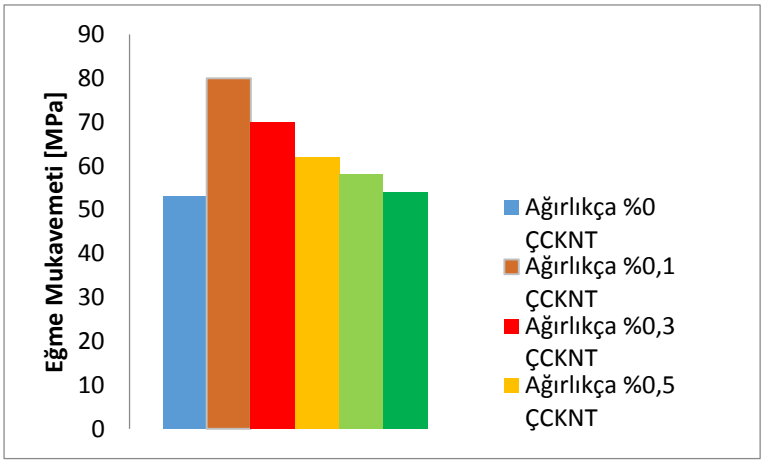
7.3. Üç Noktadan Eğme Deneyleri Sonuçları

AFTK'lerin eğme yükü etkisi altındaki davranışlarını incelemek amacıyla gerçekleştirilen üç noktadan eğme deneyleri sonucu elde edilen gerilme-şekil değişimi grafiği Şekil 7.5'de verilmiştir. Elde edilen eğrilerden yola çıkarak AFTK'lerin matrisi içerisine ÇCKNT ilavesi kompozitlerin eğme özelliklerini etkilemiştir. ÇCKNT'ler kompozit malzemeye ilave edildiğinde eğme dayanımını, elastikiyet modülleri ve şekil değişimi artmıştır.



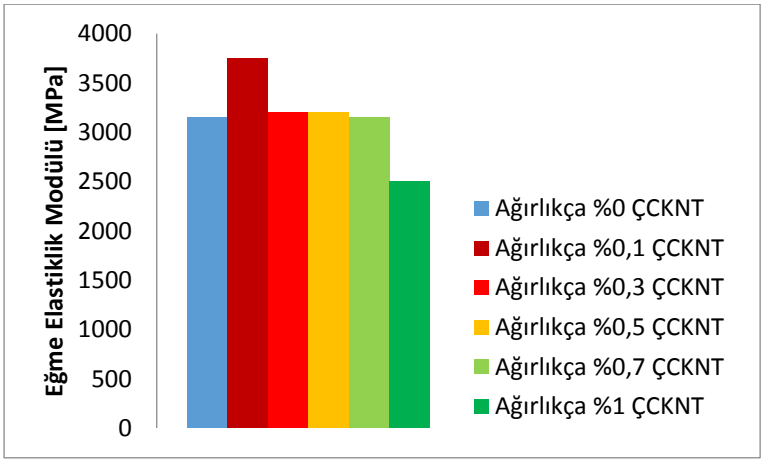
Şekil 7.5. AFTK'lerin üç noktadan eğme deneyi sonucu elde edilen σ-ε eğrisi

Şekil 7.6'da ağırlıkça %0,1 ÇCKNT katkılı AFTK'lerin eğme gerilmeleri 80 MPa bulunurken katkısız numunelerin 53 MPa bulunmuştur. Bu veriler ışığında ÇCKNT ilavesi sonrasında kompozitin eğme gerilmesinde yaklaşık %50 artış meydana gelmiştir. %0,3 katkılı numunenin eğme dayanımı 70 MPa, %0,5 katkılı numunenin 62 MPa, %0,7 katkılı numenin 58 MPa ve %1 katkılı numenin ise 54 MPa ölçülmüştür. Bu sonuçlar bize ağırlıkça %0,1 katkı oranından sonra eğme dayanımının düştüğünü göstermektedir. Bunun temel nedeni ÇCKN'lerin matris içerisinde çökelerek kümelenmesinden dolayı çatlak gibi davranmalarıdır.



Şekil 7.6. AFTK'lerin üç noktadan eğme deneyi sonucu, ağırlıkça %0, %0,1; %0,3; %0,5; %0,7; %1 ÇCKNT katkı oranlarına göre (sırasıyla soldan sağa) elde edilen şekil değiştirme değerleri

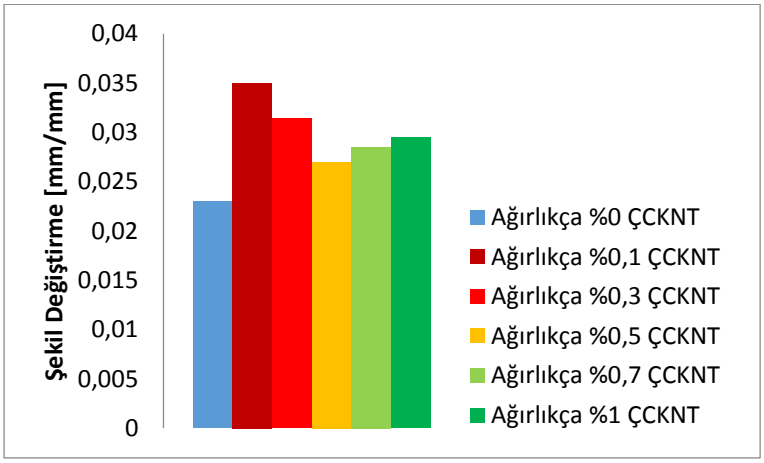
AFTK'lerin eğme elastikiyet modüllerindeki değişim Şekil 7.7'de gösterilmiştir. ÇCKNT katkısız numunelerin elastikiyet modülü 3150 MPa iken ağırlıkça %0,1 katkılı numunelerinki 3750 MPa ölçülmüştür. Kompozite ÇCKNT ilavesi sonrasında elastikiyet modülleri yaklaşık olarak %19 oranında artmıştır. Ağırlıkça %0,3 katkılı numunenin 3200 MPa, ağırlıkça %0,5 katkılı numunenin 3200 MPa, ağırlıkça %0,7 katkılı numunenin 3150 ve ağırlıkça %1 katkılı numunenin 2500 MPa olarak ölçülmüştür.



Şekil 7.7. AFTK'lerin üç noktadan eğme deneyi sonucu ağırlıkça %0, %0,1; %0,3; %0,5; %0,7; %1 ÇCKNT katkı oranlarına göre (sırasıyla soldan sağa) elde edilen eğme elestiklik modülü değerleri

Şekil 7.8'de ÇCKNT katkısız eğme numunesinin maksimum şekil değiştirme miktarı 0,023 ölçülürken ağırlıkça %0,1 katkılı malzemenin 0,035 ölçülmüştür. Bunun artışın sebebi ÇCKN'lerin çatlak ilerlemesini zorlaştırması ve yolunu uzatmasına bağlayabiliriz. Çekme

deneylerinde katkılı kompozitlerde azalan elastiklik modülü eğme deneylerinde %19 artış göstermektedir. Literatürde çekme elastiklik modülünün epoksi reçineye KNT ilavesinden sonra hem arttığını gösteren hem de azaldığını gösteren kaynaklar mevcuttur [24, 30, 119, 120]. Teorik olarak artması beklenen çekme elastik modülünün azalmasındaki en büyük etken kompozit içerisinde hapsolan hava kabarcıkları olarak öngörülmektedir.



Şekil 7.8. AFTK'lerin üç noktadan eğme deneyi ağırlıkça %0, %0,1; %0,3; %0,5; %0,7; %1 ÇCKNT katkı oranlarına göre (sırasıyla soldan sağa) elde edilen şekil değiştirme değerleri

Çizelge 7.2'de üç noktadan eğme deneyleri sonucunda elde edilen sayısal veriler toplu halde verilmiştir.

Çizelge 7.2. Üç noktadan eğme deneyi sonucu elde edilen sayısal veriler

Ağırlıkça ÇCKNT Oranı [%]	Eğme Mukavemeti [MPa]	Çekme Elastiklik Modülü [MPa]	Şekil Değiştirme [mm/mm]
%0	53,45	3150	0,02294
%0,1	80	3750	0,03502
%0,3	70	3200	0,03145
%0,5	62	3200	0,02740
%0,7	59	3150	0,02815
%1	55	2500	0,02974

7.4. Düşük Hızlı Darbe Deneyi Sonuçları

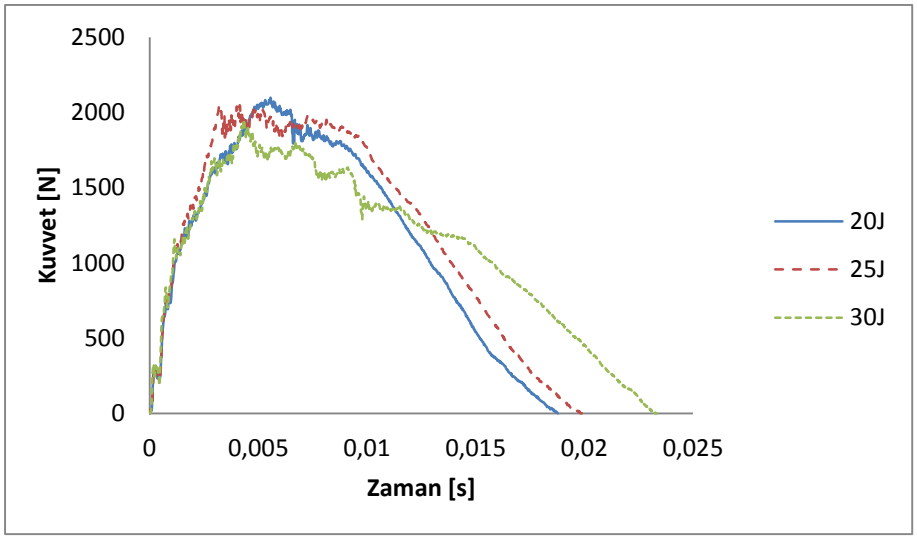
Bu bölümde, düşük hızlı darbe deneyi test cihazında yapılan deneyler neticesinde elde edilen verilerin kuvvet-zaman, kuvvet-çökme, absorbe edilen enerji-zaman ve hız-zaman diyagramları oluşturulmuşturularak ÇCKNT katkısız ve katkılı kompozitlerin enerji absorbsyonları ve darbe davranışları incelenmiştir.

7.4.1. Kuvvet-zaman diyagramları

Düşük hızlı darbe deneylerinden elde edilen temas kuvveti-zaman değişimi eğrileri kompozit malzemelere ait darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden bir tanesidir. Deneylerde 20 J, 25 J ve 30 J'lük çarpma enerjilerinde elde edilen temas kuvveti-zaman değişimlerinin çıngırak eğrisi şeklinde olduğu Şekil 7.9'dan Şekil 7.17'e kadar olan grafiklerde görülmektedir. Her bir eğri yüklemede bir artma kısmına, ulaşılan bir en büyük kuvvet değerine ve yükten boşaltmada bir azalma kısmına sahiptir. Tüm grafikler vurucunun numuneye temas etmesiyle oluşan hasardan sonra numune yüzeyinden geri sekmesiyle oluşan grafiklerdir. Yani uygulanan darbe enerjisinin büyük bir kısmı numune tarafından yutulmuş geri kalan enerji ise vurucunun geri sekmesi için kullanılmıştır. Eğer geri sekme için enerji harcanmamışsa vurucu ya saplanmıştır ya da numuneyi delmiştir. Grafiklerde görülen salınımlar numuneler üzerinde hasar mekanizması oluştuğunu göstermektedir. Darbe enerjisinin artmasıyla numunede oluşan hasar miktarı artmaktadır. Buna bağlı olarak darbe enerjisinin artmasıyla grafikte oluşan salınım miktarında da artma gözlenmiştir.

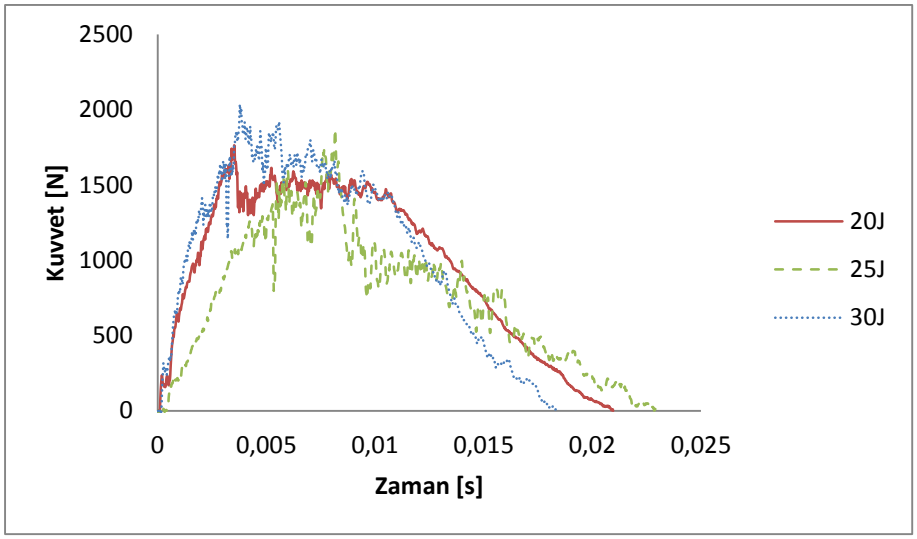
Şekil 7.9'dan Şekil 7.17'e kadar olan diyagramlar da ÇCKNT ilave yapılmadan ve ağırlıkça farklı oranlarda ÇCKN ilavesi ile üretilen kompozitlerin 20 J, 25 J, 30 J enerji seviyelerinde yapılan testin kuvvet zaman grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde artan darbe enerjisi ile temas süresinin ilişkili olduğu görülmektedir. Ayrıca kompozitlerde meydana gelen hasar mekanizmaları temas süresinde belirleyici rol oynamaktadır. Şekil 6.18'den anlaşılacağı üzere en büyük temas kuvveti katkısız numunenin 20 J enerji seviyesinde elde edilmiştir. Bunun nedeni 25 J ve 30 J enerji seviyelerinde numunelerde meydana gelen hasarlardır. Numunelerde meydana gelen bu hasarlar çıkılabilecek en büyük temas kuvvetini azaltmıştır.

Şekil 7.9'da ÇCKNT ilave yapılmadan üretilen kompozitin 20 J, 25 J, 30 J enerji seviyelerinde yapılan testin mukayesesi verilmiştir. Grafikte darbe enerjisi arttıkça temas süresinin arttığı görülmektedir. En büyük temas kuvveti 20 J enerji seviyesinde elde edilmiştir. Bunun nedeni 25 J ve 30 J enerji seviyelerinde numunelerde meydana gelen hasarlardır. Numunelerde meydana gelen bu hasarlar çıkılabilecek en büyük temas kuvvetini azaltmıştır. Ancak maksimum kuvvetteki düşüş az miktardadır. Bu da malzemede meydana gelen hasarın az olduğunu işaret eder.



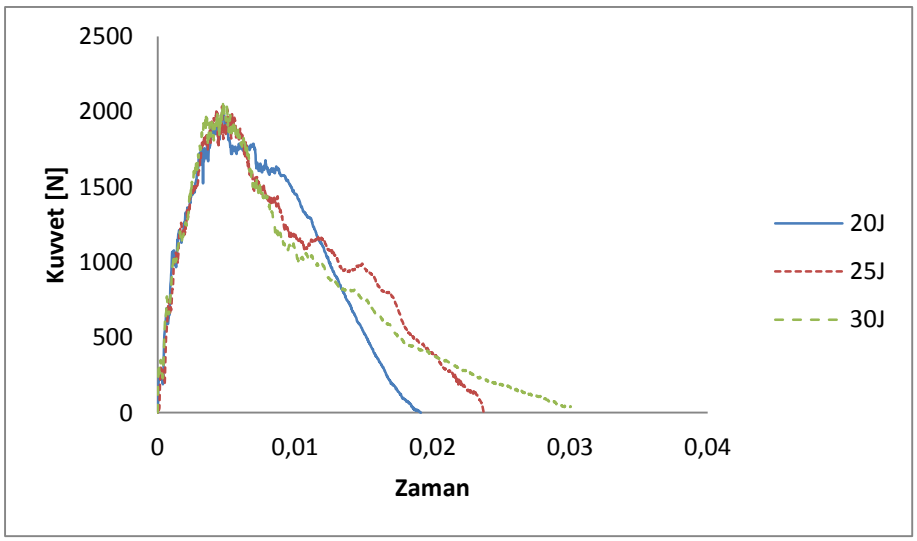
Şekil 7.9. Ağırlıkça ÇCKN katkısız AFTK'lerin farklı enerji seviyelerinde F-t diyagramları kıyaslaması

Şekil 7.10'da ağırlıkça %0,1 ÇCKN ilave edilmiş numunelerin kuvvet-zaman grafiklerinin mukayesesi görülmektedir. Temas sürelerinde ki değişim hasar davranışları ile ilişkilendirilebilir. Ancak bu diyagramda saf numunelerden farklı olarak artan kısımlarda farklılıklar söz konusudur. Tüm aynı parametrelerde en büyük temas kuvvetinin büyüklüğü malzeme rijitliğinin ölçüsüdür [89b]. Ancak yapılan deneylerde temas kuvvetlerinin ve hasar mekanizmalarının birlikte incelenmesi sonucu kompozit malzemelerin hasar davranışlarının delinme öncesi ve sonrası olarak değerlendirilmesi gerektiği gerçeğini ortaya koymuştur. Özellikle hasardan sonra malzemelerin maksimum temas kuvveti düşmektedir. Rijitlik hakkında yorum yaparken hasar alanları da dikkate alınmalıdır. Aynı parametler de yapılan deneyler neticesinde hasar alanı küçük olan numunelerin daha rijit davrandığını söyleyebiliriz. Maksimum kuvvettin büyüklüğü, hasar alanı ve kuvvet-çökme diyagramı eğrilerinin eğimi dikkate alınarak Bölüm 7.4.1'de yorumlanacaktır.

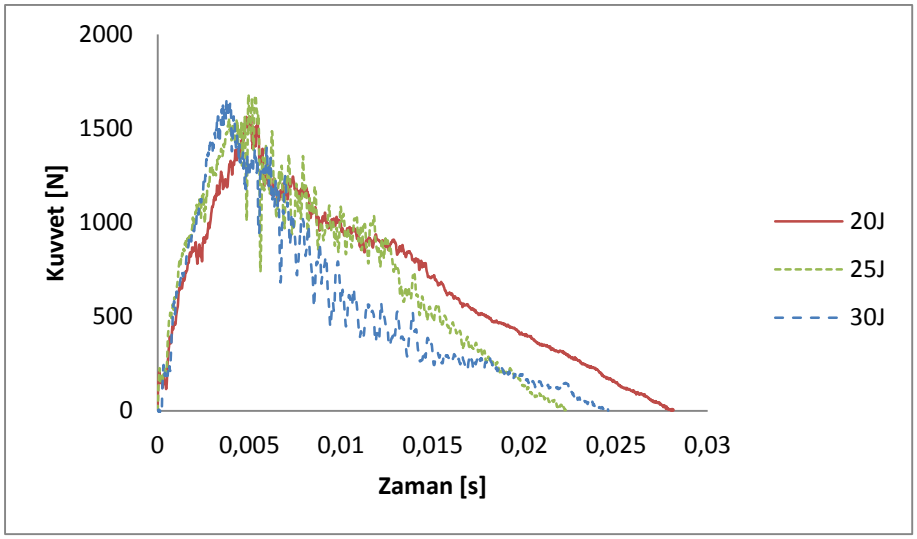


Şekil 7.10. Ağırlıkça %0,1 AFTK'lerin temas kuvvetlerinin farklı enerji seviyelerinde kıyaslaması

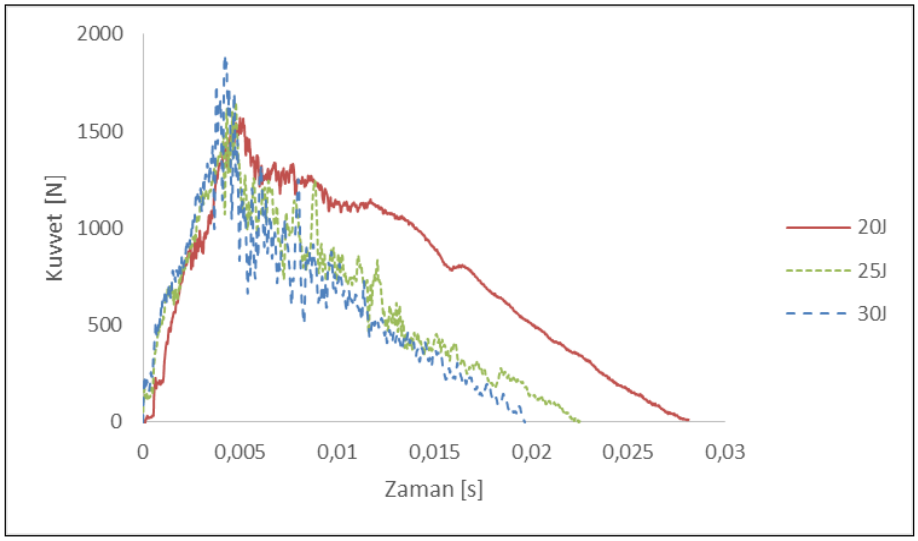
Şekil 7.11'de ağırlıkça %0,3 ÇCKN ilave edilmiş numunelerin Kuvvet zaman grafiklerinin mukayesesi görülmektedir. Saf numunelerde olduğu gibi temas süreleri deformasyona bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu grafikte tüm numuneler için kuvvet parametresinde grafiğin artan kısımları benzerlik gösterse de grafiğin azalan kısımlarında ciddi farklılıklar mevcuttur. Bu farklılıkların temel nedeni malzemede meydana gelen çökme ve delinmelerdir.



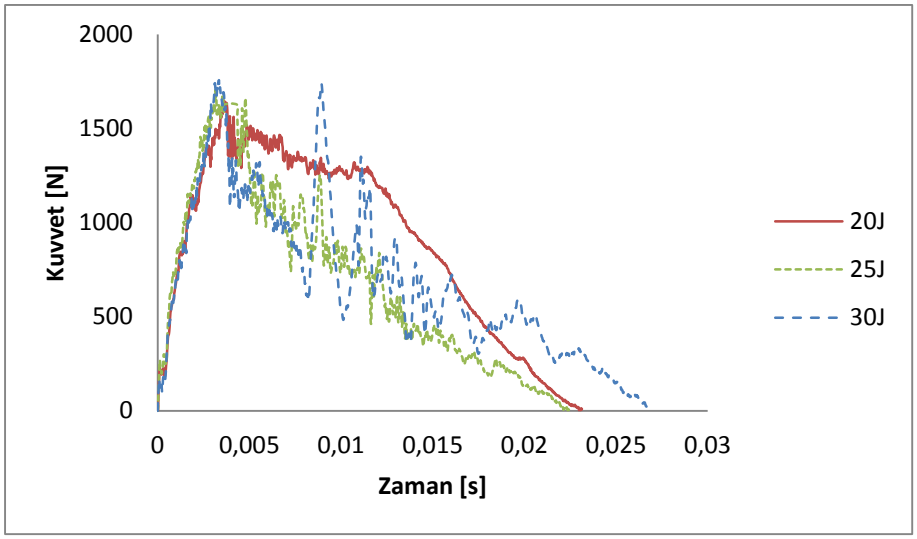
Şekil 7.11. Ağırlıkça %0,3 AFTK'lerin farklı enerji seviyelerinde F-t diyagramları kıyaslaması



Şekil 7.12. Ağırlıkça %0,5 AFTK'lerin temas kuvvetlerinin farklı enerji seviyelerindeki değişimi

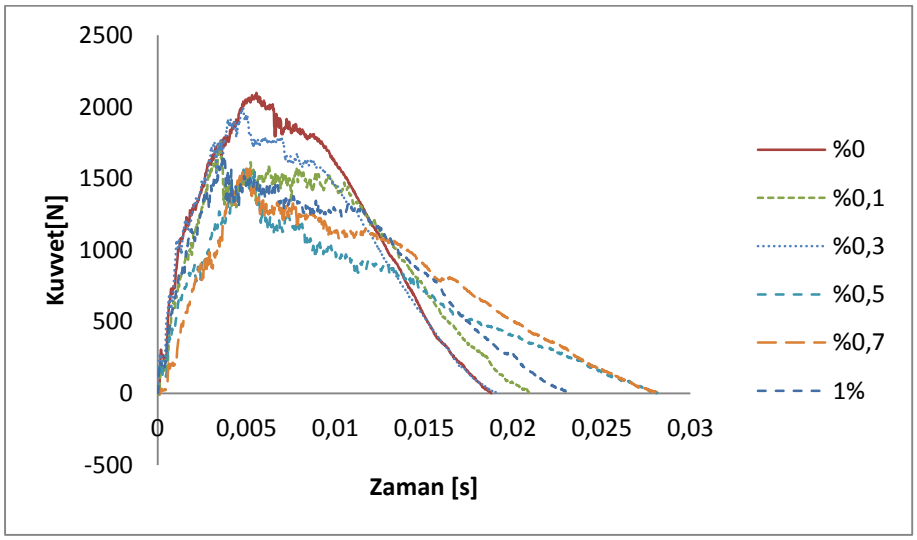


Şekil 7.13. Ağırlıkça %0,7 AFTK'lerin temas kuvvetlerinin farklı enerji seviyelerindeki değişimi



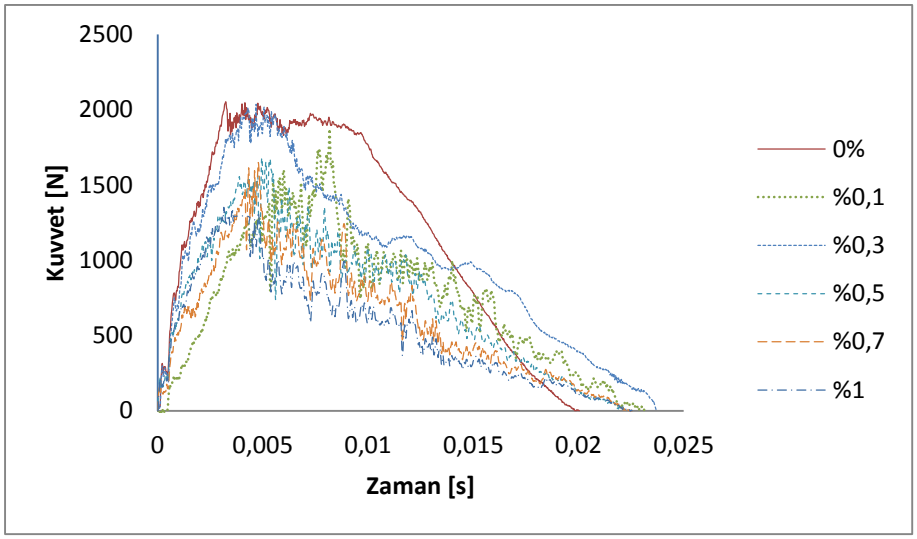
Şekil 7.14. Ağırlıkça %1 AFTK'lerin temas kuvvetlerinin farklı enerji seviyelerindeki değişimi

Şekil 7.15'de 20 J enerji seviyesinde ÇCKNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin kuvvet-zaman grafiklerinin karşılaştırılması verilmiştir. Grafikten anlaşıldığı üzere en büyük temas kuvveti saf numunede daha fazladır.

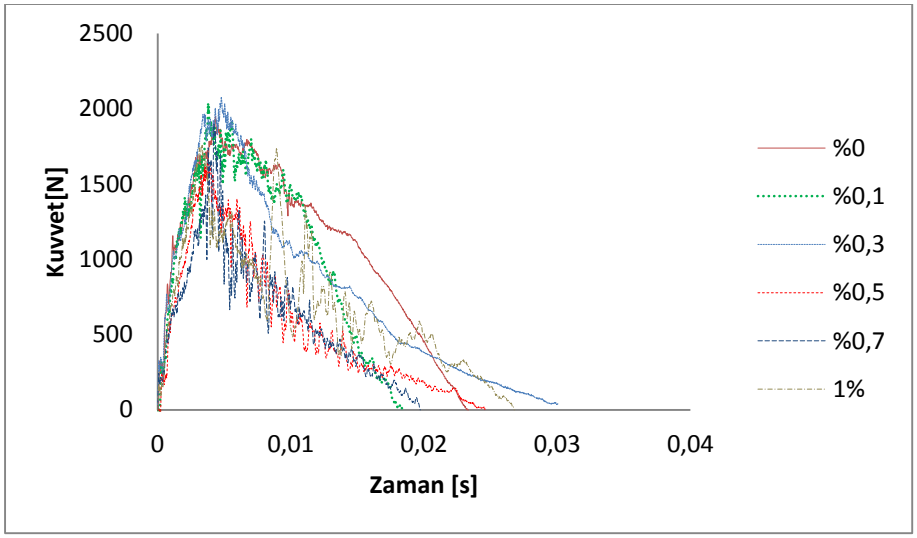


Şekil 7.15. 20 J enerji seviyesinde AFTK'lerin F-t diyagramları kıyaslaması

Şekil 7.16'da ve Şekil 7.17'de artan enerji seviyesiyle birlikte numunelerin temas kuvvetlerinde ve temas sürelerinde dalgalanmalar meydana gelmiştir. Bunların sebebi hasar mekanizmalarıdır. Özellikle grafiklerdeki salınımlar bizlere oluşan hasar mekanizmasını ifade etmektedir. Bu hasar mekanizmalarında değişlikler de temas sürelerini doğrudan etkilemektedir.



Şekil 7.16. 25 J enerji seviyesinde AFTK'lerin F-t diyagramları kıyaslaması



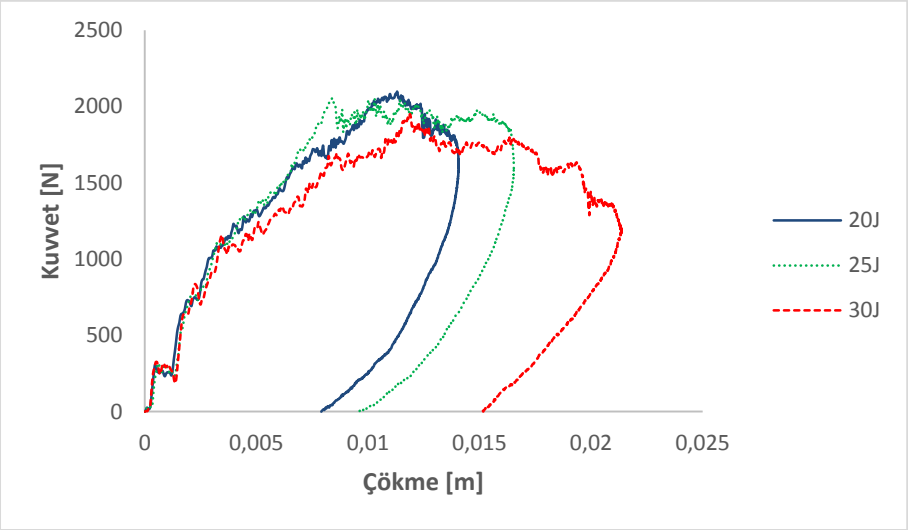
Şekil 7.17. 30 J enerji seviyesinde AFTK'lerin F-t diyagramları kıyaslaması

7.4.2. Kuvvet-çökme diyagramları

Düşük hızlı darbe deneyine maruz bırakılan ÇCKNT katkılı ve katkısız kompozit malzemelere ait darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden bir diğeri kuvvet-çökme (kuvvet-çökme) değişim grafikleridir. Farklı enerji seviyelerinde düşük hızlı darbeye maruz kalmış kompozit numuneler için elde edilen kuvvete bağlı yer değiştirme değerleri Şekil 6.18'den 6.26'ya kadar olan grafiklerde verilmiştir. Darbe sırasında vurucunun numuneye temasıyla numunede yer değiştirme (çökme) başlamış ve kuvvet en büyük değerine ulaşıncaya kadar devam etmiştir. Darbe enerjisi arttıkça kuvvet ve yer değiştirme miktarı artmaktadır. Kuvvet-yer değiştirme eğrisinde artma kısmındaki eğim darbe yüküne

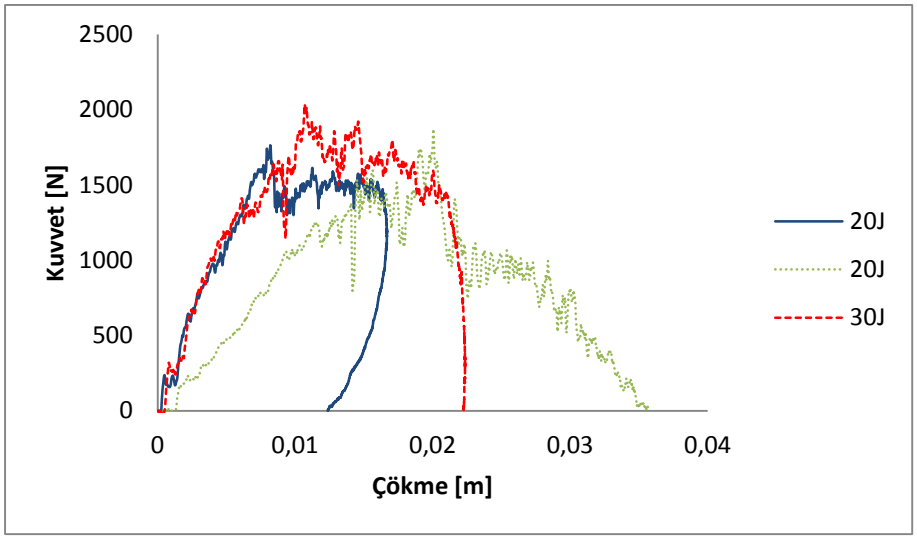
karşı numunenin göstermiş olduğu dirençten dolayı *eğme rijitliği* olarak adlandırılır. Eğme rijitliğindeki salınımlar ve değişimler numunede oluşan hasarlanmayı göstermektedir [89b].

Şekil 7.18'de ÇCKN katkısız numunelerin kuvvet-çökme grafiklerinin mukayesesi görülmektedir. Grafikte enerji seviyesi arttıkça numunede meydana gelen çökme miktarının arttığı açık bir Şekilde görülmektedir. Grafikte meydana gelen salınımlar numunede meydana gelen hasarları ifade etmektedir. Enerji seviyesi arttıkça salınımların artması numunenin hasarının da paralel olarak arttığını göstermektedir.



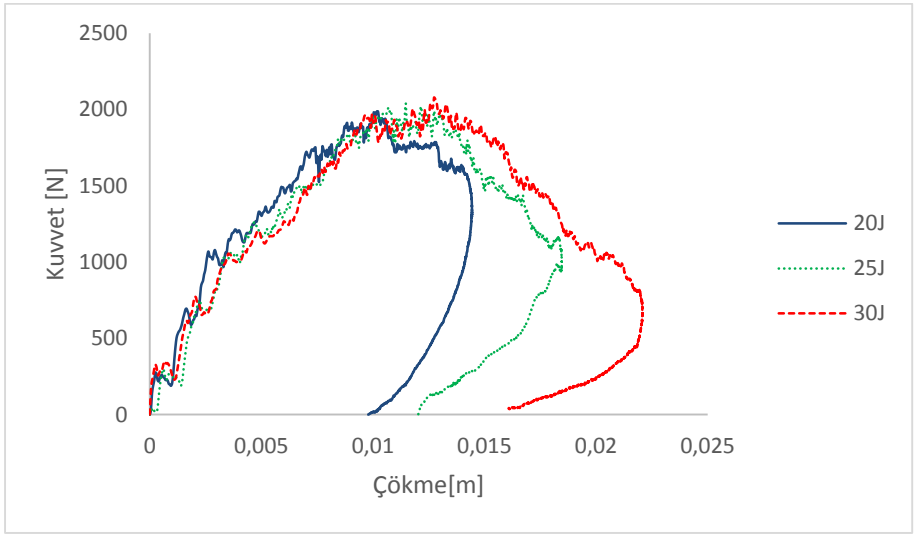
Şekil 7.18. ÇKNT katkısız AFTK'lerin farklı enerjilerde kuvvet-çökme diyagramları kıyaslaması

Şekil 7.19'da ağırlıkça %0,1 ÇCKNT katkılı numunenin kuvvet-çökme diyagramı görünmektedir. Grafikten anlaşılacağı üzere 25 J ve 30 J enerji seviyelerinde uygulanan tüm enerji malzeme hasarlanmasına ve sürtünmelere harcanmıştır. Geri iade edilen enerji yoktur. Ancak salınımlar daha büyük ölçeklidir. Buda malzemede meydana gelen hasarın daha fazla olduğunu göstermektedir.

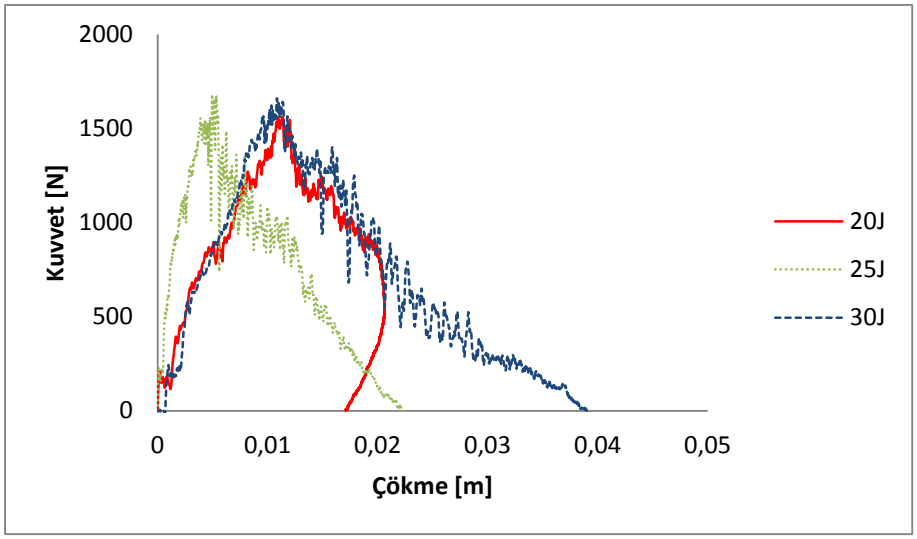


Şekil 7.19. Ağırlıkça %0,1 ÇCKNT katkılı AFTK'lerin farklı enerjilerde kuvvet-çökme diyagramları kıyaslaması

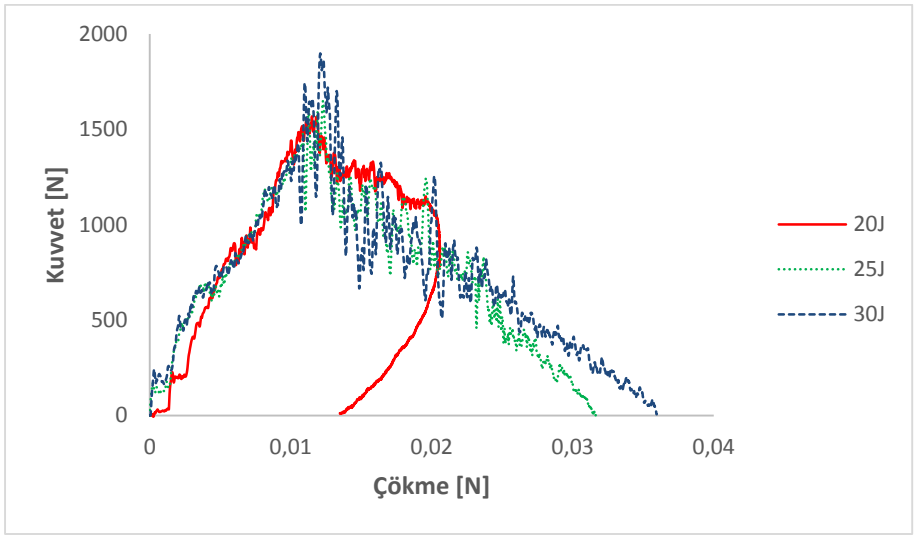
Katkısız numunelerde olduğu gibi ağırlıkça %0,3 ÇCKN katkılı numunede de enerji seviyesi arttıkça numunede meydana gelen çökme miktarının ve hasarlanmaların arttığı Şekil 7.20'de açıkça görülmektedir. Takviyeli numune için 25 J ve 30 J enerji seviyesinde vurucu ucun bir miktar numuneye saplanması çökme ve saplanma meydana getirmiştir.



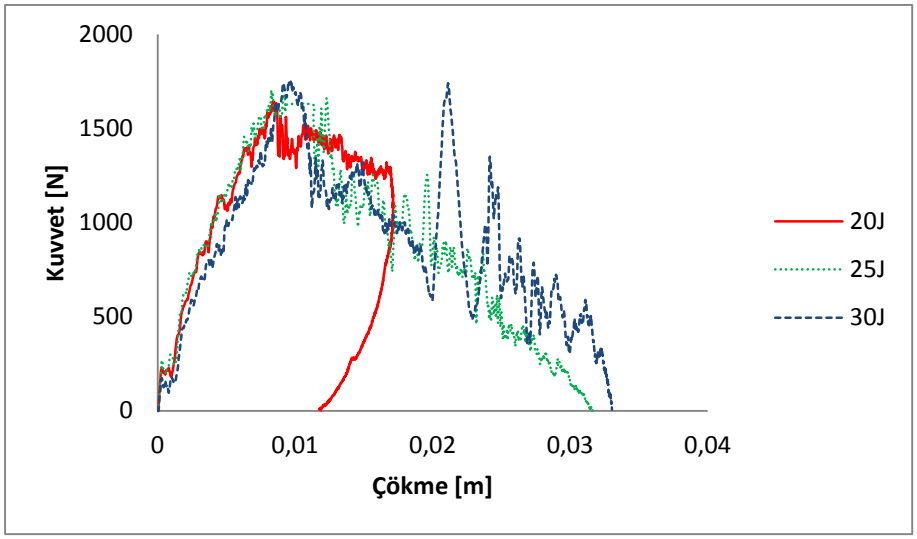
Şekil 7.20. Ağırlıkça %0,3 ÇCKNT katkılı AFTK'lerin farklı enerjilerde kuvvet-çökme diyagramları kıyaslaması



Şekil 7.21. Ağırlıkça %0,5 ÇCKNT katkılı AFTK'lerin farklı enerjilerde kuvvet-çökme diyagramları kıyaslaması

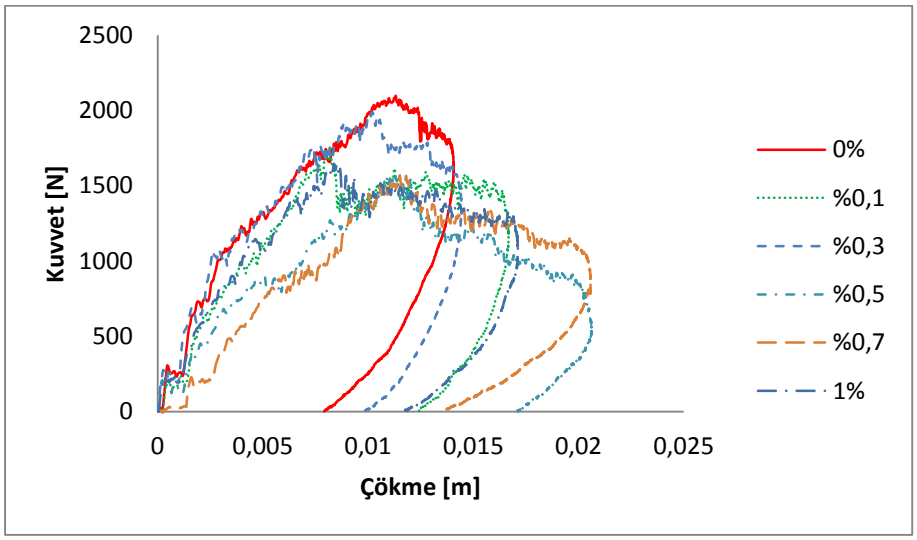


Şekil 7.22. Ağırlıkça %0,7 ÇCKNT katkılı AFTK'lerin farklı enerjilerde kuvvet-çökme diyagramları kıyaslaması

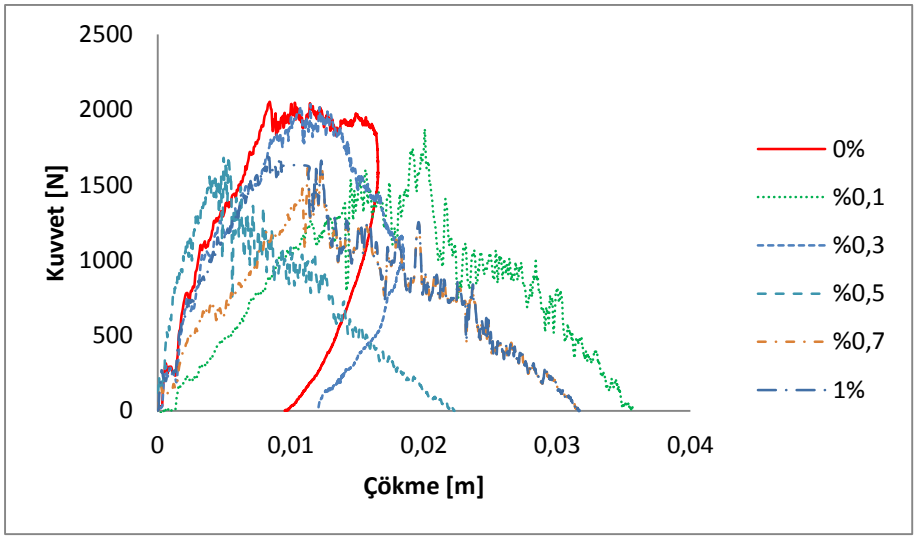


Şekil 7.23. Ağırlıkça %1 ÇCKNT katkılı AFTK'lerin farklı enerjilerde kuvvet-çökme diyagramları kıyaslaması

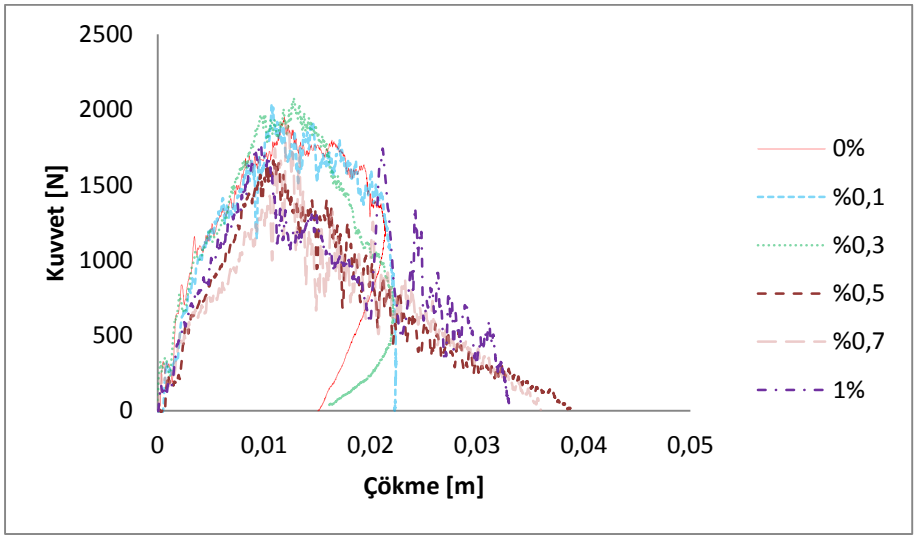
Şekil 7.24'de 20J enerji seviyesinde ÇCKNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin kuvvet-zaman grafiklerinin karşılaştırılması verilmiştir. Grafikten anlaşıldığı üzere en büyük temas kuvveti saf numunede daha fazladır.



Şekil 7.24. 20 J enerji seviyesinde AFTK'lerin kuvvet-çökme diyagramları kıyaslaması



Şekil 7.25. 25 J enerji seviyesinde AFTK'lerin farklı enerjilerde kuvvet-çökme diyagramları kıyaslaması

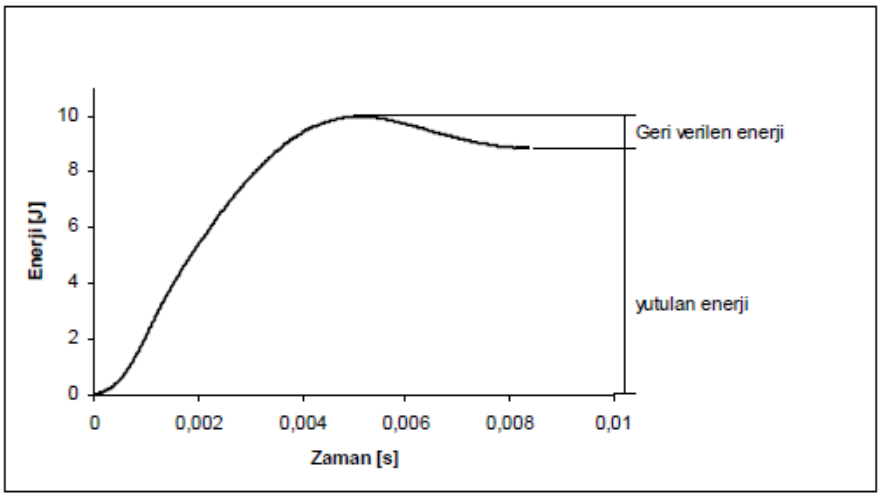


Şekil 7.26. 30 J enerji seviyesinde AFTK'lerin farklı enerjilerde kuvvet-çökme diyagramları kıyaslaması

Temas kuvvetin ÇCKNT takviyeli numunelerde daha keskin düşüş yaşaması nüfuziyetin büyüklüğüne bir göstergedir. Kompozitlerin eğme rijitlikleri genel olarak benzerlik göstermektedir. Ancak darbe sonrası özellikle katkısız malzemelerde meydana gelen deformasyon alanının takviyeli malzemelerdeki deformasyon alnından büyüklük olması takviyeli malzemelerin daha rijit davrandığının göstergesidir.

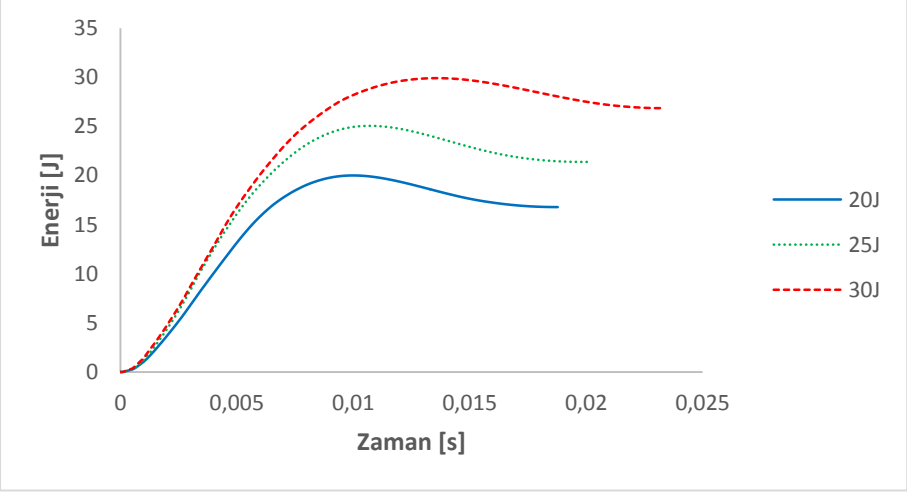
7.4.3. Absorbe edilen enerji-zaman diyagramları

Düşük hızlı darbe deneyi esnasında uygulanan enerjinin tamamı absorbe edilmeyebilir. Absorbe edilmeyen enerji vurucunun geri sekmesi için harcanır. Bu sekme işlemi de reband olarak adlandırılır. Şekil 6.35'de zamanla enerji değişimi gösteren tipik bir diyagram verilmiştir.

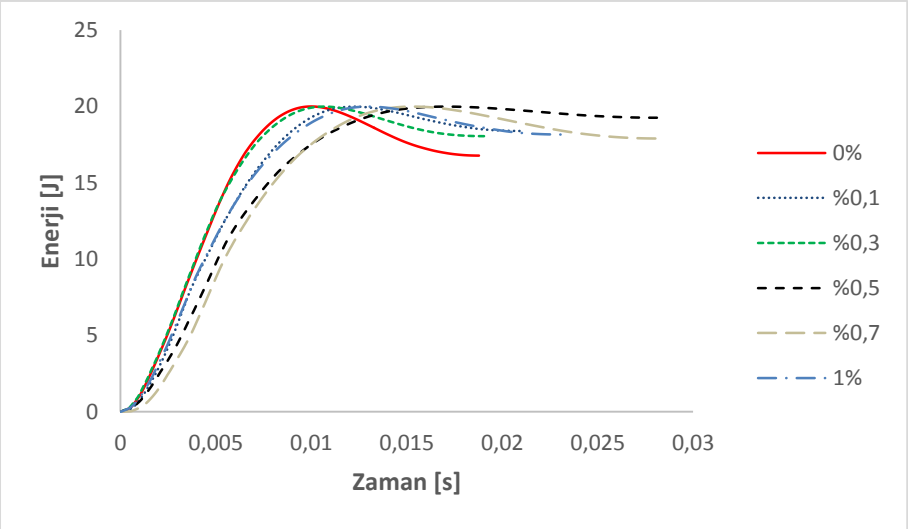


Şekil 7.27. Enerji-zaman değişimi

Şekil 7.28'de katkısız numunelere farklı enerji seviyelerinde uygulanan düşük hızlı darbe deneyinin enerji-zaman değişim grafiği birlikte verilmiştir. Grafikten anlaşıldığı üzere artan enerji seviyesiyle numunelerin absorbe ettiği enerji miktarı da artmaktadır.

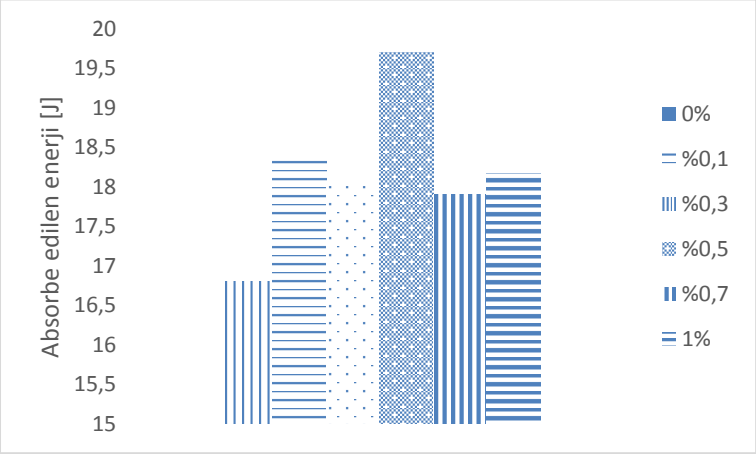


Şekil 7.28. Ağırlıkça %0 katkılı numunenin farklı enerji seviyelerinde Enerji-zaman değişim grafiği



Şekil 7.29. 20 J enerji seviyesinde tüm numunelerin enerji- zaman değişimleri

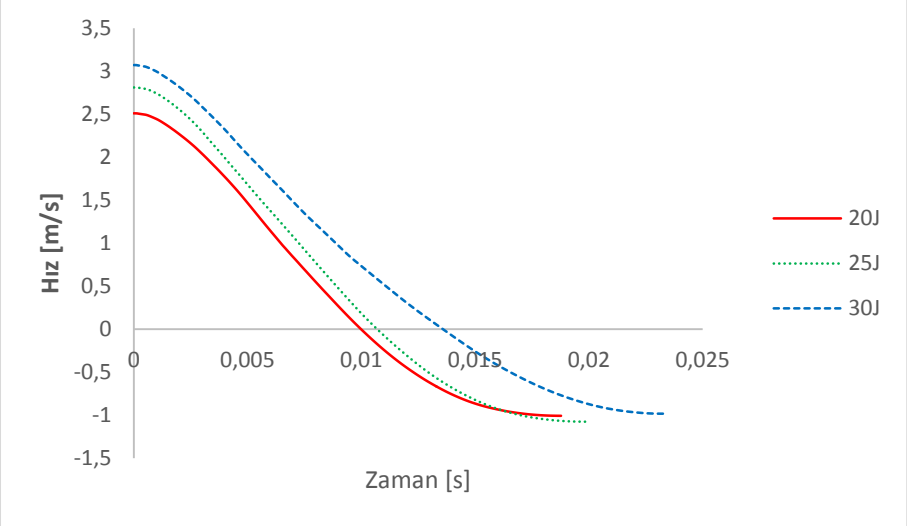
Şekil 7.30'da 20 J enerji seviyesinde numuneler tarafından absorbe edilen enerji miktarları verilmiştir. Absorbe edilen enerji miktarı ÇCKN ilavesi ile artış göstermiştir. Ağırlıkça %0,5 ÇCKN katkılı numunelerde katkısız numunelere oranla absorbe ettiği enerji miktarı %17 artış göstermiştir.



Şekil 7.30. 20 J enerji seviyesinde absorbe edilen enerji miktarları

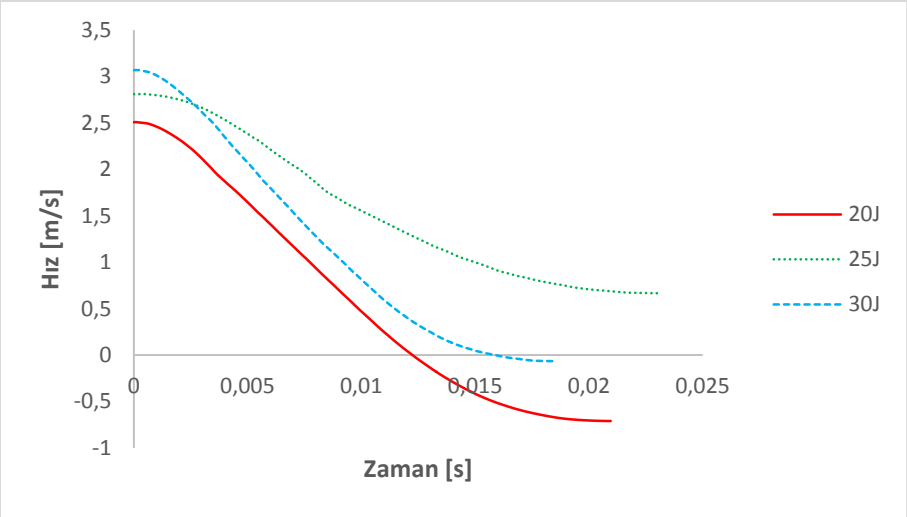
7.4.4. Hız-zaman eğrileri

Şekil 6.39'dan Şekil 6.44'e kadar olan Şekillerde farklı enerji seviyelerinde düşük hızlı darbeye kalmış kompozitlerin hız-zaman değişimi verilmiştir. Artan darbe enerjisi ile yapılan darbe testlerinde, başlangıçta belli bir hıza sahip olan vurucunun numune ile ilk temasından sonra hızı azalarak sıfıra düşmüştür. Vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi ile yukarı doğru hareket başlar ve vurucu Şekil 7.31'de görüldüğü gibi negatif bir hıza sahip olur.

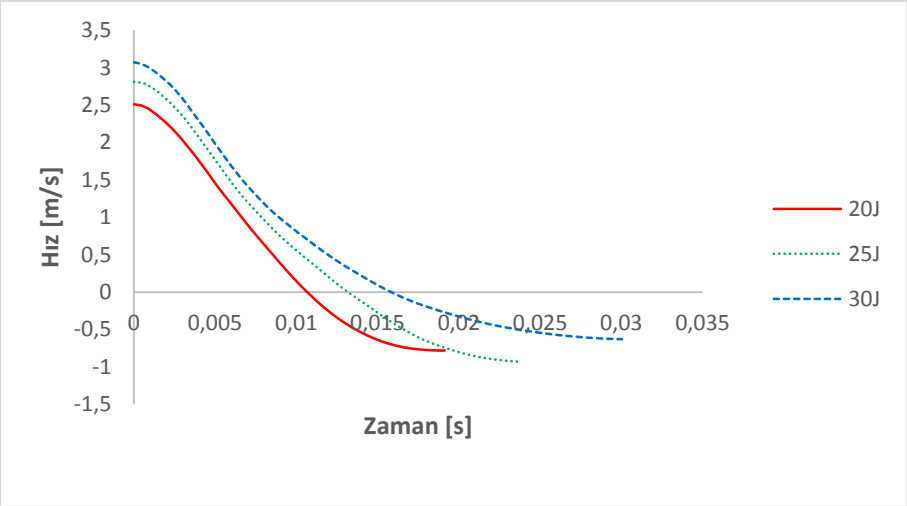


Şekil 7.31. Katkısız numunenin hız zaman grafiği

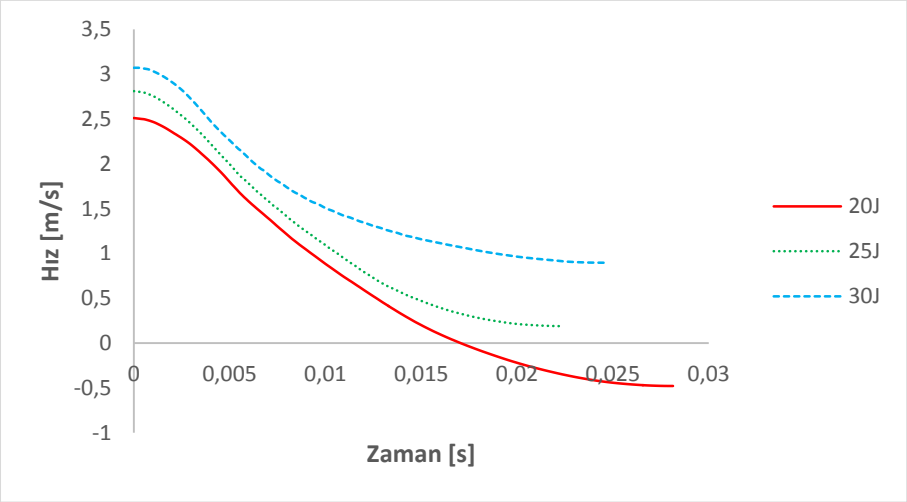
Şekil 7.32'de 20 J enerji seviyesinde vurucunun hızı numuneye temas ettikten sonra sıfır olmuş ve eksi yönde ilerlemiştir. Ancak 30J enerji seviyelerinde bu durumun aksine vurucunun hızı sıfıra düşmeden test sonlanmıştır. Bu durum vurucunun numuneye saplandığını veya numuneyi deldiğini ifade eder.



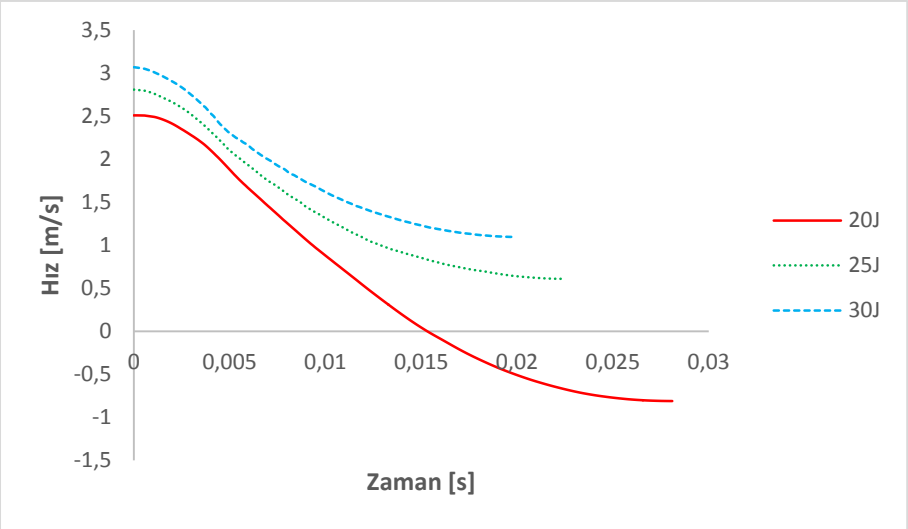
Şekil 7.32. Ağırlıkça %0,1 katkılı numunenin hız zaman grafiği



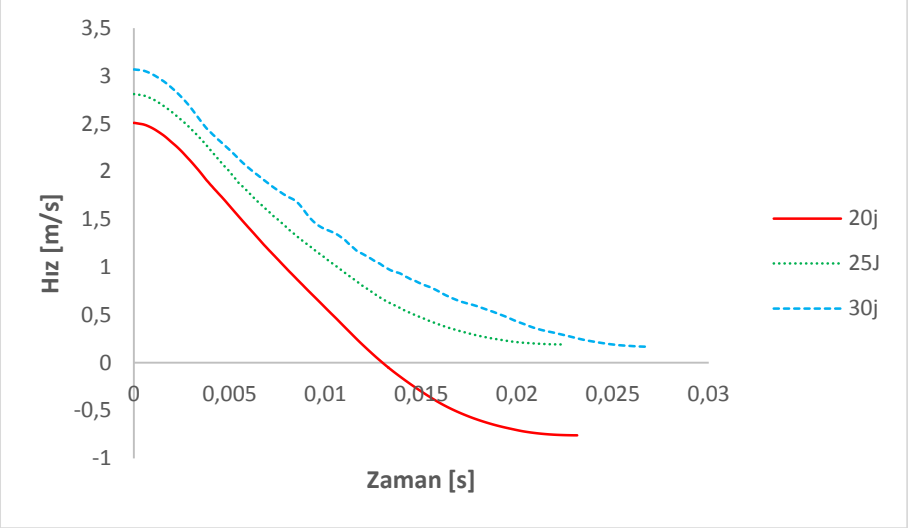
Şekil 7.33. Ağırlıkça %0,3 katkılı numunenin hız zaman grafiği



Şekil 7.34. Ağırlıkça %0,5 katkılı numunenin hız zaman grafiği



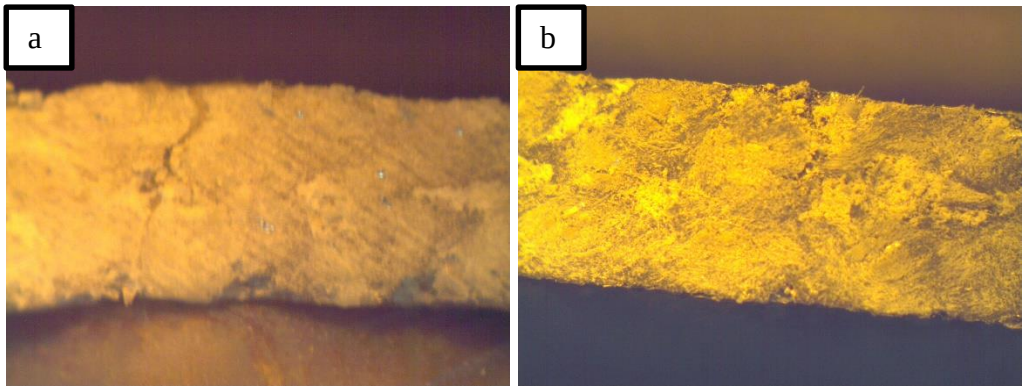
Şekil 7.35. Ağırlıkça %0,7 katkılı numunenin hız zaman grafiği



Şekil 7.36. Ağırlıkça %1 katkılı numunenin hız-zaman grafiği

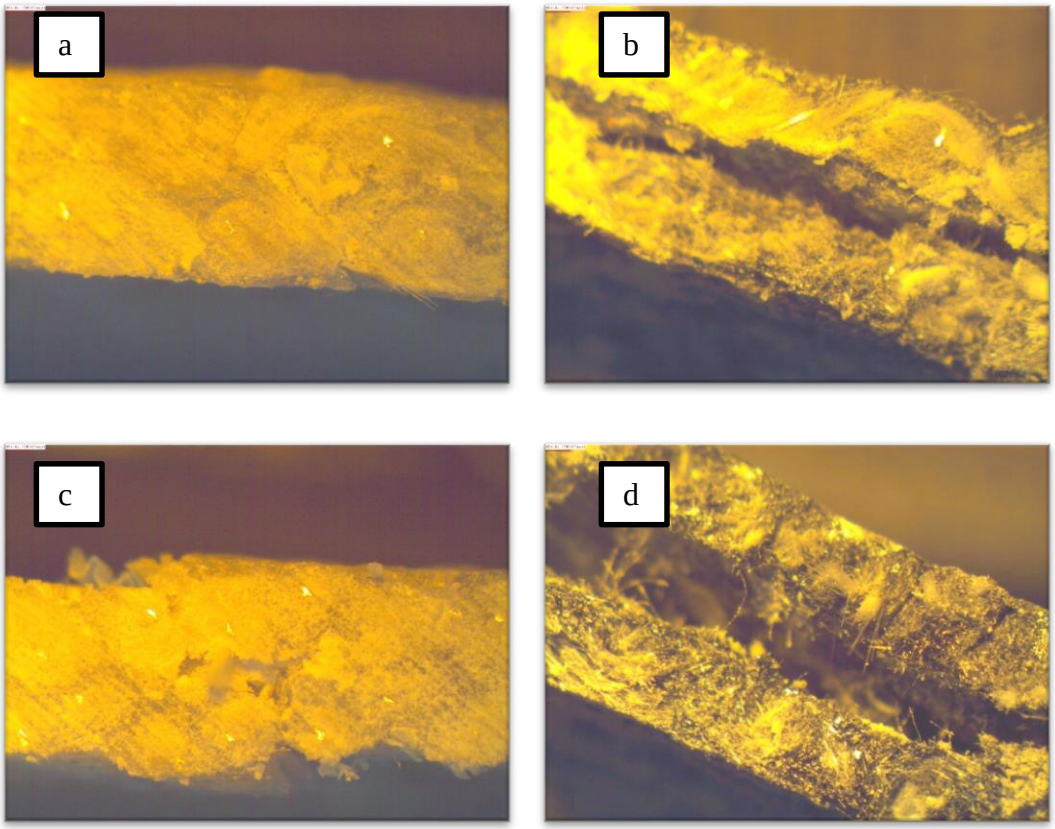
7.4.5. Düşük hızlı darbenin hasar analizi

Şekil 6.45'de 20 J enerji seviyesinde, düşük hızlı darbe testi sonrası AFTK'lerin kesitlerine ait mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.45a'da ÇCKNT katkısız numunenin vurucu ucun temas ettiği noktadan alınan kesit görüntüsünde matriste çatlağı görünmektedir. Ancak ağırlıkça %0,3 ÇCKNT numunede çatlak görünmemektedir. ÇCKNT ilavesi ile 20 J enerji seviyesinde numunelerin darbe direnci artmıştır.



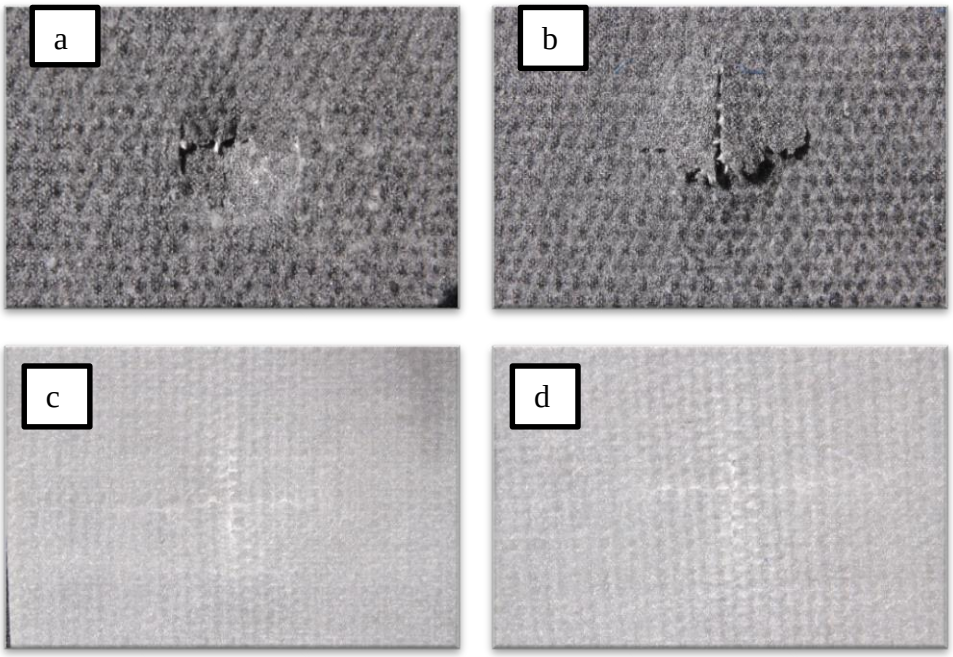
Resim 7.5. 20J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testi sonrasında AFTK'lerin kesitlerine ait mikroskop görüntüleri a) ÇCKNT katkısız b) ağırlıkça %0,3 ÇCKNT katkılı numune

Resim 7.6'da 25 J enerji seviyesinde, düşük hızlı darbe testi sonrası AFTK'lerin kesitlerine ait mikroskop görüntüleri verilmiştir. Resim 7.6a'da ÇCKNT katkısız numunenin vurucu ucun temas ettiği noktadan alınan kesit görüntüsünde matriste çatlağı görünmektedir. Ancak ağırlıkça %0,3 ÇCKNT numunede delaminasyon meydana gelmiştir.

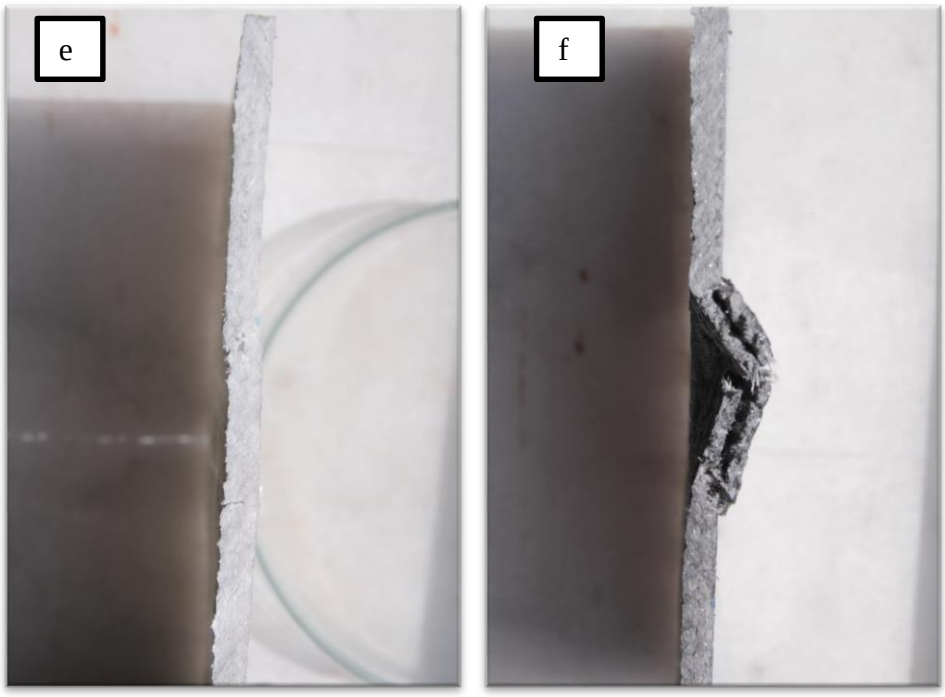


Resim 7.6. Düşük hızlı darbe testi sonrası AFTK'lerin kesitlerine ait mikroskop görüntüleri a) ÇCKNT katkısız b) ağırlıkça %0,3 ÇCKNT katkılı numune

Resim 7.7'de 30 J enerji seviyesinde, düşük hızlı darbe testi sonrası AFTK'lerin kesitlerine ait hasar resimleri verilmiştir. Resim 7.6a'da ÇCKNT katkılı numunede vurucu parçayı delmiştir. Ancak Resim 7.7c'de vurucu ucun parçayı delmediği çatlağın belirgin Şekilde ilerlediği görülmektedir. Resim 7.7c'de alınan kesit görüntüsünde katkısız numunede delinme gerçekleşmese de parçanın kesit alanı boyunca deformasyon meydana gelmiş ve rijitliği bozulmuştur. Resim 7.7d'de ise vurucu uç parçayı delmiş olmasına rağmen numunenin kesit alanında delik bölgesi haricinde bir bozulma görülmemektedir. Vurucu ucun kompoziti delmesi hasar alanını küçültmüştür. ÇCKNT ilavesi ile numunede meydana gelen hasar bölgesi küçültülmüştür.



Resim 7.7. 30 J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testi sonrası AFTKlerin a) ağırlıkça %0,3 ÇCKNT katkılı numunenin hasar resmi ön yüzeyi b) arka yüzeyi c) ÇCKNT katkısız numunenin hasar resmi ön yüzeyi d) arka yüzeyi e) ÇCKNT katkısız numunelerin kesit yüzeyi f) ağırlıkça %0,3 ÇCKNT katkılı numunenin kesit yüzeyi



Resim 7.7. (devam) 30 J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testi sonrası AFTKlerin a) ağırlıkça %0,3 ÇCKNT katkılı numunenin hasar resmi ön yüzeyi b) arka yüzeyi c) ÇCKNT katkısız numunenin hasar resmi ön yüzeyi d) arka yüzeyi e) ÇCKNT katkısız numunelerin kesit yüzeyi f) ağırlıkça %0,3 ÇCKNT katkılı numunenin kesit yüzeyi

En büyük temas kuvvetleri ve çökme miktarları bir birine çok yakın olmasına rağmen takviyeli ve takviyesiz numunelerde meydana gelen hasar mekanizmaları hasar resimlerinden anlaşılacağı üzere büyük farklılık göstermektedir. Özellikle Şekil 6.46b'de takviyeli malzemede tabaka ayrılması ve delinme meydana gelmiş ancak hasar alanı kısıtlı kalmıştır. Takviyesiz numunede ise tabaka ayrılması çok daha az olmasına ve delinme olmamasına rağmen hasar çok daha büyük bir alana yayılmıştır. Bu veriler ışığında malzeme üzerine uygulanan enerji seviyesi arttıkça ÇCKNT katkılı malzemenin rijitlik tepkisinin arttığı açıkça görülmektedir.

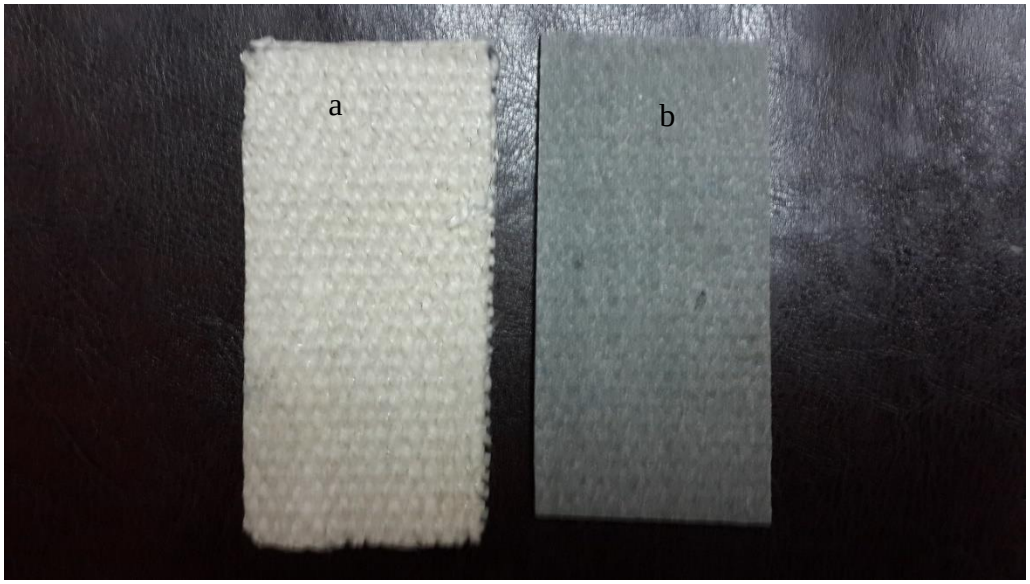
7.5. Yakma Deneyleri Sonuçları

Yakma deneyinde Resim 7.8b'deki numune hassas olarak tartıldıktan sonra fırın içerisinde yakılmaktadır. Yakma işlemi ile reçine tamamen yanmakta ve Resim 7.8a'da kalan alumina elyaf tartılmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen elyaf hacim oranları Çizelge 7.3'de verilmiştir.

Çizelge 7.3. Yakma deneyi sonucu elde edilen sayısal veriler

Numune	Alumina Kumaşın Yoğunluğu (g/cm^3)	Yakma Öncesi Ağırlık (g)	Yakma Sonrası Ağırlık (g)	Toplam Kompozit Hacmi cm^3	Elyaf Hacim Oranı V_f
Katkısız	0,6	27,765	9,005	10*5*0,42	0,71
0%0,1	0,6	28,265	9,002	10*5*0,43	0,69
%0,3	0,6	28,5	8,920	10*5*0,44	0,68
%0,5	0,6	28,75	9,123	10*5*0,46	0,67
%0,7	0,6	29,75	9,125	10*5*0,47	0,65
%1	0,6	31,75	9,255	10*5*0,48	0,64

ÇCKNT oranı arttıkça elyaf hacim oranı düşmekte kompozit kalınlığı yani hacmi artmaktadır. Kalınlık artışının temel nedeni ÇCKNT ilavesi ile doğru orantılı olarak reçinenin viskozitesinin artmasıdır. Artan viskozite matris içerisinde ki gözenekli yapının artmasına neden olmuştur.

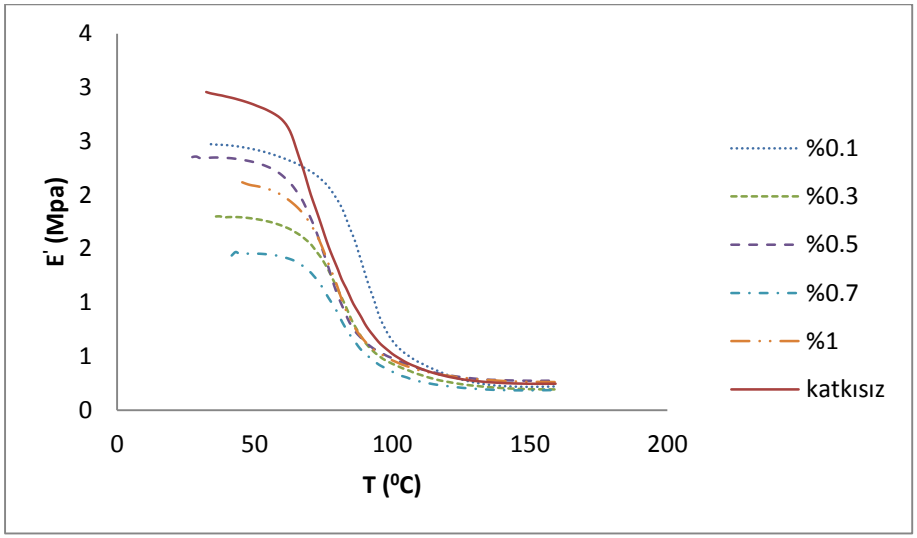


Resim 7.8. a) Yakma sonrası deney numunesi b) yakma öncesi deney numunesi

Elyaf hacim oranı bize kompozit malzemenin mekaniği hakkında birçok aydınlatıcı bilgi vermektedir. Sarıbıyık ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada artan elyaf hacim oranının kompozit malzemenin elastisite modülünün arttığını ve sünekliğin azaldığını göstermişlerdir [121].

7.6. Dinamik Mekanik Analiz Sonuçları

DMA deneyi neticesinde elde edilen kayıp modülü sıcaklık eğrileri Şekil 7.37'de verilmiştir. Bu eğriler sayesin de üretilen AFTK'lerin camsı geçiş sıcaklıkları belirlenebilir. Camsı geçiş sıcaklılarını bulmak için ASTM D7028-07 standartından faydalanılmıştır [101].



Şekil 7.37. AFTK'lerin DMA sonucu elde edilen kayıp modülü sıcaklık eğrileri

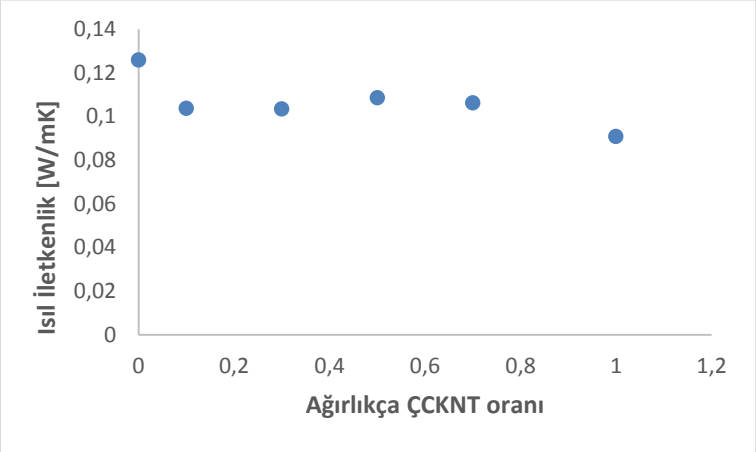
Çizelge 7.4'de DMA deneyi neticesinde elde edilen veriler tablo halinde verilmiştir. AFTK'lere ÇCKNT ilavesi ile nanokompozitlerin camsı geçiş sıcaklıklarında artış gözlemlenmiştir. ÇCKNT katkısız kompozitlerin camsı geçiş sıcaklıkları yaklaşık olarak 60 ^{0}C iken ağırlıkça %0,1 ÇCKNT katkılı numunelerin camsı geçiş sıcaklıkları yaklaşık olarak 78 ^{0}C bulunmuştur. Artış miktarı yaklaşık olarak %60'dır. Kayıp faktörü (tan δ) kayıp modülünün (E'') depolama modülüne oranıdır (E') ve kompozitlerin elastik özelliklerini temsil eder. Kayıp modülü ne kadar küçük malzeme daha elastik davranır diyebiliriz [101-103].

Çizelge 7.4. DMA deneyi sonucu elde edilen sayısal veriler

Ağırlıkça ÇCKNT oranı	E' (Mpa)	E'' (Mpa)	T_g (^{0}C)	tan δ
%0	2830 (50 ^{0}C)	101(50 ^{0}C)	60	0,03584
%0,1	2420 (50 ^{0}C)	101 (50 ^{0}C)	78	0,04175
%0,3	1780 (50 ^{0}C)	108 (50 ^{0}C)	63	0,06067
%0,5	2300 (50 ^{0}C)	144 (50 ^{0}C)	63	0,06263
%0,7	1460 (50 ^{0}C)	140 (50 ^{0}C)	68	0,09315
%1	2080 (50 ^{0}C)	117 (50 ^{0}C)	62	0,05621

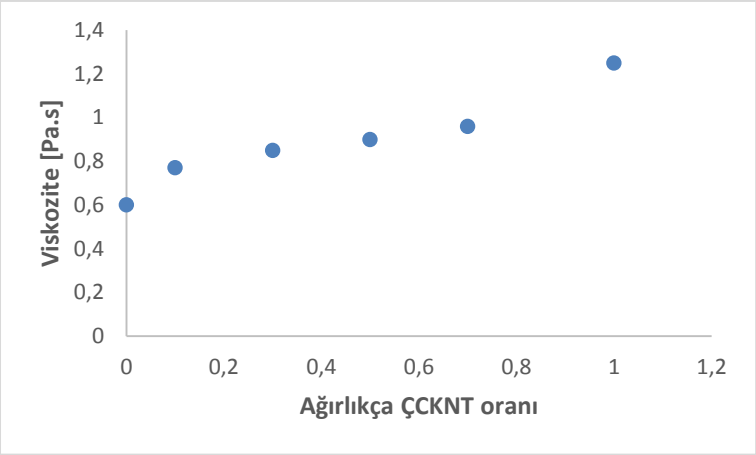
7.7. Isıl iletkenlik Analizi

Lasercomp fox 314 deney cihazında oda sıcaklığında yapılan deneyler neticesinde AFTK'lerin elde edilen ısıl iletkenlik değerleri Şekil 7.38'de verilmiştir. Ağırlıkça ÇCKNT oranı arttıkça kompozitlerin ısıl iletkenliklerinde değişiklikler meydana gelmiştir. Bu değişiklerinin temel nedeni bölüm 6.5'de belirtilen artan gözenek miktarı olarak düşünülmektedir.



Şekil 7.38. AFTK'lerin ısıl iletkenlik değerleri

Şekil 7.39'da AFTK'lerin üretiminde kullanılan reçinenin ÇCKNT katkısı ile değişen viskoziteleri verilmiştir. Viskoziteler viskozimetre yardımıyla ölçülmüştür.



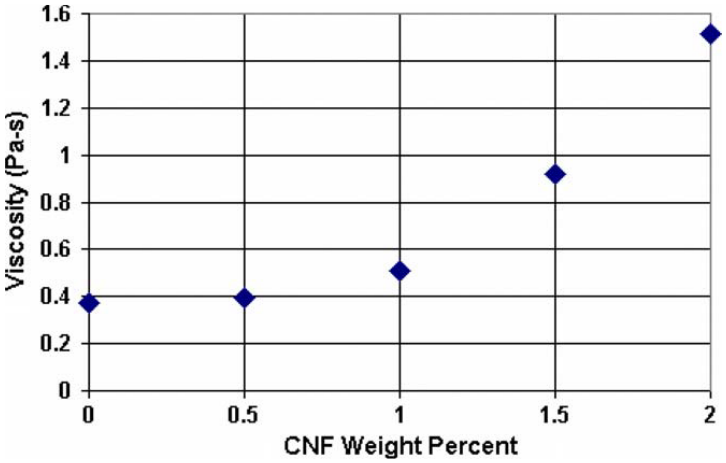
Şekil 7.39. MGS-L285 epoksi reçinenin viskozite değerleri

Çizelge 7.5'de üretilen kompozitlerin ölçülen iletkenlik değerleri tablo halinde verilmiştir. Isaac ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda epoksi reçineye yapılan ÇCKN ilavesinin epoksi reçinenin iletkenliğini %15 oranında arttırdığını göstermiştir [122]. Bu tez çalışması kapsamında üretilen kompozitlerde ÇCKNT ilavesi sonrasında ısıl iletkenlik değerlerinde ki düşüş Çizelge 7.5'de açıkça görülmektedir.

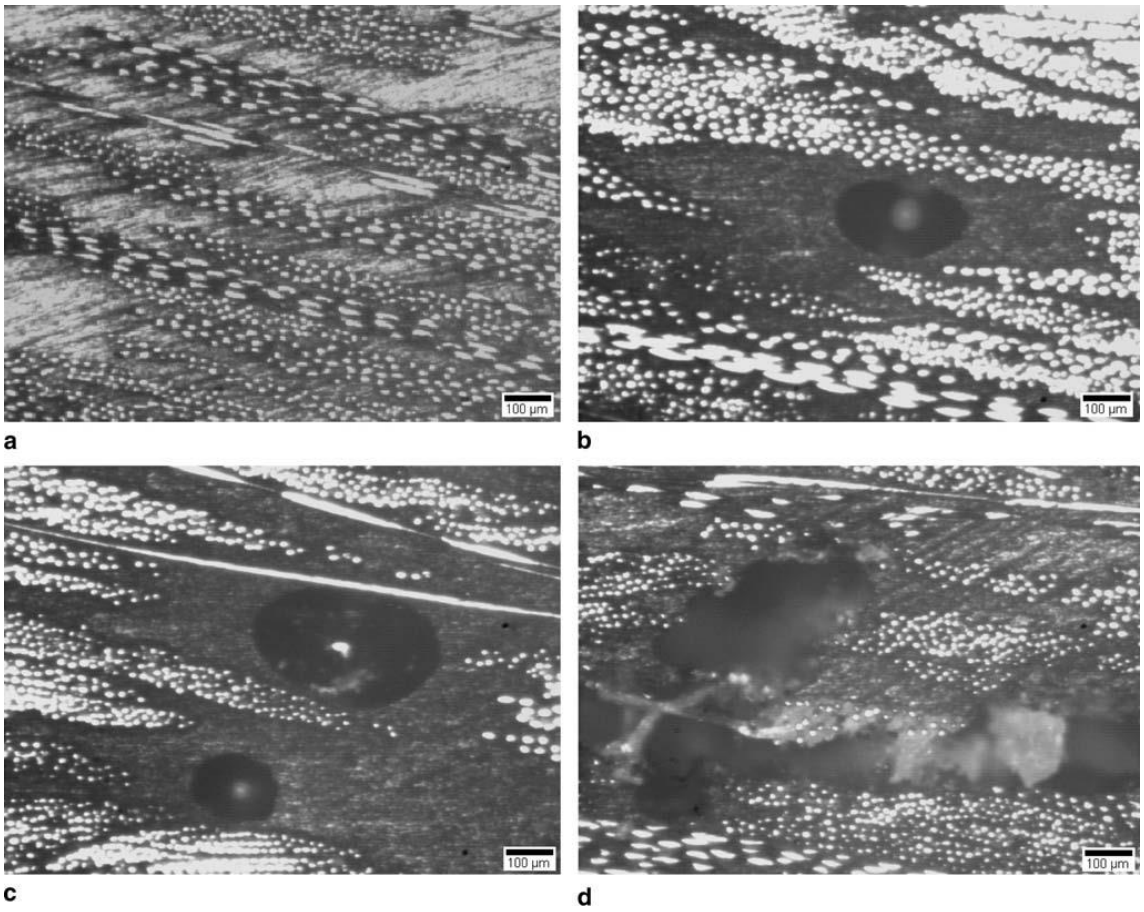
Çizelge 7.5. AFTK'lerin ısıl iletkenlik değerleri

Ağırlıkça ÇKNT miktarı	Isıl İletkenlik (W $m^{-}K^{-1}$)
%0	0,1259
%0,1	0,1038
%0,3	0,1038
%0,5	0,1086
%0,7	0,1063
%1	0,0909

Bu düşüşün temel nedeni ÇCKNT ilavesi ile reçinenin artan viskozitesiden dolayı kompozit malzemelerin yapısında ki boşluk miktarının artması olarak değerlendirilebilir. VARTM yöntemi ile yapılan üretimlerde ÇCKNT ilavesinin reçine viskozitesini arttırdığı ve buna bağlı olarak boşluk miktarının arttığı Şekil 7.40 ve Resim 7.9'da açıkça görülmektedir [113].



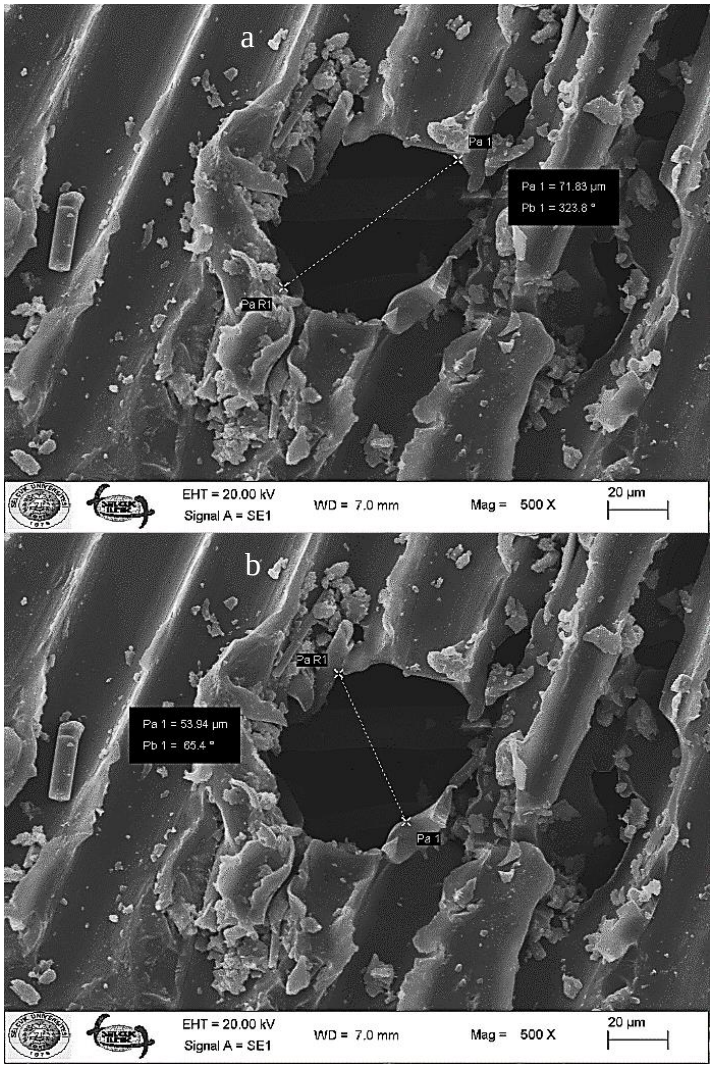
Şekil 7.40. Epoksi reçineye KNT ilavesi ile viskozite değişimi [113]



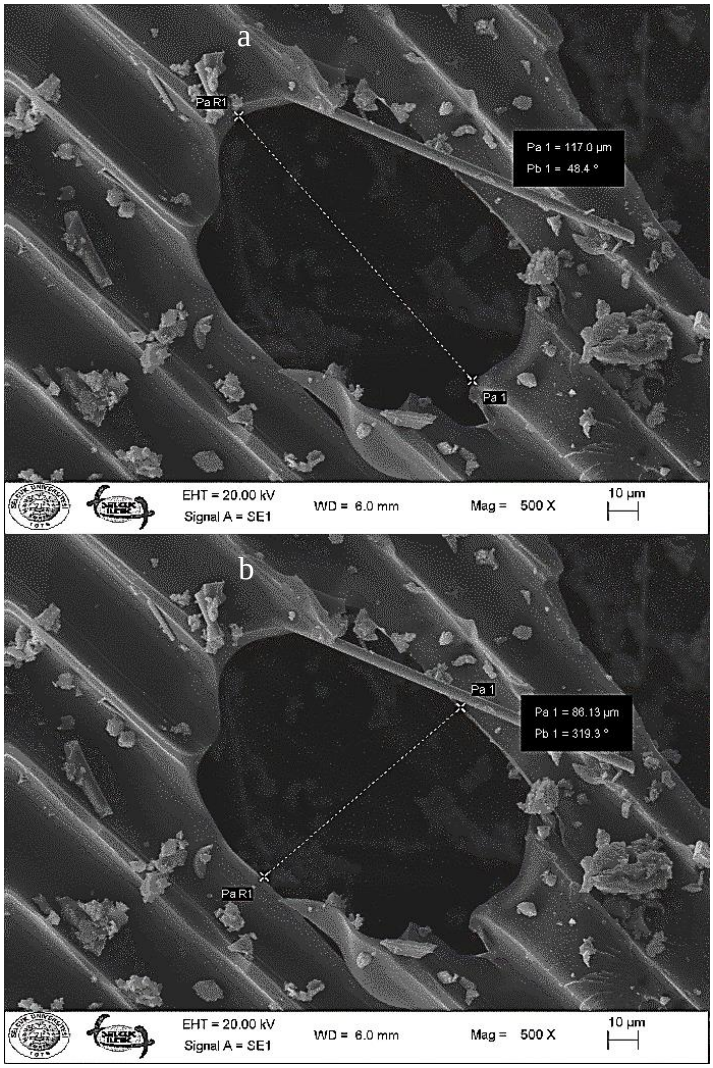
Resim 7.9. Ağırlıkça a) %0 b) %0,5 c) %1 d) %1,5 KNT katkılı kompozitlerde mikro boşlular [113]

AFTK'lere ait Resim 7.10 ve Şekil 7.11'deki SEM görüntülerinde artan KNT oranı ile boşluk Şekillerinin ve boyutlarının değiştiği görülmektedir. Ağırlıkça %0,1 katkılı kompozitler de kapalı hücre gözeneklerin boyutları 71-53 µm ölçülürken ağırlıkça %1 katkılı numunelerin 86-117 µm olarak ölçülmüştür. Bu verilere dayanarak artan ÇKNT

ilavesi kompozitler de ki gözenek miktarını ve gözeneklerin boyutunu arttırdığı için ısıl iletkenliklerinde düşüşe sebep olmuştur diyebiliriz.



Resim 7.10. Ağırlıkça %0,1 katkılı AFTK'lerin hasarsız yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri



Resim 7.11. Ağırlıkça %1 katkılı AFTK'lerin hasarsız yüzeylerinden alınan SEM görüntüler

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Nanokompozitler son zamanlarda araştırmacılar tarafından detaylı bir Şekilde incelenmektedir. Bu çalışmada, AFTK'lerin çekme, eğme, darbe davranışları, ısıl yalıtkanlıkları, elyaf hacim oranları, SEM görüntü analizleri ve DMA verileri araştırılmıştır.

AFTK'lerin üretilmesi ve yapılan testler detaylı bir Şekilde anlatılmıştır. AFTK'ler ÇCKNT katkısız ve ağırlıkça %0,1; %0,3; %0,5; %0,7; %1 ÇCKNT katkılı olarak üretilmiştir.

Nanokompozitlerin üretiminde VARTM yöntemi kullanılmıştır. Üretim yönteminin nanokompozit üzerine etkisini ortadan kaldırmak için bütün numunlerde aynı işlem adımları uygulanmıştır.

Üretilen nanokompozitlerin mekanik karakterizasyonu çekme ve eğme deneyleri gerçekleştirilerek yapılmıştır. Bu deneyler ile nano kompozitlerin çekme dayanımları, eğme dayanımları, çekme ve eğme elastisite modülleri belirlenmiş ve bulunan sonuçlar ÇCKNT'ün epoksi matris içerisindeki varlığı ile ilişkilendirilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Üretilen nanokompozit malzemelere uygulanan çekme deneyleri sonucunda, epoksi matris içerisine katılan ÇCKNT'lerin çekme mukavemetini ve çekme şekil değiştirmesini arttırdığı saptanmıştır. Ancak reçineye katılan ÇCKNT oranını artıkça malzemenin mekanik davranışlarında olumsuz etkiler gözlemlenmiş ve sayısal olarak gösterilmiştir.

Çekme deney numunelerinin kırılma yüzeyleri incelendiğinde, ÇCKNT varlığının epoksi reçinenin kırılma yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı SEM görüntüleri aracılığı ile belirlenmiştir.

Eğme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre, nanokompozit malzemelerde epoksi matris içerisine ÇCKNT ilavesi ile nanokompozitlerin davranışları önemli ölçüde değişmektedir. Reçineye ağırlıkça %0,1 ÇCKNT katkısı ile eğme dayanımları %50, eğme elastikiyet modülleri katkısız numuneye kıyasla %19 oranında artmıştır.

Darbe deneyleri sonucunda ÇCKNT katkılı kompozitlerin daha rijit hale geldiği açıkça gözlemlenmiştir. Eğme deneylerinde de elastikiyet modülündeki artış rijit deformasyon gözlemlerimizle örtüşmüştür. ÇCKNT ilavesi ile üretilen malzemelerde direk delinme meydana gelmesi hasar bölgesini sınırlandırmaktadır. Bu da endüstriyel uygulamalarda kullanılacak olan kompozitlerde dinamik yük deformasyonu sonucu oluşacak hasarlanmaların daha kolay tamir edilebileceği sonucunu bize göstermiştir.

Reçineye ÇCKNT katkısının reçinenin viskozitesini arttırdığı saptanmıştır. Ağırlıkça yüzde ÇCKNT katkısı ile vizkozitenin nasıl değiştiği sayısal olarak ortaya konmuştur. Viskozite artışı AFTK'lerin kalınlıkları, gözenek yapısı, elyaf hacim oranı ve ısıl iletkenlikleri ile ilişkilendirilmiştir.

Isıl iletkenlik ölçümleri neticesinde AFTK'ler ağırlıkça yüzde ÇCKNT oranı artışının AFTK'lerin ısıl iletkenliklerini düşürdüğü belirlenmiştir. Bu düşüş AFTK'lerin matrislerin viskozite artışına bağlı olarak artan boşluk miktarı ve büyüyen gözenek çapları ile ilişkilendirilmiştir.

Yakma deneyleri neticesinde üretilen AFTK'lerin elyaf hacim oranları belirlenmiştir. ÇCKNT katkısının elyaf hacim oranlarını değiştirdiği belirlenmiş ve nedenleri araştırma verileriyle ilişkilendirilerek açıklanmıştır.

Daha sonraki çalışmalarda alumina fiberler ısıl dayanımı yüksek matrislerle birleştirilerek daha fonksiyonel malzemeler üretilebileceği kanısına varılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Deo, R. B., Starnes, J. H., & Holzwarth, R. C. (2001, May). Low-cost composite materials and structures for aircraft applications. In *NATO RTO AVT Panel spring symposium and specialists' meeting Loen, NORWAY*.

2. Shaw, M. (2011) *"ATK Awarded Multi-million Dollar F-35 Contract."* Standard-Examiner - Top of Utah News & Multimedia. Web. Technomic, Lancaster.

3. Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354, 56–58.

4. Oberlin, A., Endo, M., & Koyama, T. (1976). Filamentous growth of carbon through benzene decomposition. *Journal of Crystal Growth*, *32*(3), 335-349.

5. Nesterenko, A. M., Kolesnik, N. F., Akhmatov, Y. S., Sukhomlin, V. I., and Prilutski, O. V. (1982). Metals 3 UDK 869, 173.23. *News of the academy of science*, 12–16, USSR.

6. Thostenson, E. T., Ren, Z., and Chou T. W. (2001). Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review. *Composites Science and Technology*, 61, 1899-1912.

7. Nam, T. H., Goto, K., Nakayama, H., Oshima, K., Premalal, V., Shimamura, Y., and Kobayashi, S. (2014). Effects of stretching on mechanical properties of aligned multi-walled carbon nanotube/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 64, 194-202.

8. Thostenson, E. T., and Chou, T. W. (2003). On the elastic properties of carbon nanotube-based composites: modeling and characterization, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36, 573–582.

9. Yu, M. F., Lourie, O., Dyer, M. J., Moloni, K., Kelly, T. F., and Ruoff, R. S. (2000). Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load. *Science*, *287*(5453), 637-640.

10. Yu, M. (2000). Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load. *Science*, 287, 637-640.

11. Li, C., and Chou, T. W. (2003). Elastic moduli of multi-walled carbon nanotubes and the effect of van der Waals forces. *Compos Science and Technology*, 63(11), 1517–1524.

12. Eskizeybek, V. (2012). *Yüzeylerine kimyasal olarak karbon nanotüpler bağlanmış örgü cam fiber/epoksi nanokompozitlerin üretimi ve tabakalar arası kırılma davranışının incelenmesi*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

13. Ma, P. C., Kim, J. K., and Tang, B. Z. (2007). Effects of silane functionalization on the properties of carbon nanotube/epoxy nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 67 (14), 2965-2972.

14. Gojny F., Wichmann, M., Fiedler, B., and Schulte, K. (2005a). Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study, *Composites Science and Technology*, 65, 2300-2313.

15. (a) Gojny, F. H., Whichmann, M. H. G., Fiedler, B., Bauhofer, W., and Schulte, K. (2005b). Influnce of nanomaodification on the mechanical and electrical properties of conventional fibre-reinforced composites. *Composites: Part A*, 36, 1525-1535.

15. (b) Schulte, K., Gojny, F. H., Fiedler, B., Broza, G., and Sandler, J. (2005). Carbon nanotube reinforced polymers A state of the art – review. In: Friedrich K, Fakirov S, Zhang Z, editors. Polymer-composites –from nano to macro scale. *Dordrecht: Kluwer Publishers*, 3–23.

16. Lu, K. L., Lago, M., Chen, Y. K., Green, M. L. H., Harris, P. J. F., and Tsang, S. C. (1996). Mechanical damage of carbon nanotubes by ultrasound. *Carbon*, 34, 814–816.

17. Shelimov, K. B., Esenaliev, R. O., Rinzler, A. G., Huffman, C. B., and Smalley, R. E. (1998). Purification of single-wall carbon nanotubes by ultrasonically assisted filtration. *Chemical Physics Letters*, 282, 429–434.

18. Zhang, M., Yudasaka, M., Koshio, A., and Iijima, S. (2001). Effect of polymerand solvent on purification and cutting of single-wall carbon nanotubes. *Chemical Physisc Letter*, 349, 25–30.

19. Li, J., Wu, Z., Huang, C., Tu, Y., & Li, L. (2015). Simultaneous enhancements in the mechanical, thermal, and electrical performances of glass-fiber-reinforced cyanate ester/epoxy composites with plasma-functionalized carbon nanotubes at different temperatures. *Journal of Applied Polymer Science*,132(6).

20. Feng, J., Zhang, C., & Feng, J. (2012). Carbon fiber reinforced carbon aerogel composites for thermal insulation prepared by soft reinforcement. *Materials Letters*, 67(1), 266-268.

21. La Rosa, A. D., Recca, A., Gagliano, A., Summerscales, J., Latteri, A., Cozzo, G., & Cicala, G. (2014). Environmental impacts and thermal insulation performance of innovative composite solutions for building applications. *Construction and Building Materials*, 55, 406-414.

22. Kandare, E., Khatibi, A. A., Yoo, S., Wang, R., Ma, J., Olivier, P., ... & Wang, C. H. (2015). Improving the through-thickness thermal and electrical conductivity of carbon fibre/epoxy laminates by exploiting synergy between graphene and silver nano-inclusions. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 69, 72-82.

23. Tian, T., & Cole, K. D. (2012). Anisotropic thermal conductivity measurement of carbon-fiber/epoxy composite materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(23), 6530-6537.a

23. (a)Rachmadini, Y., Tan, V. B. C., and Tay, T. E. (2010). Enhancement of mechanical properties of composites through incorporation of CNT in VARTM-a Review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1-26.

24. Lau, A. K. T, and Hui, D. (2002). The revolutionary creation of new advanced materials—carbon nanotube composites. *Composites Part B: Engineering*, 33 (4), 263-277.

25. Iwahori, Y., Ishiwata, S., Sumizawa, T., and Ishikawa, T. (2005). Mechanical Properties Improvements in Two-phase and Three-phase Composites Using Carbon Nano-fiber Dispersed Resin. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36 (10), 1430-1439.

26. Qian, D., Dickey, E. C., Andrews, R., and Rantell, T. (2000). Load Transfer and Deformation Mechanisms in Carbon Nanotube-polystyrene Composites. *Applied Physics Letters*, 76 (20), 2868-2870.

27. Adams, D. F., Carlsson, L. A. and Pipes, R. B. (2003). *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials Series*. CRC Press, Boca Raton, FL.

28. Allaoui, A., Bai, S., Cheng, H. M. and Bai, J. B. (2002). Mechanical and electrical properties of a MWNT / epoxy composite. *Composite Science and Technology*, 62, 1993-1998.

29. Montazeri, A., Javadpour, J., Khavandi, A., Tcharkhtchi, A., and Mohajeri, A. (2010). Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites. *Materials & Design*, 31, 4202-4208.

30. Lau, K. T., and Shi, S. Q. (2002). Failure mechanisms of carbon nanotube/epoxy composites pretreated in different temperature environments. *Carbon*, 40 (15), 2965-2968.

31. Moaseri, E., Karimi, M., Baniadam, M., and Maghrebi, M. (2014). Improvements in mechanical properties of multi-walled carbon nanotube-reinforced epoxy composites through novel magnetic-assisted method for alignment of carbon nanotubes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 64, 228-233.

32. Dirand, X., Hilaire, B., Soulief, J. P., and Nardin, M. (1996). Interfacial shear strength in glass fiber/vinylester resin composites. *Composite Science and Technology*, 56, 533-539.

33. Moaseri, E., Karimi, M., Baniadam, M., & Maghrebi, M. (2014). Improvements in mechanical properties of multi-walled carbon nanotube-reinforced epoxy composites through novel magnetic-assisted method for alignment of carbon nanotubes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 64, 228-233.

34. Rahmanian, S., Suraya, A. R., Shazed, M. A., Zahari, R., and Zainudin, E. S. (2014). Mechanical characterization of epoxy composite with multiscale reinforcements: Carbon nanotubes and short carbon fibers. *Materials & Design*, 60, 34-40.

35. Rotem, A., and Lifshitz, J. M. (1971). Longitudinal strength of unidirectional fibrous composite under high rate of loading. In Proceeding of 26th Annual Technology Conference, *Society for Plastics Industry,* 1-10.

36. Sierakowski, R., Hemp, G., and Hokstad, A. (1971). Some Damping Properties of Aluminum Particle Filled Epoxy Composites. *Journal of Composite Materials*, 5 (3), 417-420.

37. Abrate, S. (1998). Impact on composite structures. Cambridge, Cambridge University Press. 135-160.

38. Sierakowski, R. L., and Chaturvedi, S. K. (1997). Dynamic loading and characterization of fiber-reinforced composites. Dynamic Loading and Characterization of Fiber-Reinforced Composites, by Robert L. Sierakowski, Shive K. Chaturvedi, pp. 252. ISBN 0-471-13824-X. Wiley-VCH, February 1997., 1.

39. Whittingham, B., Marshall, I.H., Mitrevski, T., and Jones, R. (2004). The response of composite structures with pre-stress subject to low velocity impact damage. *Composite structures*, 66, 685-698.

40. Belingardi, G. and Vadori, R. (2002). Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates. *International Journal of Impact Engineering*, 27, 213-229.

41. Mitrevski, T., Marshall, I.H., Thomson, R., Jones, R., and Whittingham, B. (2004). The effect of impactor shape on the impact response of composite laminates. *Composite Structures*, 67, 139-148.

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

43. Soliman, E. M., Sheyka, M. P., and Taha, M. R. (2012). Low-velocity impact of thin woven carbon fabric composites incorporating multi-walled carbon nanotubes. *International Journal of Impact Engineering*, 47, 39-47.

44. Panda, P., Mishra, G., Mantry, S., Singh, S. K., & Sinha, S. P. (2013). A study on mechanical, thermal, and electrical properties of glass fiber-reinforced epoxy hybrid composites filled with plasma-synthesized AlN. *Journal of Composite Materials*, 0021998313506242.

45. Yao Y., Zeng X., Guo K., Sun R., Xu J., (2015). The effect of interfacial state on the thermal conductivity of functionalized Al2O3 filled glass fibers reinforced polymer composites. *Composites: Part A*, 69,49-55.

46. Hull, D., & Clyne, T. W. (1996). *An introduction to composite materials*. Cambridge University Press: Cambridge.

47. Sheikh-Ahmad, J. Y. (2009). *Machining of polymer composites*. Newyork: springer, 164-165.

48. Sinha, P. K. (2006). Composite Materials and Structures, Composite Centre of Excellence, AR&DB, Department of Aerospace Engineering I. I. T. Kharagpur.

49. Clyne, T.W. and Withers, P.J. (1993). An introduction to Metal Matrix Composites. Cambridge University Press: Cambridge.

50. Chou, T. W., McCullough, R. L., and Pipes, R. B. (1986). Composites, Scientific American, 255, 192-203.

51. Sahin, Y., 2000, Kompozit Malzemelere Giris, Gazi Kitabevi, Ankara, 1-3, 65-66, 67-68, 87-88, 79-86, 38-41, 254, 211-215.

52. Takeno, M., Nishijima, S., Okada, T., Fujioka, K., Tsuchida, Y., and Kuraoka, Y. (1986). Thermal and mechanical properties of advanced composite materials at low temperatures. Advances in Cryogenic Engineering Materials, 217-224.

53. Hojo, M., Matsuda, S., Fiedler, B., Kawada, T., Moriya, K., Ochiai, S., and Aoyama, H. (2002). Mode I and II delamination fatigue crack growth behavior of alumina fiber/epoxy laminates in liquid nitrogen. International Journal of Fatigue, 24(2), 109-118.

54. Licciulli, A., Chiechi, A., Fersini, M., Sanosh, K. P., and Balakrishnan, A. (2013). Influence of Zirconia Interfacial Coating on Alumina Fiber-reinforced Alumina Matrix Composites. International Journal of Applied Ceramic Technology, 10(2), 251-256.

55. JCMA. (2011). "The Japan Carbon Fiber Manufacturers Association."

56. Walsh P.J. (2001). Carbon Fibers, ASM Handbook, 21, 35-40.

57. Kornmann, X. (2001). Polimer Layered Silcate Nanocomposites, EMP, Dübendorf, Switzerland, 44-56.

58. Okada, A. (1987). O.Poly.Prep., ACS Div. Polym. Chem., 28 (2), 447-450,

59. Alexandre, M., and Dubois, P., (2000). Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials, Materials Science and Engineering R:Reports, 28, 1-63.

60. Yılmazbayhan, A. (2006). Maleik anhidritle graftlanmıs oligomerlerin ve i-pp/silikat nanokompozitlerin tepkimeli ekstrüzyon yöntemiyle sentezi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Universitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

61. Steiner III, S. A. (2011). Carbon nanotube growth on challenging substrates: applications for carbon-fiber composites (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

62. Wicks, S. S., Guzman de Villoria, R., and Wardle, B. L. (2010). Interlaminar and intralaminar reinforcement of composite laminates with aligned carbon nanotubes. Composites Science and Technology, 70, 20-28.

63. Garcia, E. J., Wardle, B. L., Hart, A. J., & Yamamoto, N. (2008). Fabrication and multifunctional properties of a hybrid laminate with aligned carbon nanotubes grown in situ. *Composites Science and Technology*, *68*(9), 2034-2041.

64. Parul, (2012). *Glass fiber/epoxy polymer nanocomposites:effect of another polymeric fibe*r, Master Tehses, Master Of tehcnology Chemicak Engineering, India.

65. Fan, Z. (2007). Flow and rheology of multiwalled carbon nanotubes thermoset resin suspensions in processing of glass fiber composites. University Delaware, NJ USA.

66. Iijima, S. (2002). Carbon nanotubes: past, present, and future. *Physica B*, 323, 1-5.

67. Ebbesen, T. W., and Ajayan, P. M. (1992). Largscale synthesis of carbon nanotubes, *Nature*, 358, 220-222.

68. Collins, P. G. (2000). Nanotubes for electronics. *Scientific American*, 283, 67-69.

69. Guo, T., Nikolaev, P., Thess, A., Colbert, D., and Smalley, R. (1995). Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization. *Chemical Physics Letter*, 243, 49–54.

70. Pinilla, J. L., Moliner, R., Suelves, I., Lazaro, M., Echegoyen, Y., and Palacios, J. (2007). Production of hydrogen and carbon nanofibers by thermal decomposition of methane using metal catalysts in a fluidized bed reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32 (18), 4821-4829.

71. Njuguna, B. J., Pielichowski, K., and Alcock, J. R. (2007). Epoxy-Based Fibre Reinforced Nanocomposites. *Advanced Engineering Materials*, 9 (10), 835-847.

72. Coleman, J. N., Khan, U., and Gun'ko, Y. K. (2006). Mechanical reinforcement of polymers using carbon nanotubes. *Advanced Materials*, 18 (6), 689-706.

73. Andrews, R. and Weisenberger, M. (2004). Carbon nanotube polymer composites. *Current Opinion In Solid State and Materials Science*, 8, 31-37.

74. Song, Y. S., and Youn, J. R., (2005). Influence of dispersion states of carbon nanotubes on physical properties of epoxy nanocomposites. *Carbon*, 43, 1378–1385.

75. Shaffer, M. S. P., and Windle, A. H. (1999). Fabrication and Characterization of Carbon Nanotube/Poly (vinyl alcohol) Composites. *Advanced Materials*, 11, 937-941.

76. Gong, X., Liu, J., Baskaran, S., Voise, R. D. and Young, J. S. (2000). Surfactant-Assisted Processing of Carbon Nanotube/Polymer Composites. *Chemistry Of Materials*, 12, 1049-1052.

77. Olek, M., Kempa, K., Jurga, S., and Giersig, M. (2005). Nanomechanical properties of silica-coated multiwall carbon nanotubes-poly (methyl methacrylate) composites. *Langmuir The ACS Journal Of Surfaces and Colloids*, 21, 3146-3197.

78. Shi, D., He, P., Lian, J., Chaud, X., Bud'ko, S. L., Beaugnon, E., Wang, L. M., Ewing, R. C., and Tournier, R. (2005). Magnetic alignment of carbon nanofibers in polymer composites and anisotropy of mechanical properties. Journal Of Applied Physics. 97 (6), 064312.

79. Eskizeybek, V. (2012). *Yüzeylerine kimyasal olarak karbon nanotüpler bağlanmış örgü cam fiber/epoksi nanokompozitlerin üretimi ve tabakalar arası kırılma davranışının incelenmesi,* Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

80. Pegel, S., Potschke, P., Petzold, G., Alig, I., Dudkin, S. M., and Lellinger, D. (2008). Dispersion, agglomeration, and network formation of multiwalled carbon nanotubes in polycarbonate melts. Polymer, 49, 974-984.

81. Luo, J. J., and Daniel, I. M. (2003). Characterization and modeling of mechanical behavior of polymer/clay nanocomposites. Compos. Sci. Technol., 63 (11), 1607–1616.

82. Thostenson, E., Li, C., and Chou, T. (2005). Nanocomposites in context, Journal of Composites Science & Technology. 65, 491–516.

83. Schmidt, D., Shah, D., and Giannelis, E. P. (2002). New advances in polymer/layered silicate nanocomposites. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 6 (3), 205–212.

84. Gojny F., Wichmann, M., Fiedler, B. and Schulte, K., (2005a). Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study, Composites Science and Technology, 65, 2300-2313.

85. Stronge, W.J. (2000). Impact mechanics. Cambridge, Cambridge University Press. 1-26.

86. Mili, F., and Necib, B. (2001). Impact behaviour of cross-ply laminated composite plates under low velocities. Composite Structures, 51, 273-244.

87. Ceyhun, V., and Turan, M. (2003). Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı. Mühendis ve Makine, 516, 35-41.

88. Jenq, S.T., and Mo, J.J. (1996). Ballistic impact response for two-step braided threedimensional textile composites. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 34 (2), 375-384.

89. Dorey, G. Bishop, S., Curtis, P., (1985). On the impact performance of carbon fibre laminates with epoxy and PEEK matrices. Composites Science and Technology, 23 (3), 221-237.

89. (b) Kara, M. (2012). Düşük hızlı darbe sonrası yama ile tamir edilmiş filaman sarım CTP boruların iç basınç altındaki hasar davranışı, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

90. Kara, M. (2006). Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerin dinamik cevabı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

91. Griffin, C.F. (1987). Damage tolerance of toughned resin graphite composites. ASTM STP, 937, 23-33.

92. Sierakowski, R. L., and Chaturvedi, S. K. (1997). Dynamic loading and characterization of fiber-reinforced composites. John Wiley & Sons, Inc., United Satates of America, 252.

93. Park, R., and Jang, J. (2001a). Impact behavior of aramid fiber/glass fiber hybrid composites: Effect of stacking sequences. *Polymer Composites*, 22 (1), 80-89.

94. Gibson, R. F., Ayorinde, E. O., and Wen, Y. F. (2007). Vibrations of carbon nanotubes and their composites: a review. *Composites Science and Technology*, 67, 1–28.

95. Sayer, M. (2009). Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 134s.

96. Chadegani, A. (2008). Strain Energy Release Rate Analysis of Adhesive-Bonded Composite Joints with a Prescribed Interlaminar Crack. Master's Thesis, Wichita State University, Iran.

97. Raymond, A., (1992) Toughening mechanisms in thermoplastic-modified epoxies: 1.Modification using poly(phenylene oxide), Department of Materials Science and Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan 48109, USA.

98. Gupta, S., (1998). Fracture behavior of isotropically conductive adhesives, Paper presented at the 3rd International Conference of Adhesive Joining and Coating Technology in Electronics Manufacturing, Los Alamitos, CA: IEEE, 38-43.

99. Ahmad, Z. B. (1986). The contribution of particle-stretching to the fracture toughness of rubber modified polymers. Scripta Metallurgica, 20(6), 843-848.

100. Ekrem, M. (2015). *Karbon nanotüp ve polivinil alkol nanoelyafla güçlendirilmiş epoksi yapıştırıcıların alüminyum bağlantılar üzerindeki kırılma davranışları*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

101. ASTM International, Standard Terminology for Plastics: Dynamic Mechanical Properties Designation: D4092 - 07(2013).

102. ASTM International, Standard Test Method for Glass Transition Temperature (DMA Tg) of Polymer Matrix Composites by Dynamic Mechanical Analysis (DMA), Designation: D7028-07.

103. ISO 6721-1:2011 Plastics: Determination of dynamic mechanical properties; Part 1: General principles.

104. Flinn, R.A. (1981). *Engineering Materials And Their Applications*, Houghton Mifflin Company, Boston.

105. Czichos, H., Saito, T., and Smith, M. L. (2006). *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*, Springer, Berlin.

106. Kim, J. T., Kim H. C., Kim, S. K., Kathi, J., and Rhee, K. Y. (2009). 3-Aminopropyltrietoxysilane effect on thermal and mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes reinforced epoxy composites. *Journal of Composite Materials*, 43, 2533-2541.

107. Suslick, K. S. (1990). Sonochemistry, *Science,* 247, 1439-1445.

108. Advani, S. G. and Sozer, E. M. (2003). Process modeling in composites manufacturing, *CRC Press*, NY USA. al., (2004) [2+1] cycloaddition for cross-linking SWCNTs, *Carbon,* 42 , 941-947.

109. Chandrasekaran, V. C. S. (2011). *Role of Multiwalled Carbon Nanotube in Interlaminar Shear Strength of Epoxy/Glass Fiber/Multiwalled Carbon Nanotube Hybrid Composites*, (Doctoral dissertation, University of Delaware, 2011), Dissertation Abstracts International.

110. Khattab, A. (2005). *Exploratory Development of VARIM Process for Manufacturing High Temperature Polymer Matrix Composites*, (Doctoral dissertation, University of Missouri, 2005), Dissertation Abstracts International.

111. ASTM International, Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, Designation: D3039/D3039M-14.

112. ASTM International, Standard test method for flexural properties of polymer matrix composites, Designation: D7264/D7264M-07.

113. Sadeghian, R., Gangireddy, S., Minaie, B., and Hsiao, K. T. (2006). Manufacturing carbon nanofibers toughened polyester/glass fiber composites using vacuum assisted resin transfer molding for enhancing the mode-I delamination resistance. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, *37*(10), 1787-1795.

114. ASTM International, Standard test method for Ignition loss of cured reinforced resins, Designation: D2584 -11.

115. Zhang, S. (2000). A simple approach to the evaluation of fiber/matrix interfacial shear strength and fracture toughness. *Composites Science and Technology,* 60, 145-148.

116. Ma, P. C., Kim, J. K., and Tang, B. Z. (2007). Effects of silane functionalization on the properties of carbon nanotube/epoxy nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 67 (14), 2965-2972.

117. Park, C. (2002). Dispersion of single wall carbon nanotubes by in situ polymerization under sonication. *Chemical Physics Letters*, 364, 303-308.

118. Jang, J. S., and Kim, H. S. (1996). Performance improvement of glass fiber-poly (phenylene sulfide) composite. *J. Appl. Polym. Sci.*, 60, 2297-2306.

119. Allaoui, A., Bai, S., Cheng, H.M. and Bai, J.B. (2002) Mechanical and electrical properties of a MWNT / epoxy composite, *Composite Science and technology*, 62, 1993-1998.

120. Montazeri, A., Javadpour, J., Khavandi, A., Tcharkhtchi, A. and Mohajeri, A., (2010) Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites, *Materials & Design*, 31, 4202-4208.

121. Sarıbıyık, M. (2009). *Fıber volume fractıon effect to mechanıcal propertıes of glass fıber reınforced plastıcs*. *5. Uluslararası _leri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Turkey.

122. Ventura, I. A., Rahaman, A., & Lubineau, G. (2013). The thermal properties of a carbon nanotube-enriched epoxy: Thermal conductivity, curing, and degradation kinetics. *Journal of Applied Polymer Science*, *130*(4), 2722-2733.

123. Icten, B. M., Kıral, B. G., and Deniz, M. E. (2013). Impactor diameter effect on low velocity impact response of woven glass epoxy composite plates. *Composites Part B: Engineering*, 50, 325-332.

124. Biron, M. (2004). Thermosets and composites: technical information for plastics users. *Elsevier Science*, Amsterdam Netherlands.

125. Lordi, V., and Yao, N. (1999). Molecular mechanics of binding in carbon-nanotube-polymer composites. *Journal of Materials Research*, 15, 2770-2779.

126. Ragondet, A. (2005). *Experimental Characterization of the Vacuum Infusion Process*, (Doctoral dissertation, University of *Nottingham*, 2005), Dissertation Abstracts International.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Sezer PIÇAK
Uyruğu : T.C
Doğum tarihi ve yeri : 19.07.1986, Bursa
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (543) 2341963
Faks :
E-Posta : sezer@selcuk.edu.tr



Eğitim

Derece	Okul/Program	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/Makina Mühendisliği	2015
Lisans	Selçuk Üniversitesi/Makina Mühendisliği	2012
Lise	Yıldırım Beyazıt Lisesi	2003

İş Deneyimi

Yıl	Çalıştığı Yer	Görev
2013-Devam	Selçuk Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2012-2013	Odesis Savunma Sanayi A.Ş	Arge Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Sinema,Müzik,Futbol