

Alemdar ONGUN

Yüksek Lisans Tezi KÜ 2015

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Karbon Nanotüp ve Nanokil Katkılı, Karbon Fiber /
Epoksi Kompozitlerin Düşük Hız Darbe Testiyle Enerji
Absorbsiyon Davranışlarının İncelenmesi

Alemdar ONGUN

OCAK 2015

Makine Anabilim Dalında Alemdar ONGUN tarafından hazırlanan KARBON NANOTÜP VE NANOKİL KATKILI, KARBON FİBER / EPOKSİ KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZ DARBE TESTİYLE ENERJİ ABSORBSİYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ali ERİŞEN
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Ali ERİŞEN
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ahmet AVCI
Üye (Danışman) : Prof. Dr. Ali ERİŞEN
Üye : Yrd. Doç. Dr. Osman BİCAN

29 /01 /2015

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Aileme

ÖZET

KARBON NANOTÜP VE NANOKİL KATKILI, KARBON FİBER / EPOKSİ KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZ DARBE TESTİYLE ENERJİ ABSORBSİYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ONGUN, Alemdar

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ali ERİŞEN

Ocak 2015, 94 sayfa

Karbon Nanotüp (Carbon Nanotube, CNT) ve Nanokil Katkılı Karbon Fiber / Epoksi Hibrit Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi adlı bu yüksek lisans tezinde; epoksi reçineye CNT ve nanokil eklenmiş ve bu matris malzemesi vakum infüzyon metoduyla karbon elyafa emdirilerek tabakalı kompozit levhalar oluşturulmuştur. CNT oranın daha önceki çalışmalarda optimum özellikleri ağırlıkça epoksiye katılan % 0.3 oranı bilindiğinden dolayı bu değer sabit tutulup, nanokil reçineye ağırlıkça % 1 , % 3 ve % 5 oranlarında olacak şekilde eklenmiştir. Bunun yanında sadece reçine ve sertleştiricisiyle, sadece ağırlıkça % 0.3 CNT takviyesi ile ve sadece ağırlıkça % 1 , % 3 ve % 5 oranlarında nanokil ekleyerek toplam 8 farklı numune çeşidi hazırlanmıştır.

Tabakalı kompozit levhaların mekanik özelliklerini görebilmek için çekme, üç nokta eğme, düşük hız darbe testleri yapılmıştır. Metalografik özelliklerinin tespiti için Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM) görüntüleri incelenmiştir. Test sonuçları grafiklerle tez sonucunda verilmiş ve yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: MWCNT, Nanokil, Karbon Elyaf, Darbe Testi

ABSTRACT

THE EFFECTS OF CNTS AND NANOCCLAY ON THE ENERGY ABSORPTION BEHAVIOR OF CARBON/EPOXY NANO COMPOSITES UNDER LOW VELOCITY IMPACT

ONGUN, Alemdar

Kırıkkale University

Graduate School of Natural And Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ali ERİŞEN

January 2015, 94 pages

In this study, named as Fabrication and Investigation on Mechanical Properties of Carbon Nanotube and Nanoclay Carbon Fiber / Epoxy Hybrid Composites; CNT and Nanoclay was introduced into Epoxy resin and, thereby, this matrix material was infiltrated into Carbon fiber by Vacuum Infusion Method, laminated composite plates were produced. Since most efficient CNT rate was determined by previous studies as 0.3 %, this rate was held constant and nanoclay was added into resin so as to volume fraction was 1 % , 3 % and 5 %. In addition to this, with only resin and hardening agent, addition with volume fraction 0.3 % CNT reinforcement of Epoxy resin and eventually, with only 1 % , 3 % and 5 % nanoclay were added into resin, 8 different specimens were fabricated.

Tensile, three point bending, low-velocity impact tests were carried out for determining mechanical properties of laminated composite plates; Scanning Electron Microscope, SEM images were examined. Test results were presented with graphs and interpreted.

Keywords: MWCNT, Nanoclay, Carbon Fibre, Impact Test

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimi hazırlarken yaptığım araştırmalar ve deneyler sırasında yardımlarını esirgemeyen, bilgi, tecrübe ve görüşlerinden yararlandığım değerli danışman hocam, Sayın Prof. Dr. Ali ERİŞEN' e, tez çalışmalarım esnasında, bilimsel konularda daima yardımını gördüğüm hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet AVCI ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Barıő KALAYCIOĞLU' ya, tezimin birçok aşamasında yardım gördüğüm Arő. Gör. Sezer PIÇAK, Arő. Gör. H. Burak KAYBAL ve Arő. Gör. Onur OKUR' a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	1
1.2. Kaynak Özetleri	3
2. MATERYAL VE YÖNTEM	7
2.1. Kompozit Malzemeler	7
2.1.1. Kompozitlerde Matris Çeşitleri	9
2.1.1.1. Polimer Matrisli Kompozitler.....	9
2.1.1.2. Metal Matrisli Kompozitler	15
2.1.1.3. Seramik Matrisli Kompozitler	18
2.2. Karbon Nanotüp	20
2.3. Nanokiller.....	30
2.3.1. Kaolin	31
2.3.2. Smektit	32
2.3.3. İlit	33
2.3.4. Klorit	34
2.4. Mekanik Özellik Testleri	35
2.4.1. Çekme Testi	35
2.4.2. Üç Nokta Eğme Testi.....	36
2.4.3. Düşük Hız Darbe Testi	37
2.5. Metalografik Özelliklerin Belirlenmesi.....	40
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	41
3.1. Deneyler de Kullanılan Malzemeler.....	41

3.1.1. Karbon Nanotüp.....	41
3.1.2. Karbon Elyaf, Epoksi ve Epoksi Sertleştiricisi.....	42
3.1.3. Nanokil.....	43
3.2. Kompozit Levhaların Üretiminde Kullanılan Vakum İnfüzyon Cihazı... ..	44
3.3. Kompozit Levhaların Üretimi.....	45
3.4. Deneyler de Kullanılan Ölçüm Cihazları	47
4. SAYISAL BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER.....	50
4.1. Çekme Testi Sonuçları.....	50
4.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları	59
4.3. Düşük Hız Darbe Testi Sonuçları.....	68
4.4. Metalografik Sonuçlar.....	77
5. SONUÇLAR.....	81
KAYNAKLAR	83

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Gömülü Bileşenin Fiziksel Şekilleri a) Tek Yönlü Sürekli Elyaf lar b) Kesikli Partikül Elyaf lar c) Ortogonal Pul Elyaf lar [17].....	9
2.2. Gerilme- Şekil Değiş tirme İliş kisi.....	11
2.3. Geleneksel malzemelerle, alüminyum matrisli kompozitin mekaniksel özelliklerinin karşılaştırılması	16
2.4. Grafen.....	20
2.5. Fulleren Yapının Oluş umu	21
2.6. Bazı Materyallerin Nano Boyutlarda Karşılaştırılması [58]	22
2.7. Karbon Esaslı Nano Yapılar a) Fulleren; b) İç İç Geçmiş Fullerenler; c) Karbon Nanotüp; d) Nanokonik; e) Nanotoroid; f) Düzlem Grafen; g) 3D Kristal Grafit; h) Haeckelite Yüzey; i) Grafen Şeritler; j) Grafen Demetler; k) Spiral Karbon Nanotüp; l) Kısa Karbon Zincirler m) 3D Schwarzite Kristali; n) Sünger Karbon; o) 3D Karbon Bağ ları; p) 2D Nanoşerit Bağ ları [60].....	22
2.8. Tek Duvarlı Karbon Nanotüp (Single Walled Carbon Nanotube, SWCNT), Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (Multi Walled Carbon Nanotube, MWCNT).....	23
2.9. Nanotüplerin İsimlendirilmesi Zig Zag (Zikzak), Arm Chair (Köşegen,Koltuk), Chiral (Kiral – Helisel).....	24
2.10. Nanotüplerin vektörel birleşimlerine göre isimlendirilmesi.....	24
2.11. CNT Dizilim Örneği.....	25
2.12. Moleküler Dinamik (Molecular Dynamic, MD) Simülasyonu Yapılan MWCNT a) Yüksüz b) Kopma Durumuna Kadar Yük Uygulanmış.....	27
2.13. Şematik Olarak Yük Uygulandıktan sonra MWCNT	28
2.14. CNT' nin Çatlak İlerleyiş i Karş ısında Davranış ı a) Çatlak Köprüsü b) Çatlak Yolu c) CNT'nin Ayrılma (Pull-out) Tepkisi [81]	29
2.15. a) Silisyum tetrahedrali b) Bağ lanmış silisyum tetrahedralleri [83]	30
2.16. a) Alüminyum oktahedrali b) Bağ lanmış alüminyum oktahedralleri [83].....	31
2.17. Kaolinin 1:1 Yapısı.....	32
2.18. Kaolin'in Yapısı [86].....	32
2.19. Montmorillonit'in Yapısı [87].....	33

2.20. İlit' in Yapısı [88]	33
2.21. Kloritin Yapısı [89].....	34
2.22. Çekme Test DeneY Düzeneği [90]	35
2.23. 1) Çekme mukavemeti 2) Akma mukavemeti 3) Kopma Mukavemeti 4) Pekleşme bölgesi 5) Boyun Verme Bölgesi A: Görünür (Mühendislik) gerilmesi (F/A0) B: Gerçek gerilme (F/A) [91].....	36
2.24. Üç Nokta Eğme Test Düzeneği [92]	37
2.25. Düşük Hız Darbe Test Düzeneği [95].....	38
2.26. Kuvvet- Yer Değiştirme Grafiği	39
2.27. Enerji - Zaman Grafiği	39
2.28. Darbe Sonucu Hasar Oluşumları [97].....	40
3.1. MWCNT'nin a)TEM görüntüsü b) SEM görüntüsü [100]	42
3.2. a) Montmorillonit Yapı b) Organikleştirilmiş Montmorillonit Yapı	43
3.3. İşlem Tezgâhı.....	44
3.4. a) Hava Ortamında Vakumlanmış Tabaka b) Reçine Verilirken Tabaka	46
3.5. 100 kN Kapasiteli Çekme Cihazı	47
3.6. Shimadzu Marka Üç Nokta Eğme Ölçüm Cihazı.....	48
3.7. Düşük Hız Darbe Test Cihazı.....	48
3.8. SEM Görüntüleme Cihazı	49
4.1. CNT0NC0 Numunesinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değiştirme Grafiği	50
4.2. CNT0NC1 Numunesinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değiştirme Grafiği	51
4.3. CNT0NC3 Numunesinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değiştirme Grafiği	51
4.4. CNT0NC5 Numunesinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değiştirme Grafiği	52
4.5. CNT0,3NC0 Numunesinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değiştirme Grafiği	52
4.6. CNT0,3NC1 Numunesinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değiştirme Grafiği	53
4.7. CNT0,3NC3 Numunesinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değiştirme Grafiği	53
4.8. CNT0,3NC5 Numunesinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değiştirme Grafiği	54
4.9. CNT0NC0, CNT0NC1, CNT0NC3 ve CNT0NC5 Numunelerinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değiştirme Değerlerinin Karşılaştırılmalı Grafiği.....	54
4.10. CNT0NC0, CNT0NC1, CNT0NC3 ve CNT0NC5 Numunelerinin Çekme Testi a) Maksimum Gerilme b)Maksimum Şekil Değiştirme Değerlerinin Karşılaştırılması Diyagramı.....	56

4.11. CNT0NC0, CNT0,3NC0, CNT0,3NC1, CNT0,3NC3 ve CNT0,3NC5 Numunelerinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Değerlerinin Karşılaştırılmalı Grafiği	57
4.12. CNT0NC0, CNT0,3NC0, CNT0,3NC1, CNT0,3NC3 ve CNT0,3NC5 Numunelerinin Çekme Testi a) Maksimum Gerilme b) Maksimum Şekil Değişirme Değerlerinin Karşılaştırılması Diyagramı	58
4.13. CNT0NC0 Numunesinin Üç Nokta Eğme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği	59
4.14. CNT0NC1 Numunesinin Üç Nokta Eğme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği	60
4.15. CNT0NC3 Numunesinin Üç Nokta Eğme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği	60
4.16. CNT0NC5 Numunesinin Üç Nokta Eğme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği	61
4.17. CNT0,3NC0 Numunesinin Üç Nokta Eğme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği	61
4.18. CNT0,3NC1 Numunesinin Üç Nokta Eğme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği	62
4.19. CNT0,3NC3 Numunesinin Üç Nokta Eğme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği	62
4.20. CNT0,3NC5 Numunesinin Üç Nokta Eğme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği	63
4.21. CNT0NC0, CNT0NC1, CNT0NC3 ve CNT0NC5 Numunelerinin Üç Nokta Eğme Testi Gerilme-Şekil Değişirme Değerlerinin Karşılaştırılmalı Grafiği	63
4.22. CNT0NC0, CNT0NC1, CNT0NC3 ve CNT0NC5 Numunelerinin Üç Nokta Eğme Testi a) Maksimum Gerilme b) Maksimum Şekil Değişirme Değerlerinin Karşılaştırılması Diyagramı	65
4.23. CNT0NC0, CNT0,3NC0, CNT0,3NC1, CNT0,3NC3 ve CNT0,3NC5 Numunelerinin Üç Nokta Eğme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Değerlerinin Karşılaştırılmalı Grafiği	66

4.24. CNT0NC0, CNT0,3NC0, CNT0,3NC1, CNT0,3NC3 ve CNT0,3NC5 Numunelerinin Üç Nokta Eğme Testi a) Maksimum Gerilme b) Maksimum Şekil Değişirme Değerlerinin Karşılaştırılması Diyagramı.....	67
4.25. CNT0NC0 Numunesinin Düşük Hız Darbe Testi Kuvvet – Zaman Diyagramı .	68
4.26. CNT0NC1 Numunesinin Düşük Hız Darbe Testi Kuvvet – Zaman Diyagramı .	69
4.27. CNT0NC3 Numunesinin Düşük Hız Darbe Testi Kuvvet – Zaman Diyagramı .	69
4.28. CNT0NC5 Numunesinin Düşük Hız Darbe Testi Kuvvet – Zaman Diyagramı .	70
4.29. CNT0,3NC0 Numunesinin Düşük Hız Darbe Testi Kuvvet – Zaman Diyagramı.....	70
4.30. CNT0,3NC1 Numunesinin Düşük Hız Darbe Testi Kuvvet – Zaman Diyagramı.....	71
4.31. CNT0,3NC3 Numunesinin Düşük Hız Darbe Testi Kuvvet – Zaman Diyagramı.....	71
4.32. CNT0,3NC5 Numunesinin Düşük Hız Darbe Testi Kuvvet – Zaman Diyagramı.....	72
4.33. CNT0NC1 Numunesinin Kuvvet – Yer Değişirme Grafiği.....	73
4.34. CNT0,3NC1 Numunesinin Kuvvet – Yer Değişirme Grafiği.....	73
4.35. Numunelerden Elde Edilen İmpuls Değerleri.....	74
4.36. Farklı Darbe Enerjilerinde Elde Edilen Enerji – Zaman Grafikler a) CNT0NC1 Numunesi b) CNT0,3NC1 Numunesi	75
4.37. CNT0NC0, CNT0NC1, CNT0NC3 ve CNT0NC5 Numunelerine Uygulanan Enerji ve Numunelerin Absorbe Ettikleri Enerji Diyagramı	76
4.38. CNT0,3NC0, CNT0,3NC1, CNT0,3NC3 ve CNT0,3NC5 Numunelerine Uygulanan Enerji ve Numunelerin Absorbe Ettikleri Enerji Diyagramı	76
4.39. a) CNT0,3NC1 b) CNT0,3NC3 c) CNT0,3NC5 30J Numunelerinin Arka Kısmı	77
4.40. a) CNT0,3NC1 b) CNT0,3NC3 c) CNT0,3NC5 25J Numunelerinin Arka Kısmı	77
4.41. a) CNT0NC1 b) CNT0NC3 c) CNT0NC5 30J Numunelerinin Arka Kısmı	77
4.42. a) CNT0NC1 b) CNT0NC3 c) CNT0NC5 25J Numunelerinin Arka Kısmı	78
4.43. Farklı Enerji Seviyelerine Maruz Bırakılan Numune Kesitleri.....	78
4.44. Kopan Elyaf Demeti	79

4.45. MWCNT Ekli Karbon Elyaf Lifin Koptuktan Sonra GörünüŖü	79
4.46. Nanokil YapıŖan Elyaf Lifler	80
4.47. Nanokil Takviyeli Numune	80

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Polimer Matrisli Malzemeler, Çelik ve Alüminyumun Mekaniksel Özelliklerinin Karşılaştırılması [18-20]	10
2.2. Termoplastik ve Termoset Farkları [18]	11
2.3. Cam Liflerinin Kimyasal Birleşimleri [23,24].....	12
2.4. Karbon ve Grafit Elyafın Karşılaştırılması [25]	13
2.5. Grafit Fiberlerin Mekanik Özellikleri (Üretici Değerleri) [26].....	13
2.6. Aramid Liflerin Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması [34]	15
2.7. Alüminyum bazlı kompozitlerin, takviye malzemeli durumlarının mekaniksel özelliklerinin karşılaştırılması [38-41]	18
2.8. Seramiklerin Mekanik Özelliklerine Örnekler [43].....	19
2.9. Nanotüp Çeşitleri, Çelik ve Kevlar Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması [63] [66-78]	26
3.1. MWCNT Özellikleri.....	41
3.2. Kullanılan Malzemelerin Teknik Özellikleri [101-103].....	42
3.3. EsanNANO Kilin Kimyasal Özellikleri.....	43
3.4. EsanNANO Kilin Tane Boyut Analizi.....	444
3.5. Hazırlanan Numuneler.....	45

SİMGELER DİZİNİ

R_e	Akma Mukavemeti
R_m	Çekme Mukavemeti
μm	Mikrometre
nm	Nanometre
Å	Angström
Mg	Miligram
ε	Mühendislik Deformasyonu
ΔL	Boydaki Uzama
L_0	Başlangıç Uzunluğu
L	Son Uzunluk
F	Kuvvet
A	Kesit Alan
σ	Mühendislik Gerilmesi
σ_f	Esneme Gerilmesi
ν	Poisson Oranı
b	Numune Genişliği
h	Numune Kalınlığı
δ	Maksimum Yer Değiştirme
I	Atalet Momenti
E_f	Elastisite Modülü
V_f	Elyafın Hacim Oranı
W_f	Elyafın Kütlesi
W_c	Kompozitin Kütlesi
ρ_f	Elyafın Yoğunluğu
ρ_c	Kompozitin Yoğunluğu
ε	Şekil Değiştirme

KISALTMALAR DİZİNİ

CNT	Karbon Nanotüp (Carbon Nanotube)
SWCNT	Tek Duvarlı Karbon Nanotüp (Single Walled Carbon Nanotube)
MWCNT	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (Multi Walled Carbon Nanotube)
MD	Moleküler Dinamik (Molecular Dynamic)
PMC	Polimer Matrisli Kompozit (Polymer Matrix Composite)
MMC	Metal Matrisli Kompozit (Metal Matrix Composite)
CMC	Seramik Matrisli Kompozit (Seramik Matrix Composite)
CAI	Darbeden Sonra Sıkıştırma (Comprassion After Impact)
CFRP	Karbon Elyaf Destekli Polimer (Carbon Fiber Reinforced Polymer)
AMC	Alüminyum Matrisli Kompozit (Aluminium Matrix Composites)
ILLS	Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti (Interlaminar Shear Strength)
SBS	Kısa Çubuk Basma (Short Beam Shear)
CST	Basınçlı Kayma Testi (Compression Shear Test)
VARTM	Vakum Destekli Reçine Transferiyle Kalıplama (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)
IDVARTM	Çift Vakum Destekli Reçine Transferiyle Kalıplama (Injection and Double Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)
CVD	Kimyasal Buhar Çökeltme (Chemical Vapor Deposition)
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
TEM	Geçirim Elektron Mikroskobu (Transmission Electron Microscope)

1. GİRİŞ

1.1. Amaç ve Kapsam

Bu çalışma saf olarak ve değişik oranlar da CNT ve nanokil takviyeli karbon elyaf / epoksi kompozit levhaların, mekanik özelliklerinin belirlenmesi (çekme, üç nokta eğme, düşük hız darbe testi) amacıyla yapılmıştır.

Karbon nanotüpler göstermiş oldukları yüksek mekanik özellikler nedeniyle bilim dünyasında ve araştırmalarda ön plana çıkan nano yapılarıdır. Üretimi sebebiyle yüksek maliyetli olan CNT' lerin üretim metotları gün geçtikçe gelişmekte; üretimi serileşmekte ve maliyetleri düşmektedir.

Karbon elyaf gibi yüksek mukavemet değerlerine sahip malzemelerle, CNT katılarak yapılan tabakalı kompozit levhaların incelenmesi ve araştırılması birçok makaleye konu olmuştur.

Nanokiller de kullanıldıkları malzemeye, çeşidine göre istenilen özellikler kazandırmaktadır. Örnek verilecek olursa mukavemet, ısı dayanımı, yanma geciktiriciliği, sürtünme direnci, ultraviyole koruyucu etki vb. özellikler kazandırabilmektedir.

Nanokil ve CNT gelişmekte olan bir alan olduğundan dolayı istenilen özellikleri istenilen maliyette ve alan da kullanmak için ön çalışmalar ve uygun değerler ar-ge çalışmalarıyla tespit edilmelidir. Üretim metotları ve üretilen malzemelerin testleriyle ilgili standartlar oluşturulmalıdır. İlerleyen kısımlarda karbon elyaf, CNT, reçine ve nanokil detaylı olarak incelenmiştir.

Kompozit malzemeler uzay, havacılık ve savunma alanlarında önem arz etmektedir, çünkü bu sektörlerde maliyetten çok hafiflik ve mukavemet öncelik kazanmaktadır. Örnek verilecek olursa üretilen bir uçağın kompozit malzemeler kullanılarak daha hafif yapılmasıyla, harcayacağı yakıt miktarı düşmekte ve daha uzun mesafeli uçuşlar yapabilmektedir.

Bu çalışma nanokilin ve CNT' ün mukavemet arttırıcı özelliklerini beraber kullanabilmek, uygun tasarım değerlerini yakalamak ve bundan sonra yapılacak olan çalışmalara ışık tutmak amacıyla yapılmıştır. Tabakalı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde çekme testi ve üç nokta eğme testinin yanında dinamik hasar oluşumunu görmek amacıyla düşük hız darbe testleri de önem kazanmaktadır. Bu testlerle beraber üretilen malzemenin metalografik özelliklerini belirlemek amacıyla SEM görüntüleri incelenmiştir. Nanokilin, CNT ile olan etkileşimi ve beraber malzemeye kazandırdığı mekanik özellikler ile ilgili tespitler yapılmıştır.

Vakum infüzyon metoduyla epoksiye katılan CNT oranının % 0.3 değerinde en uygun sayısal ve mekanik özellikleri kazandırması yapılan literatür araştırması sonucunda belirlenmiştir. Ancak % 0.3 CNT içeren kompozitlere nanokil katkısının özellikleri ile ilgili literatür de herhangi bir bilgiye rastlanmamıştır. Bu nedenle bu çalışmanın amacı farklı oranlarda (% 1, % 3 ve % 5) nanokil içeren, % 0.3 CNT katkılı kompozit malzemelerin yapısal ve mekanik özelliklerinin incelenmesidir.

1.2. Kaynak Özetleri

Günümüzde devamlı olarak kompozit malzemelerin geliştirilmesine ve ekonomikleştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Karbon nanotüp (Carbon Nanotube, CNT) ve nano killer de üstün mekaniksel özellikleriyle 2000'li yıllardan itibaren geniş kullanım alanlarıyla araştırmalarda kullanılmaktadır. Bu bölümde kısaca bu araştırmalardan bahsedilmiştir.

B. Ashrafi, J. Guan, V. Mirjalili ve arkadaşları (2011), tek duvarlı karbon nanotüpü epoksi/karbon fiber tabakalı kompozitlerde kullanmış ve mekaniksel özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları testlerde epoksinin ağırlıkça % 0.1 tek duvarlı karbon nanotüp kullanıp, darbeden sonra sıkıştırma (Compression After Impact, CAI) testinde % 3.5, kırılma tokluğunda % 13, tabakalar arası kırılma tokluğunda % 28'lik artış gözlenirken; darbe hasarında % 5 azalma elde etmişlerdir [1].

E. M. Soliman, M. P. Sheyka, M. R. Taha (2012), çok duvarlı karbon nanotüpü karbon fiber kompozit tabakalarda kullanmış ve düşük hız darbe testlerini yapmışlardır. Testleri epoksinin ağırlıkça % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 çok duvarlı nanotüp kullanarak; 15, 24, 30, 60, 120 J'lük enerjilerle testleri gerçekleştirmişlerdir. Zamana bağlı olarak yükleme, şekil değiştirme, hız ve enerji ölçümlerini yapmışlardır. Karbon fiber tabakalarda, çok duvarlı karbon nanotüpün darbe dayanımını arttırdığını ve darbe hasarını sınırladığını gözlemlemişlerdir. Ek olarak % 1.5 oranında nanotüp eklenen tabakaların enerji absorpsiyonunda % 50'lik bir artış gözlemlenmiştir [2].

V. Kostopoulos, A. Baltopoulos, P. Karapappas ve arkadaşları (2010), çok duvarlı karbon nanotüpü (Multi Walled Carbon Nanotube, MWCNT) epoksinin ağırlıkça % 0.5 oranında; karbon elyaf destekli polimer (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) matrisli kompozit de kullanmışlardır. Levhanın darbe anı ve darbe sonrası özelliklerini incelemişlerdir. MWCNT katılan ve katılmayan levhaları karşılaştırdıklarında, darbe dayanımı özelliklerinde iyileşmeler olduğunu, yüksek enerji sönümlendiğini, izostatik basınç dayanımı ve basma dayanımının arttığını gözlemlemişlerdir. Bunların yanı sıra malzemenin yorulma dayanımını da arttırdığını kaydetmişlerdir [3].

M. M. Rahman, S. Zainuddin, M. V. Hosur ve arkadaşları (2012), fonksiyonelleştirilmiş MWCNT katkılı epoksi matrisi cam elyafta ağırlıkça % 0.1 – 0.2 – 0.3 – 0.4 oranlarında

kullanarak, elle yatırma daha sonra sıcak presle ürettiklerin kompozit levhalarda optimum mekaniksel ve termo-mekaniksel özellikleri sergileyen malzemeyi araştırmak için testler yapmışlardır. Yaptıkları kırma ve dinamik mekaniz analiz (DMA, Dynamic Mechanic Analysis) testlerinde ağırlıkça en uygun katılan oranı % 0.3 ile; sırasıyla akma mukavemeti, elastisite modülü ve gerilme için % 37, % 21 ve % 21 artış gözlemleyerek bulmuşlardır [4].

F. H. Gojny, M. H. G. Wichmann ve arkadaşları (2005), karbon nanotüp çeşitlerinin epoksi matrisli kompozitler üzerindeki mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kompozit levhalara, tek duvarlı, çift duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüpleri; ağırlıkça oranları polimerin % 0.1, % 0.3 ve % 0.5' i olacak şekilde ekleyerek elastite modüllerini, akma mukavemetlerini ve darbe dayanımlarını ölçmüşlerdir. Genel değerlendirmede tüm mekanik özelliklerinin en fazla % 0.5 oranında çift duvarlı nanotüp katılan levhada arttığını gözlemlemişlerdir [5].

Z. Fan, M. H. Santare, S. G. Advani (2007), epoksi matrisine ağırlıkça % 0, % 0,5 ve % 1 MWCNT ilave ederek cam elyafli kompozit tabakalara, tabakalar arası kayma mukavemetini (Interlaminar Shear Strength, ILSS) ölçmüşlerdir. ILSS ile yeterince yorum yapabilmek için, kısa çubuk basma (Short Beam Shear, SBS) ve basınçla kayma testi (Compression Shear Test, CST) yapmışlardır. Genel olarak kullanılan vakum destekli reçine transferiyle kalıplama (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding, VARTM) metoduyla, çift vakum destekli reçine transferiyle kalıplama (Injection and Double Vacuum Assisted Resin Transfer Molding, IDVARTM) metodunu kullanmışlardır. IDVARTM, VARTM metoduna göre daha fazla basınç sağlayarak reçinenin daha iyi yayılmasıyla ekstra yapışma sağladığını görmüşlerdir. IDVARTM metoduyla cam elyafli kompozit tabakalara % 0, % 0.5 ve % 1 MWCNT ilave ederek yaptıkları ILSS testlerinde sırasıyla % 9.7, % 20.5 ve % 33.1' lik iyileşme görmüşlerdir [6].

L. P. Borrego, J. D. M. Costa, J. A. M. Ferreira, ve H. Silva (2014), epoksi matrisine MWCNT ve nanokil takviye ederek vakum infüzyon yöntemiyle ürettikleri, cam elyaf kompozit tabakaların yorulma dayanımı ölçümleri yapmışlardır. Test sonuçlarında

MWCNT ve nanokilin yorulma çatlaklarının yayılmasına karşı bir bariyer görevi görerek kılcal çatlakların daha yavaş ilerlediğini gözlemlemişlerdir [7].

N. A. Siddiqui, M. Sham, B. Z. Tang ve arkadaşları (2009), cam liflerin yüzeylerini CNT katkıli epoksiyle kaplamış, böylelikle liflerin kılcal, kırılğan çatlaklarını doldurarak malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmişlerdir. Lif yüzeylerine ağırlıkça % 0.3 CNT katkıli epoksi matris kullanarak, çeşitli lif uzunluklarında yaptıkları testlerde çekme mukavemetinin, gerilimin lifler arasında daha iyi dağılarak önemli miktarda arttığını ölçmüşlerdir [8].

K. L. Kepple, G. P. Sanborn, P. A. Lacasse ve arkadaşları (2008), karbon liflere CNT ekleyip elyaf hale getirdikten sonra kırılma toklukları üzerine çalışmışlardır. CFRP matrisli kompozitlerle ASTM D 5528 standartına göre yapmış oldukları testlerde kırılma tokluğunda % 50, üç nokta eğme testlerinde ise eğilme dayanımının %5 civarında arttığını gözlemlemişlerdir [9].

N. A. Siddiqui, S. U. Khan ve J. K. Kim (2013), epoksi matrise CNT ekleyip, bu matrisi CFRP kompozitte kullanmışlardır. Yaptıkları ILSS testlerinde ağırlıkça % 0.5 CNT takviyesiyle % 12 artış gözlemlemişlerdir. Tüp şeklinde içi boş olan numunelerle yaptıkları burulma modülü ve mukavemeti testlerinde sırasıyla %17 ve % 19.5 iyileşme tespit etmişlerdir. Bunun yanı sıra ağırlıkça % 0.5'den fazla CNT içerik içeren testlerde bu iyileşmelerin düştüğünü gözlemlemişler bunu da CNT içeriğinin bölgesel olarak toplanmasına bağlamışlardır [10].

S. K. Singh, S. Singh, S. Sharma ve V. Sharma (2014), nanokili epoksi içine ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında katarak, %30 cam elyaf, epoksi reçine ve sertleştirici oranı ağırlıkça 10:4 olup, elle yatırma metoduyla kompozit tabakalar üretip, bu numuneler üzerinde testler yapmışlardır. Yaptıkları testler sonucunda %3 katkıli numunelerin eğme mukavemetinde %57, çekme mukavemetinde %8'lik artışla en iyi değerleri verdiğini gözlemlemişlerdir [11].

K. Kanny ve T. P. Mohan (2013), nanokil eklenmiş reçinenin cam elyafa infüzyonunu analiz etmişlerdir. Ağırlıkça %0 ve %5 nanokil ekleyerek yaptıkları çalışmalar sonucunda; nanokil oranı arttıkça, reçine akışında ki sürekliliğin (% 0 için; 1.48 m/s ,

% 5 için 0.9 m/s) bozulduğunu ve nanokilin fiberdeki boşlukları yeterince dolduramadığını gözlemlemişlerdir. Test sonuçlarında matirise katılan ağırlıkça % 3 nanokilin akma mukavemetini, elastisite modülünü ve yüzde uzamasında sırasıyla % 9, % 21, % 15 iyileşme gözlemlenmiştir [12] .

P. N. B. Reis, J. A. M. Ferreira, Z. Y. Zhang ve arkadaşları (2012), epoksi matrisli kevlar elyafli kompozit levhalara, epoksi ağırlığının % 1.5, % 3 ve % 6 ağırlığı oranın da nanokil ekleyip düşük hız darbe ve darbe hasarı ilişkisini incelemişlerdir. En iyi sonuçları % 6 oranda almalarına rağmen en iyi iyileşmenin % 1.5' dan % 3' e çıkarken olduğunu gözlemlemişlerdir. % 3' den % 6 ya % 1.15 iyileşme görülürken, % 1.5' den, % 3' e % 32.22' lik bir iyileşme görmüşlerdir [13].

K. Iqbal, S. U. Khan, A. Munir ve J. Kim (2009), CFRP matrisli kompozitlerin reçinesine nanokil ekleyip, darbe hasar ilişkilerini, düşük hız darbe ve CAI testlerini yapmışlardır. Testler için hazırladıkları numunelere reçine ağırlığının % 1.5, % 3 ve % 5' i kadar nanokil katıp testleri gerçekleştirmişlerdir. En iyi sonuçları % 3 nanokil ekledikleri numunelerde almışlardır [14].

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme, iki yada daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı türdeki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemeyle toplamak amacıyla, makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılırlar. Karbon elyafı, plastikler, otomobil lastikleri ve sermetler (Sermet, seramik gibi metal olmayan partiküllerin matris içinde karıştırılarak, oluşturulan kompozite verilen isimdir.) bunlara en basit örnekler olarak gösterilebilirler. Bir kompozit malzeme, genelde düşük elastisite modül ve dayanıma sahip reçine veya metalik matris bileşeni ile bunun içinde dağılmış daha az oranda kullanılan yüksek ve dayanımlı takviye elemanından oluşmaktadır.

Kompozit malzemelerin başlıca olumlu özelliklerini sıralayacak olursak ;

- Hafiflik ve görünüm
- Şekil değiştirmeme
- Yüksek mekanik özellikler (Çekme, basma, darbe, çentik, yorulma dayanımları vb.)
- Yüksek kimyasal direnç ve sıcaklık dayanımı (Kimyasal maddelere, çözücülere, asitlere vb. ortamlara dayanımları)
- Elektriksel özellikler (İsteğe bağlı kazandırılabilir özellikler)
- Çatlak ilerlemesi minimize ve titreşim absorbe özelliği

Olumsuzlukları ;

- Çoğu kompozitler anizotropiktir (Gösterdiği özellikler yöne bağlıdır; bu durum üstünlükte olabilir, zayıflıkta olabilir)
- Üretim güçlüğü (İmal usulleri yavaş ve pahalıdır)
- İşleme güçlüğü ve istenen yüzey kalitesinin elde edilemeyişi
- Geri dönüşümünün olmayışı
- Kırılma uzamasının az oluşu [15]

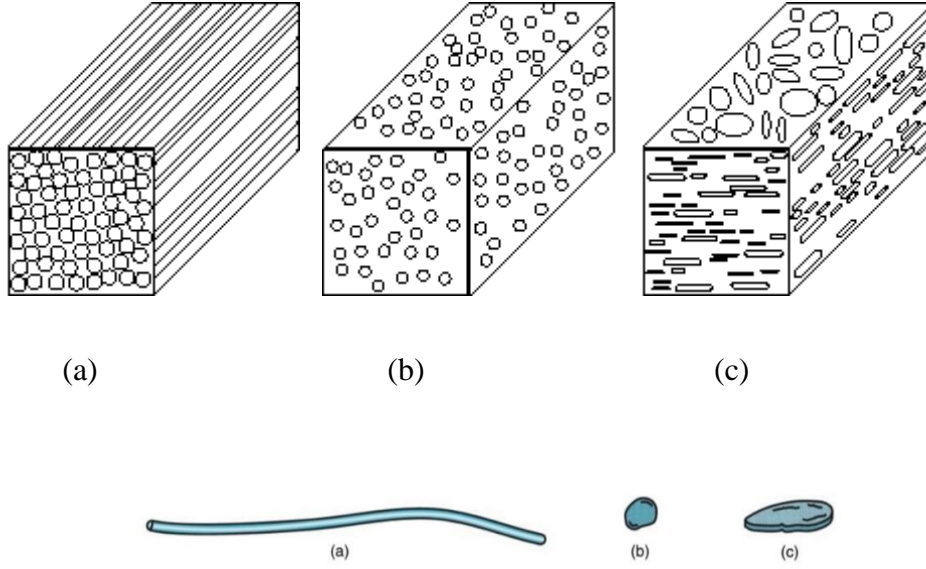
Kompozit malzemeleri genelde iki bileşen halinde, birincil bileşen olarak liflerin içine gömülü olduğu matrisi, ikincil bileşen olarak lifleri görmekteyiz. Matris, yapılan

parçanın ve ürünün ana kütlelerini oluşturur. Matris lifleri sararak ve içine gömerek iki bileşeni bir arada tutar. Yük uygulandığında, yükü ikinci bileşene ileterek ve kendi içinde liflere yayarak gelen kuvvetin dağılımını sağlar, lifleri çevresel etkilerden korur. İkincil bileşen, birinci bileşeni kuvvetlendirerek iskelet görevi görür. İdeal matris malzemesi üretimin kolaylığı açısından başlangıçta düşük viskoziteli bir akışkan yapıda iken daha sonra katılaştıkça, elyafı sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilecek bir forma geçebilmelidir.

Kompozit yapılarda yükü taşıyan liflerin fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Örneğin matris malzemesi olmaksızın bir elyaf demeti düşünüldüğünde yük bir ya da birkaç elyaf tarafından taşınacaktır. Matrisin varlığı ise yükün tüm liflere eşit olarak dağılımını sağlayacaktır. Çekme ve kesme yükü altındaki bir gerilmeye dayanım, elyaflarla matris arasında iyi bir yapışma ve matrisin yüksek kesme mukavemeti özelliklerini gerektirir. Elyaf yönlenmelerine paralel doğrultuda (liflerin boyuna doğru) , matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyici önemli hususlardır. Matris elyafa göre daha zayıf ve daha esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Matrisin kesme mukavemeti ve matris ile elyaf arası bağ kuvvetleri çok yüksek ise elyaf ya da matriste oluşacak bir çatlak, tüm yönlerde yön değiştirmeksizin ilerlemesi mümkündür. Bu durumda kompozit gevrek bir malzeme gibi davrandığından kopma yüzeyi temiz ve parlak bir yapı gösterir. Eğer bağ mukavemeti çok düşükse elyaf boşluktaki bir elyaf demeti gibi davranır ve kompozit zayıflar. Orta seviyede bir bağ mukavemetinde ise elyaf veya matristen başlayan enlemesine doğrultuda bir çatlak elyaf/matris ara yüzeyine dönüp elyaf doğrultusunda ilerleyebilir. Bu durumda kompozit sünek malzemelerin kopması gibi lifli bir yüzey sergiler [16].

Şekil 2.1.' de gömülü faz olan liflerin fiziksel olarak şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Gömülü Bileşenin Fiziksel Şekilleri a) Tek Yönlü Sürekli Elyaf lar b) Kesikli Partikül Elyaf lar c) Ortogonal Pul Elyaf lar [17]

2.1.1. Kompozitlerde Matris Çeşitleri

Kompozit malzeme türleri, matris malzemesine göre 3 grupta incelenebilir [18];

- 1- Polimer Matrisli Kompozitler
- 2- Metal Matrisli Kompozitler
- 3- Seramik Matrisli Kompozitler

2.1.1.1. Polimer Matrisli Kompozitler

En çok bilinen ve yaygın kullanım alanına sahip olan kompozit türüdür. Polimer matrisli kompozitlerde (PMC) matris olarak polimer (epoksi, polyester, üratan vb.), elyaf olarak ince çaplarda lifler (karbon, cam, boron, aramid (kevlar, hafif karbon kökenli liflerden oluşan malzeme)) kullanılır. Yaygın olmasının sebebi düşük fiyatları, yüksek mukavemetleri ve kolay üretim metotlarıdır. Pekiştirici liflerin miktarı arttıkça kompozitin mukavemeti yükselir. Çizelge 2.1.' de malzemelerin ayrı olarak ve kompozit olarak etkileşimlerinden sonraki değerleri görülmektedir.

Çizelge 2.1. Polimer Matrisli Malzemeler, Çelik ve Alüminyumun Mekaniksel Özelliklerinin Karşılaştırılması [18-20]

	Yoğunluk (gr/cm ³)	Kopma Uzaması (%)	Çekme Mukavemeti (GPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Isıl Genleşme Katsayısı (µm/m/°C)
E-Camı	2.5	2.5	2-3.5	70	
S-Camı	2.5	2.8	4.57	86	
Cam / Epoksi	1.8		1.1	38.6	8.6
Grafit	1.4	1.4-1.8	4	230-240	
Grafit / Epoksi	1.6		1.5	181	0.02
Kevlar	1.4	3.3-3.7	3-3.15	63-67	
Çelik	7.8		0.64	206	11.7
Alüminyum	2.6		0.28	68.95	23

Matris olarak epoksi diğer matris türlerinden pahalı olmasına rağmen, en çok tercih edilen türdür. Başlıca nedenleri olarak [18];

- Yüksek mukavemet,
- Düşük viskosite ile fiberlerin iyi ıslanmasına izin veren ve işlem sırasında fiberlerin kaymasını önleyen düşük akım hızları,
- Kurlenme sırasında düşük uçuculuk,
- Epoksi ve takviye arasındaki bağda görülen büyük kayma gerilmelerinin artma eğilimini azaltan düşük büzülme oranları,
- Belirli özellikleri ve işleme gereksinimlerini karşılamak üzere çok fazla çeşidinin mevcut olmasıdır.

Polimer malzemeler termoset ve termoplastik olarak iki sınıfta incelenir. Çizelge 2.2.'de farklarını inceleyebiliriz.

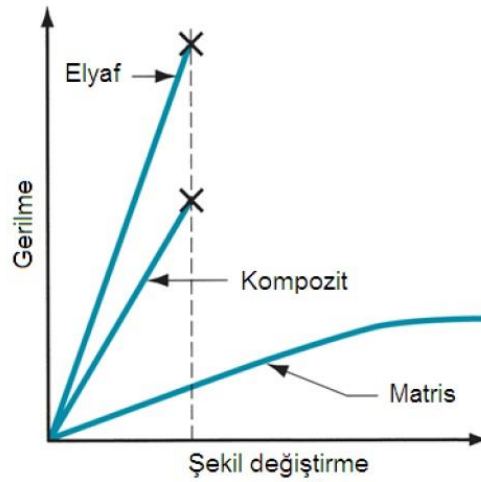
Kompozit malzemeler de yapısal özellikleri belirleyen üç faktör vardır.

- 1- Kompozitte bileşen olarak kullanılan malzemeler
- 2- Bileşenlerin geometrik şekilleri ve kompozit sistemin sonuçta oluşan yapısı
- 3- Bileşenlerin birbiriyle olan etkileşimi

Çizelge 2.2. Termoplastik ve Termoset Farkları [18]

Termoplastikler	Termosetler
Isı ve basınç altında yumuşar ve böylece tamir edilebilir	Isıtmayla ayrıştırılmaz
Yüksek kopma şekil değiştirmeleri	Düşük kopma şekil değiştirmeleri
Belirsiz raf ömrü	Kesin raf ömrü
Yeniden işlenebilirlik	Tekrar işlenemez
Kolay işlenebilme ve yapışkan olmama	Yapışkan
Kısa kür süresi	Uzun kür süresi
Yüksek üretim sıcaklığı ve viskozitenin üretimi zorlaştırması	Düşük üretim sıcaklığı
Mükemmel çözücü direnci	Düşük çözücü direnci

Şekil 2.2.' de kompozit malzeme ve bileşenlerinin gerilme- şekil değiştirme ilişkisi görülmektedir. Elyaf sert, ancak kırılındır, oysa matris (polimer) sünektir. Çoğu malzemenin elyaf halindeki dayanımı, kütle halindeki dayanımından daha büyüktür. Polimer matris içine gömülmesiyle beraber, elyafın dezavantajlarından kaçınılarak, dayanımından faydalanılan bir kompozit malzeme elde edilir. Matris, elyaf yüzeyini koruyan ve burkulmaya direnç gösteren kütle şekli sağlar. Yük uygulanınca düşük dayanıma sahip matris (polimer), şekil değiştirerek gerilmeyi yüksek dayanımlı liflere aktarır [21].



Şekil 2.2. Gerilme- Şekil Değiştirme İlişkisi

Çizelge 2.3.' de cam elyafların kimyasal içerikleri verilmiştir. Örnek verilecek olursa A (Alkali) camı yüksek oranda alkali içerdiğinden dolayı elektriksel yalıtkanlık özelliği kötüdür. Kimyasal direnci yüksek, maliyeti düşük, en yaygın cam tipidir. E (Elektrik) camı, düşük alkali oranı nedeniyle elektriksel yalıtkanlığı diğer cam tiplerine göre iyidir. Suya karşı dirençli olduğundan dolayı, nemli ortamlar için geliştirilen kompozitler de kullanılır. S (High Strength, Mukavemet) camı, adından anlaşılacağı üzere içindeki magnezyum ve alüminyum oranıyla mukavemeti yüksek bir cam türüdür. E camına oranla çekme mukavemeti %30'dan daha fazladır [22]. Bu sebeple uzay ve havacılık endüstrisinde tercih edilen cam türüdür. Genel olarak camların dayanımı; yüzey üzerindeki kusurlara, mikro çatlaklara ve kaçınılmaz imalat kusurlarına bağlıdır.

Çizelge 2.3. Cam Liflerinin Kimyasal Birleşimleri [23,24]

	A Camı	AR Camı	C Camı	D Camı	E Camı	E-CR Camı	R Camı	S Camı
SiO ₂ (%)	63-72	55-75	64-68	72-75	52-56	54-62	56-60	64-66
Al ₂ O ₃ (%)	0-6	0-5	3-5	0-1	12-16	9-15	23-28	24-25
B ₂ O ₃ (%)	0-6	0-8	4-6	21-24	5-10		0-0.35	
CaO (%)	6-10	1-10	11-15	0-1	16-25	17-25	8-15	0-0.18
MgO (%)	0-4		2-4		0-5	0-4	4-7	9.5-10.2
ZnO (%)						2-5		
BaO (%)			0-1					
Li ₂ O (%)		0-1.5						
Na ₂ O + K ₂ O (%)	14-16	11-21	7-10	0-4	0-2	0-2	0-1	0-0.2
TiO ₂ (%)	0-0.6	0-12			0-0.8	0-4		
ZrO ₂ (%)		1-18						
Fe ₂ O ₃ (%)	0-0.5	0-5	0-0.8	0-0.3	0-0.4	0-0.8	0-0.5	0-0.1
F ₂ (%)	0-0.4	0-5					0-0.1	

Grafit lifinden söz edilecek olursa, düşük yoğunluğunun yanı sıra yüksek çekme dayanımı ve yüksek elastite modülüne sahip karbon elyaflar, cam elyaflardan sonra en çok gelişen ve kullanılan elyaf grubudur. Aşınma ve yorulma mukavemetleri yüksek, nemden etkilenmeyen karbon elyaflar yaygın olarak epoksi matrislerle kullanılırlar.

Karbon elyaf ve grafit elyaf genel olarak aynı sanılmasına rağmen aralarında karbon oranı ve birkaç özelliğinde fark vardır. Karbon elyafta % 93-95 oranında karbon bulunurken bu oran grafitte, üretim işleminin farklı olması sebebiyle % 99 ve üzeridir [25] . Karbon elyafın pahalı olması; kullanım alanları kısıtlamakta ve bu sebeple genellikle havacılık, uzay ve savunma alanlarında kullanılmaktadır.

Çizelge 2.4.' de grafit ve karbonun karşılaştırılması, çizelge 2.5.' de grafit liflerin üretim metodlarına ve kimyasal içeriklerine göre değişen türlerinin mekanik özellikleri görülmektedir.

Çizelge 2.4. Karbon ve Grafit Elyafın Karşılaştırılması [25]

Özellik	Grafit	Karbon
Safılık (%)	99	93-95
İşlem Sıcaklığı (°C)	>1700	<1700
Elastite Modülü (GPa)	>345	<345

Çizelge 2.5. Grafit Fiberlerin Mekanik Özellikleri (Üretici Değerleri) [26]

Ürün İsimleri	Üretici	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Mukavemeti (GPa)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Çap (µm)
Pan T40	Amocco	283	5.65	1.81	5.7
Pan GY70	Basf	517	1.86	1.96	7
Pan HMS4	Hercules	345	2.21	1.96	7.8
Pan T300	Torayca	235	3.83	1.77	7.2
Pitch P25	Amocco	158	1.38	1.9	11.5
Pitch P55	Amocco	379	1.9	2	10.6
Pitch P75	Amocco	517	2.07	2.04	10.7
Pitch P100	Amocco	724	2.24	2.15	10.5

Kevlar elyaf, Stephanie Kwolek tarafında DuPont firmasında 1965 yılında geliştirildi [27] [28] . Benzer kimyasal yapıyla Akzo 1970 yılında Twaron ismiyle geliştirdi [29] [30] . Kevlarda grafit elyaflarda olduğu gibi elyaf eksenini doğrultusunda çok iyi iken,

elyafa dik doğrultuda zayıftırlar. Kevlar elyafın başlıca özellikleri; düşük yoğunluk, yüksek çekme mukavemeti, yüksek darbe direnci, yüksek aşınma dayanımı, yüksek yorulma ve kimyasal dayanım şeklinde açıklanabilir. Gevrekliği, grafitin yarısı kadardır. Bu nedenle şekil verilebilirliği daha kolaydır. Cam fiberlere kıyasla % 35 daha hafiftir. Dezavantajları olarak, bazı türleri ultraviyole ışınlar maruz kaldığında bozulma göstermektedirler. Bu nedenle karanlıkta saklanmaları gerekmektedir. Fiberlerin iyi birleşmemesi sonucu reçinede mikro çatlakların oluşumu gözlenebilir. İlk etapta Kevlar 29 ve Kevlar 49 olarak tanınmasına rağmen daha sonra değişik özelliklere sahip versiyonları tasarlanmıştır. Çizelge 2.7.' de mekanik özellikleri görülen kevlar liflere baktığımızda Kevlar 49'un elastisite modülünün Kevlar 29'un iki katı olduğunu, Kevlar 29'un uzama miktarının en iyisi olduğunu en düşük yoğunluk Technora lifinin sahip olduğu görmekteyiz.

Kevlar çeşitlerinin özelliklerine bakılacak olursa;

K29 – Endüstriyel uygulamalarda asbestin yerini alarak (kablo gibi), vücut ve araç zırhında, fren balatalarında vb.

K49 – Kablo ve halatlarda yüksek elastisite modülü istenen tasarımlarda, tekne ve havacılıkta

K100 – Kevların renkli versiyonu, eldivenlerde, spor malzemelerinde,

K119 – Yüksek uzama kabiliyetine sahip, esnek ve yorulma dayanımı yüksek, araç kemerlerinde ve hortumlarında,

K129 – Hafifletilmiş, daha yüksek dayanıma sahip, hayat kurtarıcı aksesuarlarda, yüksek basınç altında çalışan yağ ve gaz sanayisinde,

K AP – Akma mukavemeti K29'dan %15 daha fazla [31],

K KM2 – Zırh uygulamaları için balistik direnci yükseltilmiş [32],

K XP – Daha hafif reçineyle ve KM2 fiber kombinasyonuyla vücut zırhı uygulamalarında kullanılan çeşitleri mevcuttur [33].

Çizelge 2.6' de aramid liflerin mekaniksel özelliklerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 2.6. Aramid Liflerin Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması [34]

Özellik	Kevlar29	Kevlar49	Kevlar149	Twaron	Technora
Yoğunluk (gr/cm ³)	1.44	1.45	1.47	1.44	1.39
Çap (mm)	12	12	12	12	12
Elastite Modülü (GPa)	60	120	160	60	90
Çekme Dayanımı (MPa)	3000	3000	2400	2600	2800
Maksimum Uzama (%)	3.6	1.9	1.5	3	4

2.1.1.2. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler (MMC), adından da anlaşılacağı üzere matrislerinde metal içerirler. Kompozitlerde örnek verecek olursak matris alüminyum, magnezyum ve titanyum içerebilir. Yüksek sıcaklıklarda kullanım için kobalt ve kobalt-nikel alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Fiberler karbon ve silika karbit içerir. Katkı malzemesi olarak Al₂O₃ ve SiC eklenebilir. Metaller tasarımın özelliklerini istenildiği gibi artırmak veya azaltmak amacıyla eklenebilir. Örnek olarak; metal eklenen bir kompozitin elastitesi, aşınma direnci ve mukavemeti artarken; termal genişmesi, termal ve elektriksel iletkenlikleri artarak, kompoziti olumsuz olarak etkileyebilmektedir. MMC, çelik gibi metal bir malzemenin yüksek mukavemetini, titanyum gibi düşük bir yoğunluk sunabilmek için geliştirilmişlerdir.

MMC malzemelerde tek bileşenli alaşımlar da elde edilemeyen özellikleri sağlamak için, metal matris içinde, partikül veya ince teller şeklinde bulunan malzemeye takviye fazı denir.

Metal malzemeye, metalik bileşenin takviyeleri kullanılarak; eritip vakuma emdirerek, sıcak preslemeyle veya difüzyon kaynağı gibi metotlarla uygulanabilir.

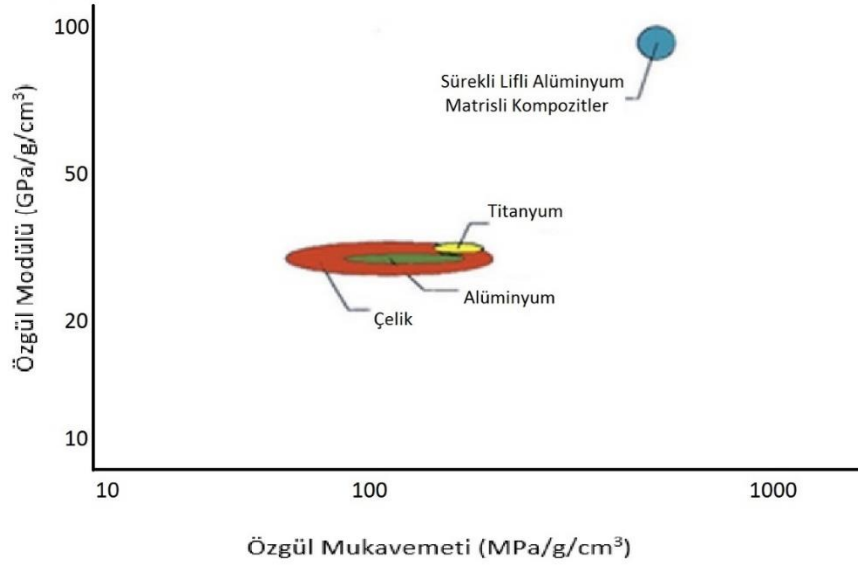
Polimer matrisli kompozitlere karşı olan avantajları;

- Yüksek tokluk ve dayanım, biçimlendirebilme,
- Yüksek çalışma sıcaklıkları, kaynakla birleştirme olanağı,
- Neme karşı direnç,
- Yüksek elektrik ve termal iletkenlik,
- Aşınma, korozyon, çatlak direncinin yüksek olması şeklinde sıralanabilir [18].

Örnek verecek olursak karbür matkap uçları genellikle tungsten karbür tozu eklenmiş, kobalt matrisle imal edilmektedir. Tank zırhlarında MMC kullanılmaktadır, çelik için iyi bir takviye malzemesi olan boron nitrit kullanılır çünkü bu malzeme çeliğin erime sıcaklığında çözünmez ve sert bir yapı oluşturur.

Aşınmaya karşı dirençli ve hafif olduğundan dolayı özellikle spor araçlarda, tren ve uçak parçalarında da kullanılmaktadır. Bunların örnekleri aşağıda verilmiştir;

- Lotus fren disklerinde (AlSiMg/SiC)
- Ford, GM firması Corvette ve bazı kamyonlarında şaft kısmında (6061/Al₂O₃/10p)
- Porsche, Toyota ve Honda çeşitli modellerinde, motorlarının blok ve pistonlarında (AlSi + kısa karbon fiberler ve katkılarla)
- Kopenhag metrosu fren disklerinde (A359/SiC/20P)
- Boing 777 turbo fan çıkış vanasında (6092/SiC/17.5p) [35]



Şekil 2.3. Geleneksel malzemelerle, alüminyum matrisli kompozitin mekaniksel özelliklerinin karşılaştırılması

Şekil 2.3.' de, malzemenin özgül modülü, elastisite modülünün yoğunluğa oranı; özgül mukavemeti ise akma dayanımının yoğunluğa oranı olarak görülmektedir. Alüminyum matrisli kompozitin (Aluminium Matrix Composites, AMC) geleneksel malzemelere

nazaran %200'e kadar kompozitin mukavemetini arttırmasının yanı sıra alüminyum alaşımla bile karşılaştırıldığında ağırlık olarak %60 daha hafif olmaktadır. Ayrıca AMC termal genleşme katsayısı sifira yakın olduğundan dolayı yüksek sıcaklıkta çalışılan parçalarda üretimi tercih edilmektedir. Metal matrisli kompozitlerde, alüminyum; magnezyum, çinko vb. alaşımlarına nazaran daha çok tercih edilir. Başlıca sebepleri ;

- Dayanım/yoğunluk oranının yüksek olması,
- Elektriksel iletkenliği,
- Atmosfere ve diğer ortamlara karşı yüksek korozyon direncine sahip bulunmasındandır [15].

Titanyum da düşük ısıl genleşme katsayısı, rijitliği ve dayanıklılığıyla tercih edilmektedir. Oda sıcaklığında yüzeyinde TiO₂ tabakası oluşturarak korozyona dayanıklı hale gelir ve kompresör pervanelerinde, denizcilikte ve yüksek sıcaklığa dayanım gerektiren yerlerde ön plana çıkar.

Çizelge 2.7.' de verilen alüminyum bazlı kompozitlerin kimyasal oranları;

2014 : Al – 5.0%Cu – 0.7%Mn – 0.7%Si – 0.5%Fe – 0.4%Mg [36]

6061 : Al – 1.0%Mg – 0.7%Fe – 0.6%Si – 0.25%Zn [37]

Çizelge 2.7.' de verilen T6 ısıl işlemi, ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklığa çıkarılıp katı-sıvı faz halinde çözeltilmeye alma işlemi gerçekleştirilmiş olur. Daha sonra hızlı soğutma ile kafes yapısı çarpıtılarak aşırı kırılğan hale getirilir. Bu kırılğanlığı azaltmak için de yapay yaşlandırma adı verilen ikincil bir ısıl işlem uygulanır.

Çizelge 2.7.' de alüminyuma katılan silisyum karbürün akma ve çekme mukavemetini katıldığı oran arttıkça arttırdığını ve uzamasında düşüş olduğunu gözlemlemekteyiz. Aynı şekilde katılan alüminyum oksidin de dayanımı arttırdığı ve esnekliğini azalttığını görebiliriz.

Çizelge 2.7. Alüminyum bazlı kompozitlerin, takviye malzemeli durumlarının mekaniksel özelliklerinin karşılaştırılması [38-41]

Matris	Takviye Elemanı, (%)	Akma Mukavemeti, R_e (MPa)	Çekme Mukavemeti, R_m (MPa)	Kopma Uzaması (%)
Al	-	64	90	21
Al	SiC, (20)	117	200	10
2014-T6	-	429	476	7.5
2014-T6	SiC, (10)	457	508	1.8
2014-T6	Al ₂ O ₃ , (20)	495	515	1.2
6061-T6	-	275	290	18
6061-T6	SiC, (15)	290	340	5.5
6061-T6	SiC, (20)	345	410	4.9
6061-T6	SiC, (30)	380	435	1.8

2.1.1.3. Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik malzemeler metal ve ametal (metal dışı) bileşenlerden elde edilen, inorganik metalik olmayan malzemedirler. Seramik malzemeler, yüksek sıcaklığa dayanıklı ve hafif oldukları ($d=1.5-3.0 \text{ gr/cm}^3$) için tercih edilir. Kırılma toklukları yüksek olmasına rağmen, sert ve kırılgan olduklarından dolayı düşük kopma uzaması gösterirler. Termal şok direnci yüksek ve dinamik yük kapasitesi fazladır. Liflerin dizilimlerine bağlı olarak anizotropik özellikler sergileyebilirler. Matris malzemesi olarak; Al₂O₃, SiC, Si₃N₄, B₄C kullanılır. Takviye elemanı ise genellikle Al₂O₃ ve SiC fiber formundadır [42]. Takviye malzemeleri partikül halinde matris malzemesi içine ilave edilir.

Başlıca uygulama örnekleri;

- Uçaklarda alçak basınçlı türbine ait (LPT) parçalarda (egzoz gömleği, flapler vb.),
- Nasa'nın uzay aracı X-38'in burun kısmı, kenar kısımları ve yönlendirici flaplarında,
- 40'dan fazla Avrupa ülkesinin katılımıyla yapılan Herakles uzay aracında termal kalkan olarak (sandviç zırh), kenar ve burun kısımlarında,
- Join Strike Fighter isimli savaş uçağında kullanılan stator kanat parçalarında,

- Rulman ve fren disklerinde
 - Snecma M88 motorunun egzoz kapaklarında,
- görülebilmektedir.

Seramik matrisli malzemelerin kullanımında ki temel sorun yüksek sıcaklıklarda fiber malzemenin, matris malzemeyle reaksiyona girerek kimyasal değişime uğraması ve özelliklerini yitirmesidir. Bu sebepten dolayı 1000 °C üstünde kullanımları zordur.

Çizelge 2.8.' de görüldüğü üzere alüminyum oksidin malzemelerde çekme mukavemeti ve elastisite modülünü arttırdığı fakat yoğunluğu arttırdığı gözlemlenmektedir. Üretici firmaların tasarımlara bağlı olarak istenilen mukavemet değerlerini yakalamak için Al₂O₃, SiC ve C değerlerini arttırdığı görülmektedir.

Çizelge 2.8. Seramiklerin Mekanik Özelliklerine Örnekler [43]

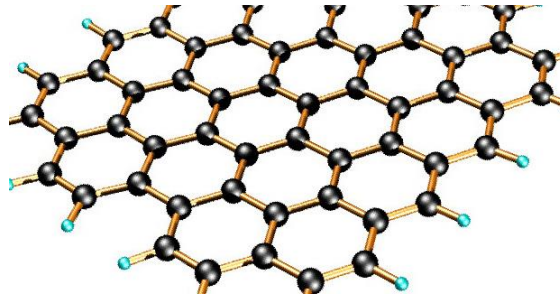
Üretici İsmi	Kompozisyon (Ağırlıkça, %)	Çap (µm)	Yoğunluk (kg/cm ³)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Nextel 312	Al ₂ O ₃ : 62.5 SiO ₂ : 24.5 B ₂ O ₃ : 13	10-12	2700	1700	150
Nextel 720	Al ₂ O ₃ : 85 SiO ₂ : 15	10-12	3400	2100	260
Nextel 610	Al ₂ O ₃ : >99	10-12	3900	3100	380
COI Ceramics Sylramic-i BN	SiC BN	10	3000	3000	400
COI Ceramics Sylramic	SiC: 96 TiB ₂ : 3 B ₄ C: 1	10	2950	2700	310
Specialty Materials SCS- Ultra	SiC C	140	3000	5865	415

2.2. Karbon Nanotüp

Günümüzde malzeme teknolojisi, ihtiyaçları karşılamak için her gün daha fazla gelişmektedir. Malzeme ihtiyaçları olarak savunma sanayisine yönelik ağırlık azaltılması ve mukavemetinin artırılması, otomotiv sanayisine yönelik üretim tekniklerinin geliştirilmesi ve maliyetlerinin düşürülmesi, medikal, elektronik ve enerji sektörlerinde de daha verimli malzemeler geliştirilmesi örnek gösterilebilir.

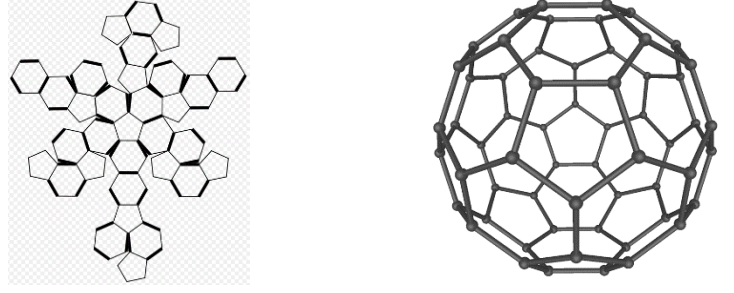
Nanoteknoloji, fizik, kimya, mühendislik ve biyolojiyi de kapsayan disiplinler arası bir daldır. Bunun yanı sıra yapılan çalışmanın özelliğine göre örneğin medikal tıp vb. dallarının da girmesiyle çalışma alanı genişleyen araştırma dalıdır. Nanoteknoloji ile yapılan malzeme konusundaki araştırmalar günümüzde artarak devam etmektedir. Atomik ölçekte yapılan çalışmalar olarak da açıklayacağımız nanoteknoloji, bilim insanlarının malzemenin yapı taşlarında atomik düzeyde araştırma ve geliştirmelerle, malzemeye üstün özellikler kazandırılması ile birlikte bu alana olan ilginin artmasını ve teknolojisinin gelişmesini sağlamıştır.

Grafen, Şekil 2.4.' de görülen, tek sıra karbon atomundan oluşan bal peteği örgülü yapıya verilen isimdir [44]. Grafen tabakaların üst üste birleşerek oluşturduğu tabakalı yapıya grafit denir. Grafit hekzagonal kristal sisteminde olup, kristal şekilleri düz ve levhamsıdır [45].



Şekil 2.4. Grafen

Fulleren Şekil 2.5.' de görüldüğü gibi karbon atomlarından meydana gelen, yaklaşık 1 nm çapında kürelerdir.



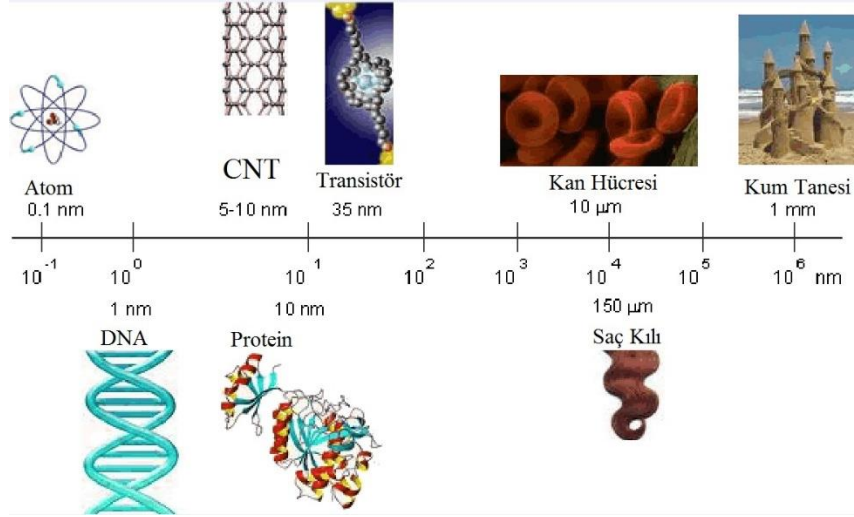
Şekil 2.5. Fulleren Yapının Oluşumu

Nanotüpler, nanometre (nm) ölçekli silindirik yapılardır. Grafen yapının boru şeklinde yuvarlanarak, uç kısımlarına yarım fullerene toplar eklenmesiyle karbon nanotüp oluşmaktadır. CNT'lerin uzunluk: çap oranı $28 \times 10^6:1$ olup, $132 \times 10^6:1$ ' e kadar ulaşmaktadır [46].

Nanotüplerin elektronik parçalarda [47], fotovoltaik cihazlarda [48], süper kondüktörlerde [49], elektromekanik aktüatörlerde [50], elektrokimyasal kapasitörlerde [51], nanokablolarda [52] ve nanokompozit malzemelerde [53] [54] oldukça geniş bir alanda kullanılabilme imkânı bulunmaktadır.

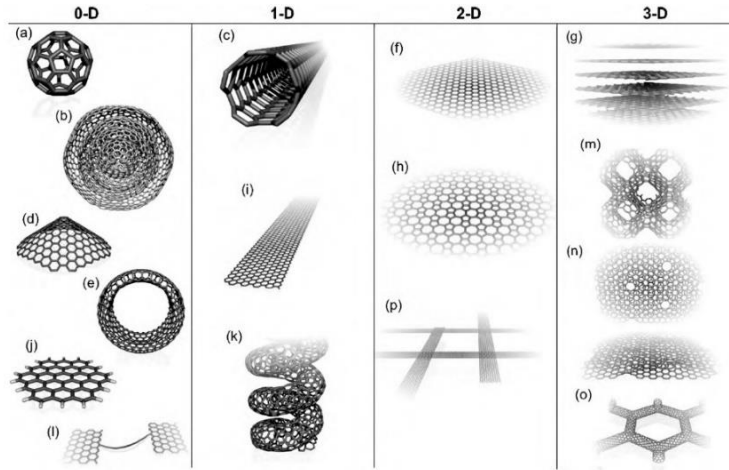
Şekil 2.6.' da görüldüğü üzere değişik maddelerin boyutları karşılaştırma amaçlı verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere nano ölçekte mühendislik maddenin en küçük yapı taşlarını kapsamaktadır. Karbon nanotüplerin çapı 5-10 nm, proteinin çapı 10nm ve atom çapı ise 0.1 nm' dir.

Eiji Osawa 1970 yılında fullerenin kimyasal olarak kararlı olabileceğini tahmin etti [55] [56]. Yayın japonca olduğundan dolayı fazla yayılamadı ve 1985 yılında bir araştırma grubu tarafından helyum koruyucu atmosfer gazıyla, 10 bar basınç altında, dönen bir grafit diski lazer tarafından ışıklandırılarak futbol topuna benzeyen ilk fullerene (C_{60}) elde edildi [57].



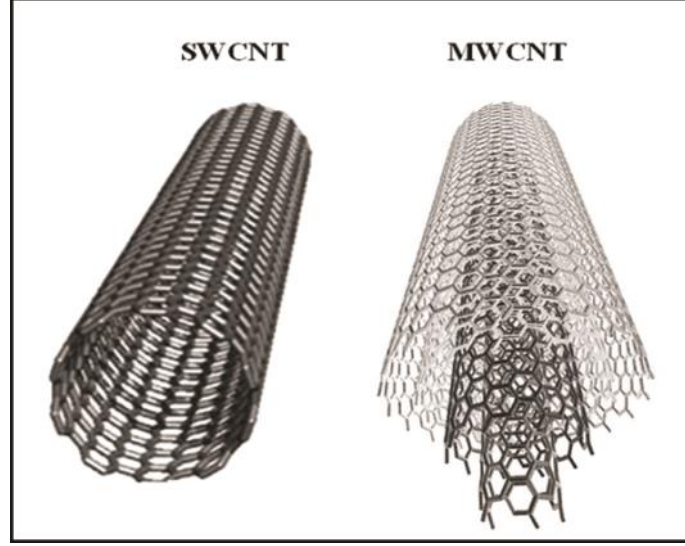
Şekil 2.6. Bazı Materyallerin Nano Boyutlarda Karşılaştırılması [58]

Sumio Iijima, Tsukuba laboratuvarlarında, 1991 yılında karbon nanotüpü keşfetti [59]. Karbon nanotüpün, karbon fiberden 1000 kat daha hafif olması, çeliğe göre çekme mukavemetinin 100 kat fazla olması önemini göstermektedir. Şekil 2.7.' de karbon esaslı nano yapıların geometrik yapıları görülmektedir.



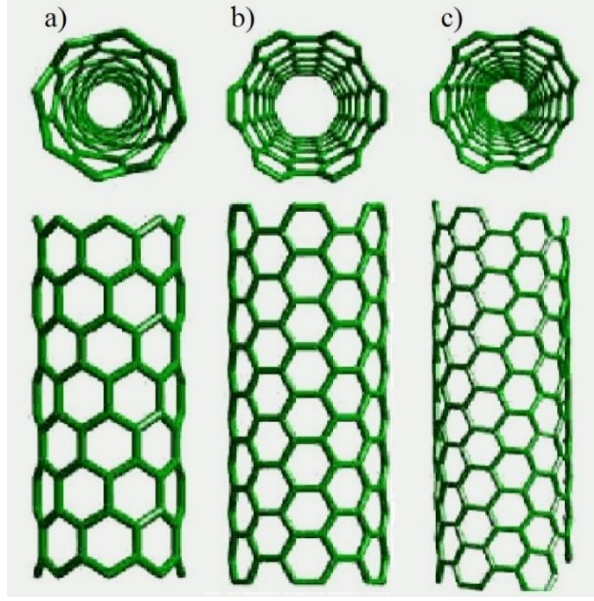
Şekil 2.7. Karbon Esaslı Nano Yapılar a) Fulleren; b) İç İçe Geçmiş Fullerenler; c) Karbon Nanotüp; d) Nanokonik; e) Nanotoroid; f) Düzlem Grafen; g) 3D Kristal Grafit; h) Haeckelite Yüzeyi; i) Grafen Şeritler; j) Grafen Demetler; k) Spiral Karbon Nanotüp; l) Kısa Karbon Zincirler m) 3D Schwarzite Kristali; n) Sünger Karbon; o) 3D Karbon Bağları; p) 2D Nanoşerit Bağları [60]

Nanotüp, tek tabakadan yuvarlanarak yapılabileceği gibi aynı zamanda Şekil 2.8.' de görüldüğü gibi eş eksenli birden çok tabakanın yuvarlanarak birleşmesiyle de oluşturulabilir.



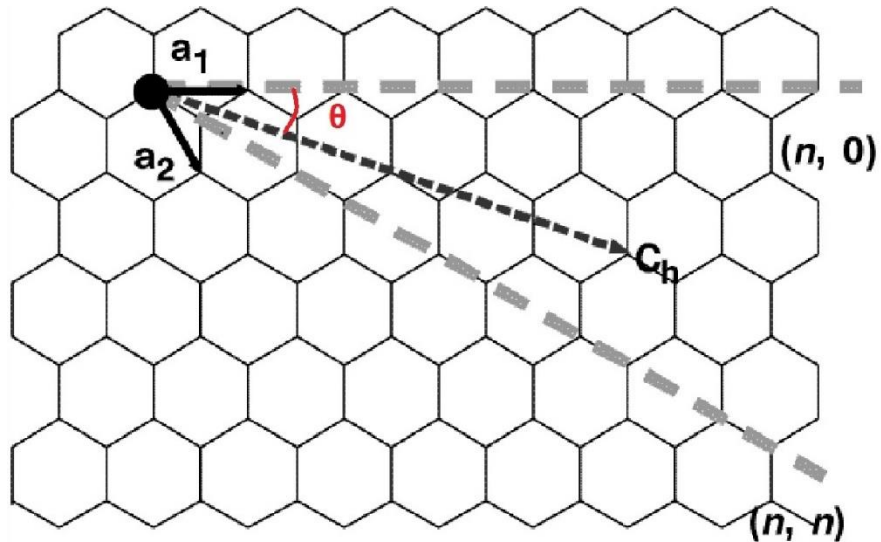
Şekil 2.8. Tek Duvarlı Karbon Nanotüp (Single Walled Carbon Nanotube, SWCNT), Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (Multi Walled Carbon Nanotube, MWCNT)

Karbon nanotüpler Şekil 2.9.' da görüldüğü gibi yatay uçlarından birleşecek şekilde 30° eksende sarılırsa köşegen tip, yatay olarak kesilerek dikine sarılırsa zikzak, herhangi bir eksen belirleyip, o eksene dik olarak sarılmasıyla da helisel tip şeklinde de oluşturulurlar.



Şekil 2.9. Nanotüplerin İsimlendirilmesi Zig Zag (Zikzak), Arm Chair (Köşegen,Koltuk), Chiral (Kiral – Helisel)

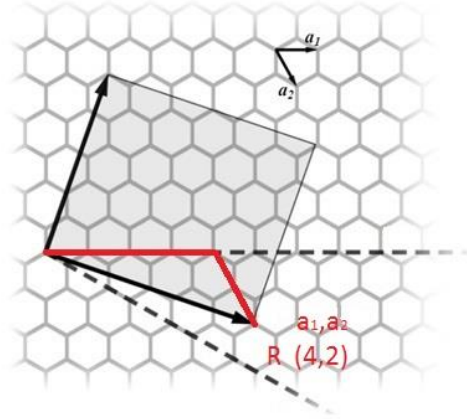
Adlandırılması ve kolay anlaşılabilir olması için Şekil 2.10.' da görüldüğü üzere, karbon nanotüpler \vec{a}_1 ve \vec{a}_2 gibi vektörlerle iki boyutta da tanımlanırlar. Bu tanımla sarılmamış tabakalar belirlenmektedir. Genel olarak $\vec{R} = n\vec{a}_1 \times m\vec{a}_2$ tanımıyla nanotüp özel olarak adlandırılır [61].



Şekil 2.10. Nanotüplerin vektörel birleşimlerine göre isimlendirilmesi

Şekil 2.10.' de grafen tabakadan örnek verilecek ve detaylı olarak incelenecek olursa; C_h vektörü, \vec{a}_1 boyunca tanımlanır ve tüp grafen tabakanın bu doğrultu boyunca, $(n,0)$ noktalarına dik olarak sarılırsa zikzak nanotüp oluşur ve dizilim $(n,0)$ yani $(9,0)$, $(10,0)$, $(11,0)$ vb. değerler ile gösterilir. Köşegen tipi için, C_h vektörü yatayla 30° açı yapacak şekilde tanımlanır ve tüp grafen tabaka bu doğrultuya dik eksen etrafında sarılmasıyla elde edilir. Bu nedenle yatayla herhangi bir kenar arasındaki açı 30° dir ve bu eğimli vektörün dizilimi (n,n) yani $(8,8)$, $(9,9)$, $(10,10)$ vb. olur. Bu durumların arasındaki değerler için sağa veya sola kıvrık biçimli kiral nanotüpler elde edilir.

Şekil 2.11.' de kiral nanotüp için, grafen tabaka, \vec{a}_1 boyunca 4, \vec{a}_2 boyunca 2 sıra ilerlemiş ve dolayısıyla isimlendirilmesi $(4,2)$ şeklinde olmuştur.



Şekil 2.11. CNT Dizilim Örneği

Kiral terimi; kendi eksenini etrafında yapılan dönmeyele elde edilemeyen ayna görüntüsü oluşturan ve bu ayna görüntüsüne sahip olan ve genelde moleküllerin tanımında kullanılan isimdir. Örnek verilecek olursa; F, G, J, L, N, P ve R kiral yapıda, A, B, C, D, E, H, I, K ve M akiral yapıdadır [62]. Grafen tabakanın silindir şeklinde bükülmesiyle oluşan CNT için, θ kiralite açısı, d CNT dış çapı, C_h vektöründe; n ve m birim vektör olmak üzere aşağıda ki eşitlikleri yazılabilir;

$$\theta = \cos^{-1} \frac{2n + m}{\sqrt{n^2 + nm + m^2}}$$

$$d = \frac{0.246 \times 10^{-9}}{\pi} \sqrt{n^2 + nm + m^2}$$

Karbon nanotüpler eksenleri doğrultusunda yüksek elastisite modülüne sahiptirler, boyca uzun olduğundan dolayı eksenel yönde çok uzayabilirler. Yapılan çalışmalarda elastisite modülü 270-950 GPa, çekme mukavemeti 11-63 GPa arasında değerler elde edilmiştir [63]. Daha ilerleyen aşamalarda atomlar arası bağlarla yapılan özel CNT kabuklarda çekme mukavemetinin 100 GPa değerlerine çıktığı da gözlemlenmiştir [64]. Ayrıca 1300-1400 kg/m³ olan, katılara göre düşük yoğunluk, ağırlığın önemli olduğu havacılık ve uzay sanayinde önem kazanmaktadır [65]. Eksenel yönde güçlü, radyal yönde güçsüz anizotropik yapısından dolayı kompozit malzemelerde kullanımına gereksinim duyulan yerlerde rahat, maliyet olarak uygun ve güvenli bir şekilde kullanılabilirler.

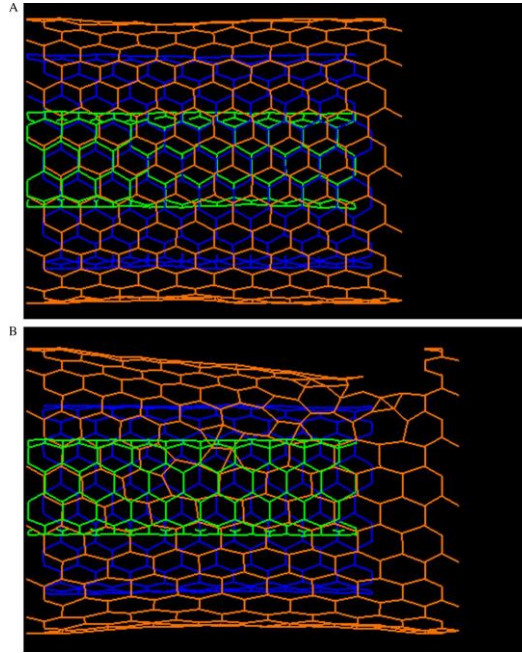
Çizelge 2.9.' da, bir cidarlı nanotüp için elastisite modülüne bakıldığında 1-5 GPa değerlerinin elde edildiğini görülmektedir. Bu değer aralığının geniş olmasının sebebi, üretim kaynaklı olarak; değişik çapların ve uzunlukların ortaya çıkmasıdır. Çok cidarlı için bunlara ek olarak cidar sayısının farklılığı da eklenmelidir. Bunun yanı sıra aynı nanotüplerle bile aynı sonuçları almak zor bir işlemdir, bu durum ise nanotüplerin saflığının sağlanamaması ve standart ölçülerde üretilmemesinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 2.9. Nanotüp Çeşitleri, Çelik ve Kevlar Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması [63, 66-78]

Malzeme	Elastisite Modülü (TPa)	Çekme Mukavemeti (GPa)	Kopma Uzaması (%)
SWNT	1 - 5	13 - 52	16
Köşegen SWNT (Teorik)	0.94	126.2	23.1
Zikzak SWNT (Teorik)	0.94	65 - 93	10 - 15
Kiral SWNT	0.92		
MWNT	0.8 - 0.95 - 1 - 1.8	11 - 63 - 150	
Paslanmaz Çelik	0.186 - 0.214	0.38 - 1.55	15 - 50
Kevlar	0.06 - 0.18	3.6 - 3.8	2

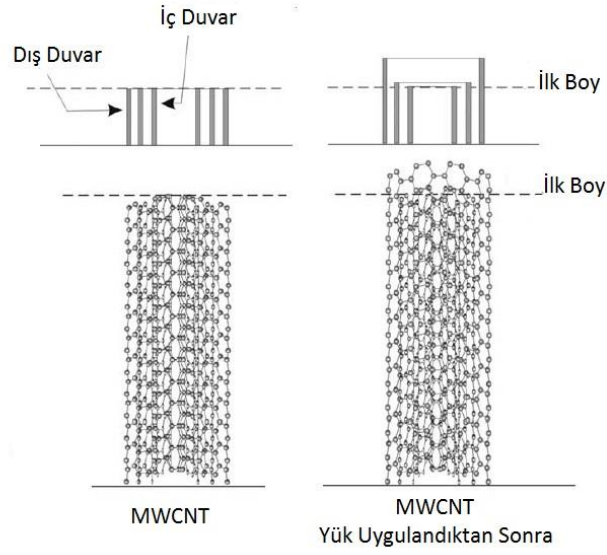
Çizelge 2.9.' dan, bazı özel deneysel çalışmalar dışında, tek duvarlı karbon nanotüpün çekme dayanımının, çok duvarlı nanotüpe göre yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bunun sebebi ise, her bir cidardaki nanotüplerin sürtünme katsayısının sıfıra yakın olması yani kuvveti aktaramamasından dolayı, birbiri üzerinden kayarak sıyrılma (pull-out) özelliğinin olmasıdır.

Yapılan deneysel çalışmalarda, yük uygulanan çok cidarlı nanotüplerin iç cidarlarına yük gelmediği sadece en dış katmanın tüm yükü taşıdığı görülmüştür [79]. Şekil 2.12.' de görüldüğü üzere kopma en dış cidardan gerçekleşmiş, iç cidarlarda ise yok denecek kadar az uzama ortaya çıkmıştır. Bundan dolayı çok katmanlı nanotüplerin elastisite modülü için en dıştaki cidar çapı kullanılarak hesap yapılabilir. Örnek verilecek olursa, çok cidarlı bir nanotüpün dış çapı, tek cidarlı nanotüple aynı ise elastisite modüllerinin aynı olmasını bekleyebiliriz.



Şekil 2.12. Moleküler Dinamik (Molecular Dynamic, MD) Simülasyonu Yapılan MWCNT a) Yüksüz b) Kopma Durumuna Kadar Yük Uygulanmış

Şekil 2.13.' de şematik olarak görüldüğü üzere duvarlar arasında oluşan kaymalardan dolayı iç duvarlara kuvvet gelmemekte ve dolayısıyla buralarda direnç oluşmamaktadır.



Şekil 2.13. Şematik Olarak Yük Uygulandıktan sonra MWCNT

Karbon nanotüp üretim metodları aşağıdaki sıralanmıştır.

1 – Katı halde karbondan sentezlenen yöntemler ile karbon kaynağı olarak katı halde bulunan grafit bir parça kullanılmaktadır. Grafit çubuğun geometrisi yöntemden yönteme değişmektedir. Bu yöntemlerde yüksek sıcaklıklar ve yüksek basınçlar söz konusu olmaktadır [80]. Lazerle Aşındırma, Ark Boşaltma, Solar Fırın yöntemleri bu gruptadır.

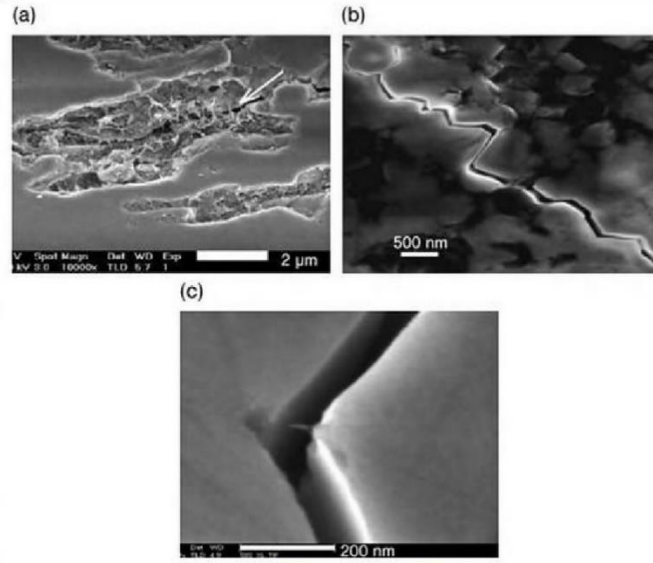
2 – Gaz halde karbondan sentezlenen yöntemlerde; karbon kaynakları çeşitli konvansiyonel gazlar olmaktadır. Yüksek miktarlarda CNT üretmek için sıklıkla kullanılan ve günümüze özellikle üzerinde durulan kimyasal buhar çökeltme (CVD, Chemical Vapor Deposition) yöntemleri bu grup içerisinde [80].

Kimyasal buhar çökeltme yöntemi ile nanotüp geliştirmede önemli değerler; hidrokarbon gaz, katalizör ve büyüme sıcaklığıdır. Katalizör boyutu veya reaksiyon zamanı, CNT çapını ve boyunu belirleyen etmenlerdir.

Diğer gaz halde karbondan sentezlenen metodlar; Isıl Kimyasal Buhar Çökeltme, Plazmayla Güçlendirilmiş Kimyasal Buhar Çökeltme, Mikrodalga Plazmayla Kimyasal Buhar Çökeltme yöntemidir.

3 – Diğer sentezleme yöntemleri; Hidrotermal Sentezleme ve Elektroliz olarak ikiye ayrılır.

Şekil 2.14.' de alüminyum matrisli kompozite Al_2O_3 ' ün ağırlığının % 10'u kadar SWCNT eklenmiş ve çatlak karşısında verdiği tepkinin SEM görüntüleri yer almaktadır. SWCNT' nin ayrılma tepkisi olarak görünen kısım SWCNT'nin malzemeye kazandırdığı kırılma tokluğunun göstergesidir. Nano bileşenler, oran olarak fazla katılırsa da kırılma esnasında değişken değil, düz bir yol izleyip kırılma enerjisinde düşmeye sebebiyet vermektedir.



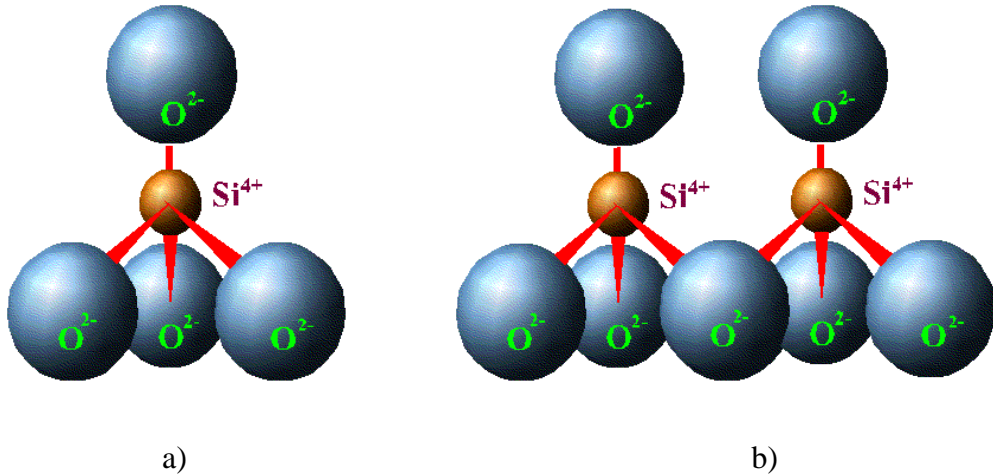
Şekil 2.14. CNT' nin Çatlak İlerleyişi Karşısındaki Davranışı a) Çatlak Köprüsü b) Çatlak Yolu c) CNT'nin Ayrılma (Pull-out) Tepkisi [81]

2.3. Nanokiller

Polimer-kil nanokompozitleri, 2000 yılından sonra önemi anlaşılan yeni kompozit türlerindedir. Dağıtıcı faz olarak kullanılan polimere, destek maddesi olarak kil kullanılır. Özel olarak seçilen bazı kil türleriyle elde edilen polimer-kil nanokompozitleri yüksek sıcaklıklara dayanıklı hale gelmekte ve aynı zamanda böyle bir kompozisyonla darbe dayanımının da iyileşmeler kaydedilmektedir [82].

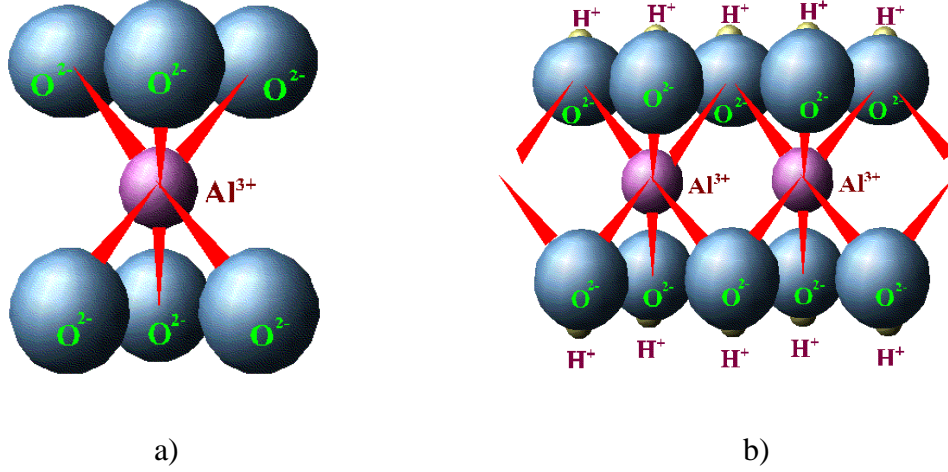
Kil, kristal yapıları birbirinden farklı olan ve genel olarak kalker, silis, mika, demiroksit bileşikleri ve birkaç farklı mineralin oluşturduğu karışımının genel adıdır. Doğada bol miktarda bulunmaktadır. Saf olarak bulunmaları son derece zordur. Genel olarak, ana kil minerali, diğer kil mineralleri ve az miktarda organik maddelerin birleşmesiyle oluşur. Genel formül olarak “ $m \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $n \cdot \text{SiO}_2$, $p \cdot \text{H}_2\text{O}$ ” şeklindedir. Her bir tabaka tetrahedral ve oktahedral kristal düzenine sahip, tabakalı yapıdan oluşmaktadır.

Tetrahedral yapı adında da anlaşılacağı üzere düzgün dört yüzlü, merkezinde bir silisyum atomu ve bu atoma bağlı dört oksijen atomundan meydana gelen kristal yapıdır. Şekil 2.15.’ de görüldüğü üzere bir oksijen iyonu iki silisyum atomuyla bağ yapabilir ve iki yönde genişleme yaparak silikat tetrahedron tabakanın oluşumunu sağlar [82].



Şekil 2.15. a) Silisyum tetrahedrali b) Bağlanmış silisyum tetrahedralleri [83]

Şekil 2.16.' da görülen Oktahedral birim ise merkezinde bir alüminyum atomu bulunan ve bu atomu saran altı oksijen atomuyla oluşan düzgün sekiz yüzlü bir kristal yapıdır. Tetrahedraller de olduğu gibi oktahedral tabakalar da birleştirilebilir. Birleşme sonucu oluşan negatif yüklü parçacıklar, pozitif yüklü hidrojenlerle dengelenmektedir [82].



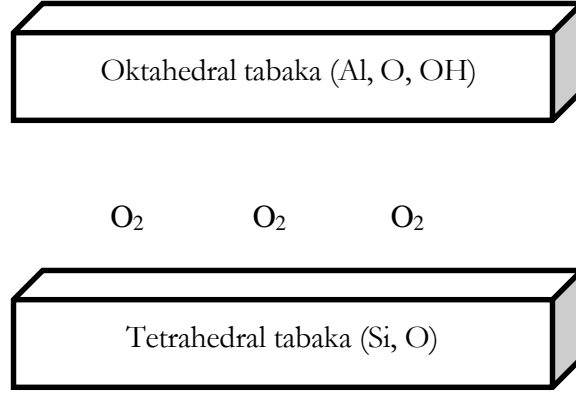
Şekil 2.16. a) Alüminyum oktahedrali b) Bağlanmış alüminyum oktahedralleri [83]

Killer, en fazla 4 ana grupta incelenir [84].

- Kaolin
- Smektit
- İlit
- Klorit

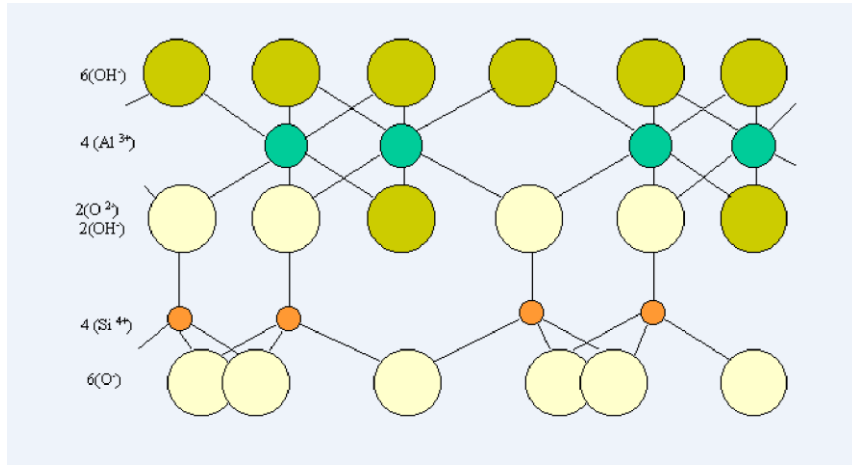
2.3.1. Kaolin

Kaolin grubu kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), dikit, haloisit ve nakrit gibi mineralleri içeren; değişik oranlarda feldspat ($\text{K}_2\text{O}.\text{Al}_2\text{O}_3.6\text{SiO}_2$ veya $\text{Na}_2\text{O}.\text{Al}_2\text{O}_3.6\text{SiO}_2$), mika ($\text{FeO}(\text{OH})$), kuvars (SiO_2), demir ve titan oksitlerle, diğer kil minerallerini bulunduran gruptur [85]. Kaolin, oksijen atomları yoluyla tetrahedral tabakanın, alümina oktahedral tabakaya bağlanmasıyla oluşur. Şekil 2.17.'de görüldüğü üzere 1:1 yapıdadır.



Şekil 2.17. Kaolinin 1:1 Yapısı

Şekil 2.18.' de $(Al_2Si_2O_5(OH)_4)$ formüllü Kaolin'in yapısı görülmektedir.



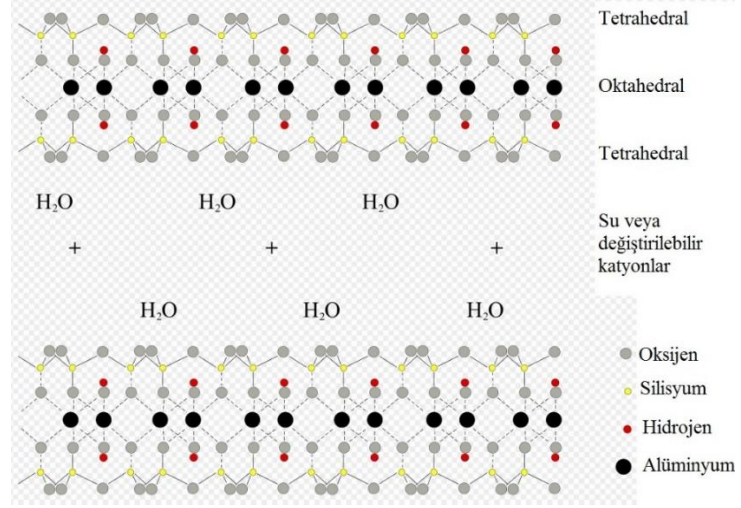
Şekil 2.18. Kaolin'in Yapısı [86]

2.3.2. Smektit

Smektit grubu montmorillonit $((Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)_2(Si_4O_{10})$ ve tekrar kısmı $(OH)_2 \cdot nH_2O$, nontronit $((CaO_{0.5},Na)_{0.3}Fe^{3+}_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O)$ ve saponit $(Ca_{0.25}(Mg,Fe)_3((Si,Al)_4O_{10})$ ve tekrar kısmı $(OH)_2 \cdot n(H_2O)$ gibi örnekleri içeren gruptur.

Montmorillonit, 2:1 kil yapısına sahip, yani merkezi oktahedral tabakayı arasına alan 2 tetrahedral yapıdan oluşan türdür. Plaka şekilli tanecikler birleşmesiyle yaklaşık 1 μm tabakalar oluşmaktadır.

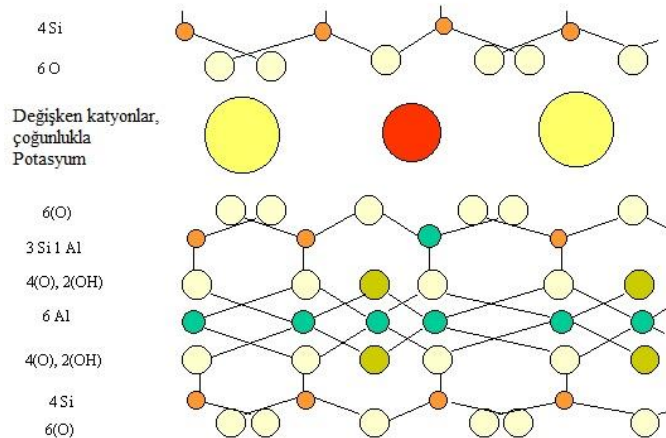
Şekil 2.19.' da yapısı gösterilen Montmorillonit çok yumuşak kristal formdaki tabakaların birleşmesiyle oluşan kil türüdür.



Şekil 2.19. Montmorillonit'in Yapısı [87]

2.3.3. İlit

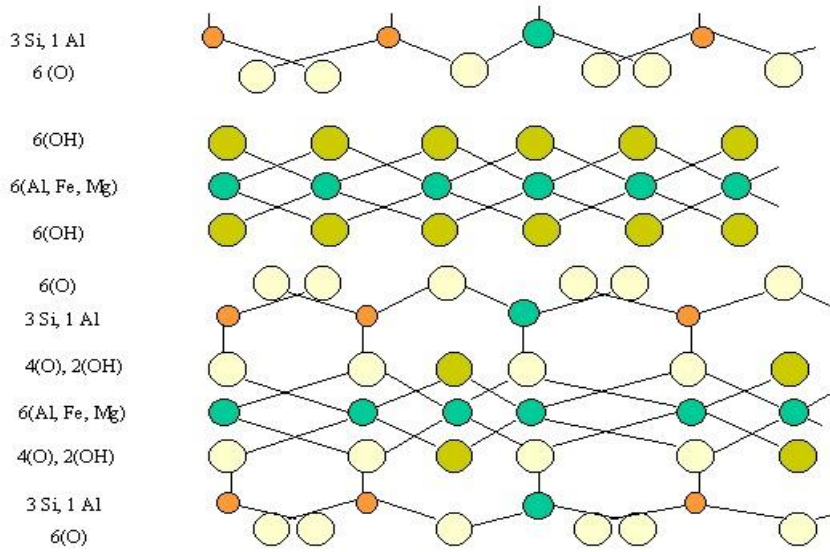
Şekil 2.20.' de yapısı gösterilen, $(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$ formülasyonuna sahip İlit genişlemesi olmayan, tabakalı silikat yapıya sahip mikalı kil türüdür. Tetrahedral – Oktahedral – Tetrahedral tabakaların (TOT) tekrarlanmasıyla oluşan 2:1 yapıdaki bir mineraldir. Katman kalınlıkları 1 nm mertebesindedir.



Şekil 2.20. İlit'in Yapısı [88]

2.3.4. Klorit

Şekil 2.21.'de yapısı gösterilen klorit, $(Mg,Fe)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot (Mg,Fe)_3(OH)_6$ genel formülüne sahip, 2:1:1 yapıda, Tetrahedral – Oktahedral – Tetrahedral tabakaların (TOT) birleşmesiyle oluşan kil türüdür. Diğer 2:1 türlerden farklı olarak bu grubun TOT ara katmanında $(Mg^{2+}, Fe^{3+})(OH)_6$ brusit adı verilen katmanlar bulunur. Yani klorit yapı –T – O – T – brusit – T – O – T – brusit –... şeklindedir. Katman kalınlıkları yaklaşık 1.4 nm' dir.



Şekil 2.21. Kloritin Yapısı [89]

Bu grup diğer gruplara nazaran tane yapısı daha büyük olması sebebiyle bazen nanokil grubuna dahil edilmemektedir [84]. Kloritin tüm çeşitleri ayrı kimyasal yapıya sahiptir.

Klorit çeşitleri ve genel formülleri aşağıdaki gibidir.

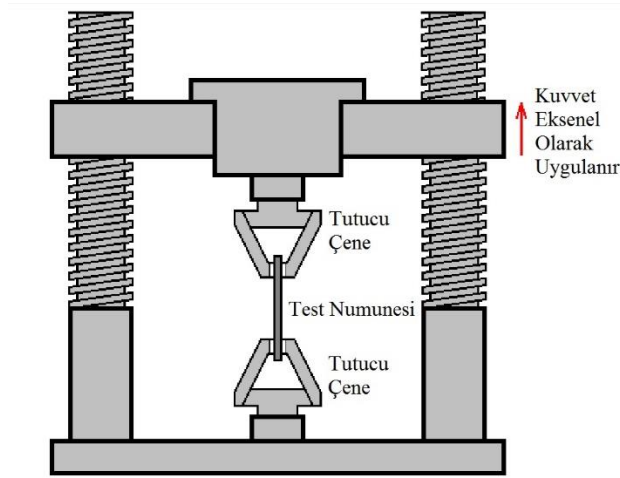
- Amesite $(Mg,Fe)_4Al_4Si_2O_{10}(OH)_8$
- Chamosite $(Fe,Mg)_3 Fe_3 AlSi_3O_{10}(OH)_8$
- Cookeite $LiAl_5 Si_3O_{10} (OH)_8$
- Nimite $(Ni,Mg,Fe,Al)_6AlSi_3O_{10}(OH)_8$
- Odinite $(Fe,Mg,Al,Fe,Ti,Mn)_{2,4}(Al,Si)_2O_5OH_4$
- Pennantite $(Mn_5Al)(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$
- Sudoite $Mg_2(Al,Fe)_3Si_3AlO_{10}(OH)_8$

2.4. Mekanik Özellik Testleri

Üretilen kompozit levhaların mekanik özelliklerini belirlemek için çekme, üç nokta eğme, düşük hız darbe ve yakma-oran testleri yapılmış ve alt başlıklar halinde detaylı olarak incelenmiştir.

2.4.1. Çekme Testi

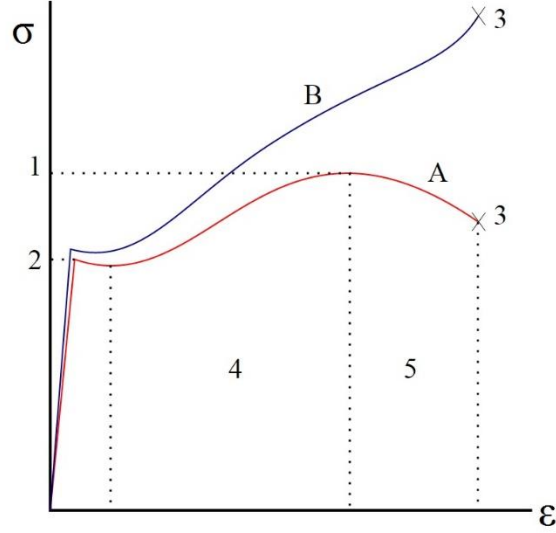
Çekme testi, standartlarla ölçüleri ve şekli belirlenmiş bir numunenin Şekil 2.22.' de görüldüğü gibi tek eksende çekme kuvvetine maruz bırakıldığı en temel malzeme testlerinden biridir. Test sonucunda elde edilen veriler; malzeme seçimi, kalite kontrolü ve malzemenin farklı yükler altında nasıl tepki göstereceğini belirlemede kullanılır. Çekme testinde maksimum çekme mukavemeti, maksimum uzama verileri elde edilir ve bu verilerden malzemenin diğer özellikleri hesaplanabilir.



Şekil 2.22. Çekme Test Deney Düzeneği [90]

Çekme testlerinde ASTM'nin D3039/D3039M – 14 standart numaralı Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials kullanılmış olup, standardın 2 numaralı tablosunda belirtilen ölçüleri göre 25*250 mm olacak şekilde numuneler çıkarılmıştır. Testler standart da belirtildiği üzere 2 mm/dakika çekme hızında yapılmıştır.

Çekme test cihazı numuneden, gerilme ve şekil değiştirmeye bağlı bir grafik çıkarır. Cihaza ilk girilen kesit alan sabit olduğundan dolayı gerçekte, cihazın verdiği gerilme – şekil değiştirme grafiği şekil 2.23.' de görüldüğü üzere farklıdır.



Şekil 2.23. 1) Çekme mukavemeti 2) Akma mukavemeti 3) Kopma Mukavemeti 4) Pekleşme bölgesi 5) Boyun Verme Bölgesi A: Görünür Gerilme (Mühendislik) gerilmesi (F/A_0) B: Gerçek gerilme (F/A) [91]

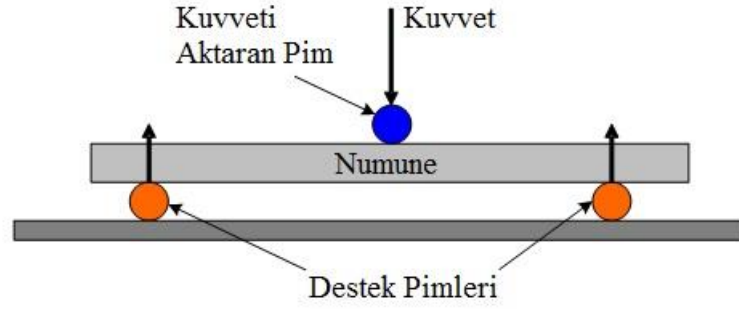
2.4.2. Üç Nokta Eğme Testi

Üç nokta eğme testi, malzemenin eğilme esnasındaki ve buna bağlı olarak malzemenin eğilme altında gerilme – şekil değiştirme tepkisini almak için yapılır. Testin en büyük avantajı; test numunesinin kolay hazırlanması ve testin kolay yapılmasıdır. Buna bağlı olarak dezavantajları; test metodu, numune, yükleme geometrisi ve kuvvete bağlı olarak hassaslık gösterir. Bunun yanı sıra numunenin hazırlanışı ve ortam koşulları test sonuçlarını etkileyebilir.

Eğme testlerinde D7264/D7264M – 07 standart numaralı Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials kullanılmış olup, standart da Şekil 4’de belirtilen ölçülerine göre 13mm genişliğinde ve kalınlığın 32 katının %40 fazlası (Numune kalınlıkları ortalama 2.5 mm olarak ölçülmüştür) 112mm olacak

şekilde numuneler çıkarılmıştır. Testler standart da belirtildiği üzere 1 mm/dakika basma hızında yapılmıştır.

Üç nokta eğme testi Şekil 2.24.' de görüldüğü üzere numunenin ortasına uygulan dik bir kuvvet ve numunenin diğer tarafında bu yükü karşılayan iki adet destek piminden oluşmaktadır. Destek pimleri ve kuvveti aktaran pimler, serbest dönecek şekilde konumlandırılmış olup, bu sayede numunenin esneme esnasında pimlere olan sürtünmesi engellenir. Pimlerin eksenleri ve numunenin eksenine paralel olarak yerleştirilir.



Şekil 2.24. Üç Nokta Eğme Test Düzenegi [92]

2.4.3. Düşük Hız Darbe Testi

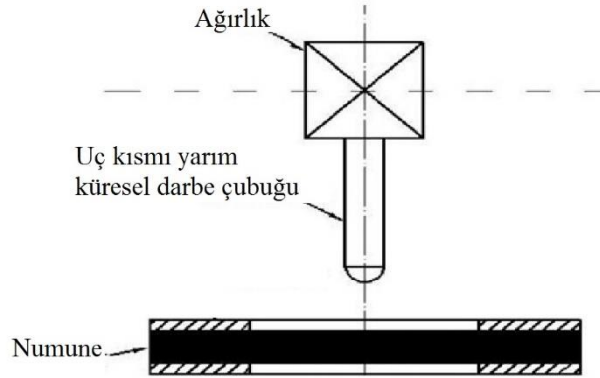
Laboratuvar ortamında darbe hasarlarının tespiti için yapılan deneylerden biride Şekil 2.25.' de görülen düşük hız darbe deneyidir. Bu testle malzemelerin darbe aldıklarında davranışları gözlemlenebilmektedir. Darbe deneyi numunenin bir tek darbe sonucu verdiği tepki değeridir. Genel olarak düşünülecek olursak darbe testlerini, araca sıçrayan bir taş, uçağa çarpan bir kuş gibi gerçek olaylara benzeterek kıyaslayabiliriz. Mühendislik tasarımlarında malzemenin vereceği reaksiyonların önceden bilinmesi ve analiz edilmesi gerekir bu sebeple dışarıdan veya içeriden gelecek tepkilerin

oluşturacağı hasarların kontrolünün yapılması gerekir. Darbe direnci malzeme ömrünün yanı sıra, malzeme güvenliğindeki en önemli etmenlerden biridir.

Litaratür de tam bir ayırım yapılmış olmamasına rağmen 1-10 m/s arasındaki hızlarda yapılan testler düşük hız, 10 m/s üstü yüksek hız darbe testi olarak geçmektedir [93]. Kompozit malzemeler üzerine yapılan düşük hızlı darbe testlerin de tabakalar arasındaki ayrılma, numune de oluşan artık gerilmeler ve malzeme performansı belirlenebilmektedir. Zamana bağlı darbe enerjileri ölçülerek darbe sonucunda malzemenin aldığı hasar yorumlanabilmektedir.

Darbe testlerinde D7136/D7136M – 12 standart numaralı Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event kullanılmış olup, standart da Şekil 8’de belirtilen ölçülere göre 100*150 mm olacak şekilde numuneler çıkarılmıştır.

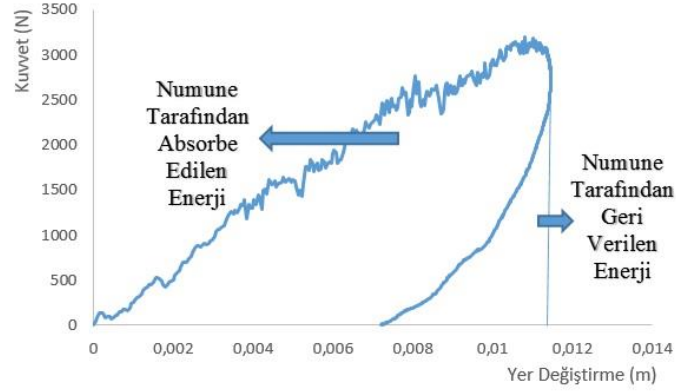
Farklı fiber ve matris malzemeleriyle yapılan çalışmalarda, kompozit malzemenin performansının life bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yüksek alansal yoğunluğuna ve yüksek fiber hacim oranına bağlanmıştır [94].



Şekil 2.25. Düşük Hız Darbe Test Düzeneği [95]

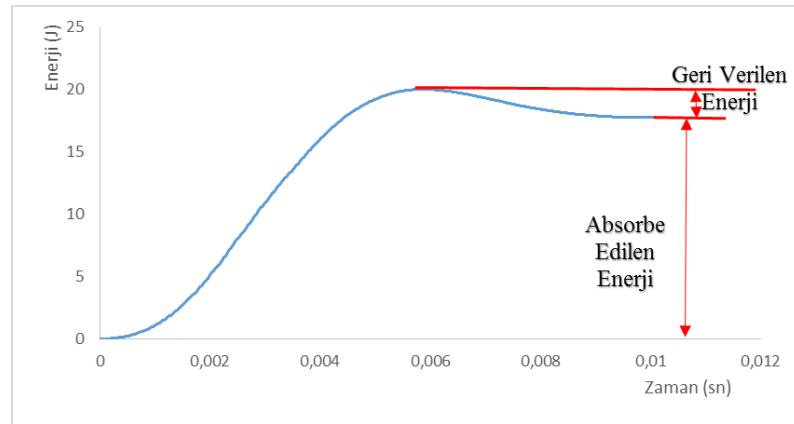
Şekil 2.26.’ da örnek olarak gösterilen kuvvet ve yer değiştirmeye bağlı olarak çizilen grafikler de eğrinin altında kalan alan numune tarafından absorbe edilen enerjiyi

vermekte; kuvvetin üst noktasından, yer değiştirmeye doğru dik çizilip oluşturulan alanda numune tarafından geri verilen enerjiyi göstermektedir.



Şekil 2.26. Kuvvet- Yer Değiştirme Grafiği

Şekil 2.27.' de ise zamana bağlı enerji değişimi grafiği gösterilmiştir. Numuneye çarpan ucun hızı bir an için sıfır olur ve geri seker. Geri sekme başladığı andan itibaren, ölçülen değerlerle darbe ucundaki kalan enerji belirlenir.



Şekil 2.27. Enerji - Zaman Grafiği

Darbe sonucu olarak genellikle oluşan hasar mekanizmaları şekil 2.28.' de görüldüğü üzere; delinme, fiber kopması ve delaminasyon (kavkıma) oluşumudur. Genelde bu hasarlar birbirleriyle etkileşimli olarak meydana gelir. Darbe ilerlerken, kompozit malzeme de yanlara ve aşağı doğru oluşan deformasyon, yani kesme ve normal

gerilmenin oluşturduğu deformasyon delaminasyona, yani yüzey altı çatlaklarına neden olur [96].



Şekil 2.28. Darbe Sonucu Hasar Oluşumları [97]

2.5. Metalografik Özelliklerin Belirlenmesi

Numunelerin metalografik özelliklerini belirlemek amacıyla SEM' le incelemeler yapılmıştır. SEM, küçük kesitli bir alana odaklanıp yüksek enerjili elektronlarla yüzeyin taranması prensibiyle çalışan mikroskop türüdür [98]. SEM' de görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin algılayıcılar aracılığıyla toplanarak, sinyallerin güçlendirilmesi ve katot ışınları tüpünün ekranına aktarımıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu işlem sinyal çeviricilerle monitöre aktarımıyla gerçekleşir [99].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

CNT ve nanokil katkılı üretilen tabakalı kompozitlerin yapımı aşamasında CNT olarak Timesnano TNM5, karbon elyaf Tenax- E HTA 40 3k, reçine Laminating Resin MGS L160, reçine sertleştiricisi Hardener MGS H160, nanokil olarak EsanNANO 1-140 kullanılmıştır.

Karbon elyaf kullanılarak hazırlanan kompozit numunelere, daha önceki çalışmalar göz önüne alınarak, yukarıdaki malzemeler arasına adı geçen CNT oranı ağırlıkça % 0.3 olarak sabit tutulup, yine malzemeler arasında yer alan nanokil oranları ise % 1 – 3 – 5 olacak şekilde eklenmiş bunun yanı sıra mukayese edebilmek için sadece reçineyle, sadece % 0.3 CNT takviyesi ile ve sadece reçinenin ağırlıkça % 1 , % 3 ve % 5 oranlarında nanokil takviyesiyle 8 farklı numune çeşidi hazırlanmıştır.

3.1. Deneyler de Kullanılan Malzemeler

Deneyler de kullanılan MWCNT, nanokil, karbon elyaf, epoksi ve epoksi sertleştiricisi başlıklar halinde incelenmiştir.

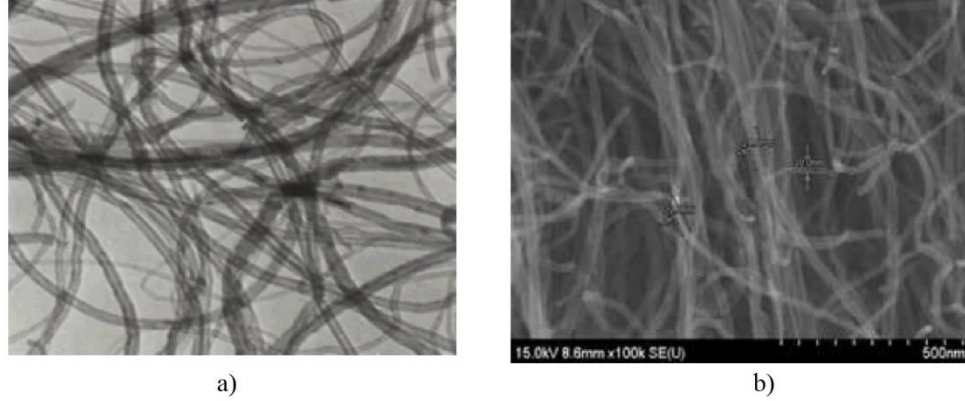
3.1.1. Karbon Nanotüp

Çalışma da kullanılan Timesnano firmasının ürettiği MWCNT' nin özellikleri Çizelge 3.1.' de verilmiştir [100].

Çizelge 3.1. MWCNT Özellikleri

Kategori	Safılık	Dış Çap	İç Çap	Boy	Üretim
Numarası		Aralığı	Aralığı		Metodu
TNM5	> % 95	20 - 30 nm	5 - 10 nm	10 – 30 µm	CVD

Bu MWCNT' nin Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM, Scanning Electron Microscope) ve Geçirim Elektron Mikroskobu (SEM, Transmission Electron Microscope) görüntüleri Şekil 3.1.' de verilmiştir.



Şekil 3.1. MWCNT'nin a)TEM görüntüsü b) SEM görüntüsü [100]

3.1.2. Karbon Elyaf, Epoksi ve Epoksi Sertleştiricisi

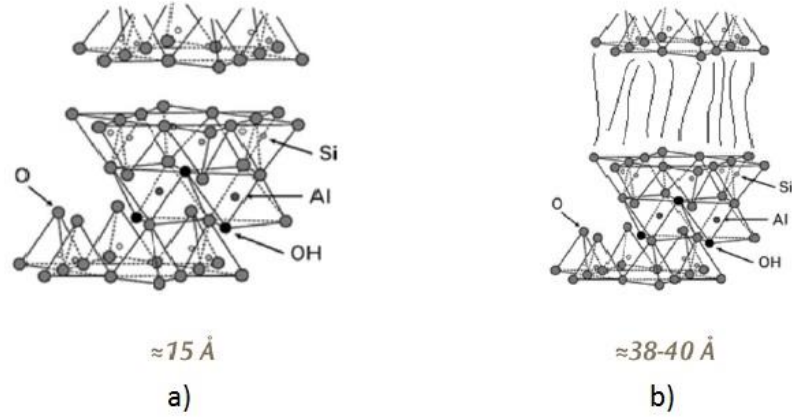
Çalışmada kullanılan karbon elyaf, epoksi ve sertleştiricinin özellikleri Çizelge 3.2.' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Kullanılan Malzemelerin Teknik Özellikleri [101-103]

	Karbon Elyaf	Epoksi	Sertleştirici
Ticari İsim	Tenax- E HTA	Laminating Resin	Hardener
	40 3k	MGS L160	MGS H160
Lif Sıklığı (adet/cm)	5		
Lifteki Filament Sayısı (adet)	3000		
Filament Çapı (µm)	7		
Yoğunluk (g/cm ³)	1.76	1.18 – 1.20	0.96 - 1
Akma Mukavemeti (MPa)	3950	70-80	
Elastisite Modülü (GPa)	238	3.2 - 3.5	
Kopma Uzaması (%)	1.7	5 - 6.5	
Vizkosite (mPas)		700 - 900	10 - 50
Darbe Dayanımı (KJ/m ²)		40 - 50	

3.1.3. Nanokil

Nanokil olarak montmorillonit yapılı Eczacıbaşı'nın EsanNANO 1-140 kodlu kili kullanılmıştır. Ultra beyaz ve saf bir yapıya sahip kil, içerisine katıldığı malzemenin yanmazlık, mukavemet, nem ve gaz geçirgenliği özelliklerinde iyileşme sağlamaktadır. Şekil 3.2.' de görüldüğü üzere bir nanokilin özelliği montmorillonit kilin başlangıçta tabakalar arası mesafe değerleri yaklaşık olarak 15 Å iken, aynı nanokile organik modifikasyon yapıldığında bu değerler 38-40 Å aralıklarına ulaşabilmektedir. EsanNANO 1-140 üretiminde de montmorillonitin saflaştırılması ve organik modifikasyonu yapılmaktadır. Bu modifikasyonla kilin matris malzemesinde homojen olarak dağılması sağlanmaktadır [104]



Şekil 3.2. a) Montmorillonit Yapı b) Organikleştirilmiş Montmorillonit Yapı

EsanNANO Kilin Kimyasal Özellikleri aşağıda belirtilmiştir [104] ;

Çizelge 3.3. EsanNANO Kilin Kimyasal Özellikleri

	Al ₂ O ₃	SiO ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	LOI
%	6±1	44±1	0.6 ±	0.4 ±	0.3 ±	0.4 ±	1.4 ±	0.05 ±	45 ± 2
			0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.02	

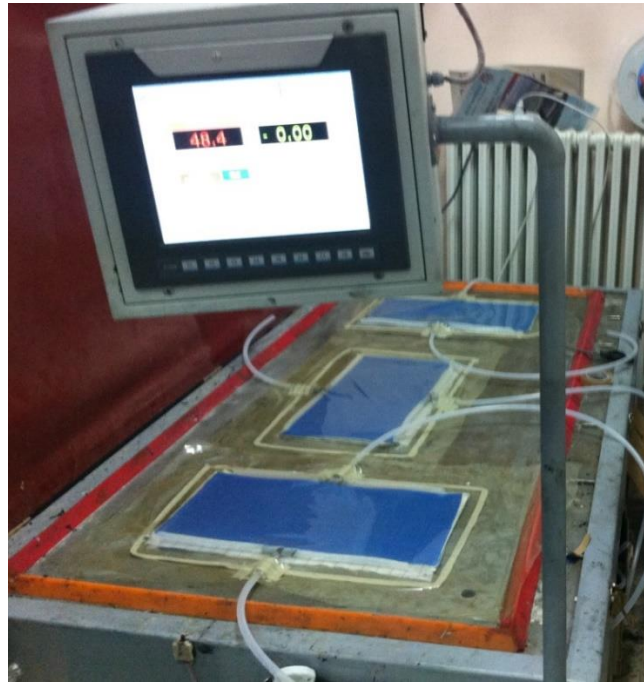
EsanNANO Kilin Lazer Difraktometrisi ile yapılmış tane boyut analizi aşağıda verilmiştir [104] ;

Çizelge 3.4. EsanNANO Kilin Tane Boyut Analizi

Büyükük (μm)	0–0.5	0.5–1	1–2	2–2.7	2.7–5	5–7.5	7.5–10	10–15
Yüzde Oranı(%)	2.27	8.66	23.8	15.84	32.25	12.6	3.94	0.64

3.2. Kompozit Levhaların Üretiminde Kullanılan Vakum İnfüzyon Cihazı

Şekil 3.3.' da tabakalar vakuma bağlı bir şekilde görülmektedir. Tezgâh özel üretim olup IDVARTM özelliğine sahip, ısı ve vakum değerleri zamana göre ayarlanabilir bir program yapısına sahiptir.



Şekil 3.3. İşlem Tezgâhı

3.3. Kompozit Levhaların Üretimi

Hazırlanan numunelere katılan MWCNT ve nanokil miktarları Çizelge 3.5.'de verilmiştir. Numune isimleri kolay anlaşılabilir olması açısından; karbon nanotüp-CNT, nanokil-NC olarak gösterilmiş olup yanında ki sayılar numunelerdeki reçineye göre ağırlıkça yüzde oranlarını göstermektedir.

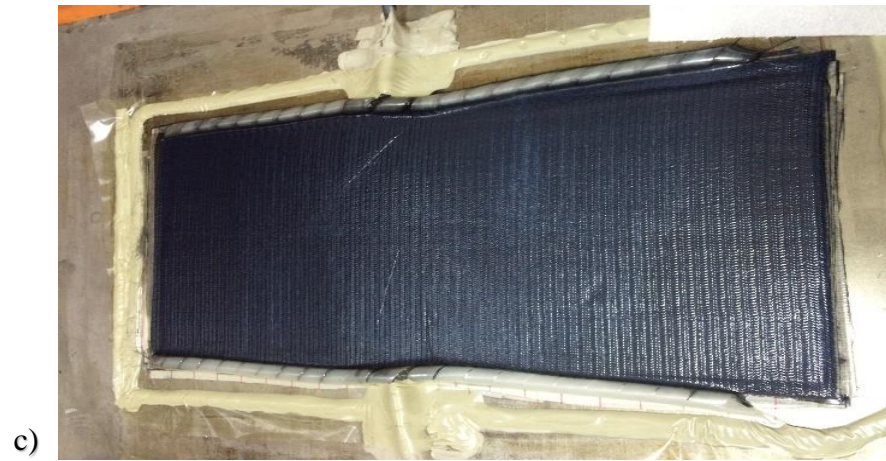
Çizelge 3.5. Hazırlanan Numuneler

	MWCNT (%)	Nanokil (%)
CNT0NC0		
CNT0NC1		1
CNT0NC3		3
CNT0NC5		5
CNT0,3NC0	0,3	
CNT0,3NC1	0,3	1
CNT0,3NC3	0,3	3
CNT0,3NC5	0,3	5

Kompozit levhaların imal edilmesi sırasında ilk olarak asetonla temizlenmiş metal yüzeye matris malzemesinin dağılması için infüzyon filesi, daha sonra kompozit levhanın fileden ve yüzeyden kolay ayrılması için peel ply adı verilen ayırıcı kumaş serilir. Ayırıcı yüzeyden sonra karbon elyaflar toplam 12 katman olacak şekilde aynı ekseninde üst üste yerleştirilir. Alt kısmın simetrisi olacak şekilde karbon elyaflardan sonra peel ply, infüzyon filesi ve alt kısımdan farklı olarak en üste vakum naylonu geçirilir.

Tüm tabakaları vakum naylonu kaplayacak şekilde kapatılır ve metal yüzeye arasına çift taraflı vakum sızdırmazlık bandı çekilir. Bu bantların arasına ilk giriş ve çıkış kısmına havayı çekmek ve matris malzemesini elyaflara aktarabilmek için hortum bağlanır. Matris akışını homojen dağıtabilmek içinde giriş ve çıkışlarına giren hortumun ucuna spiral hortum bağlanır ve sızdırmazlık sağlanır.

Yukarı da sözü edilen tabakaların imalatında, matris malzemesi verilmeden önceki, verilmesi sırasındaki ve sonrası Şekil 3.4.' de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. a) Hava Ortamında Vakumlanmış Tabaka b) Reçine Verilirken Tabaka

c) Reçine Verme İşlemi Bittikten Sonra Tabaka

3.4. Deneyler de Kullanılan Ölçüm Cihazları

Çekme deneyleri Kırıkkale Üniversitesi Makine Mühendisliği bünyesinde bulunan, Şekil 3.5. 'de görülen Alşa markalı, elektromekanik motor tahrikli 100 kN kapasiteli çekme-basma ölçüm cihazında yapılmıştır. Elektronik yük ölçer hassasiyeti %1 Class1 olup, 1 mikron pozisyon çözünürlüğünde çalışmaktadır.



Şekil 3.5. 100 kN Kapasiteli Çekme Cihazı

Üç nokta eğme deneyleri Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği bünyesinde bulunan, Şekil 3.6.' da gösterilen Shimadzu markalı Autograph AGS-X serisi, MVG 20 kN loadcell bağlı ölçüm cihazında yapılmıştır. Loadcell ile ölçülen yükler için standart TS EN ISO 7500-1' de Class 1 olarak geçmekte olup, hassasiyeti %1' dir. Basın ucun orta açıklığına ait elastik yer değiştirmesine (δ) ait hassasiyeti de %0.1' dir [105].

Düşük hız darbe testleri, Selçuk Üniversitesi Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan, bu amaçla özel olarak imal edilmiş test cihazında yapılmıştır. Şekil 3.7.' de görülen test cihazıyla, değişik enerji seviyelerinde ya da değişik darbe hızlarında deneyler yapılabilmekte ve bu deneyler sırasında, darbe değerini kaydedebilme ve değerlendirme imkânları vardır.



Şekil 3.6. Shimadzu Marka Üç Nokta Eğme Ölçüm Cihazı



Şekil 3.7. Düşük Hız Darbe Test Cihazı

Numunelerin metalografik yapılarının belirlenmesi için ve yorumlanabilmesi için Kırıkkale Üniversitesi, Merkez Laboratuvarları bünyesinde bulunan JEOL JSM 5600 (30kV) SEM cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.8.' de görülen SEM 3.5 nm görüntü çözünürlüğüne sahiptir ve 18x – 300.000x arası büyütme yapılabilir [106].



Şekil 3.8. SEM Görüntüleme Cihazı

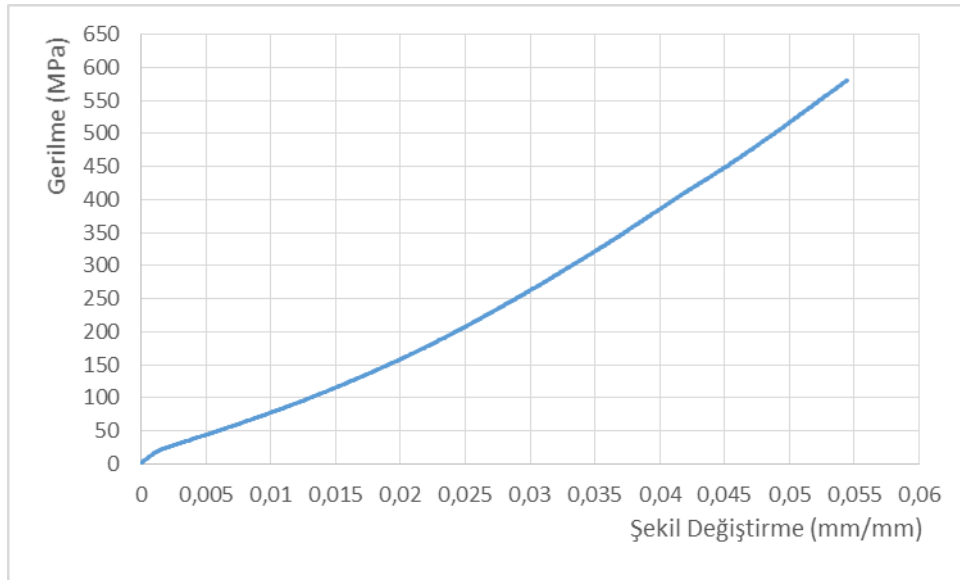
4. SAYISAL BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

4.1. Çekme Testi Sonuçları

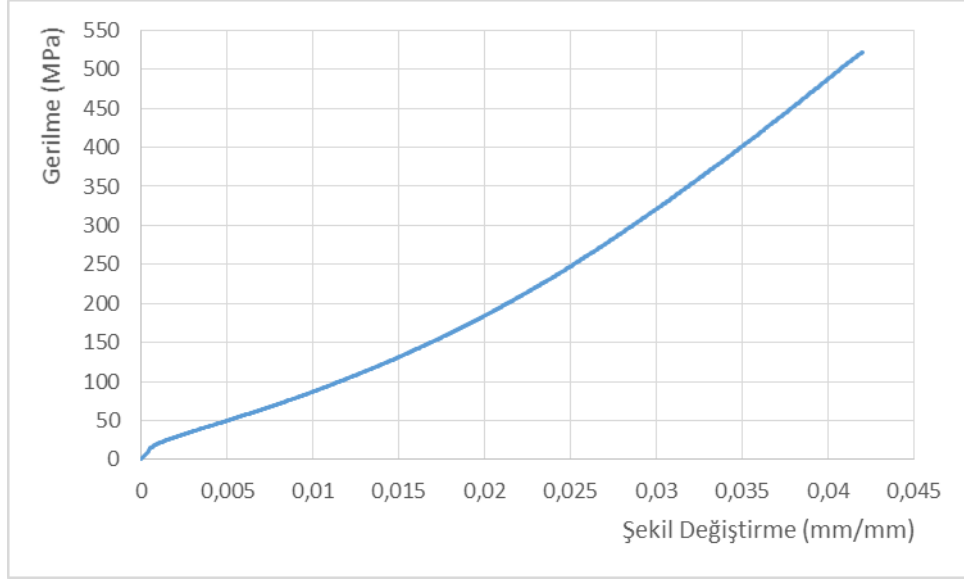
Numunelere uygulanan çekme testlerinin sonuçları gerilme – şekil değiştirme diyagramları olarak verilmiş ve maksimum ulaşabildikleri değerler incelenmiş ve yorumlanmıştır.

Çekme testlerinde ASTM'nin D3039/D3039M – 14 standart numaralı Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials kullanılmış olup, standardın 2 numaralı tablosunda belirtilen ölçüleri göre 25*250 mm olacak şekilde numuneler çıkarılmıştır. Testler standart da belirtildiği üzere 2 mm/dakika çekme hızında yapılmıştır.

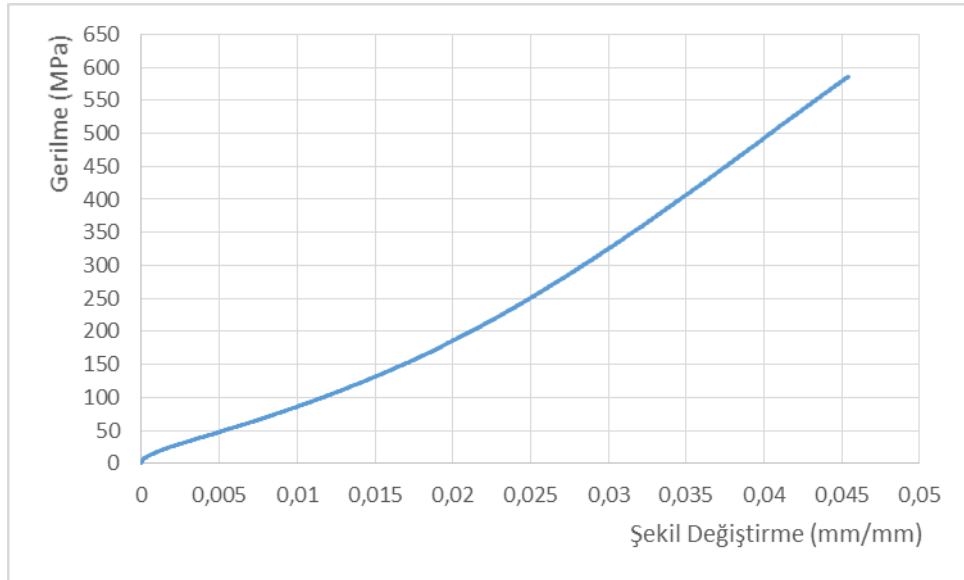
Yapılan çekme testlerinden elde edilen gerilme – şekil değiştirme grafikleri, 8 farklı numune için ayrı ayrı Şekil 4.1. – 4.2. – 4.3. – 4.4. – 4.5. – 4.6. – 4.7. ve 4.8.'de verilmiştir.



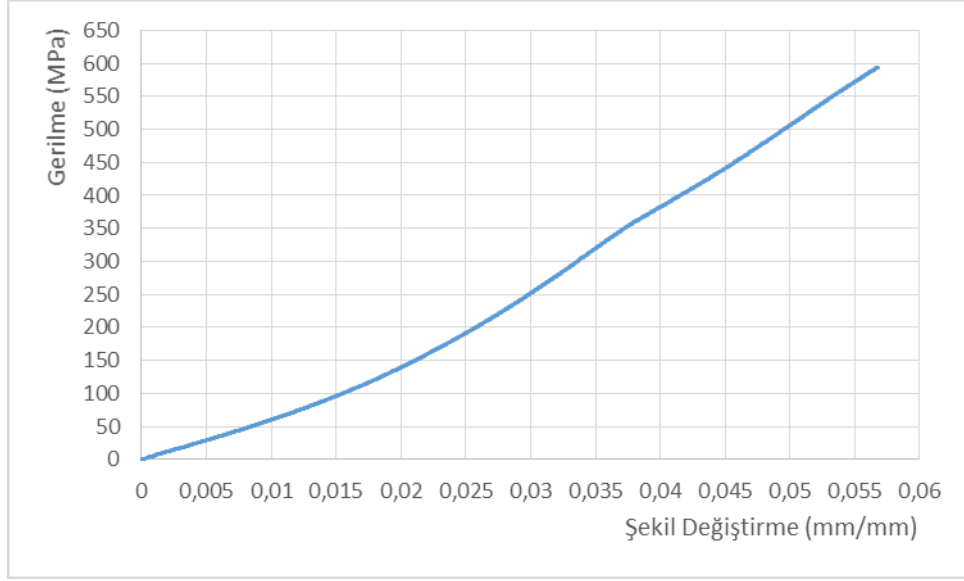
Şekil 4.1. CNT0NC0 Numunesinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değiştirme Grafiği



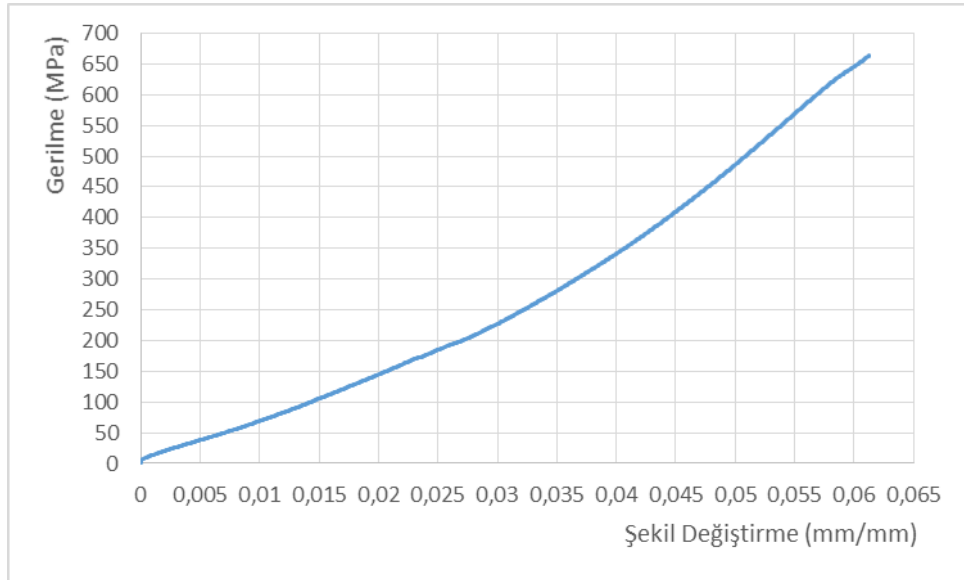
Şekil 4.2. CNT0NC1 Numunesinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği



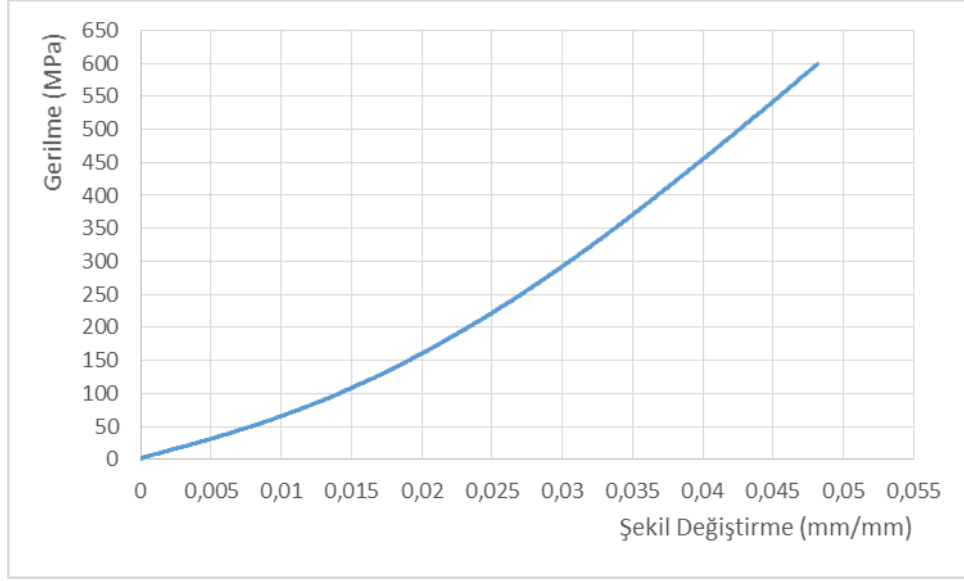
Şekil 4.3. CNT0NC3 Numunesinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği



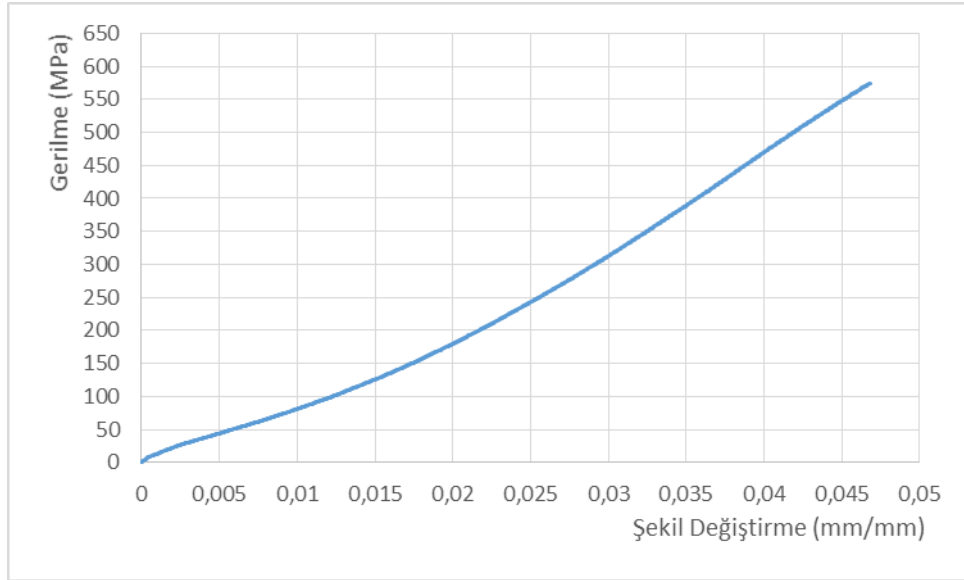
Şekil 4.4. CNT0NC5 Numunesinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği



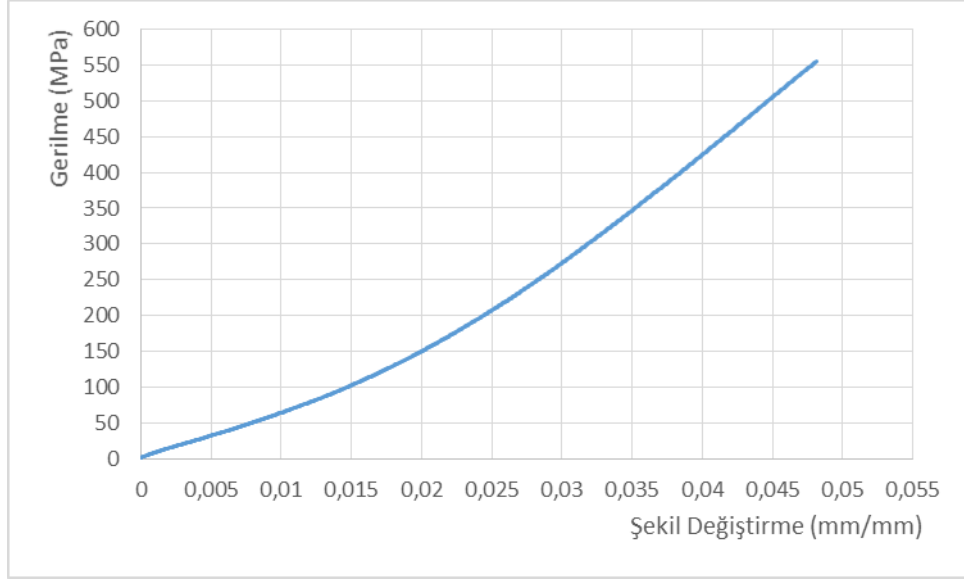
Şekil 4.5. CNT0,3NC0 Numunesinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği



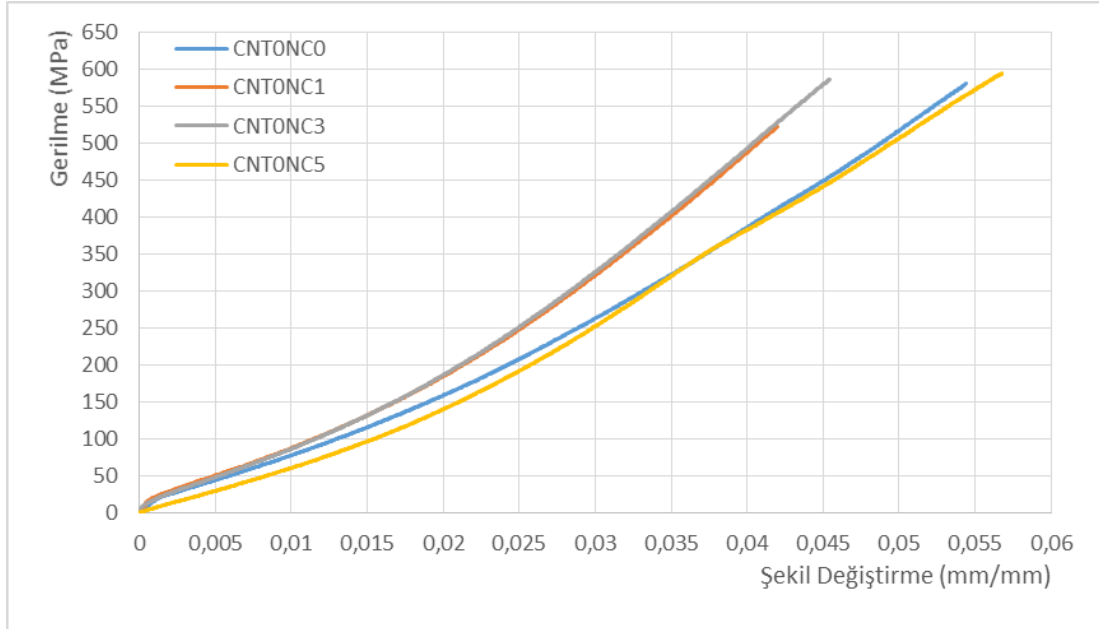
Şekil 4.6. CNT0,3NC1 Numunesinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği



Şekil 4.7. CNT0,3NC3 Numunesinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği



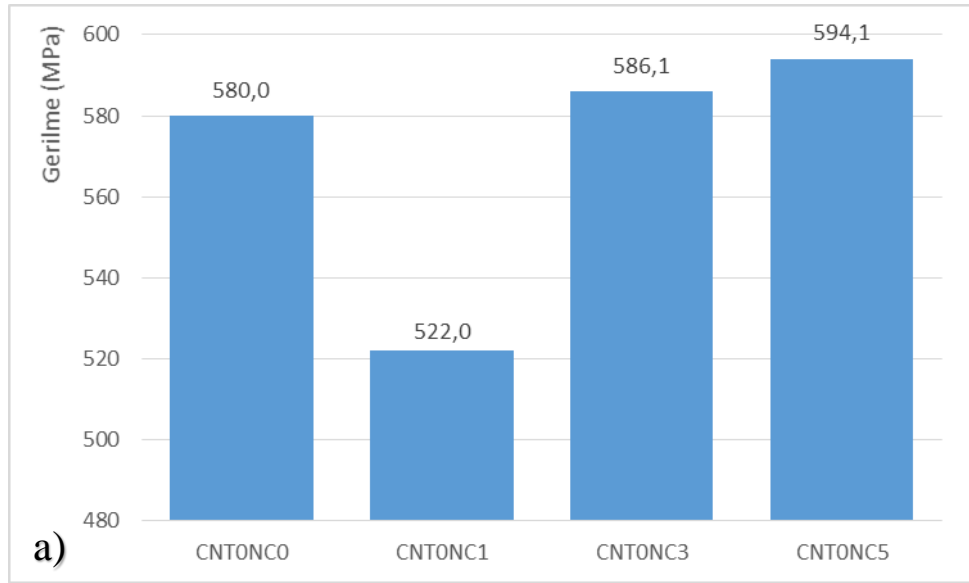
Şekil 4.8. CNT0,3NC5 Numunesinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği

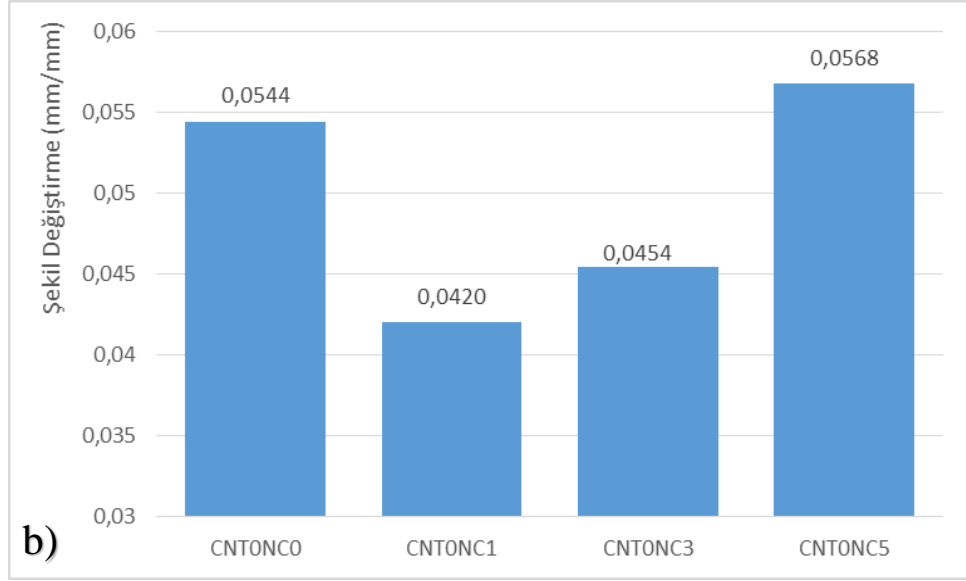


Şekil 4.9. CNT0NC0, CNT0NC1, CNT0NC3 ve CNT0NC5 Numunelerinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Değerlerinin Karşılaştırılmalı Grafiği

Yapılan çekme testlerinde ki Şekil 4.9.' dan alınan maksimum gerilme ve şekil değiştirmeler nanokil ekli numuneler için, Şekil 4.10.' da grafiklerle incelendiğin de aşağıda ki sonuçlar görülmektedir.

- Maksimum gerilme ve şekil değiştirme CNT0NC5 numunesin de ölçülmüştür.
- Minimum gerilme ve şekil değiştirme CNT0NC1 numunesin de ölçülmüştür.
- CNT0NC0 numunesine göre, CNT0NC1 numunesin de gerilme de % 10, şekil değiştirme de % 23' lük azalma görülmüştür.
- CNT0NC1 numunesine göre; CNT0NC3 numunesin de % 12, CNT0NC5 numunesin de % 14 artış gözlemlenmektedir.
- Maksimum çekme şekil değiştirmelerini incelediğimizde CNT0NC1 numunesine göre, CNT0NC3 numunesin de %8, CNT0NC5 numunesin de %35 artış ölçülmüştür.

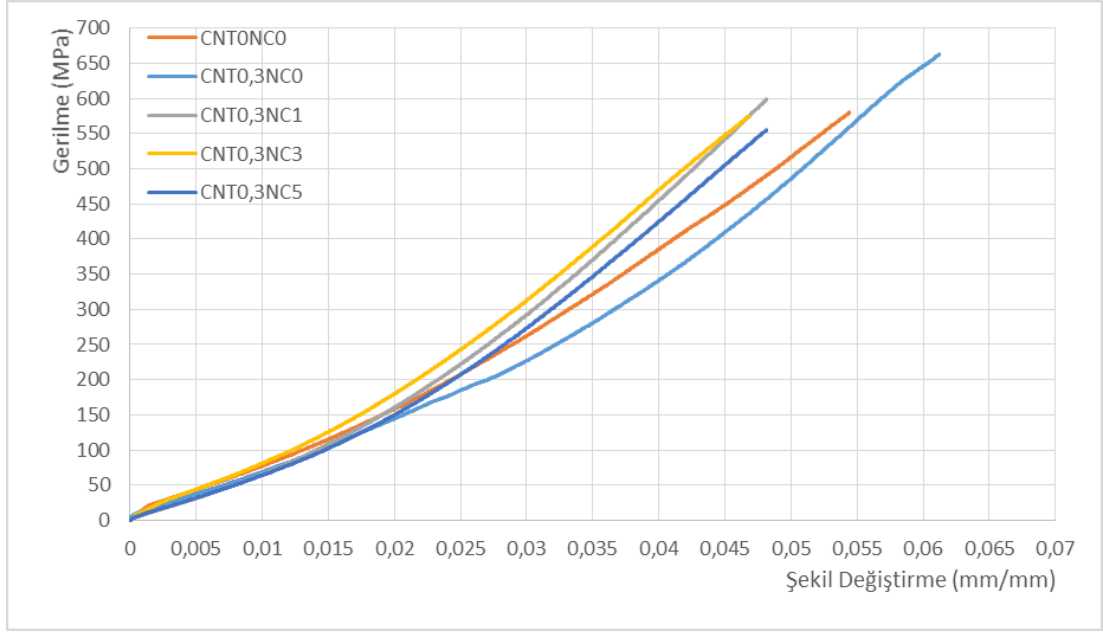




Şekil 4.10. CNT0NC0, CNT0NC1, CNT0NC3 ve CNT0NC5 Numunelerinin Çekme Testi a) Maksimum Gerilme b)Maksimum Şekil Değişirme Değerlerinin Karşılaştırılması Diyagramı

% 1 nanokil takviyeli CNT0NC1 numunesinin, saf olan CNT0NC0 numunesine göre çekme gerilmesinde ve şekil değişirmesinde önemli bir düşüş görülmektedir. Bu düşüşün sebebi olarak az oranda katılan takviyenin çatlakları uzun çizgiler halinde birleştirmesi düşünülebilir. CNT0NC0 numunesiyle kıyasladığımızda CNT0NC1 numunesinde ki kil oranının az olması sebebiyle mukavemetinin düştüğü ancak CNT0NC3 numunesinde gerilme değerlerini yakaladığı, buna rağmen şekil değişirme değerlerini ancak CNT0NC5 numunesinde de yakaladığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak numunelerde az oranda bulunan nanokilin kopma esnasında, doğrusal çatlaklar ve bu çatlakların çentik etkisi oluşturması düşünülebilir. Şekil değişirmede ki artışlardan; numunelerdeki nanokil oranı arttıkça artan çekme mukavemeti ve gerilme değerleri açıkça görülmektedir. Nanokil, reçinenin içinde liflere sarılarak, fazladan zincir yapılar oluşturmuş, köprü kırılmasının yolunu uzatmıştır.

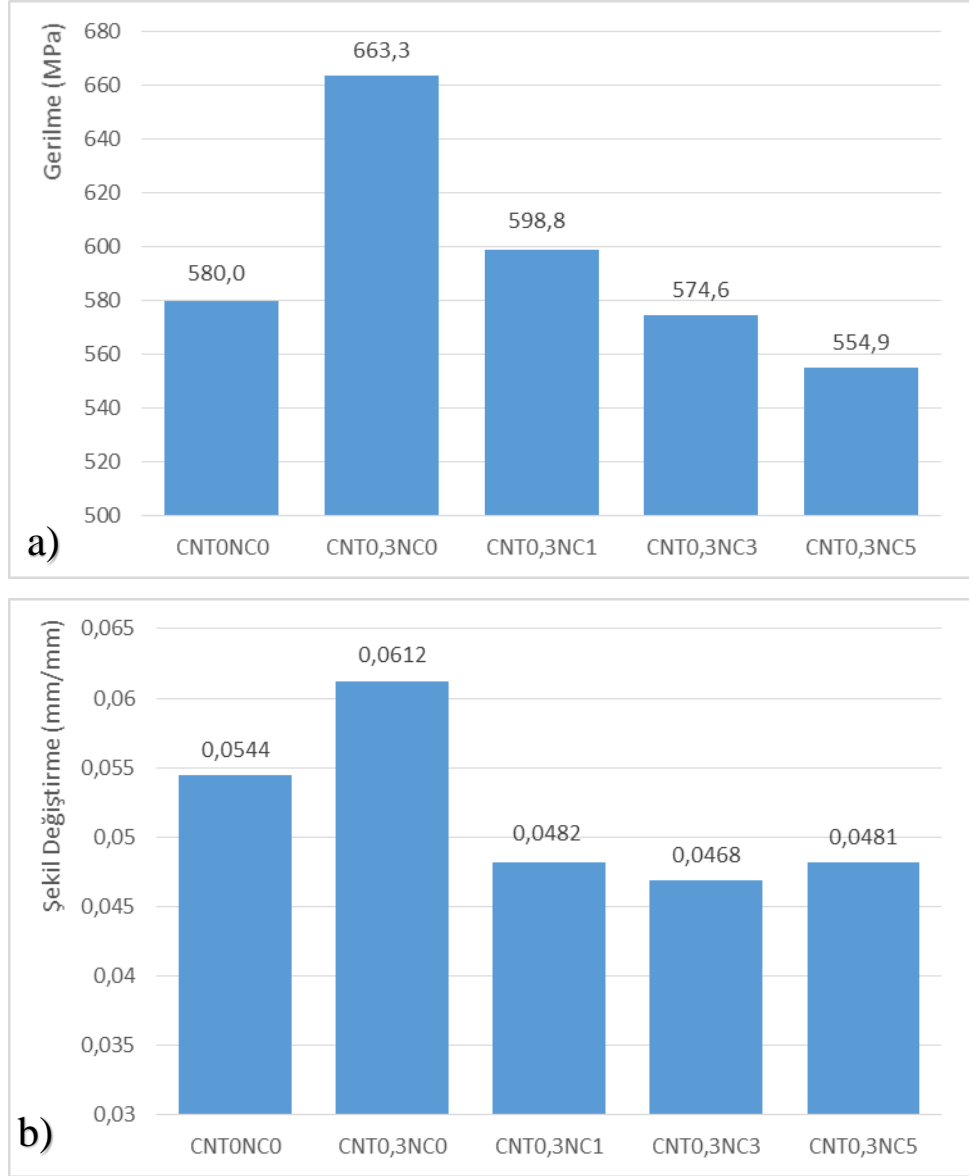
% 1 takviyeli numunenin, takviye oranları % 3 ve % 5'e çıkarıldığında gerilme ve şekil değişirme değerleri artmaktadır. Ancak % 3 ve % 5 katkılı numunelere ait gerilme ve şekil değişirme değerleri, katkısız numune değerlerini çok az aşabilmiştir. Nanokil yüzdesinin daha da artırılması durumunda, katkının olumlu veya olumsuz ilgili değerlerinin nasıl değişeceği ilgi çekici olabilir.



Şekil 4.11. CNT0,3NC0, CNT0,3NC1, CNT0,3NC3 ve CNT0,3NC5 Numunelerinin Çekme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Değerlerinin Karşılaştırılmalı Grafiği

Yapılan çekme testlerinde Şekil 4.11.'den alınan maksimum gerilme ve şekil değiştirmeler CNT ve nanokil ekli numuneler için, Şekil 4.12.' de grafiklerle incelendiğinde aşağıda ki sonuçlar görülmektedir.

- Maksimum gerilme ve şekil değiştirme CNT0,3NC0 numunesin de ölçülmüştür.
- Minimum gerilme CNT0,3NC5 numunesin de, minimum şekil değiştirme CNT0,3NC3 numunesin de görülmektedir.
- CNT0,3NC0 numunesine göre; CNT0,3NC1 numunesinin gerilmesinde % 14, şekil değiştirme değerlerin de ise % 13' e varan artış gözlemlenmiştir.
- CNT0,3NC0 numunesine göre gerilme değerleri incelendiğinde; CNT0,3NC1 numunesin de % 9, CNT0,3NC3 numunesin de % 14, CNT0,3NC5 numunesin de % 16 azalma görülmektedir.



Şekil 4.12. CNT0NC0, CNT0,3NC0, CNT0,3NC1, CNT0,3NC3 ve CNT0,3NC5 Numunelerinin Çekme Testi a) Maksimum Gerilme b) Maksimum Şekil Değişirme Değerlerinin Karşılaştırılması Diyagramı

MWCNT, karbon elyaf üzerindeki etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Buna rağmen MWCNT ekli numunelere ilave katılan nanokilin gerilme değerlerini düşürdüğü görülmektedir. Bunun sebebi olarak MWCNT ile beraber katılan nanokilin içinde ki boşlukların kırılma yolunu, rahat bir şekilde geçmesi düşünülebilir.

MWCNT' nin gerilme ve şekil değişirme üzerinde ki katkısı dikkate değerdir, önemli bir artış gözlemlenmektedir. Bu MWCNT takviyeli numunelere, giderek artan oranda katılan nanokil gerilme ve şekil değişirme değerlerini geriye çekmiştir. Hatta bu azalma

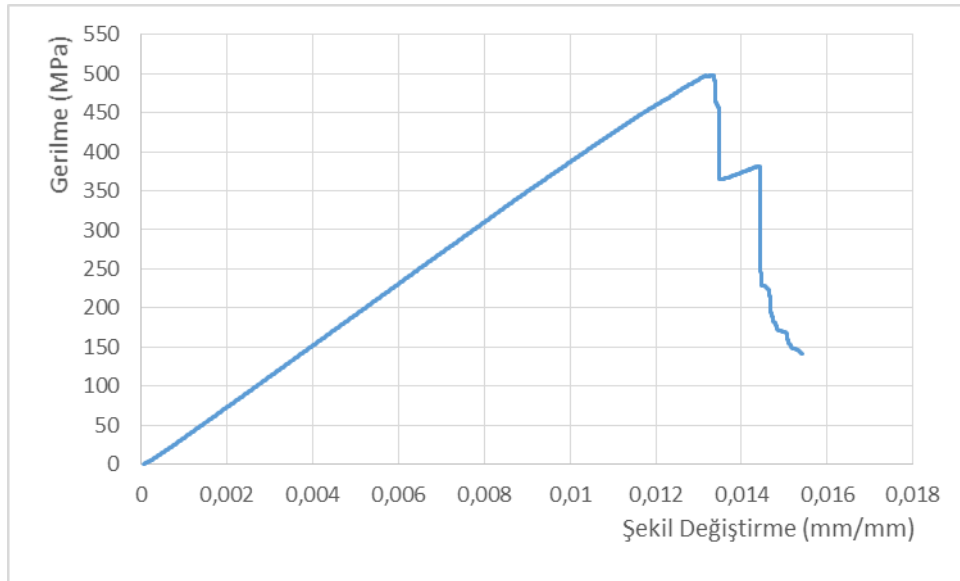
CNT0NC0 saf numunesinden bile ařađıya dūřmūřtur. Bu sonuřlardan anlařılacađı ūzere, řekme gerilmesi ve řekme řekil deđiřtirmeleri, MWCNT ile beraber katılan nanokilden ařık olarak olumsuz řekilde etkilenmiřtir.

4.2. Ūç Nokta Eđme Testi Sonuřları

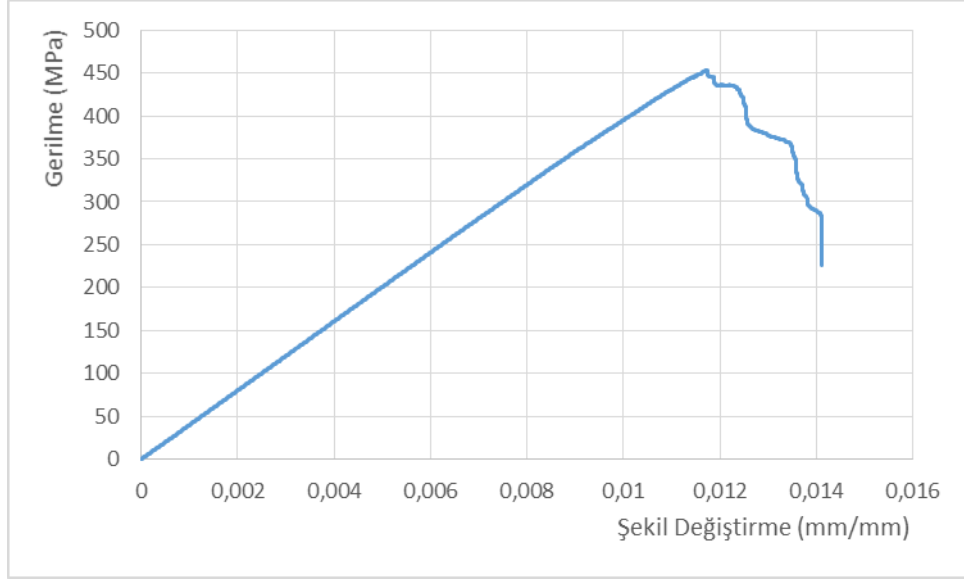
Ŗlçūlen deđerleri kullanarak oluřturulan eđilme gerilmesi – řekil deđiřtirme diyagramları ařađıda gŖsterilmiřtir.

Eđme testlerinde D7264/D7264M – 07 standart numaralı Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials kullanılmış olup, standart da şekil 4’de belirtilen Ŗlçūlerine gŖre 13mm genişliğinde ve kalınlığın 32 katının %40 fazlası (Numune kalınlıkları ortalama 2.5 mm olarak Ŗlçūlmūřtur) 112mm olacak şekilde numuneler şıkarılmıştır. Testler standart da belirtildiği ūzere 1 mm/dakika basma hızında yapılmıştır.

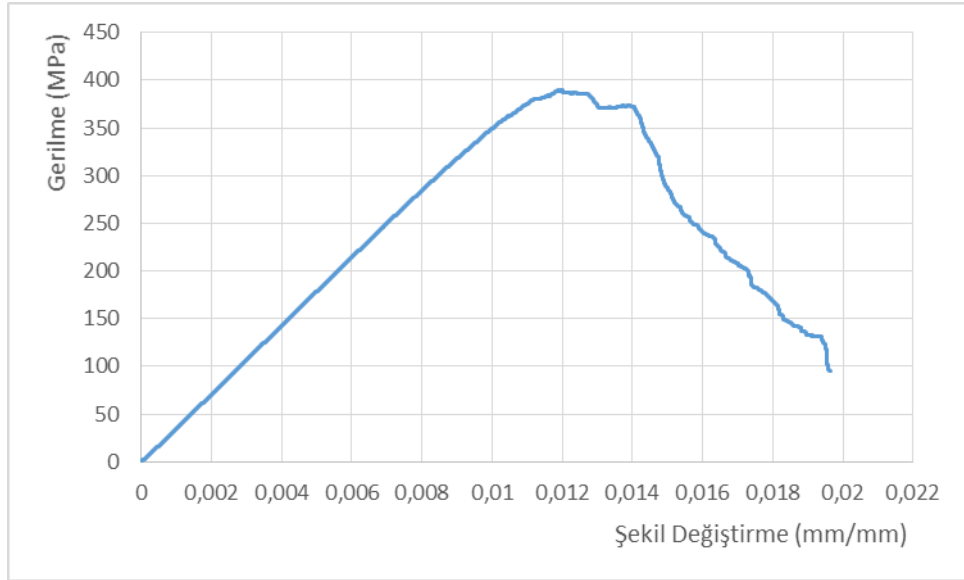
Yapılan ūç nokta eđme testlerinden elde edilen gerilme – řekil deđiřtirme grafikleri, 8 farklı numune iřin ayrı ayrı řekil 4.13. – 4.14. – 4.15. – 4.16. – 4.17. – 4.18. – 4.19. ve 4.20.’de verilmiřtir.



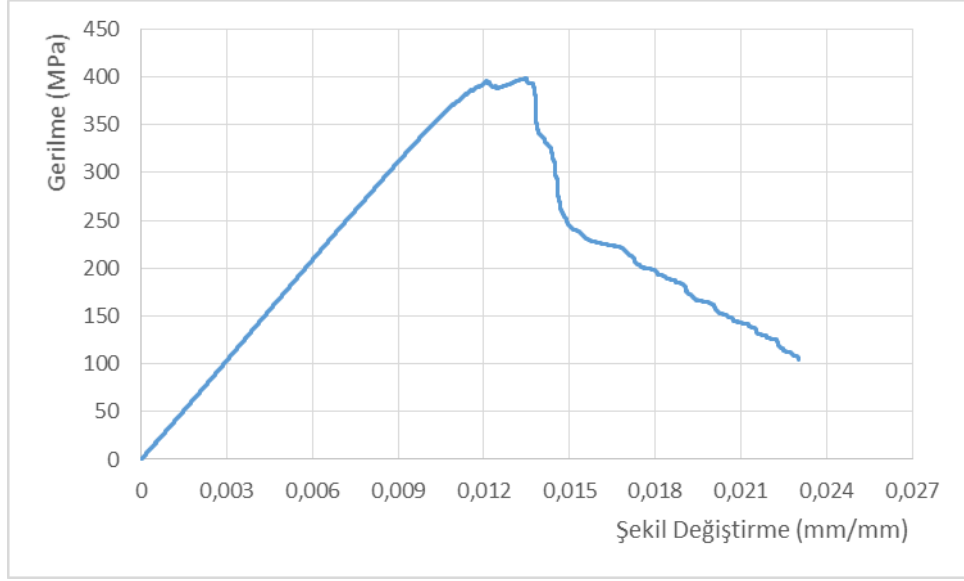
řekil 4.13. CNT0NC0 Numunesinin Ūç Nokta Eđme Testi Gerilme – řekil Deđiřtirme Grafiđi



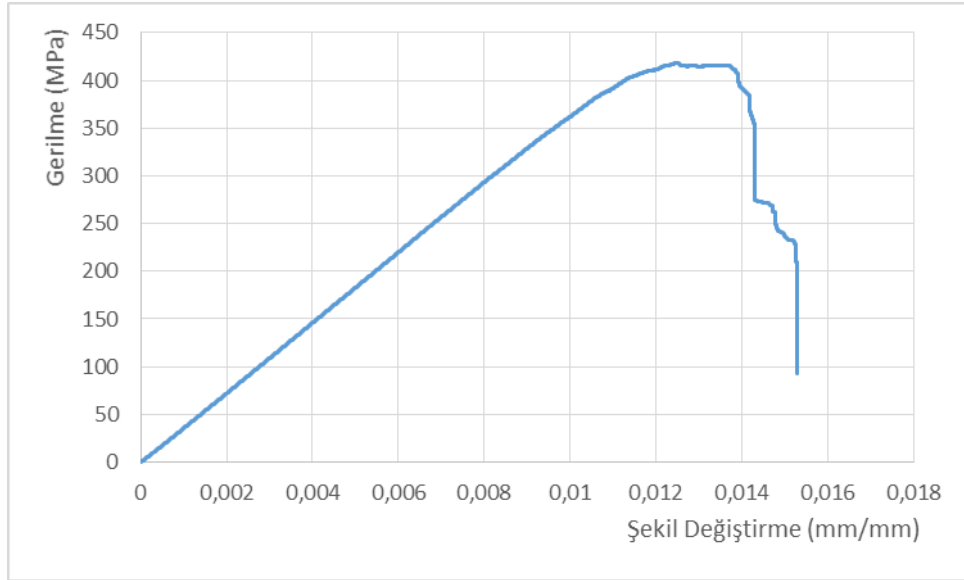
Şekil 4.14. CNT0NC1 Numunesinin Üç Nokta Eğme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği



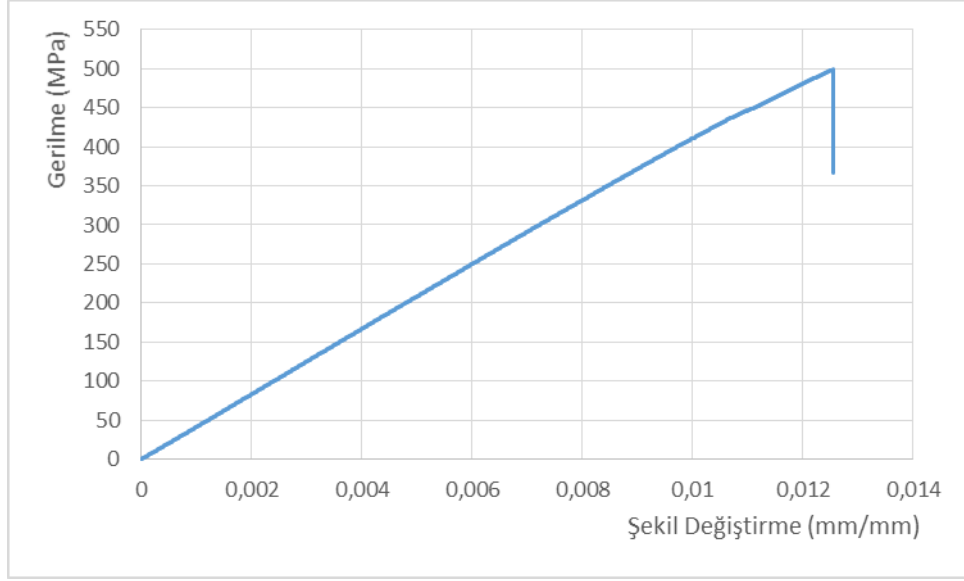
Şekil 4.15. CNT0NC3 Numunesinin Üç Nokta Eğme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği



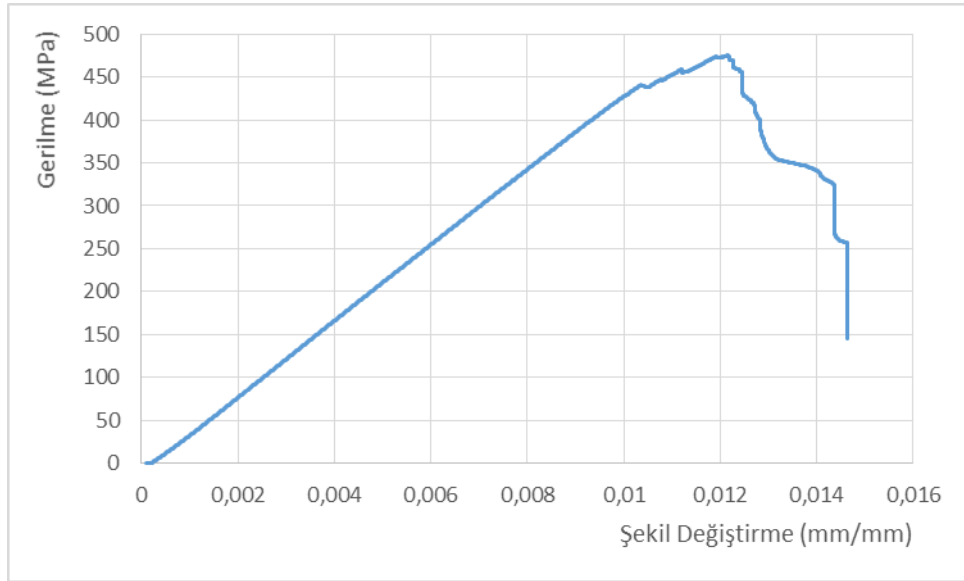
Şekil 4.16. CNT0NC5 Numunesinin Üç Nokta Eğme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği



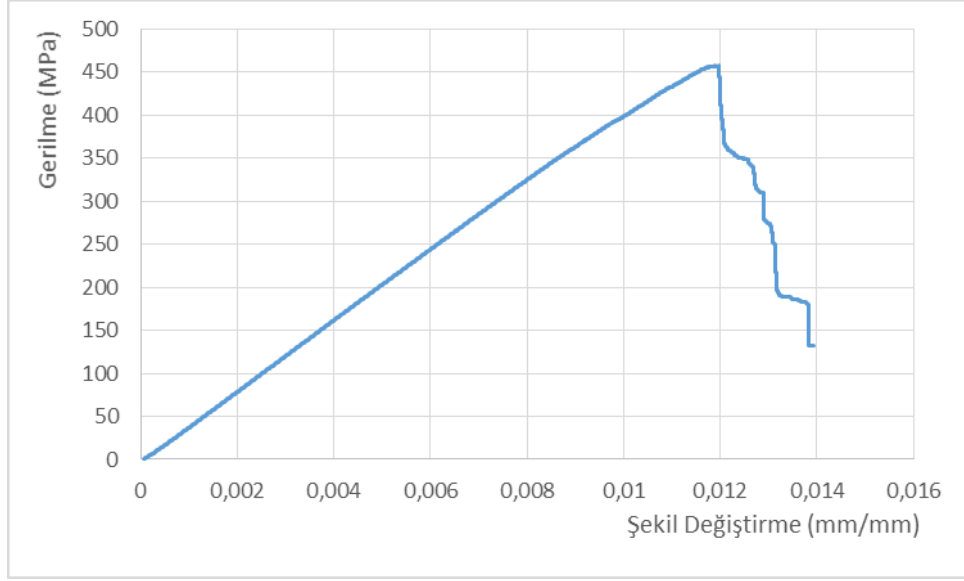
Şekil 4.17. CNT0,3NC0 Numunesinin Üç Nokta Eğme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği



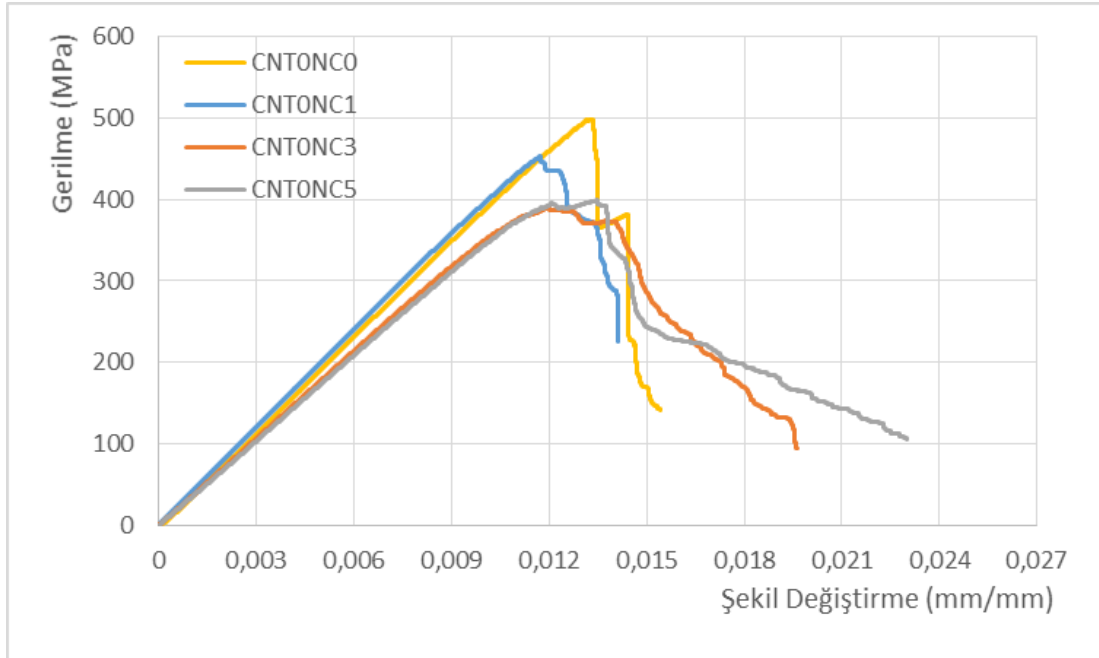
Şekil 4.18. CNT0,3NC1 Numunesinin Üç Nokta Eğme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği



Şekil 4.19. CNT0,3NC3 Numunesinin Üç Nokta Eğme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği



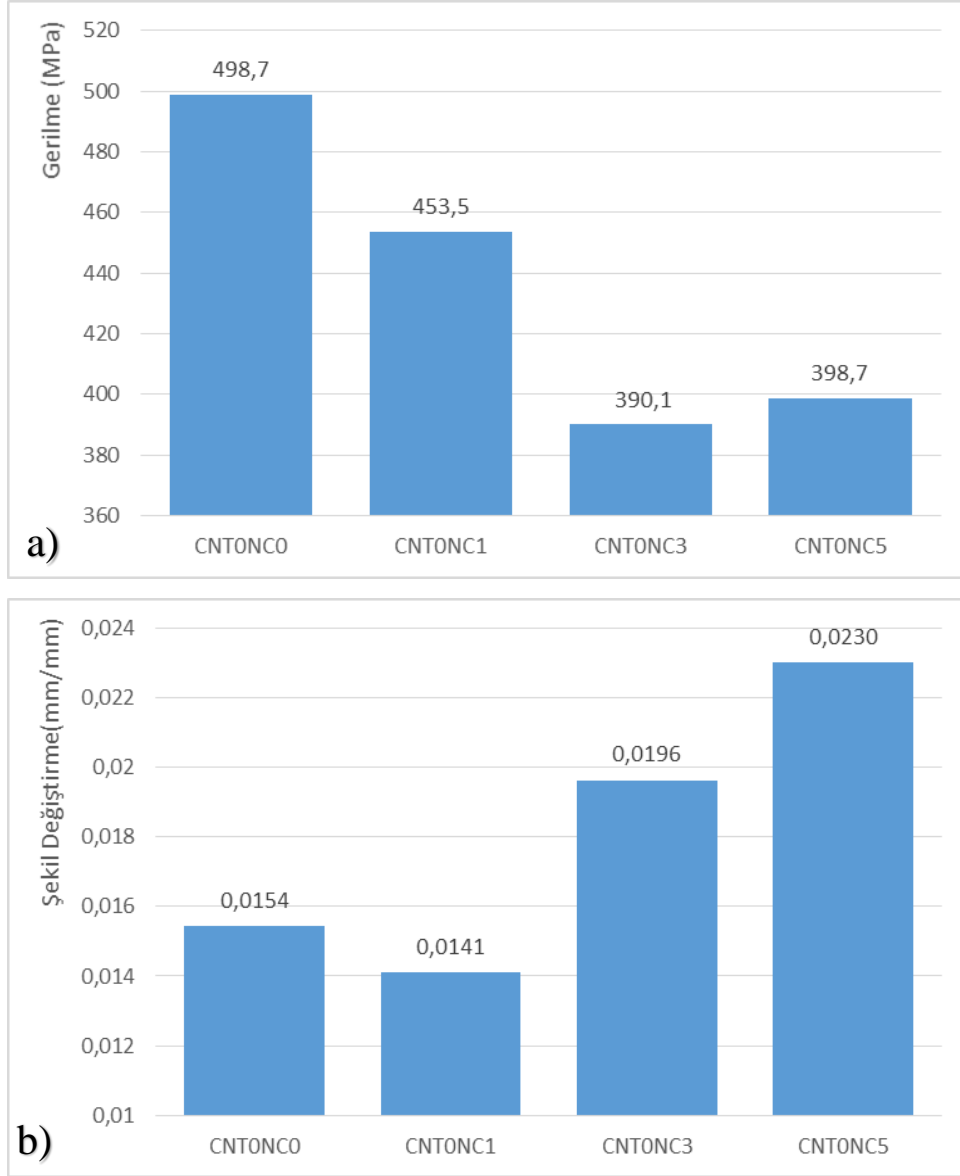
Şekil 4.20. CNT0,3NC5 Numunesinin Üç Nokta Eğme Testi Gerilme – Şekil Değişirme Grafiği



Şekil 4.21. CNT0NC0, CNT0NC1, CNT0NC3 ve CNT0NC5 Numunelerinin Üç Nokta Eğme Testi Gerilme-Şekil Değişirme Değerlerinin Karşılaştırılmalı Grafiği

Yapılan üç nokta eğme testlerinde ki Şekil 4.21.' den alınan maksimum gerilme ve şekil değiştirmeler, Şekil 4.22.' de grafiklerle incelendiğin de aşağıda ki sonuçlar görülmektedir.

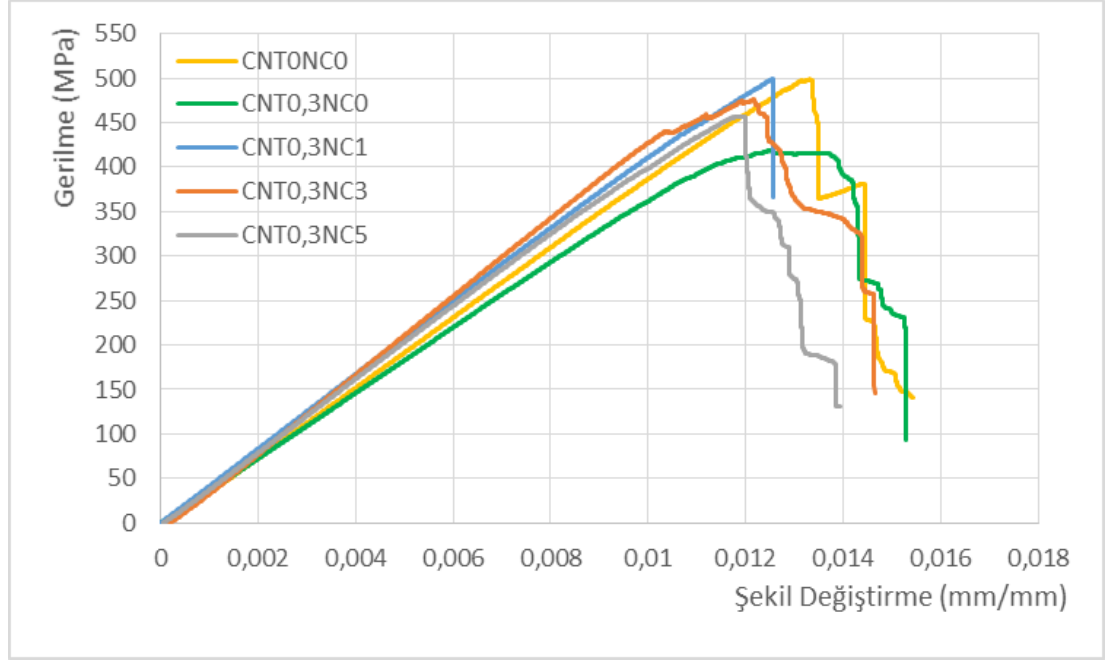
- Maksimum gerilme 1. numune de, maksimum şekil değiştirme 4. numune de ölçülmüştür.
- Minimum gerilme 3. numune de, minimum şekil değiştirme 2. numune de ölçülmüştür.
- 2. Numunenin gerilme değerlerine göre, 3. numune de %14 azalma, 4. numune de %12'lik bir azalma görülmektedir.
- Şekil değiştirme değerleri 2. numuneye göre kıyaslama yapıldığında 3.numune de %39, 4. numune de %63 oranında açık bir artış gözlemlenmektedir.



Şekil 4.22. CNT0NC0, CNT0NC1, CNT0NC3 ve CNT0NC5 Numunelerinin Üç Nokta Eğme Testi a) Maksimum Gerilme b) Maksimum Şekil Değişirme Değerlerinin Karşılaştırılması Diyagramı

Nanokil oranı arttıkça gerilme değerleri düşerken, şekil değişirme değerlerini nanokil oranı arttıkça, artış gözlemlenmektedir. Nanokilin eğilme şekil değiştirmesini, dolayısıyla sünekliği açık bir şekilde arttırdığı görülmektedir. Nanokil; liflerin, reçine içinde kaymasını engelleyici bir ortam oluşturmaktadır. Yani pürüzlülük değeri arttığı için, sürtünme kuvveti artmakta ve şekil değişirme değerleri yükselmektedir. Reçinenin tamamen kırılması zorlaşmaktadır.

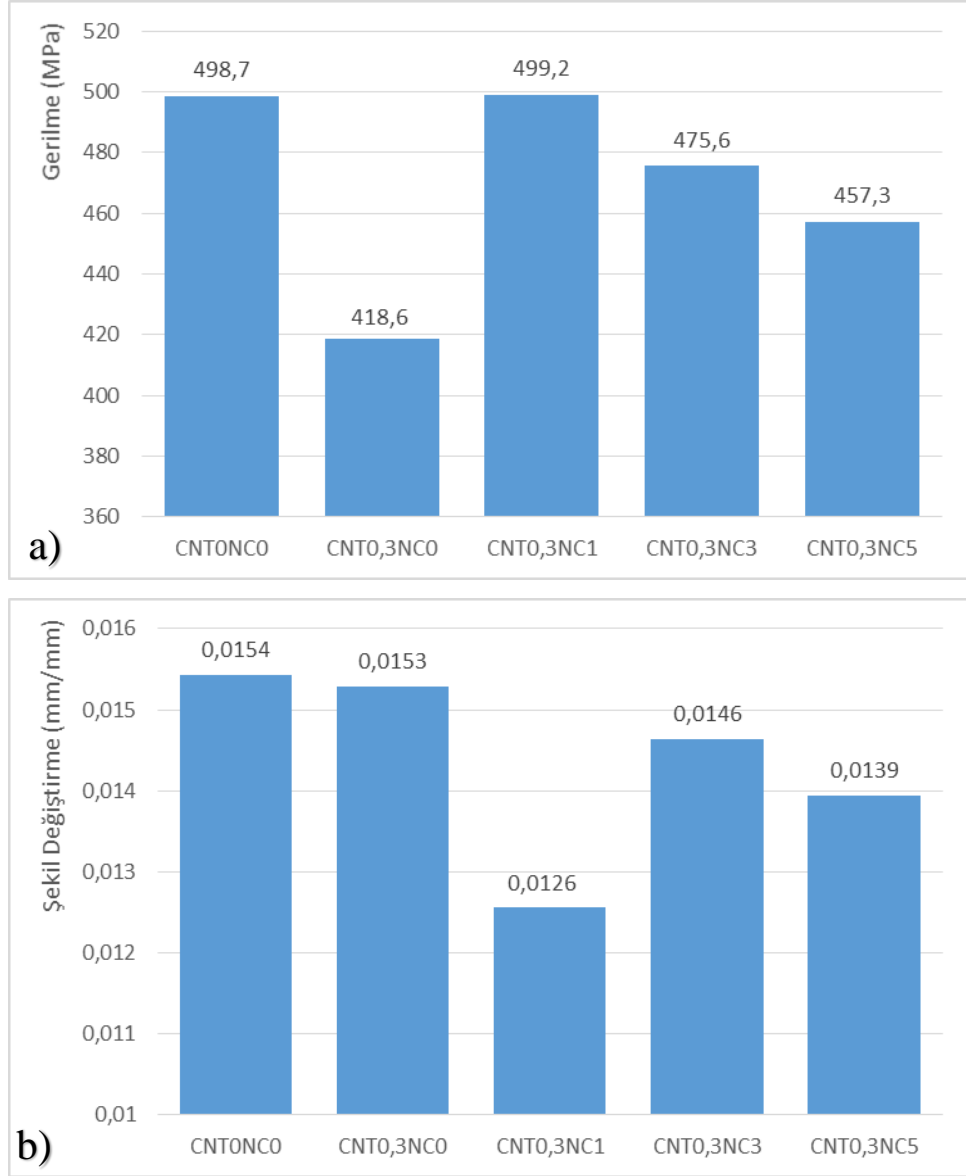
Nanokilsiz numuneye değişik yüzdelerde nanokil katılması gerilme değerlerini düşürürken, Şekil değiştirme değerlerini % 1 takviyeli 2. numune de azalırken, % 3 ve % 5 takviyeli 3. ve 4. numuneler de önemli artıŐlar gerçekleŐmiŐtir.



Şekil 4.23. CNT0NC0, CNT0,3NC0, CNT0,3NC1, CNT0,3NC3 ve CNT0,3NC5 Numunelerinin  Nokta Eğme Testi Gerilme – Şekil Değiştirme Değerlerinin KarŐılaŐtırılmalđ Grafiği

Şekil 4.23.' den alınan gerilme ve Şekil değiştirme değerleri, Şekil 4.24.' de incelendiğinde;

- MWCNT takviyeli 5. numunenin gerilmesi, saf olan 1. numuneye göre %16 azalmıŐtır.
- MWCNT ve % 1 nanokil takviyeli 6. numunenin gerilmesi, sadece MWCNT takviyeli 5. numuneye göre % 19 artarken, Şekil değiştirme değerini %18 azalmıŐtır.
- 6. numunenin gerilme değerlerine göre, 7. Numune de % 5, 8. numune de % 8 azalma görülmektedir.



Şekil 4.24. CNT0NC0, CNT0,3NC0, CNT0,3NC1, CNT0,3NC3 ve CNT0,3NC5 Numunelerinin Üç Nokta Eğme Testi a) Maksimum Gerilme b) Maksimum Şekil Değişirme Değerlerinin Karşılaştırılması Diyagramı

Üç nokta eğme test sonuçlarından, 6. , 7. ve 8. numuneler de MWCNT ile beraber katılan nanokilin oranı arttıkça gerilme değerlerinin düştüğü görülmektedir. Şekil değişirme değerlerini incelediğimizde ise optimum değeri % 0.3 MWCNT' ye katılan %3 nanokille ulaşılabilirdiği görülmektedir. Artan nanokil oranının şekil değişirme değerini düşürme sebebi olarak MWCNT ile beraber oluşturduğu çatlak köprüleri düşünülebilir. Köprü çatlağı, yolunu kolayca bulabilmesi ve ilerleyebilmesi ile kırılma meydana gelir.

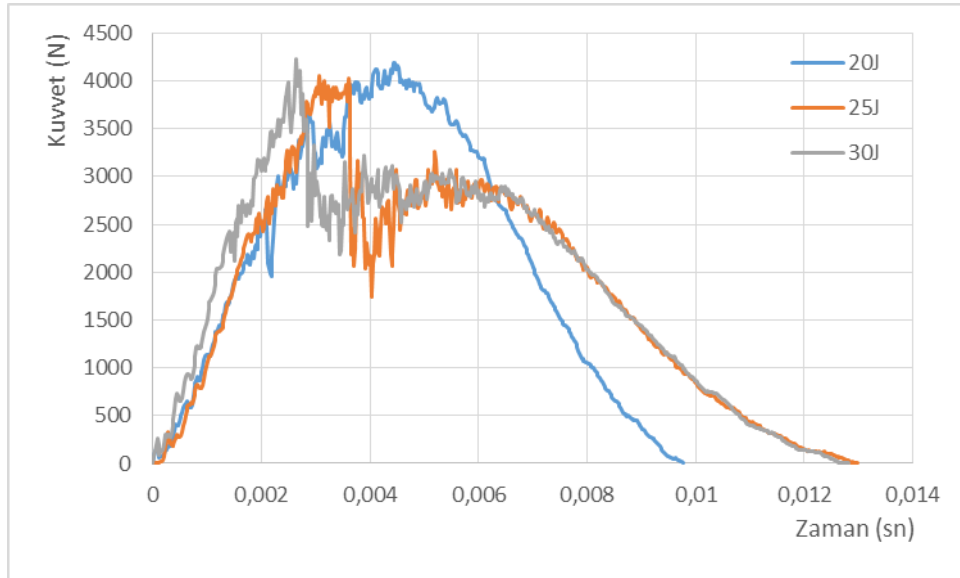
4.3. Düşük Hız Darbe Testi Sonuçları

Düşük hız darbe test sonuçlarından elde edilen diyagramlar aşağıda gösterilmiştir.

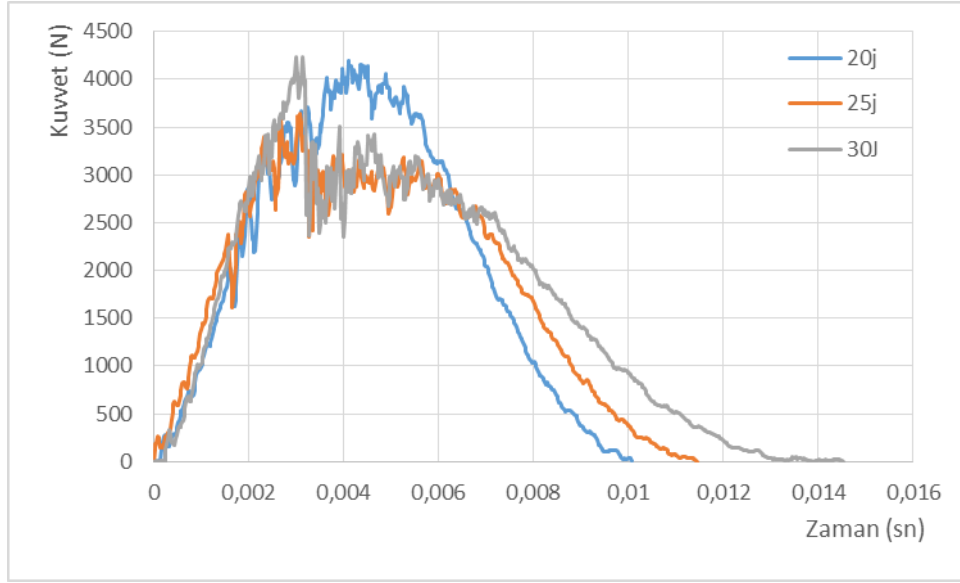
Darbe testlerinde D7136/D7136M – 12 standart numaralı Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event kullanılmış olup, standart da şekil 8’de belirtilen ölçülere göre 100*150 mm olacak şekilde numuneler çıkarılmıştır. 20J – 25J – 30J enerji seviyelerinde testleri yapılmıştır. Vurucu pimın kütlesi 6,35kg ve uç kısmı 24 mm çapında yarım küre şeklindedir.

Şekil 4.25.’ da eğri üzerindeki salınımlar malzeme de meydana gelen hasarları ifade etmektedir. Özellikle 25 J enerji seviyesinden sonra salınımlar keskinleşmiştir. Bu salınımlar delaminasyon ve elyaf kopmalarını ifade etmektedir. Ayrıca artan enerji seviyeleri ile birlikte temas süreleri de artış göstermiştir.

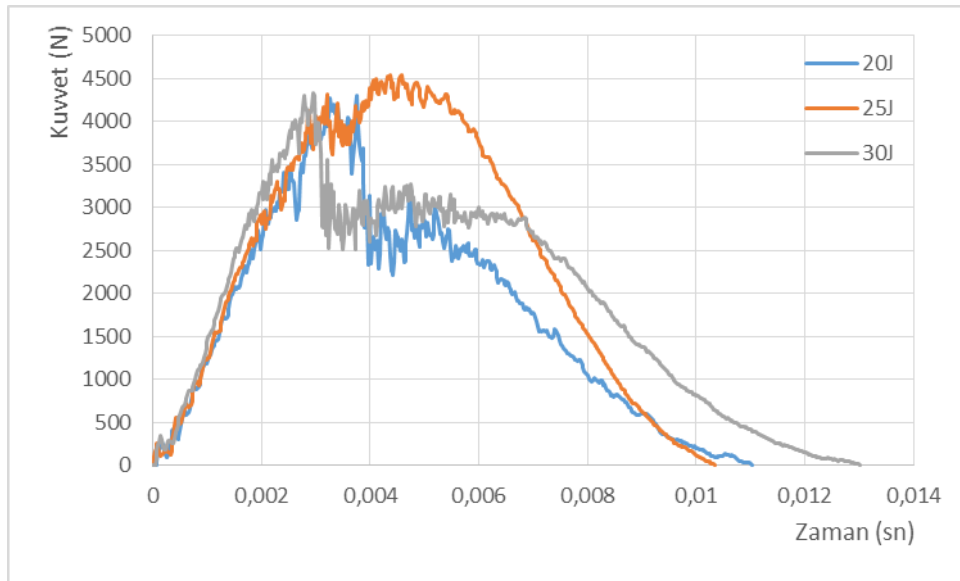
Yapılan çekme testlerinden elde edilen gerilme – şekil değiştirme grafikleri, 8 farklı numune için ayrı ayrı Şekil 4.25. – 4.26. – 4.27. – 4.28. – 4.29. – 4.30. – 4.31. ve 4.32.’de verilmiştir.



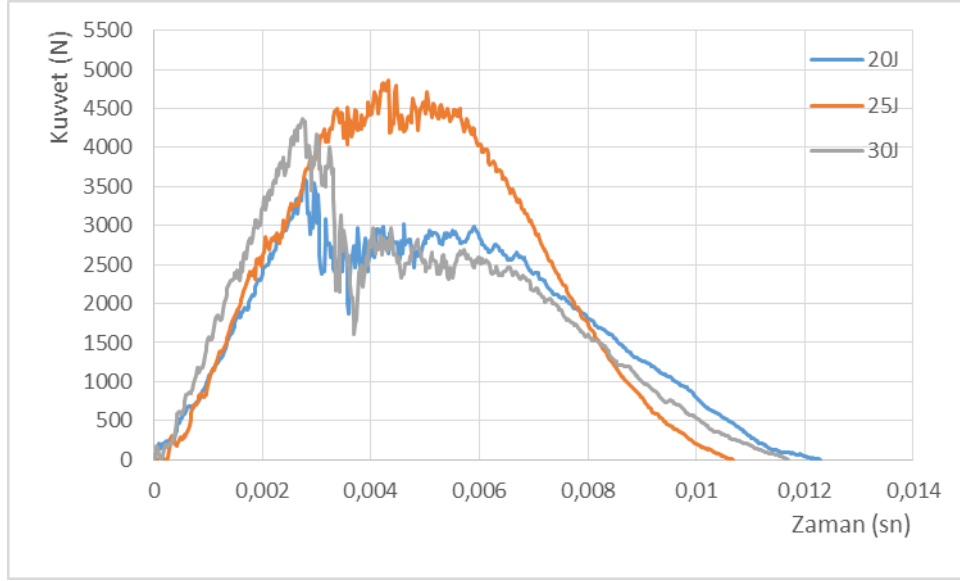
Şekil 4.25. CNT0NC0 Numunesinin Düşük Hız Darbe Testi Kuvvet – Zaman Diyagramı



Şekil 4.26. CNT0NC1 Numunesinin Düşük Hız Darbe Testi Kuvvet – Zaman Diyagramı

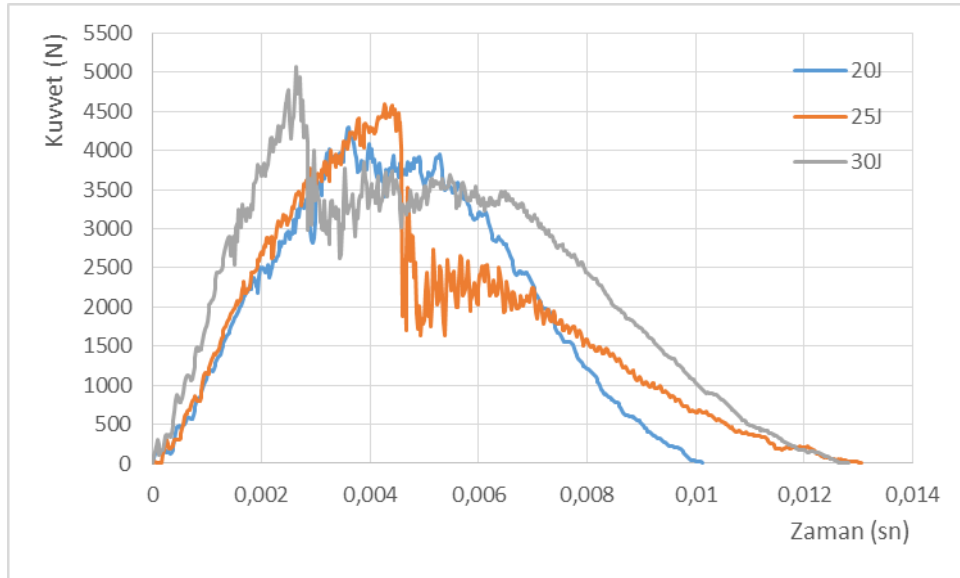


Şekil 4.27. CNT0NC3 Numunesinin Düşük Hız Darbe Testi Kuvvet – Zaman Diyagramı



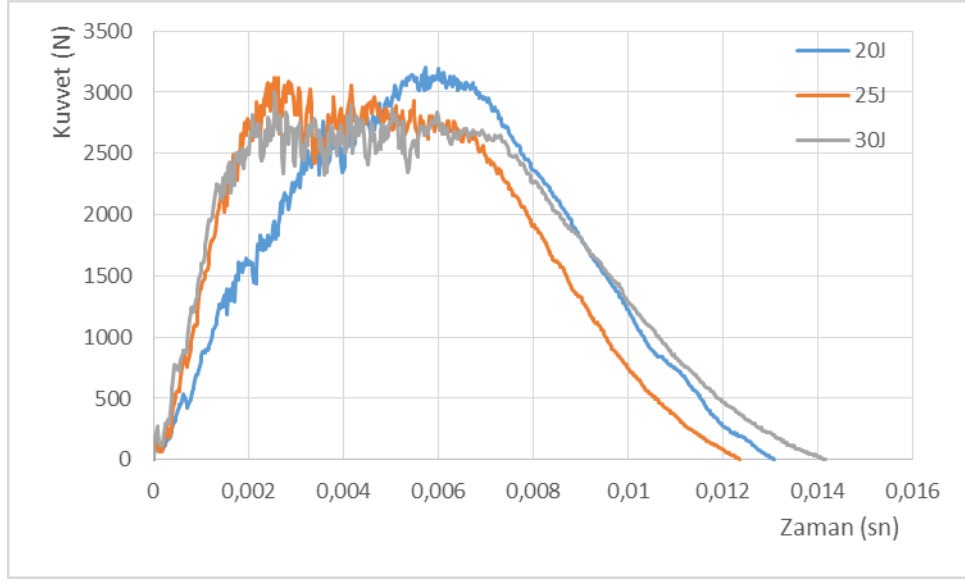
Şekil 4.28. CNT0NC5 Numunesinin Düşük Hız Darbe Testi Kuvvet – Zaman Diyagramı

CNT0NC0, CNT0NC1, CNT0NC3 ve CNT0NC5 numuneleri incelediğimizde CNT0NC0 ve CNT0NC1 numunesin de fazla bir değişiklik görülmezken, CNT0NC3 numunesin de ve CNT0NC5 numunesin de ölçülen kuvvetlerin artışı görülmektedir. Bu artış nanokilin, kompozit levhaya kattığı rijitlik olarak düşünülebilir. Reçine gelen darbeyi absorbe ederken, içine katılan nanokil reçinenin yapısını sertleştirmiş ve kompoziti daha sert bir hale getirmiştir.

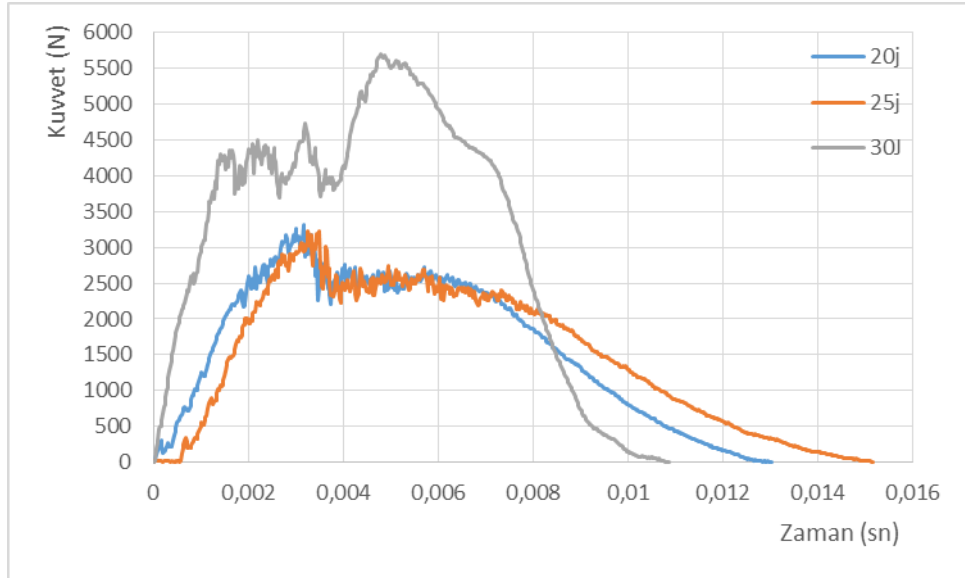


Şekil 4.29. CNT0,3NC0 Numunesinin Düşük Hız Darbe Testi Kuvvet – Zaman Diyagramı

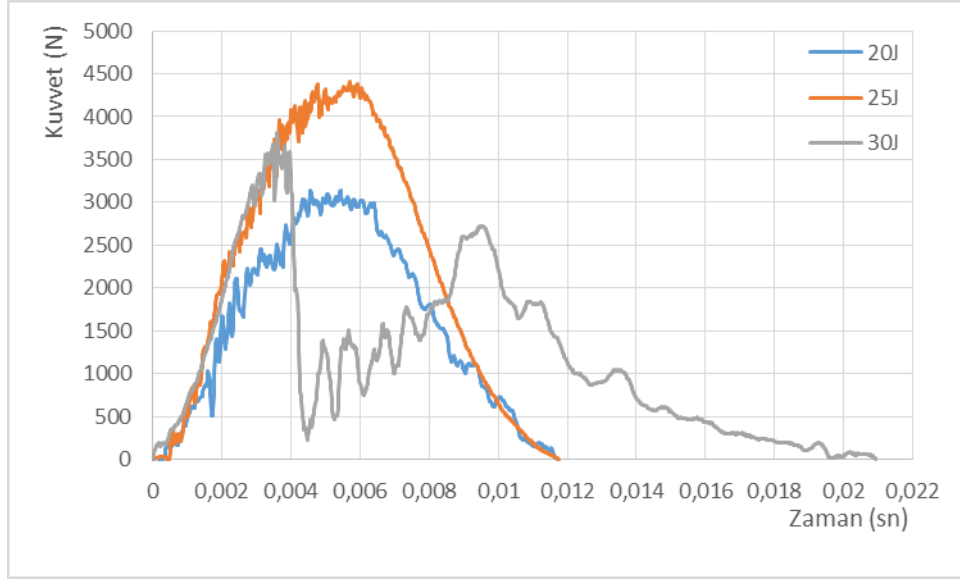
CNT0NC0 ve CNT0,3NC0 numunesini karşılaştırdığımızda CNT0,3NC0 numunenin üç enerji seviyesinde de yaklaşık % 12' lik artış gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak katılan MWCNT' nin, reçineden daha yüksek olan elastisite modülü düşünülebilir. Kompozitleri daha rijit hale getirmektedir.



Şekil 4.30. CNT0,3NC1 Numunesinin Düşük Hız Darbe Testi Kuvvet – Zaman Diyagramı



Şekil 4.31. CNT0,3NC3 Numunesinin Düşük Hız Darbe Testi Kuvvet – Zaman Diyagramı



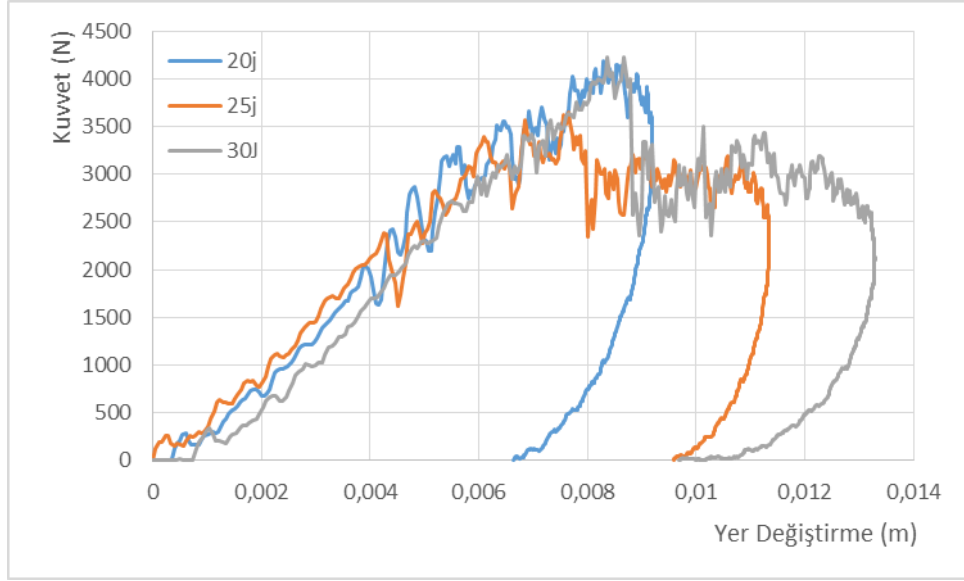
Şekil 4.32. CNT0,3NC5 Numunesinin Düşük Hız Darbe Testi Kuvvet – Zaman Diyagramı

CNT0,3NC1, CNT0,3NC3 ve CNT0,3NC5 numunelerini karşılaştırdığımızda optimum sonuçların CNT0,3NC3 numunesin de alındığı görülmektedir.

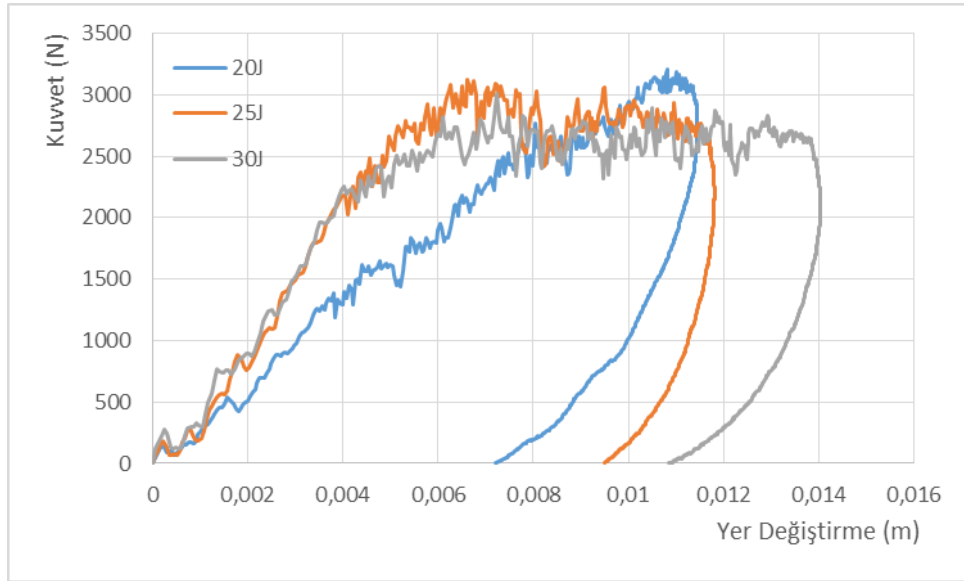
Darbe, pimin numuneye temasıyla başlamış dolayısıyla çökme yani yer değiştirme başlamış ve kuvvet maksimum değerine ulaşınca kadar devam etmiştir.

Kuvvet ve yer değiştirme grafiği altında kalan alan numune üzerinde yapılan işi vermektedir. Buna bağlı olarak da darbe enerjisi arttıkça, numune tarafından yutulan enerji miktarının arttığı görülmektedir [107].

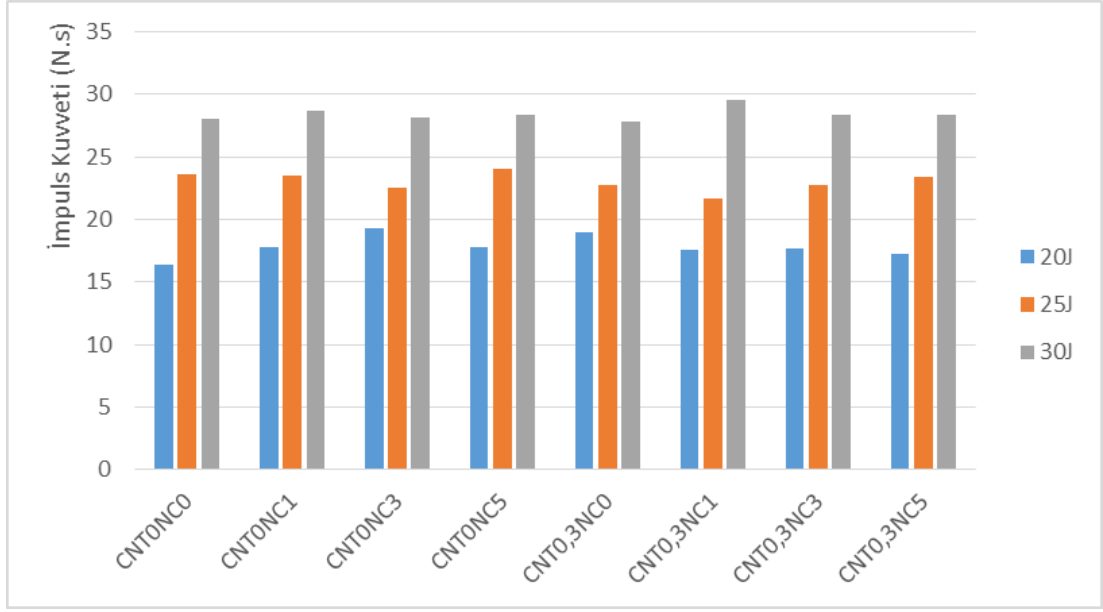
Şekil 4.33. ve Şekil 4.34.’ de kuvvet ve yer değiştirme grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.33. CNT0NC1 Numunesinin Kuvvet – Yer Değişirme Grafiği

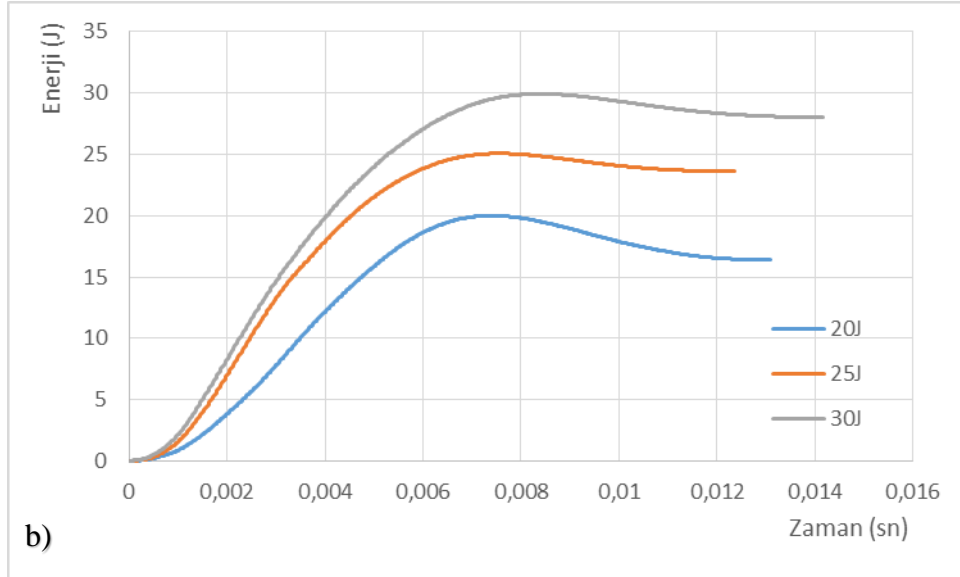
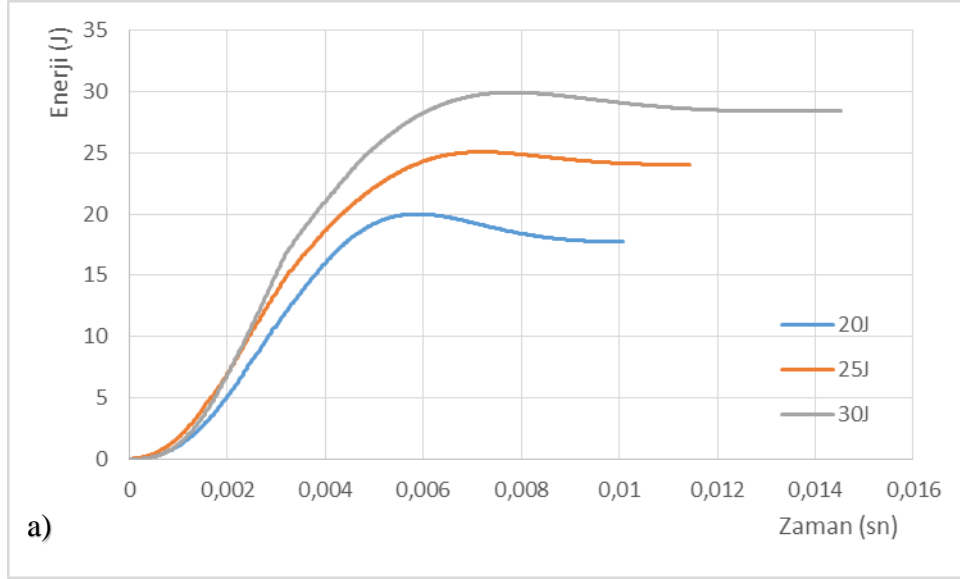


Şekil 4.34. CNT0,3NC1 Numunesinin Kuvvet – Yer Değişirme Grafiği



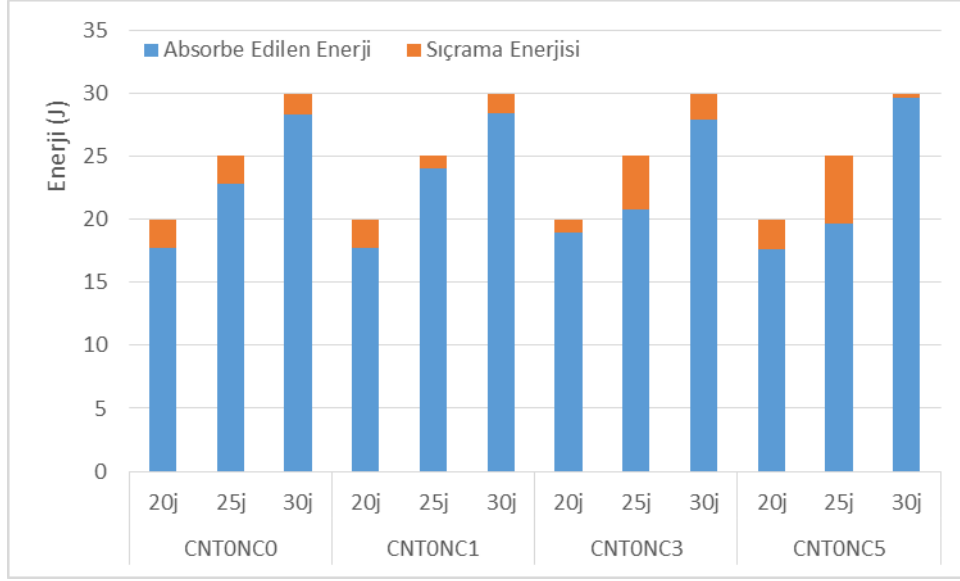
Şekil 4.35. Numunelerden Elde Edilen İmpuls Değerleri

Şekil 4.35.' de lineer momentumda ki değişim olan impuls kuvveti değerleri gösterilmiştir. İmpuls değeri biriminden de anlaşılacağı üzere kuvvet-zaman eğrisinin altında kalan alandır. Değişik enerji seviyelerinde artan değerler grafikte açıkça görülmektedir.

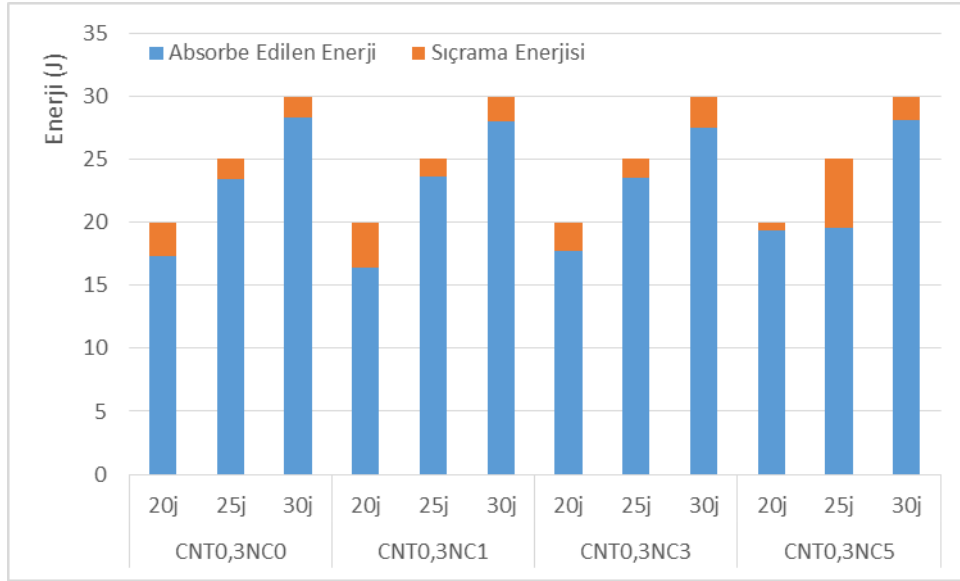


Şekil 4.36. Farklı Darbe Enerjilerinde Elde Edilen Enerji – Zaman Grafikler a) CNT0NC1 Numunesi b) CNT0,3NC1 Numunesi

Şekil 4.36.' da ölçülen enerji zaman grafikleri gösterilmiştir. Darbe enerjisi arttıkça impuls değeri ve yutulan enerjinin artması beklenen olağan bir durumdur. Şekil 4.37. ve 4.38.' de numunelere uygulanan darbe enerjileri ve numunelerin bu darbe enerjilerinden sönmülediği enerji seviyeleri gösterilmiştir.



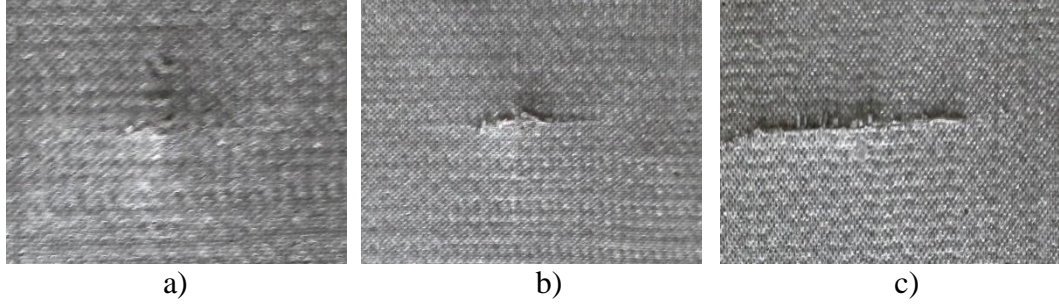
Şekil 4.37. CNT0NC0, CNT0NC1, CNT0NC3 ve CNT0NC5 Numunelerine Uygulanan Enerji ve Numunelerin Absorbe Ettikleri Enerji Diyagramı



Şekil 4.38. CNT0,3NC0, CNT0,3NC1, CNT0,3NC3 ve CNT0,3NC5 Numunelerine Uygulanan Enerji ve Numunelerin Absorbe Ettikleri Enerji Diyagramı

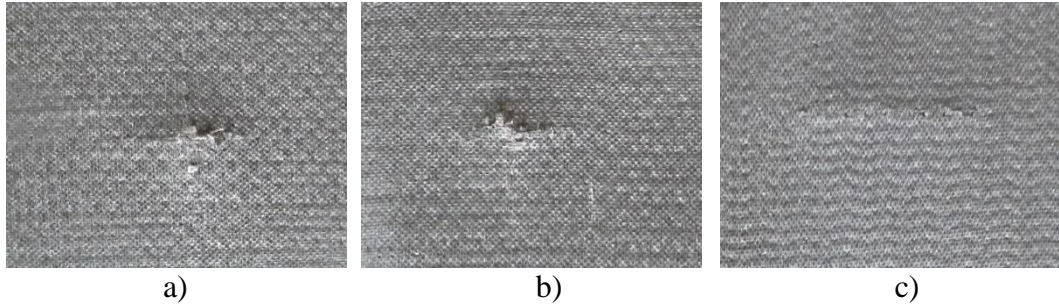
4.4. Metalografik Sonuçlar

Darbe testi yapılan numunelerden örnekler aşağıda gösterilmiştir. Resimlerde görüleceği üzere hem nanokil katılan numuneler hem de MWCNT ile beraber katılan nanokil, darbenin arka tarafa daha az geçmesine ve daha az hasar oluŐumuna yol açmıŐtır.

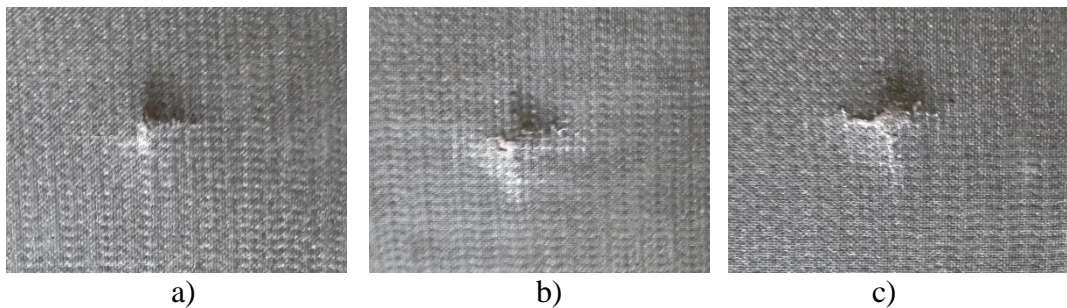


Şekil 4.39. a) CNT0,3NC1 b) CNT0,3NC3 c) CNT0,3NC5 30J Numunelerinin Arka Kısım

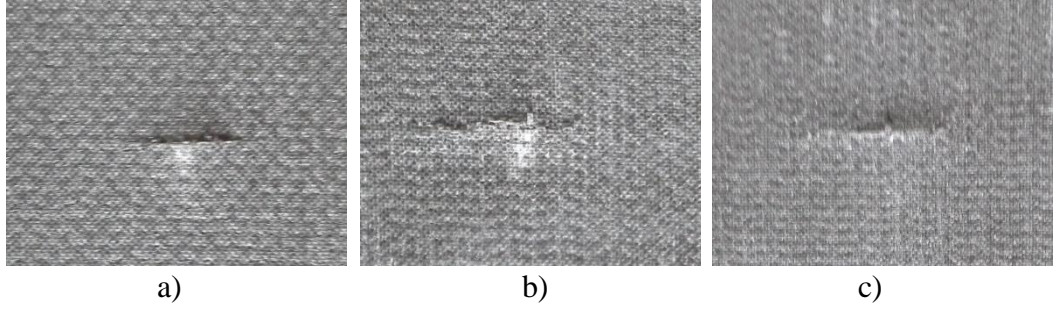
Şekil 4.40.' da açıkça görüleceği üzere nanokil oranı arttıkk numunenin aldığı hasarın azaldığı gözlemlenmiştir. Nanokil reçinenin sertliğini arttırarak, daha rijit hale getirdiğinden dolayı hasar arka kısma daha az ulaŐmıŐtır.



Şekil 4.40. a) CNT0,3NC1 b) CNT0,3NC3 c) CNT0,3NC5 25J Numunelerinin Arka Kısım

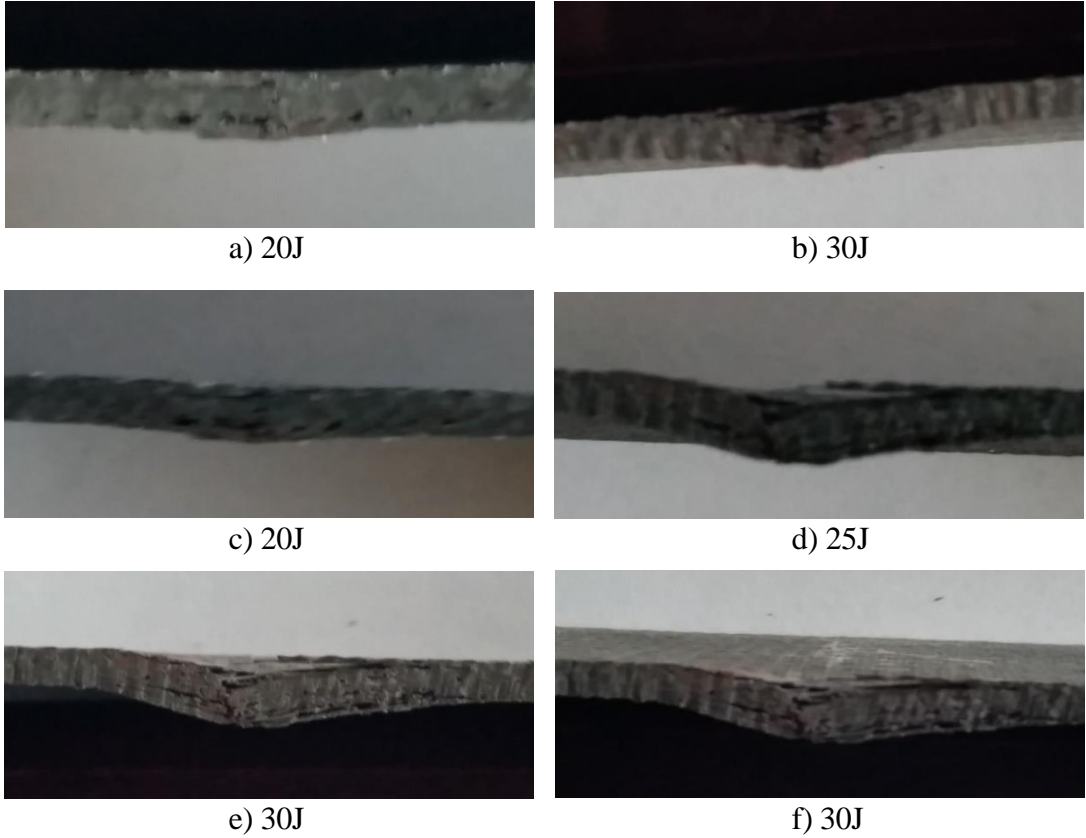


Şekil 4.41. a) CNT0NC1 b) CNT0NC3 c) CNT0NC5 30J Numunelerinin Arka Kısım



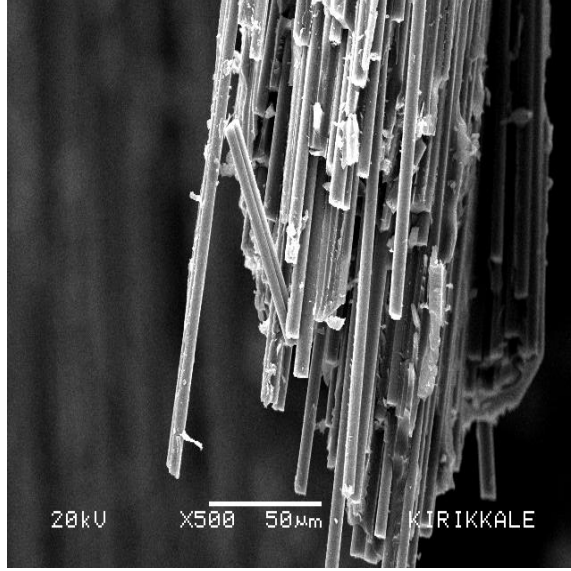
Şekil 4.42. a) CNT0NC1 b) CNT0NC3 c) CNT0NC5 25J Numunelerinin Arka Kısmı

Şekil 4.43.' de numunelerin kesitleri alınıp, delaminasyon ve liflerin kopmaları görüntülenmiştir. 20J seviyesinde genel olarak lifler bir arada kalmıştır. Arka kısımdaki 1-2 tabaka da kayma gözlemlenmiştir. 25J için delaminasyonlar ve lif kopmaları genel olarak eşit görülmüş, 30J için 1-2 tabaka da delaminasyon diğer tabakalarda lif kopması gözlemlenmiştir.

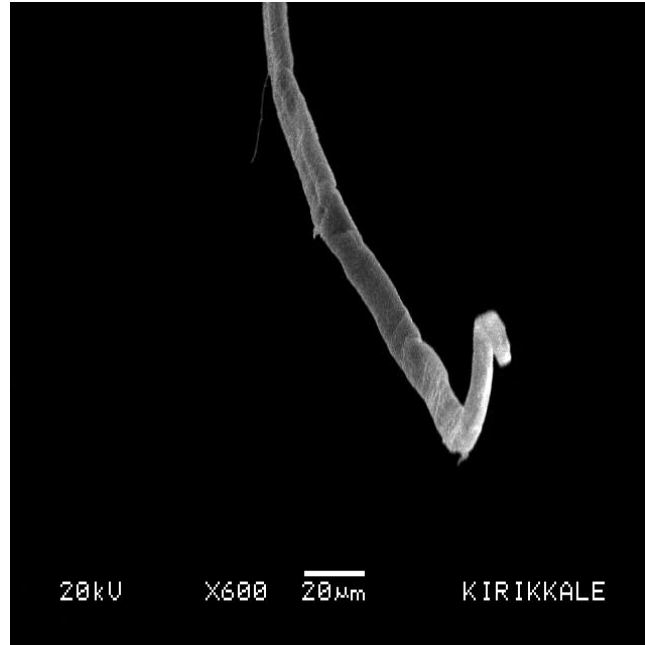


Şekil 4.43. Farklı Enerji Seviyelerine Maruz Bırakılan Numune Kesitleri

Numunelerden alından örneklerin SEM cihazında alınan sonuçları aşağıda gösterilmiştir. Şekil 4.45.' de görülen MWCNT takviyeli numune de kopan MWCNT görülmektedir.

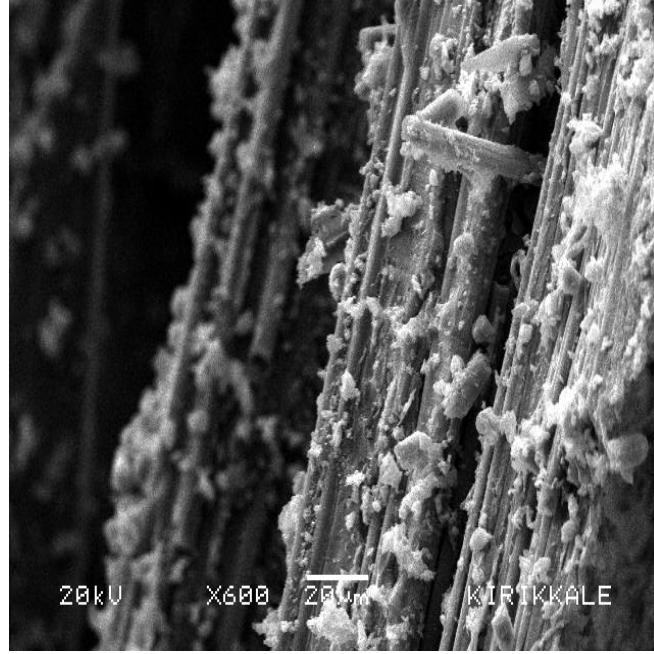


Şekil 4.44. Kopan Elyaf Demeti

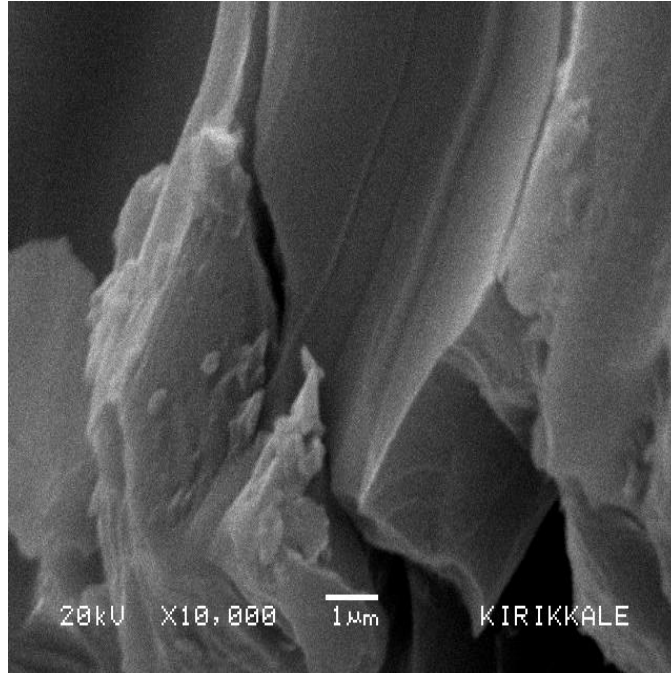


Şekil 4.45. MWCNT Ekli Karbon Elyaf Lifin Koptuktan Sonra Görünüşü

Şekil 4.46.' de nanokilin liflere üzerine düzenli bir şekilde yapıştığı ve Şekil 4.47.' de nanokilin lif üzerinde kırılma çatlaklarının yolunu değiştirdiği açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.46. Nanokil Yapışan Elyaf Lifler



Şekil 4.47. Nanokil Takviyeli Numune

5. SONUÇLAR

Karbon elyaf/epoksiye katılan nanokil takviyeli kompozit levhaları, saf hazırlanan karbon elyaf/epoksi kompozit levhalarla kıyasladığımızda; ağırlıkça % 1 nanokil takviyeli numunelerin çekme gerilmesinde % 10, çekme şekil değiştirmesinin de % 23' lük azalma, % 3 nanokil takviyesi çekme gerilmesinde % 1 artış, çekme şekil değiştirmesinin de % 16' lük azalma, % 5 nanokil takviyesinde çekme gerilmesinde % 3 artış, çekme şekil değiştirmesinin de % 4' lük artış gözlemlenmiştir.

Üç nokta eğme testlerini incelediğimizde; % 1 takviyeli numunenin eğilme gerilmesinde ve şekil değiştirmesinin de % 9 azalma, % 3 takviyeli numunenin eğilme gerilmesinde %22 azalma, şekil değiştirmesinin de % 27 artış, % 5 takviyeli numune için gerilme de % 20 azalma, şekil değiştirmesinin de ise % 49' luk bir artış ölçülmüştür.

Düşük hız darbe testlerini, örnek olarak 25J için ölçülen maksimum kuvvetler olarak incelediğimizde %1 katkılı numune de, saf kıyasla fazla bir değişiklik görülmezken, % 3 takviyeli numunede % 12, % 5 takviyeli numune de ise % 20'lik artış ölçülmüştür.

Bu ölçümlerden; nanokil oranı ağırlıkça %3 'ü geçtikten sonra çekme gerilmesinin, % 5' i geçtikten sonra çekme şekil değiştirmesinin artmaya başladığı görülmüştür. Eğme gerilmesini genel itibariyle azalttığı ancak % 3 ve % 5 takviyeli numuneler de eğme şekil değiştirmesini kayda değer bir şekilde arttırdığı gözlemlenmiştir. Eğme şekil değiştirmesini artıran sebep olarak nanokillerin, epoksi içinde liflerin aksel bir şekilde kaymasını engelleyici bir ortam oluşturması düşünülmektedir. Karbon liflere yapışma ve tutunmayı arttırarak kaymayı engellemektedir. Artan bir grafik şeklinde çıktığından dolayı nanokil oranı arttıkça, eğme şekil değiştirmesinin de daha da artacağı düşünülmektedir. Nanokil oranındaki artışla beraber darbe testlerinde ölçülen kuvvet değerlerinin artması da, nanokilin reçineye kazandırdığı sertlik olarak düşünebiliriz.

Karbon elyaf/epoksiye katılan MWCNT takviyeli kompozit levhaları, saf hazırlanan karbon elyaf/epoksi kompozit levhalarla kıyasladığımızda; çekme gerilmesinde %14,

şekil değiştirme de ise % 13' lük artış ölçülmüştür. Eğme gerilmesinde % 16 azalma ölçülürken, şekil değiştirme de fazla bir değişiklik olmamıştır. Düşük hız darbe testlerinde 25J örnek olarak incelersek ölçülen kuvvet değerlerinde % 13' lük artış gözlemlenmiştir. MWCNT' nin eksenel yönde olan yüksek mukavemet değerleri ile bu artışların olması beklenen bir durum olarak gözlemlenmiştir.

Karbon elyaf/epoksi + MWCNT ile karbon elyaf/ epoksi +MWCNT içine katılan nanokil oranlarını incelediğın de; ağırlıkça % 1 nanokil takviyeli numunelerin çekme gerilmesinde % 9, çekme şekil değiştirmesin de ise % 21 azalma, % 3 nanokil takviyeli numunelerin çekme gerilmesinde % 14, çekme şekil değiştirmesin de % 24, % 5 nanokil takviyeli numunelerin çekme gerilmesinde % 16, çekme şekil değiştirmesin de ise % 21' lik azalma gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak MWCNT ve nanokilin, reçine içinde ki taneciklerinin kırılma köprüsünün ilerlemesini kolaylaştırdığı düşünölmektedir.

Karbon elyaf/epoksi + MWCNT ile karbon elyaf/ epoksi +MWCNT içine katılan nanokil oranlarını incelediğimizde; ağırlıkça % 1 nanokil takviyeli numunelerin eğme gerilmesinde % 19 artış, eğme şekil değiştirmesin de % 18 azalma; % 3 nanokil takviyeli numunelerin eğme gerilmesinde %14 artış, eğme şekil değiştirmesin de % 4 azalma; % 5 nanokil takviyeli numunelerde ise çekme gerilmesinde % 9 artış, eğme şekil değiştirmesin de ise % 9 azalma görölmüştür. % 1 katkılı numune de maksimum eğme gerilmesi, % 3 takviyeli numune de maksimum şekil değiştirme tespit edilmiştir. Düşük hız darbe testlerinde 25J örnek olarak incelersek, %1 takviyeli numunelere göre, % 3 takviyeli numunelerde % 4 artış, % 5 takviyeli numuneler de ise % 41' lik bir artış gözlemlenmiştir. Nanokil, kompozit levhada ki reçineyi daha rijit bir hale getirerek dışarıdan gelen yüklere daha fazla tepki vermesini sağlamıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Ashraf B., Guan J., Mirjalili V., Zhang Y., Chun L., Hubert P., Simard B., Kingston C. T., Bourne O. ve Johnston A., Enhancement of mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminate composites using single-walled carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, no. 71, pp. 1569-1578, 2011.
- [2] Soliman E. M., Sheyka M. P. ve Taha M. R., Low-velocity impact of thin woven carbon fabric composites incorporating multi-walled carbon nanotubes, *International Journal of Impact Engineering*, no. 47, pp. 39-47, 2012.
- [3] Kostopoulos V., Baltopoulos A., Karapappas P., Vavouliotis A. ve Paipetis A., Impact and after-impact properties of carbon fibre reinforced composites enhanced with multi-wall carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, no. 70, pp. 553-563, 2010.
- [4] Rahman M., Zainuddin S., Hosur M., Malone J., Salam M., Kumar A. ve Jeelani S., Improvements in mechanical and thermo-mechanical properties of e-glass/epoxy composites using amino functionalized MWCNTs, *Composite Structures*, no. 94, pp. 2397-2406, 2012.
- [5] Gojny F. H., Wichmann M. H., Fiedler B. ve Schulte K., Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study, *Composites Science and Technology*, no. 65, pp. 2300-2313, 2005.
- [6] Fan Z., Santare M. H. ve Advani S. G., Interlaminar Shear Strength of Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites Enhanced with Multi-Walled Carbon Nanotubes, *Composites Part A*, no. 39, pp. 540-554, 2007.

- [7] Borrego L. P., Costa J. D. M., Ferreira J. A. M. ve Silva H., Fatigue behaviour of glass fibre reinforced epoxy composites enhanced with nanoparticles, *Composites Part B*, no. 62, pp. 65-72, 2014.
- [8] Siddiqui N. A., Sham M.L., Tang B. Z., Munir A. ve Kim J.K., Tensile Strength of Glass Fibres with Carbon Nanotube-Epoxy Nanocomposite Coating, *Composites: Part A*, no. 40, pp. 1606-1614, 2009.
- [9] Kepplea K., Sanbornb G., Lacassea P., Gruenbergc K. ve Readyd W., Improved fracture toughness of carbon fiber composite functionalized with multi walled carbon nanotubes, *Carbon*, no. 46, pp. 2026-2033, 2008.
- [10] Siddiqui N. A., Khan S. U. ve Kim J.K., Experimental torsional shear properties of carbon fiber reinforced epoxy composites containing carbon nanotubes, *Composite Structures*, no. 104, pp. 230-238, 2013.
- [11] Singh S. K., Singh S., Sharma S. ve Sharma V., Strength Degradation of Mechanical Properties of Undirectional E-Glass Fiber Epoxy Resin Nanoclay Composites under Hygrothermal Loading Conditions, *Procedia Material Science*, no. 5, pp. 1114-1119, 2014.
- [12] Kanny K. ve Mohan T. P., Resin Infusion Analysis of Nanoclay Filled Glass Fiber Laminates, *Composites Part B*, no. 58, pp. 328-334, 2014.
- [13] Reis P. N. B., Ferreira J. A. M., Zhang Z. Y., Benameur T. ve Richardson M. O. V., Impact Response of Kevlar Composites with Nanoclay Enhanced Epoxy Matrix, *Composites: Part B*, no. 46, pp. 7-14, 2012.
- [14] Iqbal K., Khan S. U., Munir A. ve Kim J., Impact Damage Resistance of CFRP with Nanoclay-filled Epoxy Matrix, *Composites Science and Technology*, no. 69, pp. 1949-1957, 2009.
- [15] Doç. Dr. Şahin Y., Kompozit Malzemelere Giriş, Ankara: Gazi Kitabevi, 2000.

- [16] Yrd. Doç. Dr. Ünal O., Teknolojik Araştırmalar, <http://teknolojikarastirmalar.com/>.
- [17] Common Categories of Composite Materials, efunda, http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/composites/comp_intro.cfm. [Erişildi: 14 10 2014].
- [18] Kaw A. K., Mechanics of Composite Materials, CRC Press LLC, 1997.
- [19] S. H., International plastics handbook, Munchen: Hanser, 1987.
- [20] B. ETN ve A. M. J, The properties of sisal-cnsl composites, *Mater Sci*, no. 27, pp. 1690-1700, 1992.
- [21] Doç. Dr. Vural M., Polimerler ve Kompozit Malzemeler, İTÜ, İstanbul.
- [22] Wallenberger F. T. ve Bingham P. A., Fiberglass and Glass Technology: Energy Friendly Compositions and Applications, 2009, p. 211.
- [23] Kinsella M., Murray D., Crane D., Mancinelli J. ve Kranjc M., Mechanical properties of polymeric composites reinforced with high strength glass fibers, *In International SAMPE Technical Conference*, no. 33, pp. 1644-1657, 2001.
- [24] Agy, Agy Technical Paper, High Strength Glass Fibers, http://www.agy.com/wp-content/uploads/2014/03/High_Strength_Glass_Fibers-Technical.pdf. [Erişildi: 13 10 2014].
- [25] Islam M. ve Wallace W., Carbon fibre reinforced aluminium composites : A critical review, *Division of mechanical engineering*.
- [26] Lee S. M., Carbon and Graphite Fibers, %1 içinde *Reference Book For Composite Technology*, p. Technomic Publishing Company.

- [27] Kwolek S., Mera H. ve Takata T., High-Performance Fibers, %1 içinde *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Weinheim, Wiley-VCH, 2002.
- [28] Kwolek S., Wholly Aromatic Carbocyclic Polycarbonamide Fiber. US Patent: US 3819587 A, 25 Jun 1974.
- [29] Hongū T. ve Phillips G. O., New Fibers Ellis Horwood Series in Polymer Science and Technology, %1 içinde *New Fibers*, Ellis Horwood, 1990, p. 22.
- [30] Fink J. K., %1 içinde *Handbook of Engineering and Specialty Thermoplastics: Polyolefins and Styrenics*, Scrivener Publishing, 2010, p. 35.
- [31] DuPont, Kevlar K-29 AP Technical Data Sheet, http://www2.dupont.com/Kevlar/en_US/assets/downloads/K23339_KevlarAP.pdf.
- [32] DuPont, Kevlar KM2 Technical Description, 2014. http://www2.dupont.com/Kevlar/en_US/products/life_protection/kevlar_km2.html.
- [33] DuPont, Kevlar XP, http://www2.dupont.com/Kevlar/en_US/products/life_protection/kevlarxp_dupont.html.
- [34] Eker P. A., Plastik Matrisli Kompozitler, 4 11 2008. http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/imalattakompozit/Plastik_Matrisli_Kompozitler.pdf. [Erişildi: 29 6 2014].
- [35] O. B. (EMPA), http://www.mat.ethz.ch/news_events/archive/materialsday/matday01/pdf/BeffortMD.pdf, http://www.mat.ethz.ch/news_events/archive/materialsday/matday01/pdf/BeffortMD.pdf. [Erişildi: 8 5 2014].

- [36] Vedani M. ve Gariboldi F., Damage and ductility of particulate and short-fibre Al-Al₂O₃ composites, *Acta Mater*, no. 44, pp. 3077-3088, 1996.
- [37] Kaczmar J. ve Janus A., Properties of squeeze-cast Al-base composite materials strengthened with delta alumina fibres, %1 içinde *Proceedings of the 19th Congress of the International Council for the Aeronautical Sciences*, Anaheim, USA, 1994.
- [38] Brooksbank D. ve Andrews K., Tessellated stresses associated with inclusions in steel, *JISI 207*, pp. 474-483, 1969.
- [39] You C., Thompson A. ve Bernstein I., Proposed failure mechanism in a discontinuously reinforced aluminium alloy, *Scripta Metall*, no. 21, pp. 181-185, 1987.
- [40] Duralcan, Composites for Wrought Products: Mechanical and Physical Property Data, USA, San Diego, 1995.
- [41] Daniels D. M., Analysis of stress-strain, fracture and ductility behaviour of aluminium matrix composites containing discontinuous silicon carbide reinforcements, *Metall. Trans.*, no. 16, pp. 1105-1113, 1985.
- [42] Akdoğan P., Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretimi Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2008.
- [43] Clauß B., Fibers for Ceramic Matrix Composites, *Ceramic Matrix Composites*, 2008.
- [44] Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Yiang D., Zhang Y., S. V., Dubonos I., Grigorieva V. ve Firsov A. A., Nomenclature and terminology of graphite intercalation compounds, *Science*, no. 306, 2004.
- [45] Anthony J. W., Bideaux R. A., Bladh, K. W. ve M. C., Graphite, %1 içinde *Handbook of Mineralogy*, 1990.

- [46] Wang X., Li Q., Xie J., Jin Z., Wang J., Li Y., Jiang K. ve Fan S., Fabrication of Ultralong and Electrically Uniform Single-Walled Carbon Nanotubes on Clean Substrates, *Nano Letters*, no. 9, pp. 3137-3141, 2009.
- [47] B. A., H. P., N. T. ve D. C., Logic circuits with carbon nanotube transistors, *Science*, no. 294, pp. 1317-1320, 2001.
- [48] A. H., P. K., S. MSP., W. AH. ve F. RH., Composites of carbon nanotubes and conjugated polymers for photovoltaic devices, *Adv Mater*, no. 5, pp. 1281-1285, 1999.
- [49] Kasumov A. Y., Deblock R., Kociak M., Reulet B., Bouchiat H., Khodos I. I., Gorbatov Y. B., Volkov V. T., Journet C. ve Burghard M., Supercurrents Through Single-Walled Carbon Nanotubes, *Science*, no. 284, pp. 1508-1511, 1999.
- [50] Baughman R. H., Cui C., Zakhidov A. A., Iqbal Z., Barisci J. N., Spinks G. M., Wallace G. G., Mazzoldi A., Rossi D. D., Rinzler A. G., Jaschinski O., Roth S. ve Kertesz M., Carbon Nanotube Actuators, *Science*, no. 284, pp. 1340-1344, 1999.
- [51] Niu S. E. H. R. T. H. C, High power electrochemical capacitors based on carbon nanotube electrodes, *Applied Physics Letters*, no. 70, pp. 1480-1482, 1997.
- [52] A. PM ve I. S., Capillarity-induced filling of carbon nanotubes, *Nature*, no. 361, pp. 333-334, 1993.
- [53] X. XL, M. YW ve P. X., Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: a review, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, no. 49, pp. 89-112, 2005.
- [54] A. R. ve W. MC., Carbon nanotube polymer composites, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, no. 8, pp. 31-37, 2004.
- [55] Osawa E., Superaromaticity, *Kagaku*, p. 854-863, 1970.

- [56] Hargittai I., *The Road to Stockholm: Nobel Prizes, Science, and Scientists* Oxford University Press, 2002.
- [57] Kroto H. W., Heath J. R., O'Brien S. C., Curl R. F. ve Smalley R. E., C₆₀: Buckminsterfullerene, *Nature*, no. 318, pp. 162 - 163, 1985.
- [58] <http://nanoscience.massey.ac.nz/>,.
- [59] Iijima S., Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, no. 354, pp. 56-58, 1991.
- [60] Terrones M., Botello-Méndez A. R., Campos-Delgado J., López-Urías F., Vega-Cantú Y. I., Rodríguez-Macías F. J., Elías A. L., Muñoz-Sandoval E., Cano-Márquez A. G., Charlier J.-C. ve Terrones H., Graphene and graphite nanoribbons: Morphology, properties, synthesis, defects and applications, *Nanotoday*, p. 352, 2010.
- [61] I. S, I. T ve A. Y, *Natura*, no. 356, pp. 76-78, 1992.
- [62] Prelog V., Chirality in Chemistry, %1 içinde *Nobel Lecture*, Zürich, Switzerland, Laboratory of Organic Chemistry, 1975.
- [63] Yu M.-F., Lourie O., Dyer M. J., Moloni K., Kelly T. F. ve Ruoff R. S., Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load, *Science* , no. 287, pp. 637-640, 2000.
- [64] Peng B., Locascio M., Zapol P., Li S., Mielke S. L., Schatz G. C. ve Espinosa H. D., Measurements of near-ultimate strength for multiwalled carbon nanotubes and irradiation-induced crosslinking improvements, *Nature Nanotechnology*, no. 211, pp. 626-631, 2008.
- [65] C. PG ve A. P., Nanotubes for Electronics, *Scientific American*, no. 283, pp. 67-69, 2000.

- [66] Belluci S., Carbon nanotubes: physics and applications, *Physica Status Solidi*, pp. 34-47, 2005.
- [67] Chae H. ve Kumar S., Rigid Rod Polymeric Fibers, *Journal of Applied Polymer Science*, p. 791–802, 2006.
- [68] Meo M. ve Rossi M., Prediction of Young's modulus of single wall carbon nanotubes by molecular-mechanics-based finite element modelling, *Composites Science and Technology*, no. 66, p. 1597–1605, 2006.
- [69] Sinnott S. ve Andrews R., Carbon Nanotubes: Synthesis, Properties, and Applications, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, no. 26, p. 145–249, 2001.
- [70] L. JP., Elastic properties of single and multilayered nanotubes, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, no. 58, p. 1649–1652, 1997.
- [71] Tu Z.-c. ve Ou-Yang Z.-c., Single-walled and multiwalled carbon nanotubes viewed as elastic tubes with the effective Young's moduli dependent on layer number, *Phys. Rev. B*, no. 65, pp. 233-407, 2002.
- [72] Yu M., Files B., Arepalli S. ve Ruoff R., Tensile Loading of Ropes of Single Wall Carbon Nanotubes and their Mechanical Properties, *Physical Review Letters*, no. 84, pp. 5552-5555, 2000.
- [73] Belytschko T., Xiao S. P., Schatz G. C. ve Ruoff R. S., Atomistic simulations of nanotube fracture, *Phys. Rev. B*, no. 65, p. 235430, 2002.
- [74] Demczyk B., Wang Y., Cumings J., Hetman M., Han W., Zettl A. ve Ritchie R., Direct mechanical measurement of the tensile strength and elastic modulus of multiwalled carbon nanotubes, *Materials Science and Engineering*, no. 334, pp. 173-178, 2002.

- [75] Gogotsi Y., Nanotubes and Nanofibers, CRC Press Taylor & Francis Group, 2006.
- [76] A. S. S. D. Association, Properties of Stainless Steel, Australia.
- [77] Stainless Steel – 17-7PH (Fe/Cr17/Ni 7) Material Information.
- [78] Wagner H., Encyclopedia of Polymer Science and Technology "Reinforcement", John Wiley & Sons, 2002.
- [79] L. KT, C. M, L. HY ve H. D., On the effective elastic moduli of carbon nanotubes for nanocomposite structures, *Compos Part B*, no. 35, pp. 95-101, 2004.
- [80] Akdoğan A. ve Küçükyıldırım B., Karbon Nanotüpler, Sentezleme Yöntemleri Ve Kullanım Alanları, 2006.
- [81] Tjong S. C., Alümina Matrix, %1 içinde *Carbon Nanotube Reinforced Composites: Metal and Ceramic Matrices*, Wiley, 2009, p. 196.
- [82] Çalıklı P., Nanokil-Polimer Kompozitlerin Sentez ve Karakterizasyonu Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri, Ankara, 2010.
- [83] <http://pubpages.unh.edu/~harter/crystal.htm>. [Erişildi: 20 10 2014].
- [84] Uddin F., Clays, Nanoclays, and Montmorillonite Minerals, *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, no. 39A, 2008.
- [85] wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Kaolinite>. [Erişildi: 20 10 2014].
- [86] http://soils.ifas.ufl.edu/faculty/grunwald/teaching/eSoilScience/images/kaolinite_fig.gif. [Erişildi: 30 10 2014].
- [87] Montmorillonite-en, <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Montmorillonite-en.svg>. [Erişildi: 21 10 2014].

- [88] <http://soils.ifas.ufl.edu/faculty/grunwald/teaching/eSoilScience/images/illite.gif>. [Erişildi: 20 10 2014].
- [89] <http://soils.ifas.ufl.edu/faculty/grunwald/teaching/eSoilScience/images/chlorite.gif>. [Erişildi: 20 10 2014].
- [90] Engineering Archives, http://www.engineeringarchives.com/les_mom_tensiletest.html. [Erişildi: 20 10 2014].
- [91] Vikipedi, http://tr.wikipedia.org/wiki/Gerilme-%C5%9Fekil_de%C4%9Fi%C5%9Firme_e%C4%9Frisi#mediaviewer/File:Stress_v_strain_A36_2.svg. [Erişildi: 20 10 2014].
- [92] SubsTech, http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?w=&h=&cache=cache&media=3-point_flexure.png. [Erişildi: 20 10 2014].
- [93] Sjoblem P., Hartness J. ve Cordell T., On low velocity impact testing of composite materials, *Compos. Matei*, no. 22, pp. 30-52, 1988.
- [94] Segal C., High-Performance Organic Fibers, Fabric and Composites for Soft and Hard Armor Applications, %1 içinde *23rd International SAMPE Technical Conference*, 1991.
- [95] http://what-when-how.com/wp-content/uploads/2011/07/tmp8620_thumb.jpg. [Erişildi: 20 10 2014].
- [96] Turan M., Tabakalı Kompozit Malzemelerde Yüksek Hızlı Darbe Hasarı, *Mühendis ve Makine*, cilt 48, no. 575.
- [97] Z. G., G. W. ve D. C., Penetration of Laminated Kevlar by Projectiles, *International Journal of Solid and Structures*, no. 29, pp. 399-420, 1992.

- [98] Wikipedia,
http://tr.wikipedia.org/wiki/Taramal%C4%B1_elektron_mikroskobu. [Erişildi: 20 10 2014].
- [99] S. Ü. İ. T. A. v. U. Merkezi, Taramalı Elektron Mikroskobu,
<http://www.selcukiltek.com/equipment-105-sem-taramali-elektron-mikroskobu.aspx>.
- [100] Times Nano, Chinese Academy of Sciences,
http://www.timesnano.com/upfile/fck/20120927/20120927_114401_145316156318876818.pdf. [Erişildi: 20 10 2014].
- [101] Tenax, Tohotenax, http://www.tohotenax-eu.com/fileadmin/tohotenax/downloads/Produkte/Technische%20Datenblaetter/en/Filament_Yarn_Overview_2011-03.pdf. [Erişildi: 21 10 2014].
- [102] Technical Information Epoxy and Phenolic Resins Division,
<http://www.metyx.com/Uploads/GenelDosya/30120139318515.pdf>. [Erişildi: 2014 10 21].
- [103] MGS Laminasyon Epoksi Sertleştirici H160, <http://www.kompozit.net/?urun-524-MGS-Laminasyon-Epoksi-Sertlestirici-H160-1kg.html>. [Erişildi: 21 10 2014].
- [104] E. ESAN, Eczacıbaşı esanNANO 1-140, www.esan.com.tr. [Erişildi: 2014 10 23].
- [105] AGS-X Series, Shimadzu, http://www.shimadzu.com/an/test/universal/ags-x/ags-x_6.html. [Erişildi: 20 10 2014].
- [106] S. N. a. C. (. Facility, Field Emission Scanning Electron Microscope,
<http://www.imre.a-star.edu.sg/fckeditor/uploadfiles/C15-SNFC%20Factsheet%20-%20SEM1.pdf>. [Erişildi: 20 10 2014].

- [107] Kara M., Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama ile Tamir Edilmiş Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı, %1 içinde *Doktora Tezi*, Konya, 2012, p. 70.