



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**KARBON KOMPOZİT BORULARDA
NANOKİL/NANOTÜP TAKVİYESİNİN
DÜŞÜK HIZLI DARBE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Bülent KARAOĞLU

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz -2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Bülent KARAOĞLU tarafından hazırlanan “Karbon Kompozit Borularda Nanokil, Nanotüp Takviyesinin Düşük Hızlı Darbe Etkisinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 29/07/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından ~~oy birliği~~ / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Memduh KARA

Danışman

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi M. Turan DEMİRCİ

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf UZUN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI

İmza

.....

.....

.....

.....

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI
FBE Müdürü

* Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 181431003 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Bülent KARAOĞLU

Tarih: 29/ 07/ 2022

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KARBON KOMPOZİT BORULARDA NANOKİL NANOTÜP TAKVİYESİNİN DÜŞÜK HIZLI DARBE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Bülent KARAOĞLU

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

2022, 72 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Memduh KARA
Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN
Dr. Öğr. Üyesi M. Turan DEMİRCİ
Dr. Öğr. Üyesi Yusuf UZUN
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI

Nano dolgu malzemeleri, fiber destekli polimer tabanlı kompozitlerin mekanik ve darbe dayanımlarını artırır. Kumaş destekli kompozitler için nano dolguların hibridizasyona etkileri ve hasar mekanizmalarına sebepleri hakkında literatürde fazla bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Çalışmamızda, karbon kumaş kompozitlere, epoksi reçineye karbon nanotüp, Nanokil partikülleri, ağırlıkça %1 ve 3 ilave edilerek, elle yatırma tekniği ile aplikasyon yapılmıştır. Boruların düşük hızlı darbe tepkileri ,ASTM D7136 M-12 standartlarına ve 5,10 ve 15 J enerji seviyelerine göre incelenmiştir. Kuvvet, emilen enerji, yer değiştirme, sıçrama enerjisi deney verilerinden hesaplanmıştır. Karbon nanotüp, nanokil eklenmesinin kumaş karbon boruların mekanik özelliklerini arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca elle yatırma üretimin yönteminin , ekonomik ve hızlı bir yöntem olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Darbe Hasar Analizi, Düşük Hız Darbe Deneyi, Karbon Nanotüp, Nanokil , Tekstil Takviyeli Kompozit Boru

ABSTRACT

Ph.D THESIS

INVESTIGATION OF LOW VELOCITY IMPACT EFFECT OF NANOCCLAY NANOTUBE REINFORCEMENT IN CARBON COMPOSITE PIPES

Bülent KARAOĞLU

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

2022, 72 Pages

Jury

Doç. Dr. Memduh KARA
Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN
Dr. Öğr. Üyesi M. Turan DEMİRCİ
Dr. Öğr. Üyesi Yusuf UZUN
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI

Nanofillers increase the mechanical and impact strengths of fiber-reinforced polymer-based composites. There are not many studies in the literature on the effects of nanofillers on hybridization and the causes of damage mechanisms for fabric-supported composites. In our study, carbon nanotubes, nanoclay particles, 1 and 3% by weight were added to carbon fabric composites, epoxy resin, and application was made by hand lay-up technique. The low velocity impact responses of the pipes were investigated according to ASTM D7136 M-12 standards and energy levels of 5, 10 and 15 J. Force, absorbed energy, displacement, jump energy were calculated from the test data. It has been determined that the addition of carbon nanotube, nanoclay increases the mechanical properties of fabric carbon pipes. In addition, it has been seen that the method of manual laying production is an economical and fast method.

Keywords: Carbon Nanotube, Impact Damage Analysis, Low Velocity Impact Experiment, Nanoclay, Textile-Reinforced Composite Pipe

ÖNSÖZ

Doktora çalışmam boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, tezimin hazırlanmasına yardım ve yönlendirmeleriyle büyük katkı sağlayan değerli danışman hocam Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışması sırasında karşılaştığım zorluklarda çözümü benimle arayan ve yol göstererek her zaman destek olan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI'ya teşekkür ederim.

Eti Alüminyum A.Ş. Genel Müdürü Mehmet Arıkan'a parça imalat ve işleme konusunda verdiği destekler için teşekkür ederim.

Aileme verdikleri manevi destek için minnettarım.

Tez çalışmama 181431003 No'lu proje ile maddi destek sağlayan Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne ayrıca teşekkür ediyorum.

Bülent KARAOĞLU
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Kompozitlerin Tarihi	1
1.2. Kompozitlerin Sınıflandırması	4
1.3. Kompozit Malzemelerin Nesilleri.....	5
1.3.1. Birinci Nesil (1940’lar): Cam Fiber Destekli Polimerler (GFRP).....	5
1.3.2 İkinci Nesil (1960’lar): Yüksek Performans Kompozitler.....	6
1.3.3. Üçüncü Nesil (1970 ve 1980’ler): Yeni Pazarlar ve Özelliklerin Sinerjisi Üzerinde Araştırmalar	7
1.3.4. Dördüncü Jenerasyon (1990’lar ve Günümüz): Hibridler ve Nanokompozitler	9
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	12
2.1. Kompozitler İçin Polimer (Plastik) Matris Malzemeleri	13
2.1.1. Elastomerler	15
2.1.2. Termoplastikler.....	15
2.1.3. Termosetler.....	17
2.1.3.1 Epoksiler.....	18

2.1.3.1.1 Epoksilerin Endüstri Uygulamaları.....	20
2.1.3.2 Fenolik.....	21
2.1.3.3 Doymamış Polyester	21
2.1.3.4 Silikonlar.....	22
2.1.3.5 Amino Reçineler.....	23
2.1.4. Katkı Maddeleri.....	23
2.2. Karbon ve Grafit Fiberler.....	23
2.3 Dokuma Kumaşlar Teknik ve Ürünler İçin.....	24
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	26
3.1. Deneysel Prosedür	26
3.1.1. Hammaddeler	26
3.1.2. Üretim	26
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	29
4.1. Deney Sonuçları.....	29
4.1.1. Düşük Hız Darbe Testi	29
4.1.2. Düşük Hız Darbe Testi Grafikleri.....	30
4.1.2.1. 5 J, 10 J ve 15 J Darbe Enerjileri İçin Kuvvet-Zaman Değişimi Grafikleri.....	30
4.1.2.2. 5 J, 10 J ve 15 J Darbe Enerjileri İçin Kuvvet-Yer Değiştirme Grafikleri..	33
4.1.2.3. 5 J, 10 J ve 15 J Darbe Enerjileri İçin Enerji – Zaman Grafikleri.....	35
4.1.2.4. 5 J, 10 J ve 15 J Darbe Enerjileri İçin Absorbe edilen Enerji – Geri verilen Enerji Grafikleri.....	37
4.2. Dijital Mikroskop ve SEM ile Nano Takviyesiz ve Takviyeli Boru Numunelerinin Detaylı Görüntülenmesi.....	39
4.1.3. Yakma Testi.....	47
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	51

5.1 Sonuçlar	51
5.2 neriler	51
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŐ	57



SİMGELER VE KISALTMALAR

m	Metre
cm	Santimetre
mm	Milimetre
μm	Mikrometre
nm	Nanometre
MPa	Megapascal
Gpa	Gigapascal
TPa	Terapascal
Ch	Kiral vektör
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat
kg	Kilogram
gr	Gram
J	Joule
KN	Kilonewton
m	Kütle
g	Yerçekimi
h	Yükseklik
V	Hız

Kısaltmalar

ABS	Akrilonitrile Butadien Stiren
ÇDKNT	Çok Duvarlı Karbon Nano Tüp
DP	Degree Polymerization (polimerleştirme derecesi)
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer (Cam fiber takviyeli polimer)
KTB	Karbon Takviyeli Boru
PA	Poli Amidler
PEEK	Poli Eter Eter Ketelon
PMC	Polimer matris kompozitler
PTFE	Poli tetra flor etilen
MW	Moleküler Weight , moleküler ağırlık
MWu	Tekrarlanan ünitenin moleküler ağırlığı
NK	Nano kil
NT	Nano tüp

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. İlk balonların kompozit malzemeler ile imali, yıl1783... ..	2
Şekil 1.2. Çeşitli matrislerin kimyasal bağları	2
Şekil 1.3. Çeşitli fiberlerin mikro görüntüleri.....	3
Şekil 1.4. Çeşitli kompozit uygulamaları... ..	3
Şekil 1.5. Bir helikopter pervane kanadının kompozit yapısı.....	4
Şekil 1.6. Malzemelerin kronolojik değişimi	4
Şekil 1.7. Kompozitlerin genel sınıflandırılması	5
Şekil 1.8. Polimer matriks kompozitler (PMC), CFRP ve AFRP'nin SEM mikrografları	7
Şekil 1.9. Metal matris kompozitlerin (MMC), SEM mikrografları.....	8
Şekil 1.10. Seramik matris kompozitlerin (CMC) ve Karbon- karbon kompozitlerin (CCC) SEM mikrografları.....	9
Şekil 1.11. Sentetik fiberler: (a) cam fiber, (b) Kevlar fiber ve (c) karbon fiber.....	10
Şekil 1.12. Hibrid malzemeler, SEM mikrografları.....	10
Şekil 1.13. Nanokompozitler, SEM ve TEM mikrografları.....	11
Şekil 2.1. Kompozitlerin matris ve destek malzemeye göre sınıflandırılması.....	12
Şekil 2.2. Bağımsız monomerlerin (vinilkloride, C_2H_3Cl) birleşerek polimerleştirme ile polimer oluşturmaları (C_2H_3Cl) _n	13
Şekil 2.3. Polimer matrisler	14
Şekil 2.4. Polimer zincirleri.....	15
Şekil 2.5. Polimer moleküllerin mümkün düzenlenmeleri: a. Amorf, b. Yarı kristal.....	16
Şekil 2.6. Karbon fiberin (çapı 6 µm) insan saçı ile karşılaştırılması	23
Şekil 3.1. Kompozit nano takviyeli boru üretiminin basit akış şeması.....	26
Şekil 3.2. Parlatılmış çelik kalıp, L= 1300 mm, d= 72 mm, t= 4 mm.....	27
Şekil 3.3. Reçine sertleştirici, (a) KNT ve nanokil mekanik karıştırma, (b) ultrasonla karıştırma.....	27
Şekil 3.4. Kalıp üzerine kumaş sararak kompozit boru üretimi.....	28
Şekil 3.5. İmalattan sonra nano takviyeli boru için vakum işlemi.....	28
Şekil 3.6. Nano takviyeli boru yüzey işleme, kalıptan çıkarma ve numunelere kesme işlemleri ve nano takviyeli boru numunesi.....	28
Şekil 4.1. Düşük hız darbe testi standı.....	30
Şekil 4.2. Katkısız numune için Kuvvet – Zaman grafiği.....	31

Şekil 4.3. %1 KNT-%1 NK katkılı numune için Kuvvet – Zaman grafiği.....	31
Şekil 4.4. %1 KNT-%3 NK katkılı numune için Kuvvet – Zaman grafiği.....	32
Şekil 4.5. %3 KNT-%1 NK katkılı numune için Kuvvet – Zaman grafiği.....	32
Şekil 4.6. Katkısız numune için kuvvet – yer değiştirme grafiği.....	33
Şekil 4.7. %1 KNT-%1 NK katkılı numune için kuvvet – yer değiştirme grafiği.....	34
Şekil 4.8. %1 KNT-%3 NK katkılı numune için kuvvet – yer değiştirme grafiği.....	34
Şekil 4.9. %3 KNT-%1 NK katkılı numune için kuvvet – yer değiştirme grafiği.....	35
Şekil 4.10. Katkısız numune için enerji – zaman grafiği.....	35
Şekil 4.11. %1 KNT-%1 NK katkılı numune için enerji – zaman grafiği.....	36
Şekil 4.12. %1 KNT-%3 NK katkılı numune için enerji – zaman grafiği.....	36
Şekil 4.13. %3 KNT-%1 NK katkılı numune için enerji – zaman grafiği.....	37
Şekil 4.14. Katkısız numune için yutulan enerji – geri tepme enerjisi grafiği.....	37
Şekil 4.15. %1 KNT-%1 NK katkılı numune için yutulan enerji – geri tepme enerjisi Grafiği.....	38
Şekil 4.16. %1 KNT-%3 NK katkılı numune için yutulan enerji – geri tepme enerjisi Grafiği.....	38
Şekil 4.17. %3 KNT-%1 NK katkılı numune için yutulan enerji – geri tepme enerjisi grafiği.....	39
Şekil 4.18. Karbon fiber kumaşın Dijital Mikroskop görüntüsü.....	39
Şekil 4.19. Karbon fiber kumaşın Dijital Mikroskop görüntüsü.....	40
Şekil 4.20. Katkısız kompozit boru, 5 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü.....	40
Şekil 4.21. Katkısız kompozit boru 10 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü.....	40
Şekil 4.22. Katkısız kompozit boru 15 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü.....	41
Şekil 4.23. %1 KNT-%1 NK katkılı kompozit boru 5 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü.....	41
Şekil 4.24. %1 KNT-%1 NK katkılı kompozit boru 10 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü.....	41
Şekil 4.25. %1 KNT-%1 NK katkılı kompozit boru 15 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü.....	42
Şekil 4.26. %1 KNT-%3 NK katkılı kompozit boru 5 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü.....	42

Şekil 4.27. %1 KNT-%3 NK katkılı kompozit boru 10 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü.....	42
Şekil 4.28. %1 KNT-%3 NK katkılı kompozit boru 15 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü.....	43
Şekil 4.29. %3 KNT-%1 NK katkılı kompozit boru 5 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü.....	43
Şekil 4.30. %1 KNT-%3 NK katkılı kompozit boru 10 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü.....	43
Şekil 4.31. %1 KNT-%3 NK katkılı kompozit boru 15 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü.....	44
Şekil 4.32. Katkısız numune kompozit boru hasarsız SEM görüntüsü.....	44
Şekil 4.33. Katkısız numune kompozit boru SEM görüntüsü.....	44
Şekil 4.34. Katkısız numune kompozit boru 15 J darbe enerjisi SEM görüntüsü.....	45
Şekil 4.35. Katkısız numune kompozit boru 15 J darbe enerjili SEM görüntüsü.....	45
Şekil 4.36. %1 KNT-%1 NK katkılı numune kompozit boru darbe enerjisi uygulanmamış SEM görüntüsü.....	46
Şekil 4.37. %1 KNT-%1 NK katkılı kompozit boru 15 J darbe enerjili SEM görüntüsü..	46
Şekil 4.38. %1 KNT-%1 NK katkılı kompozit boru 15 J darbe enerjili SEM görüntüsü..	47
Şekil 4.39. %3 KNT-%1 NK katkılı kompozit boru 15 J darbe enerjili SEM görüntüsü..	47
Şekil 4.40. Yakma testi için numunelerden kesilen parçalar.....	48
Şekil 4.41. Yakma fırını.....	49
Şekil 4.42. Numunelerin 600 °C ‘de tek tek yakılması işlemi için fırına konulması.....	49
Şekil 4.43. Numunelerin 600 ° C yakılması işlemi.....	49
Şekil 4.44. Numunelerin yakma testinden sonraki hali ve hassas terazide tartılması.....	50

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Termoplastiklerin bazı tipik özellikleri.....	17
Çizelge 2.2. Bazı termoset plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	17
Çizelge 2.3. Epoksinin bazı önemli özellikleri.....	18
Çizelge 2.4. Oda sıcaklığındaki polyesterin bazı özellikleri.....	21
Çizelge 4.1. Yakma Testi sonuçları.....	48



1. GİRİŞ

Malzeme, insanlığın gelişmesindeki en önemli kilometre taşıdır ve onlarca yüzyıldır istifade edilmektedir. Malzemelerin geliştirilmesi için insanoğlu yüzyıllardır bilimsel ve teknolojik araştırma ve çalışmalar yapmaktadır (Beşergil, 2021). Malzeme bilimi, eşyanın menfaatlerini anlatan bir fendir. Eşya, yeryüzünde insanın istifadesine sunulan her şeydir (Kayıran, 2009).

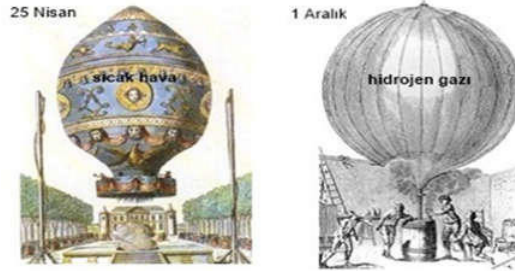
Kompozit malzeme, iki veya daha fazla farklı materyalin makroskobik birleşimidir ve aralarında tanımlanabilir bir ara yüze sahiptirler (Miracle, 2001). Makroskobik ölçüde (skalada) oluşturulan üçüncü malzeme (kompozit) geliştirilmiş özelliklere sahiptir. Bu makro ölçek malzemeler, elyaflar (fiber) ve reçineler, birlikte tek başlarına sahip olamayacakları, avantajlara egemen olurlar. Uygun dizaynla üretilmiş kompozit malzeme, diğerleri arasında, kuvvet, sıkılık (Young modülü) (Hull, 1996), sertlik, hasar direnci, aşınma direnci, korozyon direnci, yorulma ömrü ve termal yalıtımı, kendi içindeki malzemelerden farklı gösterirler. Bundan başka, kompozit malzemelerin birim yoğunluğa göre mekanik özellikleri , örneğin özgül mukavemet (MPa/kg/m^3) ve özgül modülü, standart metalik mühendislik malzemelerinden, kat ve kat daha büyüktür. Dizayncı, eğer uygun şartları sağlamak isterse, mekanik avantajlardan ,hepsini değil, bazılarını hedeflemelidir. Çünkü kompozit malzemelerin ,bu özel nitelikleri, binlerce yıldır kullanılmaktadır ve halen daha gelişmiş teknolojilerde ve yapılarda kullanılacaktır (Carey, 2016).

1.1. Kompozitlerin Tarihi

Malzeme tarihi incelendiğinde kompozitlerin binlerce yıldır var olduğu görülür. M.Ö. 3000 öncesinde yayların kompozit malzemeler olduğuna, özellikle Orta Asya Türk kavimlerinin kullandığını belgeler mevcuttur (Klopsteg,1987; Loades,2016). Mısır'da, M.Ö. 2500, ölülerin mumyalanmasında keten sargılar ve doğal kauçuk ile ilk filament sarma prosesi tatbik edilmiştir. Romalılar ,1700 yıl önce, altın ve gümüş nano partiküller ile içki kupaları, Arap savaşçılar ,1600 yıl önce, nano borular ve nano teller ile çelik kılıçlar üretmiştir (Beşergil, 2021).

Aşağıda ilk kompozitler ve üretilen polimerik malzemelere örnekler bulunmaktadır (Beşergil, 2021; Şahin, 2000; Cihangir, 2003) :

1783: Balon ile insanın uçuşu. Kompozit materyal için keten kumaşlar ve kâğıt (J. M. ve J. É. Montgolfier, 25 Nisan 1783), ipek kumaşlar ve kauçuk (J.A.Charles ve F.P.Rozier, 1 Aralık 1783) kullanıldı. Şekil 1.1.



Şekil 1.1. İlk balonların kompozit malzemeler ile imali, yıl 1783 (Beşergil, 2021)

1878-1879: Ampulde kullanılan filament, karbon fiberden yapıldı. Filament, pamuk ipliğine karbonizasyon işlemi uygulanarak imal edildi (J. W. Swan, 1878). Bambu kıymıkları karbonize edilerek filament yapıldı (T. A. Edison, 1879).

1889: İlk yapay ipek fiber “Rayon”, selülozik filamentler olarak kâğıt hamurunun rejenere edilmesi ile imal edildi (Hilaire de Chardonnet).

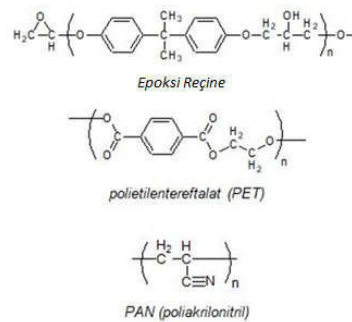
1923: İlk bazalt elyaf üretim patenti ABD ‘de alındı (Paul Dhe).

1933: Doymamış poliestere reçine üretilti (C. Ellis). Doymamış poliestere reçine ve cam fiber ile kompozit yapıldı (P. Castan).

1938: A.B.D ‘de epoksi tipi reçinenin patenti alındı (P. Castan).

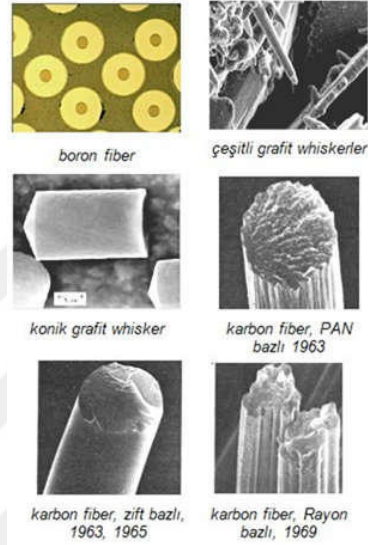
Epoksi reçine ve cam fiber ile kompozit malzeme imal edildi (C. Ellis).

1942: PAN (Poliakrilonitril) akrilik fiber imal edildi (H. Rein).PAN prekürsör, karbon elyafın hammaddesidir.



Şekil 1.2. Çeşitli matrislerin kimyasal bağları

1959-1969: Karbon ve Boron elyaflar imal edildi. Boron fiber, C.P.Talley tarafından imal edildi (1959). Grafit kılcal kristal (whisker) oluşturularak elastik modülü çok yüksek karbon fiberin, mikro yapıların denetimi ile üretilebileceği ispatlandı, R. Bacon (1960). Şekil 1.2 -Şekil 1.3.



Şekil 1.3. Çeşitli fiberlerin mikro görüntüleri

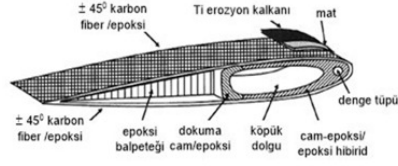
Karbon lif kömür ziftinden üretildi, S. Otani (1963). Petrol katranından karbon lif imal edildi, L. S. Singer (1965). Rayon kullanılarak karbon lif yapıldı, R. Bacon (1969).

1970'ler: Karbon lifler kullanılarak spor malzemeleri imal edilmeye başlandı. Golf sopaları ve tenis racketlerinin grafit ile yapılması vs. gibi. Şekil 1.4.



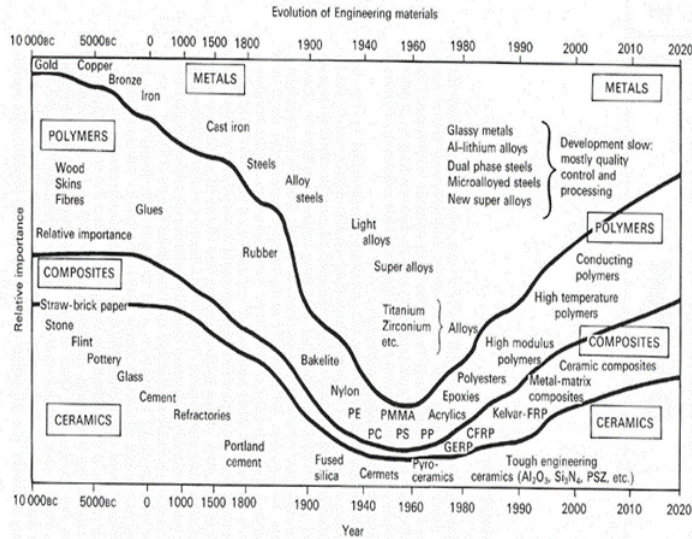
Şekil 1.4. Çeşitli kompozit uygulamaları

1990'lar: Metal matris kompozitler uzay araç ve cihazlarında kullanılmaya başlandı. Şekil 1.5.



Şekil 1.5. Bir helikopter pervane kanadının kompozit yapısı

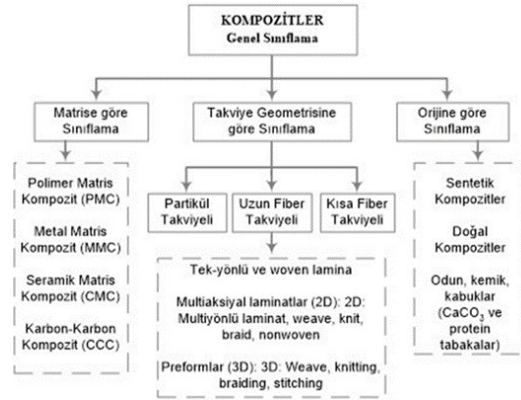
Malzemenin M.Ö.10.000 başlayan ve 2020 yılına kadar ekstrapole edilmiş relatif önemlerinin kronolojik değişimi aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 1.1). Kompozitlerin önemi 1960' dan sonra istikrarlı büyüme göstermiştir ve büyümenin ilerdeki senelerde devam etmesi beklenmektedir. Şekil 1.6.



Şekil 1.6. Malzemelerin kronolojik değişimi (Palucka ve Bensaude-Vincent, 2021)

1.2. Kompozitlerin Sınıflandırılması

Aşağıdaki Şekil 1.7' de görüldüğü gibi kompozit genel sınıflandırması yapılabilir.



Şekil 1.7. Kompozitlerin genel sınıflandırılması (Beşergil,2021).

Kompozit çalışmaları 1940'lı yıllarda üç önemli nedenle ilerlemiştir:

- 1) Roket, uçak ve helikopter gibi askeri araçlarda yüksek mukavemette ve hafif malzemelere olan isteğin yükselmesi,
- 2) Hızla büyüyen polimer sanayisinin fazla türde dallarda ilerlemesiyle, hafif ve yüksek mekanik niteliklerde malzeme isteği,
- 3) Cam fiber benzeri yüksek mukavemetli malzemelerin icat edilmesi ve bu özelliklerinin askeri gereçler için yararlanılmasıdır (Beşergil, 2021).

1.3. Kompozit Malzemelerin Nesilleri

Kompozit malzemelerin gelişimi dört nesilde açıklanabilir:

- 1) Birinci nesil (1940'lar): Cam fiber destekli kompozitler,
- 2) İkinci nesil (1960'lar): Yüksek performans kompozitler,
- 3) Üçüncü nesil (1970-1980'ler):Yeni pazar araştırmaları gereksinimleri,
- 4) Dördüncü nesil (1990'lar ve günümüz): Hibrid malzemeler, nano kompozitler, biyomimetikler ((Palucka ve Bensaude-Vincent, 2021).

1.3.1. Birinci Nesil (1940'lar): Cam Fiber Destekli Polimerler (GFRP)

Havacılık araçlarının kanat, roket burnu, helikopter rotoru, gibi parçalarının, yüksek mukavemetli malzemelerden imal edilmesi çalışmaları, bu malzemelerin mukavemetlerine karşın kırılgenlikleri sebebiyle yetersiz oldukları ortaya çıkmıştır.

Matris, lif takviyesini bağlar, lifler arasında yükleri aktarır, kompozit bileşene kesin biçimini verir ve yüzey kalitesini belirler. Bir kompozit matris seramik, polimer,

karbon veya metaldir. Polimer matrisler, havacılığın ticari ve yüksek performanslı uygulamaları için kompozitlerde en çok kullanılan malzemelerdir. Motor gibi çok yüksek sıcaklıktaki ortamlarda seramik ve metal matrisler kullanılır. Bir matris olarak karbon-karbon/karbon frenleri ve roket memeleri gibi aşırı yüksek sıcaklıklı uygulamalarda kullanılır (Composites World, 2016).

Malzeme Özelliklerini Geliştirme: Hafif ve kuvvetli olmayan bir matris malzeme içine fiberler konulduğunda malzemenin mukavemetinin arttığı saptanmıştır. Matristeki çatılmanın ilerlemesinin fiberlerin durdurmasından hasıl olduğu anlaşılmıştır.

Endüstriyel İş birliği: Camdan fiber çekilmeye 1932 yılında başlanmıştır. Kimya firmalarının polimer çalışmaları, doymamış poliestere reçineler (~1936) ve epoksi reçinelerin (~1938) keşfi ile devam etti. Yeni termoplastik ve termoset reçineler paketleme, yapıştırıcı ve ucuz kalıplama malzemelerin imali gayesiyle geliştirilirken, matris olarak da yararlanabileceği düşünülmüştür.

Takviyeli Plastik Endüstrisinin Başlaması; Cam Fiber Takviyeli Polimer (GFRP): Cam fiber, karbon fiber veya çelik veya alüminyum gibi, umumi bir isimdir. Çelik veya alüminyum alaşımların farklı kompozisyonlarda elde edilmesi gibi, çok farklı kimyasal kompozisyonlarda cam fiberler ticari olarak temini mümkündür. Genel cam fiberler silis bazlıdır (~ %50 – 60 SiO₂) ve örneğin kalsiyum, bor, sodyum, alüminyum ve demir gibi oksitler bünyesinde bulundurulur. Cam fiberleri belirten: E harfi, elektrik; C harfi, korozyon; S harfi, yüksek silis içeriğini (~%65 SiO₂) işaret etmektedir (Chawla, 2019).

GFRP, basit haliyle cam fiberlerin bir polimer eriyik içine konulması ve karışımın bir kalıba dökülmesiyle imal edilir. Cam fiber takviyeli polimerlerin (GFRP) ilk tatbikatları denizciliktedir. Tahta ve metal kayıkların yerini, hafif kuvvetli ve paslanmayan fiberglas kayıklar almıştır. GFRP'ler 1943' de havacılıkta kullanılmaya başlanmıştır.

1.3.2 İkinci Nesil (1960'lar): Yüksek Performans Kompozitler

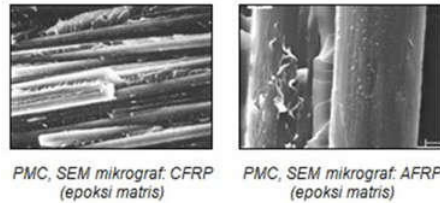
Askeri uzay programlarındaki isteklerle yüksek modül değerlerine haiz daha mukavemetli ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı fiberlere yönelik araştırmalar başlamıştır. Fenolik reçine matrisli ve asbest takviye malzemeli kompozitler 1956'da sentezlenmiştir. Metal matris kompozitler (MMC) üzerinde çalışmalara girilmiştir.

Karbon ve Boron: 1960'lı yıllarda grafit (karbon) ve boron fiberlerin sentezlenmesiyle daha yüksek sıkılık ve daha mukavemetli yeni takviye malzemeler imal edilmiştir. Bir yıl kadar sonra grafit elyaflar poli matrislerde takviye olarak kullanılmaya başlanmıştır. Karbonun alüminyum ve magnezyum gibi metallere karşı reaktif olması grafitin metal matrislerde kullanımını engellemiştir; ancak daha sonra karbon elyafların hava-dayanıklı kaplamalarla kaplanmasıyla bu engel aşılmış ve grafit-alüminyum, grafit-magnezyum kompozitleri imal edilmiştir.

Aramid Elyaf: Aromatik poliamidlerden imal edilen aramid fiber “kevlar” adı ile 1971 yılında üretilmiştir. Kevlar üretiminde kullanılan öncül polimerin aromatik halkaları arasındaki amid gruplarının pozisyonlarında değişikliklerle, aleve dayanıklı Nomex elde edildi.

Takviyeli Plastiklerden Genel Kompozit Kavramına Geçiş: 1960'larda kompozit malzemelerin tasarımı, bilim adamları ve mühendisleri kompozitteki iki faz arasındaki arayüz üzerinde çalışmaya itti. Heterojen yapıların mekanik özellikleri komponentler arasındaki arayüzlerin kalitesindendir. Elyaf ve matris arasındaki kimyasal bağları güçlendirecek katkı maddeleri icat edilmiştir.

Polimer matris kompozitler (PMC), polimer reçinenin matris ve liflerin takviye olarak ve/veya diğer takviye malzemelerden hasil olan kompozitlerdir. Matris ile takviye fazın birlikteliğindeki etkileşim, zayıf sürtünme kuvvetlerinden mukavemetli kimyasal bağlara kadar farklı türlerde olabilir. Şekil 1.8.



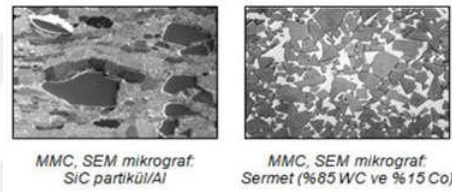
Şekil 1.8. Polimer matriks kompozitler (PMC), CFRP ve AFRP'nin SEM mikrogramları (Beşergil, 2021).

1.3.3. Üçüncü Nesil (1970 ve 1980'ler): Yeni Pazarlar ve Özelliklerin Sinerjisi Üzerinde Araştırmalar

Bilgisayarların da kullanıma girmesiyle malzeme tasarımında yeni bir yaklaşıma, özelliklerin sinerjini araştıran çalışmalara ağırlık verilmiştir.

Metal Matris Kompozitler (MMC): Metalik matrisler için 1970’lerde yeni fiberlerin (SiC , silikon karpit gibi) geliştirilmesi; karbon ve boron elyafların MMC’lere kaplanmasıyla, 1990’lı yıllarında uzay çalışmalarında yararlanılan mühim malzemeler olmuşlardır (örneğin, SiC / Cu, Al₂O₃/Al, SiC / Al, vs.) (Chawla,2019 ve Beşergil, 2021).

Metal matris kompozitler (MMC), esneyebilen metal matris ile takviye malzemelerden hasıl olan kompozitlerdir. Matris bir metal olarak ifade edilse de metalleri ve hafif metal alaşımları da içerir. Metal matris kompozitlerin çalışma sıcaklık aralığı 200 ile 800 °C dolayındadır, bu sebeple yüksek sıcaklık aplikasyonla gerektiren ortamlara uygundur. Şekil 1.9.



Şekil 1.9. Metal matris kompozitlerin (MMC), SEM mikrogafı (Beşergil, 2021).

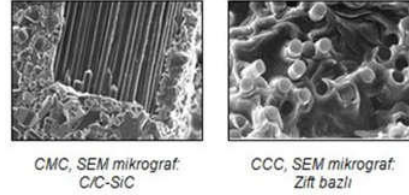
Seramik Matris Kompozitler (CMC): Seramik matris kompozitlerin geliştirilmesi, yüksek sıcaklığa dayanıklı takviye fiberlerin (SiC gibi) keşfinden sonra olabilmıştır. CMC’lerin elde edilmesinde Nicalon SiC fiberlerin sentezi (1976) ilk temel adım olmuştur.

Seramiklerde fiber, çatlamaya karşı köprü görevi yapar, çatlamanın ilerlemesini yavaşlatır, durdurur. Ancak bu işlevi yaparken fiberlerin, çatlamadan dolayı oluşan enerjinin bir kısmını absorblayarak metal matristeki yerleşimleri bozulur; istenmeyen bu durum fiberlerin kaplanmasıyla giderilmiştir. Örnek; SiC takviyeli alümina seramik, Şekil 1.3.

Seramik matris kompozitlerde (CMC) matris, seramik olarak tanımlanan geniş bir inorganik malzemeler topluluğudur. Mesela kristalin seramik, silika tabanlı cam, inter metalik ve karbon gibi. Hepsi yüksek sıcaklıklara dayanıklı yapısal malzemelerdir. Kimyasal bağları kovalent hibrid ve iyoniktir; böylece ergime sıcaklık değerleri yüksek, kimyasal kararlılıkları yüksek, elastik modülleri yüksek ve atomik davranışları düşüktür. Bu özelliklerinin sonucu olarak çok serttirler ve kaymaya dirençlidirler, fakat kırılıgandır.

Karbon- Karbon Kompozitler (CCC): Karbon (veya Grafit) lif destekli karbon matris kompozitlerdir. Hem destek ve hem de matris faz karbondur. Monolitik grafit

kırılmandır ve kuvvetli olmayan bir malzemedir. Yüksek sıcaklık uygulamalarda termal kararlılığın fevkalade olduğu, karbon matris içinde yüksek-kuvvetli karbon fiberler bulunduğu karbon-karbon kompozitler geliştirilmiştir. Şekil 1.10.



Şekil 1.10. Seramik matriks kompozitlerin (CMC), SEM mikrografları ve Karbon- karbon kompozitlerin (CCC) SEM mikrografları (Beşergil, 2021)

Kompozit malzemelerin özelliklerinde sinerjik etkiler çeşitli ve kapsamlı araştırmalara konu olmuştur. Bu araştırmalar, kompozit imalat ve uygulama teknolojisine yeni bakış açıları getirmişlerdir. Bu yüzden, kompozit tanımları farklı şekillerde ifade edilmeye başlanmıştır:

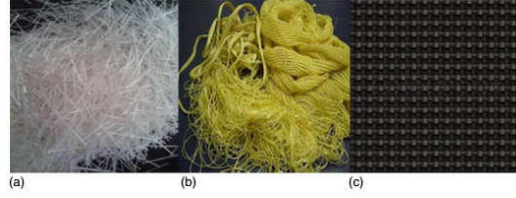
“Kompozitler, bir matris ve takviye fiberlerin birleşmesinden oluşan bir malzemedir”. “Kompozitler, içerdiği elementlerin özellikleri arasında bir sinerji etkinin olduğu malzemelerdir” vb.

1.3.4. Dördüncü Nesil (1990’lar ve Günümüz): Hibridler ve Nanokompozitler

1990’larda akademik ve endüstriyel araştırmacılar kompozit modellerinde küçük, daha da küçük skalalara yönelmeye başladılar: Makroskobik skaladan moleküler skalaya doğru: Hibrid malzemeler. Nano skalaya doğru: Nanokompozitler.

Hibrid kompozitler fiber takviyeli, partikül ve yapısal kompozitler olmak üzere üç sınıfa ayrılırlar (Jawaid, 2019).

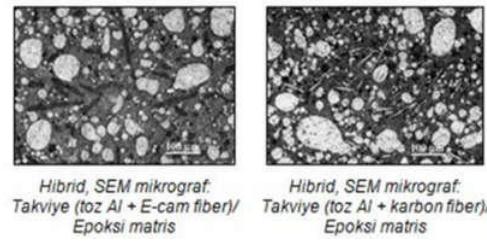
Hibrid Malzemeler; Doğadan Ders Almak: Hibrid malzemelerde organik ve inorganik komponentler (moleküler ölçekte) karışık durumdadır. Yumuşakça kabukları, kemikler, odun, canlı organizmalarca yapılan pek çok malzeme inorganik ve organik komponentlerden oluşmuştur. Biyolojik makro moleküller proteinler ve mineral fazların çok çeşitli seviyelerdeki karışımıdır. Örneğin sedef, protein organik tabakalarla kalsiyum karbonat tabakalardan oluşmuş sandviç yapısıdır. Kemikte matris faz kolajen protein fiberler, takviye malzeme de küçük hidroksiapatit (inorganik) kristallerdir. Şekil 1.11.



Şekil 1.11. Sentetik fiberler: (a) cam fiber, (b) Kevlar fiber ve (c) karbon fiber (Khan, 2020).

Hibrid kompozitler, konvansiyonel kompozitlerin harika fiziksel ve mekanik nitelikleriyle, mikrofil kompozitlerin düzgün yüzey oluşumlarını bir araya getirmek için geliştirilmiş kompozit tipleridir. Dolgu maddesi genellikle bir mikrofil ve küçük dolgulardır; tanecik büyüklüğü $\sim 0.4\text{--}1\ \mu\text{m}$ ' dir. Fiziksel ve mekanik özellikleri konvansiyonel kompozitlere kıyasla daha yüksektir. Hibrid kompozitler, bir matriste iki veya daha fazla farklı fiber veya takviye içeren kompozitlerdir; Hibrid kompozitler, tek tip takviyeli kompozitlere kıyasla çok daha yeterli özelliklere sahiptir. Örneğin, karbon (C) ve cam fiberlerin polimerik bir reçine matriste bir araya getirildiği sistemler çok yaygındır. Karbon fiberler kuvvetlidir, oldukça serttir ve düşük yoğunluktadır. Cam fiberler karbonun sertliğine sahip değildir. Cam-karbon hibriti kuvvetli ve dayanıklıdır, darbe direnci yüksektir.

Alüminyum matriste destek küçük SiC partiküller (MMC), ve alümina matriste küçük zirkon partiküller (CMC) içeren kompozitler hibrite tipik örneklerdir (Şekil 1.12).



Şekil 1.12. Hibrid malzemeler, SEM mikrografları (Beşergil, 2021).

Bazalt Elyaf:

Takviye olarak değerlendirilen bir diğer malzeme de bazalt lifidir (McDonald, 2021). Bazalt, bilinen volkanik kayadır ve yeryüzünde geniş alanlarda bulunabilir (plato bazaltı gibi). Bazaltın içeriğinde, %50–55 SiO_2 vardır ve volkanik denklik olarak, gabro kaya familyasındandır (Chawla, 2019). Bazalt yoğun, kompakt ve bazen granül yapıda veya porpihirik yapıdadır ve koyu siyah renktedir. Bazalt matrisinin ana yapısı,

pilagioklase (plagioclase) (%50–75 anortit [anorthite]) ve piroksen (pyroxene) (çoğunlukla augit [augite]) dir (Tufar, 2005).

İlk bazalt lif üretim girişimleri, ABD’de 1923 yılında Paul Dhe tarafından yapılmış ve ilk bazalt üretim patenti ABD Patent No. 1462446 ile onay verildi (wikipedia.org, 2021).

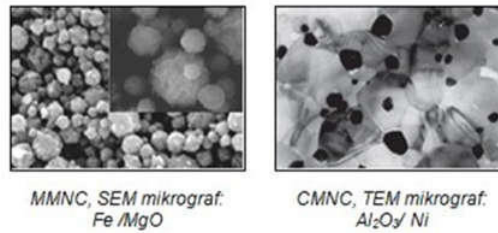
1995'te tekrar sınıflandırmadan bu yana bazalt lifleri daha geniş bir sivil uygulama yelpazesinde kullanılmıştır (basfiber.com, 2021).

Bu inorganik elyaf, bazalt, polimerleri güçlendirmek için kullanıldığında, iyi mukavemet, yüksek çalışma sıcaklığı aralığı, iyi kimyasal direnç, çok iyi ısı ve ses yalıtım özellikleri ve düşük su emilimi gösteren kompozitlerle sonuçlanmıştır. Ek olarak, bazalt lifleri kolayca işlenir, çevre dostudur ve en önemlisi ucuzdur (McDonald, 2021 ve Kompozit Sanayicileri Derneği, 2019).

Nanokompozitler:

Bilgisayar malzemelerinin imalinde, mikro sentezlerle başarılı sonuçların alınması, malzeme bilimcilerini atom-atom yapıların oluşabileceği nano ölçekli boyutlarda (<100 nm) kompleks malzemelere yönlendirmiştir. Biyolojik sistemler nano malzemelere tipik modellerdir: "nanometre skala için ilginç fikirler ve stratejilerin bulunduğu biyolojiden daha zengin bir hazine yoktur". Temel sorun mikro ölçekten nano ölçeğe ekstrapolasyonun olanaksız olmasıdır; nano ölçekte kuantum etkiler önceliklidir.

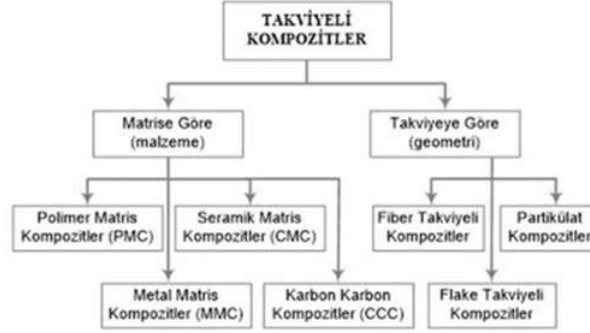
Nano kompozitler, kompoziti meydana getiren bir veya daha fazla fazın <100 nm’de boyutlarında olduğu malzemelerdir. Farklı bileşenler arasında bir sinerji yaratılarak, malzemedan istenilen yüksek performans özelliklerine ulaşabilmek için nano boyutta bir faz ilave edilir. Nano kompozit malzemelerin özellikleri malzemeyi oluşturan elemanların özellikleriyle sınırlı olmayıp, malzemenin morfolojisi ve yüzey arası karakteristiklerle de ilgilidir. Şekil 1.13



Şekil 1.13. Nanokompozitler, SEM ve TEM mikrogafı (Beşergil, 2021)

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kompozit malzemeler matris, elyaf (fiber) ve matris ile fiber arasındaki ara yüz olarak üç kısımdır (Hoa, 2009). Şekil 2.1.



Şekil 2.1. Kompozitlerin matris ve destek malzemeye göre sınıflandırılması (Beşergil, 2021).

Yüksek randımanlı kompozit malzeme üretimi için matris malzemesi fiberler arasına emdirilmeli, fiberler ıslatılabilmeli, kimyasal veya bazı şartlarda yapışma için bağ oluşturmali, ortamın düşük basınç ve sıcaklığında katılaşma yapabilmelidir. Bağdan ayrı olarak da, imalat sırasında veya sonraki işlem basamaklarında matris ve fiber arasında farklı kimyasal etkileşimler olmamalı ve matris belli sürede kararlı kalmalıdır. Kompozitin imalatı sırasında matrisin kimyasal yapısı sebebiyle fiberler de bir fiziksel zarar etkisinde olmamalıdır. Kompozitin ısıya, kimyasal etkileşime ve neme karşı mukavemeti öncelikle matris belirler. Ayrıca takviye malzemesi de ısıya karşı stabil olmalıdır.

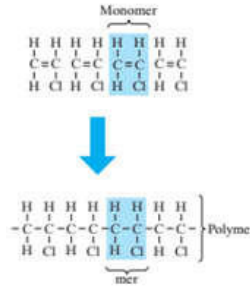
Parçacık destekli kompozit materyallerde matrisin görevi sınırlı kalmaktadır. Matris materyali, parçacıkları bir arada tutar iken fiber destekli kompozitlerde ise matrisin yapması gereken görevler şunlardır:

- Tertip edilmiş fiberleri bir arada tutarak kuvvetleri fibere aktarmaktır. Bu, bilhassa çekme ve kaymayla birlikte basma yüklemeleri için önem taşır.
- Fiberleri etraftaki etkilerden ve darbelerden korumaktır. Cam–fiber destekli kompozitlerde kullanılan çoğu matrisler suya ve korozyona karşı çok hassastırlar. Bazı matris materyaller imalat sırasında fiberlerle reaksiyona girerler. Bu sebepten matris seçimi kadar fiber seçimi de önem arz eder.
- Çatlakları engellemektir. Kullanılan fiberler çoğunlukla yüksek dayanım ve elastik modüle haiz ama çok gevrekler. Fiberler ayrı ayrı birim dahilinde imiş gibi davranırken, matris materyali kırılma anına kadar, bağımsız biçimde yük

taşıyıcı gibi hareket ederler. Bu sebepten herhangi bir çatlak ani kırılmaya neden olmaz. Mesela, bir fiber kırılırsa bitişik fibere geçmeden önce ,kırılma matrisine aktarılır. Bu sebeple matrisin ve matris fiber arasında ara yüzey bağının kompozitin tokluğunda önemli etkisi vardır. Bu ihtiyaçların çoğunu temin eden en kolay materyaller, hafif metaller ve alaşımları veya termosetlerdir (Şahin, 2000).

2.1. Kompozitler İçin Polimer (Plastik) Matris Malzemeleri

Plastikler veya polimerler her yerde vardır (Kutz,2015). Polimer, termoset veya termoplastik olsa dahi, polimer matris kompozitleri imal etmek metal matris, karbon matris ve seramik matris kompozitlere göre çok kolaydır. Polimerler, monomer olarak adlandırılan kimyasal ünitelerden oluşan zincir biçiminde yapıya sahip sentetik materyallerdir, Şekil 12.1. Tek monomer polimerizasyon işlemi ile diğer monomer molekülleri ile birleşerek yinelenen ünitelerden meydana gelen çok uzun zincir biçiminde bir makro-molekül oluşturulur ve bunların en basit biçimi bir termoplastik olan polietilen ($-H_2C - CH_2 -$) n' dir (Lewis, 2007). Şekil 2.2.



Şekil 2.2. Bağımsız monomerlerin (vinilkloride, C_2H_3Cl) birleşerek polimerleştirme ile polimer oluşturmaları (C_2H_3Cl)_n (Shackelford, 2015)

Polimerlerin yapısal şekli amorf (biçimsiz) olup, uzun ve karmaşık yapılı zincirlerin yanındakilerle düzenli yapı oluşturmaları zordur. Amorf ana yapıdaki küçük kristal yapılı kısımlar kristalitler ismi ile adlandırılır ve meydana gelen kristaller rastlantısal yönlerdedirler. Kristalleşme olanağı soğuma hızı yavaş ise artar. Mekanik nitelikler kristalleşme derecesi ile fazlaşır. Polimerlerin ağırlıklarının az olması ve üzerlerinde çalışmanın kolay olması nedeniyle ,geniş uygulama alanları vardır. Karmaşık geometriye haiz şekiller kolaylıkla bir kalıba enjekte edilerek imal edilmekte ve bu sebeple de reçine olarak da adlandırılmaktadırlar.

Polimerlerin teknik ve ekonomi açısından önem arz etmelerinin nedenleri:

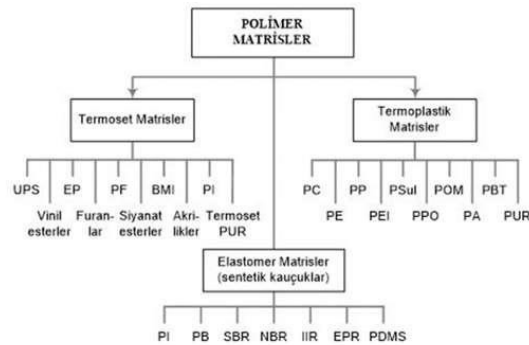
- Polimerlerle çoğunlukla fazla işleme lüzum kalmadan düzensiz parça geometrilerinin kalıplanabilmesi,
- Seramik ve metallere göre daha az yoğunluğa haiz olması ve dayanım/yoğunluk oranının uygun olması,
- Polimer malzemelerin çalışma sıcaklıklarının metallere göre daha düşük olması nedeniyle, hacimsel temelde genelde polimerleri üretmek için daha az enerji gereklidir,
- Maliyet açısından metallere yarış halindedir.
- Düşük ısı ve elektrik iletkenliğine ve yüksek korozyon dayanımına haiz olması,
- Kimi polimerlerin ışığı yansıtması ve şeffaf olması nedeniyle bazı uygulamalarda cam yerine tercih edilmesi sebebiyle ,cama rakip olmuştur.
- Polimerlerin geniş biçimde kompozit materyallerde kullanılmasıdır.

Polimerlerin bu kadar avantajına rağmen dezavantajları bulunmaktadır.

Dezavantajları kısaca şöyledir:

- Seramikler ve metallere göre daha aşağı değerde dayanıma haizdirler,
- Elastik modülleri düşüktür,
- Polimerlerin visko-elastik nitelikler göstermesi ve bu nedenle kısıtlı yükleme sahip olmasıdır.

Kompozit malzemelerde genelde polimer matris olarak üç tür vardır. Bunlar; elastomerler, termoplastikler ve termosetlerdir (Şahin, 2000). Şekil 2.3.



Şekil 2.3. Polimer matrisler (Beşergil, 2021)

Burada, UPS: Doymamış polyesterler, EP: Epoksi, PF: Fenolikler, BMI:Bismaleimidler, PI: Poliimidler, PUR: Poliüretan, PI: Poliizopren, PB: Polibütadien

Kauçuğu, NBR: Nitril-Bütadien Kauçuğu, IIR: Bütil Kauçukları, EPR: Etilen-Propilen Kauçuğu, PMDS: Polidimetilsilpksan, PC: Polikarbonat, PE: Polietilen, PP: Polipropilen, PEI: Polieterimid, PSuL: Polisülfon, PPO: POLifenilenoksit, POM: POLioksimetilen, PA: Poliamid (Naylon), PBT: Polibütillenteraftalat.

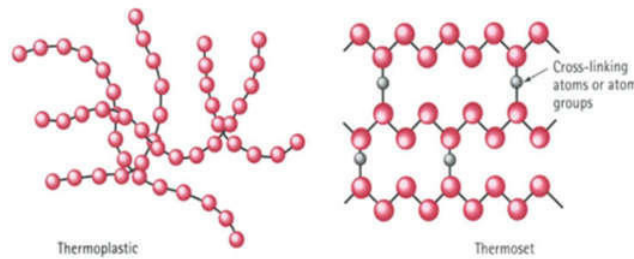
2.1.1. Elastomerler

Doğal kauçuk: Kauçuk ağacı gibi belli biyolojik bitkilerden elde edilir. **Yapay kauçuk:** Termoset ile termoplastik polimerler için kullanılır ve bilinen polimerizasyon prosesleri ile üretilir (Şahin, 2000 ve Kutz, 2016).

Uzun seneler elastomer imalinde doğal ve sentetik kauçuklardan yararlanılmışlardır. Ancak bu polimerlerin elastikiyeti yüksek olmakla beraber kopma dayanımları iyi değildir. Oksidatif degradasyona meyillidirler ve boyanmaları da zordur. Yapay elastomerik lifler kauçuksal elastikiyetin sebepleri anlaşıldıktan sonra II. Dünya savaşı sırasında Almanya’da imal edilmiştir. Poliüretanlar, elastomerik lif imaline uygun niteliklere sahiptirler. Spandex, ilk imal edilen elastomerik fiberdir (Saçak, 2002).

2.1.2. Termoplastikler

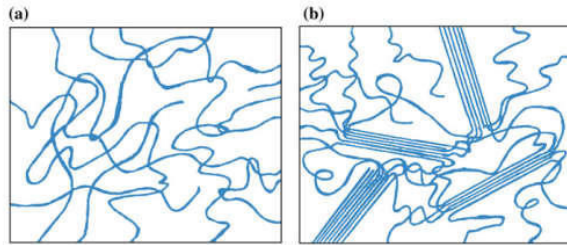
Polimerizasyon küçük moleküller büyük moleküller veya polimerler oluşturmak için birleştğinde oluşur. Polimer molekülleri zincir molekülleri şeklinde bir yapıya sahip olabilir (termoplastikler) veya üç boyutlu ağlar (termosetler) oluşturabilirler. Şekil 2.4.



Şekil 2.4. Polimer zincirleri

Global termoplastik pazarı, kimya sanayisinin %10 ‘dan fazlasını kapsar ve dünya ekonomisinin en hızlı büyüyen kısmıdır (Olabisi, 2016). Termoplastikler, imal edilen tüm sentetik polimerlerin yaklaşık %70’ini oluşturur ve üç türden (elastomer, termoplastik, termoset) ticari olarak en mühimidir.

Termoplastikler, normal şartlarda ,oda sıcaklığında katı olan materyal olarak isimlendirilir. Polimer zincirleri arasında çapraz bağlar yoktur; bu yapı polimere erime özellikleri kazandırır. Termoplastik matriste, polimer zincirleri birbirleriyle temastadır, ancak aralarında çapraz-bağlar bulunmaz. Şekil 2.4. Van der Walls kuvveti, bağı olmayan, atomlar ve moleküller arasında, dipol – dipol, dipol– indüklenmiş dipol veya Londra kuvvetlerini içerir (Willie, 2010). Polimerik çizgisel molekül zincirleri zayıf Van der Waals kuvvetlerle (poliolefinler), hidrojen bağlarla (naylonlar), veya aromatik halkaların yığılmasıyla (polistiren) bağlanırlar. Termoplastikler rijit bir yapıya sahip değildir. İşlenme sırasında reaksiyona girmezler; bu özelliği ile ‘reaktif olmayan katılar’ olarak kullanılırlar. Polimer ısıtılırsa yumuşar, sıcaklık yükselince viskozitesi azalır, basınç uygulandığında akar (Beşergil, 2021). Bu sıcaklık etkileşimi özelliği termoplastiklerden imal edilen malzemeleri daha iktisadi yapar ve kolaylıkla biçimlenmesini sağlar. Yeniden soğutulduğunda tekrar sertleşir. Sıvı durumunda bulunduğu sıcaklıklarda viskozite durumu yüksektir. Bu sebeple ara yüzey bağı termosete göre daha zor oluşur. Fakat biçimlendirme kapasitesi iyi olduğundan termoplastiklerin kullanımı artmaktadır. Termoplastik polimerler semi kristalin veya amorf (şekilsiz) olabilir. Amorf polimerlerde uzun zincirler birden fazla noktada birbirine dolanmıştır (Chawla, 2019). Bu dolanma polimeri daha yüksek sıcaklıklarda rijit hale getirir. Kimyasal etkenlere karşı duyarlıdırlar. Fakat poliamid veya PEEK / Karbon fiberli kompozit 95 ° C ‘de suya karşı koyma dayanımında azalma olmamaktadır. Şekil 2.5.



Şekil 2.5. Polimer moleküllerinin mümkün düzenlenmeleri: **a.** Amorf, **b.** Yarı kristal (Chawla,2019).

Termoplastiklerin özelliklerinin Çizelge 2.1’de karşılaştırılması gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Termo plastiklerin bazı tipik özellikleri (Şahin,2000).

Özellikleri	Arkilik	ABS	PTFE	PA
Elastik modülü (MPa)	2800	2100	425	700
Çekme dayanımı (MPa)	55	50	20	70
Uzama miktarı (%)	5	10-30	100-300	300
Özgül ağırlığı (g/cm ³)	1.2	1.6	2.2	1.14
Ergime derecesi (°C)	200	--	327	260

2.1.3. Termosetler

Termosetler, polimerizasyonla iki kademe üretilir. Birincisi materyali içeren monomerler, lineer zincirlerin bir araya getirdiği reaktörde başlarken; ikinci polimerizasyon işlemi kalıplaşma işlemi sırasında sıcaklık (T) ve basınçla (P) reaksiyona girmeyen kısımlar sıvılaşarak molekül zincirleri üç boyutlu yapıya sahip olurlar ve rijittirler. Bunlar tekrar ısıtılarak yumuşatılamaz. Epoksi ve poliesterler, fiber destekli kompozitlerde çok kullanılan matrislerdir. Epoksi ile poliesterlerin mekaniksel ve fiziksel özellikleri, moleküllerin büyüklüğüne, yoğunluğuna ve çapraz bağın uzunluğuna dayanır. Ama poliesterlerin cam fiberi ıslatması iyidir ve dolgu malzemesi olarak yararlanılabilir. Poliesterlerin dezavantajı ise sertleşme sırasında %10 kadar büzülmesidir. Bu kendini çekme ise fiberlerin basma gerilmeleri altında burkulmasına sebep olur. Suyu emebilir ama sürtünme direnci daha iyidir.

Çizelge 2.2. Bazı termoset plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri (Şahin, 2000).

Malzeme cinsi	Epoksi	Polyester	Fonelik
Yoğunluk (g/cm ³)	1.11	1.04-1.46	1.24-1.32
Elastik modül (MPa)	7000	3400	4800
Çekme dayanımı (MPa)	70	41-90	34-62
Kopma uzaması (%)	3-6	42	1.5-2.0
Isıl iletkenlik	0.19	0.19	0.15
Isıl genleşme katsayısı (1/°C)	45-65	55-100	68

Termosetlerin mekanik dayanım değerleri (Çizelge 2.1.), termoplastiklere göre (Çizelge 2.2) yüksektir.

Termoplastiklerin özelliklerindeki farklar, termal olarak stabil strüktür, çapraz bağ, moleküller içindeki yapının kovalent bağlı olmasıdır. Kovalent bağ, elektronların atomlar tarafından çok kuvvetli bir atraksiyonla paylaşılmasıdır (Lewis, 2007 ve Willie, 2010). Çapraz bağda üç yolla temin edilir. Bunlar, katalitik aktive edilmiş sistem, sıcaklıkla aktive edilmiş sistem ve mikser (karıştırma) ile aktive edilmiş sistemden

edinilmiş olabilir. Ama bu üç yolun dezavantajları ise; kısa hayat ve düşük mekanik özellikler göstermesi, yüksek sıcaklıklarda nispeten düşük dirence sahip olması ve alçak ısı genleşme ve elektrik iletkenliğine haiz olmasıdır (Şahin, 2000).

Termoset epoksi reçineler (TER'ler), yüksek kimyasal ve solvent direnci, yüksek cam geçiş sıcaklığı, substratlara mükemmel yapışma, yüksek iletkenlik ve darbe direnci ve düşük termal ve solvent büzülmesi gibi mükemmel fiziksel ve mekanik özellikler sergileyen çapraz bağlı polimerlerdir. Bu karakteristik özellikler, bu malzemeleri kaplamalar, havacılık, otomotiv, spor malzemeleri, elektronik malzemeler, yapıştırıcılar vb. gibi çeşitli endüstriyel uygulama alanlarında kullanım için çekici kılmaktadır. Yük taşıyan hafif yapılar için karbon fiber takviyeli epoksi kompozitler (CFREC'ler) önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenlerle, TER ve CFREC malzemelerinin dünya çapında kullanımı arttı ve 2020'de 17,5 milyar dolardan 2025'te 31,5 milyar dolara çıkması bekleniyor (Perez, 2021).

2.1.3.1 Epoksiler

Epoksiler, ana termoset matrislerden bir tanesidir. Epoksi, kimyasal yapısında epoksit grubu (bir oksijen atomu ve iki karbon atomu) içeren bir polimerdir (Şekil 3.7) (Chawla, 2019).

Epoksi, gelişmiş kompozitlerin en genel bilinen matrisi ve talep edilen uygulamaların bir çeşidi içindir (Hoa, 2009). Epoksi reçineler bir kompozitin sağlamlığına, dayanıklılığına ve kimyasal direncine katkıda bulunur (Composite World, 2016). Epoksiler mükemmel yapışkanlığı, yüksek mukavemeti, iyi korozyon direnci, düşük büzülmesi (poliester reçinelerle karşılaştırılırsa) ve işleme kolaylığı gibi mükemmel yetenekleri ile bu uygulamalar için kullanılmaktadır. Ek olarak, epoksi reçinelerin işlenmesi sırasında sitiren gibi toksik gazlar içermez (Hoa, 2009). Epoksinin ,oda sıcaklığında, bazı önemli özellikleri Çizelge 2.3 'de bulunmaktadır.

Çizelge 2.3. Epoksinin bazı önemli özellikleri (Chawla,2019)

Density, ρ ($g\ cm^{-3}$)	Strength, σ (MPa)	Modulus, E (GPa)	Poisson's ratio, ν	CTE α ($10^{-6}\ K^{-1}$)	Cure shrinkage (%)	Service temp. ($^{\circ}C$)
1.2-1.3	50-125	2.5-4	0.2-0.33	50-100	1-5	120

Epoksi matris kompozitler, 180 ° C’de uzun süre dayanabilecek biçimde, orijinal şekilde formüle edilirler (Chawla ,2019). Detaylı bir şekilde epoksilerin, kompozit matris olarak, yapı – özellik ilişkileri çalışmaları Peter Morgan’ın kitabından temin edilebilir (Morgan, 2005).

Isıl işlem görmemiş epoksiler, düşük polimerizasyon derecesine sahiptir (Şahin, 2000). Makromolekül, polimerizasyonla n adet tekrarlanan ünitelerle üretilir. Bir polimerleşmiş malzeme serisinde içindeki moleküller uzunlukça farklı olduğundan, demet için n ortalama olup bunun istatistiksel dağılımı normaldir. n ortalama değeri, serinin polimerizasyon derecesi (DP) olarak adlandırılır (Chawla, 2019). Epoksinin moleküler ağırlığını ve çapraz bağını artırmak için ısıtılma tabi tutulmalıdır. Isıl işleme tabi olmuş epoksilerin dayanımı yüksektir, ısıtılma ve kimyasal dirençleri iyidir. Yüzey kaplamaları, endüstriyel döşemeler, cam destekli kompozitler ve yapıştırıcılar epoksilerin uygulama alanlarından bazılarıdır. Epoksinin izolasyon nitelikleri farklı elektronik uygulamalarda, yarı iletkenler ve transistör benzeri malzemelerde ve baskı devre levhalarında kullanılmalarına olanak sağlar (Şahin, 2000).

Epoksiler sıvı, katı ve yarı katı formlarda gelir ve tipik olarak aminler veya anhidritlerle reaksiyona girerek sertleşir. Çoğu ticari epoksi, bisfenol A'nın diglisidil eteri, bisfenol F'nin diglisidil eteri (düşük viskozite), kreosol novalaklar veya fenolik novalaklara dayanan bir kimyasal yapıya sahiptir. Epoksiler, polyester reçineler gibi bir katalizörle kurlenmez, bunun yerine bir sertleştirici (kürleme maddesi olarak da adlandırılır) kullanılır. Sertleştirici (kısım B) ve baz reçine (kısım A), sabit bir orana göre bir 'ilave reaksiyonunda' birlikte reaksiyona girer. Bu nedenle, tam bir reaksiyon sağlamak için reçinenin sertleştiriciye doğru karışım oranını kullanmak çok önemlidir. Aksi halde, reçine ne tam olarak kurlenir ne de tam özelliklerine ulaşır. (Metre/karıştırma/dağıtım ekipmanı, reçinenin bu karışımını otomatikleştirmek ve doğru bir şekilde kontrol etmek ve ardından bunu kalıplama işlemine iletmek için artık yaygın olarak kullanılmaktadır). Kullanılan sertleştirici türü, kurlenmiş reçinenin ve dolayısıyla kompozitin nihai özelliklerini etkiler. Sertleştiriciler, alifatik aminleri, sikloalifatik aminleri, poliamidleri, aromatik aminleri, anhidritleri, fenoller, tiyoller ve gizli sertleştiricileri (örneğin Lewis asitleri) içerir.

2.1.3.1.1 Epoksilerin Endüstri Uygulamaları

Birçok havacılık uygulaması, yüksek sıcaklık ve basınçlarda kürleme gerektiren aminle kürlenmiş, çok işlevli epoksiler kullanır. Sertleştirilmiş epoksi yüksek derecede çapraz bağlanma nedeniyle kırılabilirliği önlemek için eklenen termoplastikler ve reaktif kauçuk bileşikleri ile Boeing Co.'s (Chicago, IL, ABD) 787 Dreamliner ve Airbus (Toulouse, Fransa) A350 XWB gibi yüksek yüzdeli kompozit uçak gövdelerinde norm haline geldi.

Epoksi cephesinde, büyük ölçüde otomotiv endüstrisinin kalıcı "dakikada parça" üretim beklentisiyle desteklenen dikkate değer bir gelişme, "ani-kürleme " epoksiler uygun tanımlayıcısını almış bir grup ve yeni reçine formülasyonunun ortaya çıkması olmuştur. Bu geleneksel epoksilere benzer bir kullanım ömrü ile tasarlanmış reçineler için toplu bir terimdir ve lifler tamamen emprenye edilene kadar uzatılabilen, ancak daha sonra "tetikleyici" bir sıcaklıkta iki dakikalık veya daha az bir süre ile bir kürleme döngüsüne aktive edilebilecektir.

Dow Automotive System (Horgen, İsviçre), VORAFORCE hızlı kürlenen otomotiv epoksi infüzyon reçinesi platformunu 2014 yılında piyasaya sürdü. 30 saniye kadar kısa bir sürede kürlenme süresi ve reçinenin gecikme özellikleri ile düşük viskozite (10 MPa/sn kadar düşük) bir arada sunar , infüzyon hızını maksimuma çıkarır. Hexion Inc. (Columbus, OH, ABD) bir dizi optimize edilmiş hızlı sertleşen epoksiler, sertleştirici maddeler ve ön biçimli bağlayıcılar sunmuştur. Hexion'un ticari markalı Epikote Resin TRAC 06170 ve Epikure kürleme ajanı TRAC 06170, RTM veya ıslak sıkıştırma kalıplama kullanılarak yapılan yapısal parçalara yöneliktir. Kombinasyonun, parça boyutuna ve karmaşıklığına bağlı olarak 1 dakikadan daha kısa bir parçadan parçaya döngü süresiyle sonuçlandığı bildiriliyor. Epikote Resin TRAC 06400 serisi, 130°C'de kürlendiğinde 90 saniye kadar kısa kürlenme süreleri ile hızlı kürlenen prepregler için de mevcuttur.

Hexcel (Stamford, CT, ABD), 5 mm kalınlığında bir parça için 150°C'de (80 bar basınç) iki dakikalık bir döngüye sahip, ticari markalı HexPly M77, hızlı sertleşen bir ön emprenye sunar. HexPly M77'nin düşük yapışkanlığı, önceden emprenye edilmiş malzemenin lazer kesici ile hassas şekillerde kesilmesini, ardından robotik olarak yönlendirilmesini, birleştirilmesini ve düz preformlar halinde birleştirilmesini sağlar. Onun Tg ise 125 °C'lik sıcaklık, daha hızlı bir üretim döngüsü için kürlenmiş parçaların sıcakken kalıptan çıkarılmasını sağlar.

Cytec Solvay (Heanor, Derbyshire, Birleşik Krallık), oradaki 18 aylık bir Ar-Ge programının, birincil ve ikincil araç gövdesi beyaz yapıları için birkaç 3 dakikanın altında sertleşen epoksi reçine kimyası ile sonuçlandığını bildirdi. Biyo-bazlı epoksiler de bir dizi firma tarafından geliştirilmektedir. Bunlardan biri, on yıldır birkaç ticari markalı GreenPoxxy reçinesi geliştiren Sicomin'dir (Chateauneuf les Martigues, Fransa). SR GreenPoxxy 56, bitki ve sebze kaynaklarından elde edilen %50'den fazla karbon içeriğine sahip şeffaf bir epoksi iken Surf Clear EVO ise sörf tahtası pazarına adanmış bir epoksidir. Şirket reçinesi için kesin bitki kaynakları belirtmiyor. Sicomin firmasının ihracat müdürü Marc Denjean şunu söylemektedir: epoksilerinin geniş bir sertleştirici (biyo bazlı olmayan) seçme olanağı birlikte birleşebildiklerini ve böylece özel işlemleri, elle yatırma dahil, infüzyon, basınçlı kalıplama ve diğer işlemleri yakalayabilmektedirler.

Entropy Resins (Hayward, CA, ABD), moleküler omurgasının %37'si doğal olarak oluşan çamdan elde edilen sıvı yağ olan, endüstrinin ilk ABD Tarım Bakanlığı (USDA) “biyo-tercihli” sertifikalı epoksi, Super Sap Epoxy 100/1000'e sahip olduğunu iddia ediyor . Entropy, reçinenin takviyelere iyi yapıştığını ve petrol bazlı epoksilerden daha iyi uzama özelliklerine sahip olduğunu iddia ediyor. Huntsman Advanced Materials (The Woodlands, TX, ABD), yüksek basınçlı bir RTM işleminde Aradur 3475 sertleştirici ile birleştirilmiş Huntsman'ın ticari markalı Araldite LY 3585 epoksi reçinesini kullanan, BMW i3 otomobil üretim programında ile son sekiz yıldır çalıştı (Composites World,2016).

2.1.3.2 Fenolik

Bakalit,Fenolik'in ticari ismidir ve tahta unu , selüloz fiberler ve kalıplama materyali olarak kullanılan mineraller gibi dolgu maddeleri ile daima birleştirilir. Fenolikler gevrek ama ısı, kimyasal ve boyutsal kararlılığı iyidir. Renk verme kısıtlıdır, koyu renkleri vermek mümkündür. Kalıplama imali sadece toplam kullanılan fenoliklerin %10'nudur. Diğer aplikasyonlar tahta yapıştırıcı, elektronik baskı devre levhaları, aşındırıcı volanları ve fren balatası için bağlama materyalidir (Şahin, 2000).

2.1.3.3 Doymamış Polyester

Doymamış poliestere reçinesi , belli sayıda $C = C$ çift bağlarını içerir. Terim olarak *doymamış* anlamı, molekülde reaktif bölgeler var demektir (Chawla, 2019).

Çizelge 2.4. Oda sıcaklığındaki polyesterin bazı özellikleridir.

Density, ρ ($g\ cm^{-3}$)	Strength, σ (MPa)	Modulus, E (GPa)	Poisson's ratio, ν	CTE α ($10^{-6}\ K^{-1}$)	Cure shrinkage (%)	Service temp. ($^{\circ}C$)
1.1–1.4	30–100	2–4	0.2–0.33	50–100	5–12	80

Doymamış poliester suya ve çeşitli kimyasallara, hava şartlarına, yaşlanmaya karşı yeterli dirence sahiptir ve çok ucuzdur. $80\ ^{\circ}C$ 'ye kadar sıcaklıklarda bozulmadan durabilir ve cam fiberlerle kolaylıkla birleşebilir. Poliester reçineleri kürleme sırasında %4 ile %8 arasında büzüşebilir. Çizelge 2.4.

Poliester terimi hakkında talihsiz bir kafa karışıklığı vardır. Aynı terim, iki çok farklı polimerler için kullanılmaktadır. Doymamış poliester, genelde polimer kompozit kompozitler için matris malzemesi olarak kullanılan, termoset reçinesidir. Çoğunlukla poliester olarak referans yapılan, termoplastik poliester 'den çok farklıdır (Chawla, 2019).

Termoset poliester; borular, tanklar, gemi iskeleti, otomobil, kamyon vb. gövde parçaları ve yapı panelleri vb. gibi büyük parçaları üretmek için destekleyici polimer kompozitler de büyük miktarda kullanılır (Şahin, 2000). Start için polimerin bir glikol (etilen, propilen veya dietilen glikol) ile doymamış dibazik asitin (maleik anhidrit veya fümerik) reaksiyonu gerekir. Sonuç, çift bağlı karbon atomları arasında düz bir poliesterdir (Chawla, 2019). Bu reaksiyonla oldukça düşük molekül ağırlığı ($MW = DB * (MW)_u$) olan doymamış poliester imal edilir ($MW = 1000 - 3000$). Bu materyal poliester ile çapraz bağlama ve polimerizasyon monomeri ile karıştırılır. Bu nedenle de %30–50 oranında stiren kullanılır. Bu karışım doymamış poliester reçine sistemini meydana getirir. Poliesterler ısıtılır. Bu ısıtma işlemi ya sıcaklık ile aktive edilen sistem ile ya da poliester reçineye bir katalizör ilave edilerek ısıtma işlemi tabi tutulur. Çevrimde imalat sırasında yapılır. Kalıplama veya doğru biçimlendirme işlemleri sonunda da poliester çapraz bağlı olur (Chawla, 2019 ve Şahin, 2000).

2.1.3.4 Silikonlar

İnorganik ve yarı-inorganik polimer molekül yapılarındaki tekrarlanan siloksan ($R-(SiO)_3-M$) bağının varlığı ile farklılık gösterirler (Chawla, 2019).

Polisiloksan üç biçimde imal edilir. Bunlar a) Yağlayıcı, b) Elastomerler ve c) Termo- setting'dir. Yağlar düşük moleküler ağırlıkça polimerdir ; yağlama, parlatma,

mum yapımında kullanılır. Termoset silikon çapraz bağlıdır. Boyama, parlatma ve kaplamalarda ve laminatlarda kullanılabilir (Şahin, 2000).

2.1.3.5 Amino Reçineler

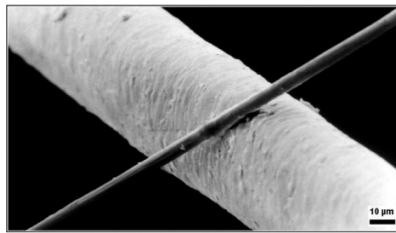
Üreformaldehit ve melamin formaldehitten gibi iki termoset polimerden oluşan amino grupları ile karakterize edilirler. Belirli aplikasyonlarda, özellikle de çok katlı ve parçacık plaka yapıştırıcılarda kalıplama bileşeni olarak kullanılabilir. Ama fenolikten biraz pahalıdır. Kalıplama malzemesi olarak kullanıldığında fazla oranda dolgu maddesi ve selüloz içerirler (Şahin, 2000).

2.1.4. Katkı Maddeleri

Bir polimerin özellikleri bir dolgu malzemesi kullanılarak değiştirilebilir veya basitçe maliyeti azaltmak içinde polimer içine değişik fiber (karbon elyaf vb.) veya parçacıklar (karbon nanotüp, nano kil vb.) katılabilir. Dolayısı ile polimer kompozite dönüştürülebilir. Bir diğer nedende ısı ve boyutsal kararlılığı iyileştirmektir. Katkı maddelerinin; pekiştirici, yağlayıcı, yanma geciktirici ve oksit giderici gibi gayeleri vardır (Şahin, 2000).

2.2. Karbon ve Grafit Fiberler

Karbon fiberler, yapılarında en az kütlece %90 karbon (C) ihtiva eden fiberlerdir (Shreve, 1984) . Şekil 2.6.



Şekil 2.6. Karbon fiberin (çapı 6 µm) insan saçı ile karşılaştırılması (Seydibeyoglu, 2017).

Karbon ve grafit yapımında bir fark vardır. Şekil 2.6. İkisi de PAN (poliakrilonitril) 'in oksidasyonu veya pirolizi (ısı bozunma) ile üretilirler. Karbon

lifleri başlangıçta bazı sıralı grafit ile oluşur, ama 3000 ° C 'ye ısıtma bu fiberlerin tamamen grafitize olmasını gerektirir. Grafit fiberler, kümes teli gibi sarılmış grafit levhalar olarak düşünülebilir (Naumann,2008). Karbon fiberler selülozik veya sentetik fiberlerin (ya da dokumaların) kontrollü ısı bozunmalarıyla (piroliz) veya oksidasyonu ile elde edilirler. Rayon (yapay ipek) fiberleri ve poliakrilonitril (PAN) yapılan elyaflar bu amaç için uygundur. Çoğu karbon elyafları poliakrilonitril (PAN) imal edilir (Saçak, 2002). Yüksek modüllü karbon fiberleri rayon, PAN ve ziftten hazırlanabilir. Rayon fiberleri 200–350 °C 'de kömürleştirilir ve ardından 1000–2000 °C'de karbonize edilirler. Elde edilen karbon fiberlere 3000 °C 'de ısı işlem uygulanır ve bu ısı işlem esnasında gerinme yapılır. Bu çok masraflı bir yöntemdir ve tüm proses verimi sadece yaklaşık %25'tir. Bu rayondan üretilen fiberlerden uzay araçlarına ısı koruyucu kalkanı ve uçaklara fren yapılır.

PAN' dan üretilen fiberler daha fazla verime sahiptir, ama Young modülü rayondan hazırlanan fiberler kadar yüksek değildir. PAN, 100 °C 'de yüzde 100'den 500'e kadar gerinme yapılır, 190 °C den 280 ° C'ye 0,5 saatten 5 saate kadar zamanda ısıtılır ve sonra 1000'den 1300 °C kadar karbonize edilirler. Verim ise yaklaşık %45'tir. Young modülü, 2500 °C 'den üstünde ısıtılarak yükseltilir.

Kömür katranı ve petrol zifti, ilk önce sıvı kristal durumu (mezofaz) için ısıtılır. İplik bu sıvıdan yapılır ve atmosferdeki oksijen ile termoset olur. Bu fiberler 3000 ° C'ye kadar ısıtılırsa yüksek Young modülüne sahip olurlar ve maliyetli gerdirme ihtiyaç duyulmaz. Karbon fiberler üç farklı formda satılırlar:

Düşük modüllü (138 GPa) altlık: Bu, elektrostatik püskürtme için bir elektrik iletkenlik yüzeyi olarak kullanılır ve enjeksiyon kalıbında elektriksel öz iletkenlik eldesi, ısıya karşı direnç ve dayanıklılığı artırmak (mil yatağı gibi) için kullanılır.

Orta modül (138 – 517 GPa): Bu fiberler kumaş formuna getirilir.

Yüksek modül (> 345 GPa): Bu en düşük fiyatlı yüksek modüllü fiberdir ve katılık çok önemli olduğunda kullanılır.

Karbon fiberler takviyeli plastiklerde kullanılırlar. Takviyeli plastikler ise sportif eşyalar (olta sopası vb.) ve mühendislik plastiklerinde kullanılırlar (Shreve, 1984).

2.3 Dokuma Kumaşlar Teknik ve Ürünler İçin

Tekstil ürünleri giyim, ev ve teknik tekstil ürünleri olarak sınıflandırılmaktadır. Perde, tekstil duvar kâğıdı, kumaş, mobilya, halı vb. giyim ve ev eşyalarına yönelik

ürünler kolayca tanımlanabilir. Bu kategorilere girmeyen tekstiller teknik tekstiller olarak kabul edilebilir. Teknik tekstiller, belirli bir işlevi yerine getirmek üzere tasarlanmış ürünlerdir. Bu kategoride, kompozit malzemelerden takviye elemanları üretmek için kullanılan dokumalar veya dokuma kumaşlar yer almaktadır (Kumar, 2017)



3. MATERYAL VE YÖNTEM

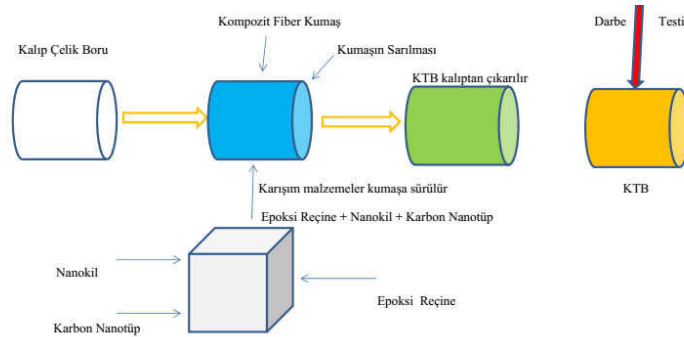
3.1. Deneysel Prosedür

3.1.1. Hammaddeler

- **Kalıp:** Dış yüzeyi parlak çelik, uzunluk 1300 mm, çap 72 mm, kalınlık 4 mm.
- **Nanokil :** Beyaz, Montmorillonit tipi, 38 - 40 A°, iki tabaka arası.
- **Nanotüp:** Karbon MWNT (çok duvarlı nanotüp), Saflık (>%95 karbon nano tüp), Çap 10-20 nm.
- **Karbon Kumaş:** Karbon fiber kumaş, çift eksenli +45/-45°, 300 gr/m² , Çekme mukavemeti: 3800 MPa, Elastisite modülü: 240 GPa , Yoğunluk: 1.79 g/cm³ .
- **Epoksi Reçine:** Hexion LR160, sertleştirici LH160, ağırlık oranı 100:25. Yoğunluk: 1.18-1.20 g/cm³ , Eğilme dayanımı: 110-140 N/mm² , Elastikiyet modülü: 3.2-3.5 kN/mm² , Çekme dayanımı: 70-80 N/mm² , Basınç dayanımı: 80-100 N/mm² , Darbe dayanımı: 40-50 KJ/m² .

3.1.2. Üretim

Kompozit borular Konya Seydişehir, Necmettin Erbakan Üniversitesi Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi kompozit laboratuvarında, sarılmış karbon kumaşa dayalı elle yatırma yöntemi ile özel yapım olarak imal edilmiştir. Kompozit takviyeli imalatın basit akış şeması Şekil 3.1. de görülmektedir.



Şekil 3.1. Kompozit nano takviyeli boru üretiminin basit akış şeması

Kompozit boru imalatı bir kalıba ihtiyaç duyar. Kalıp, Şekil 3.2'deki parlak çelikten (uzunluk 1300 mm, çap 72 mm, kalınlık 4 mm) hazırlanmaktadır.



Şekil 3.2. Parlatılmış çelik kalıp, L= 1300 mm, d= 72 mm, t= 4 mm

Kompozit borular, sertleştirici (600 g epoksi, 150 g sertleştirici) ve karbon elyaf dokusu (1,5 m) olmak üzere aynı epoksi reçinelerine dayanan dört farklı bileşene sahiptir. Birinci boruda dolgu maddesi eklenmez, ikinci boruda kütle ağırlık yüzdesi reçineye göre 6 gr veya ağırlıkça %1 KNT ile 6 g veya %1 nanokil ve üçüncü boruda 6 gr veya ağırlıkça %1 KNT ile 18 gr veya ağırlıkça %3 nanokil ve son olarak dördüncü boruda 18 gr veya ağırlıkça %3 CNT ile 6 gr veya ağırlıkça %1 nanokil bulunur. Tüm numuneler reçine ve dolgu maddelerinin mekanik olarak karıştırılması, daha sonra Şekil 3.3' teki homojen karışımlar için Ultrasonik Hücre Bozucu UCD-650 ile 15 dakika boyunca karıştırılması.



Şekil 3.3. Reçine sertleştirici, (a) KNT ve nanokil mekanik karıştırma, (b) ultrasonla karıştırma

Kompozit elyaf kumaş, epoksi reçine karbon kumaş üzerine uygulanarak hazırlanır. Daha sonra karbon kumaş, Şekil 3.4'teki mekanizmayı döndürerek ve fırça ile nano dolgular ile reçineler sertleştirici uygulayarak kalıba altı tabaka sarıldı.



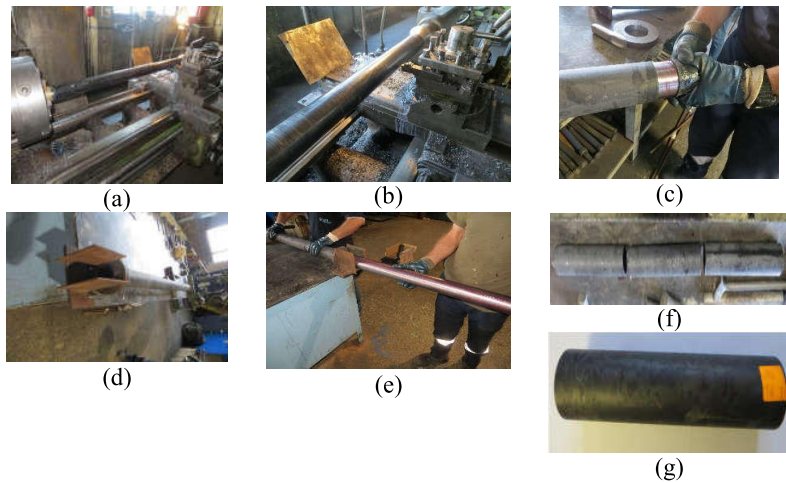
Şekil 3.4. Kalıp üzerine kumaş sararak kompozit boru üretimi

Bu aşamadan sonra boruya hava kaçağı olmayan bir paket konur. Kompozit boru ile paketten bir saat boyunca vakum sistemi ile hava alındı. Son adımda, kompozit borulu vakum paketi Şekil 3.5. 'te ki gibi vakum altında 24 saat boyunca kürlendi.



Şekil 3.5. İmalattan sonra nano takviyeli boru için vakum işlemi.

Böylece bir gün sonra boru paketlenip kalıptan çıkarıldı. Boru yüzeyleri torna ile düzeltildi ve son aşamada Şekil 3.6.a)' da ki darbe deneylerinde kullanılmak üzere 30 cm'lik parçalar halinde kesiliyor. Aşağıdaki Şekil 3.6'da nano takviyeli borunun yüzey işleme, kalıptan çıkarma ve numune parçalarına kesme işlemleri vardır.



Şekil 3.6. Nano takviyeli boru yüzey işleme, kalıptan çıkarma ve numunelere kesme işlemleri ve nano takviyeli boru numunesi.

4. DENEY BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. DENEY SONUÇLARI

Elle yatırma, vakum poşetleme ve vakum altında oda şartlarında kürlendirilerek üretilen, 6 kat karbon fiber kumaş (biaxial +45/-45°) ile el ile sarım yapılan; çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) veya kısaca karbon nanotüp (KNT) ve nanokil (NK) takviyeli ve/veya takviyesiz kompozit borulara 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerjileri uygulanmıştır. Katkısız numune hiçbir nano dolgu içermez, diğerleri ağırlık bazında; %1 KNT-%1 NK katkı; %1 KNT-%3 NK katkı; %3 KNT-%1 NK katkı ihtiva etmektedir.

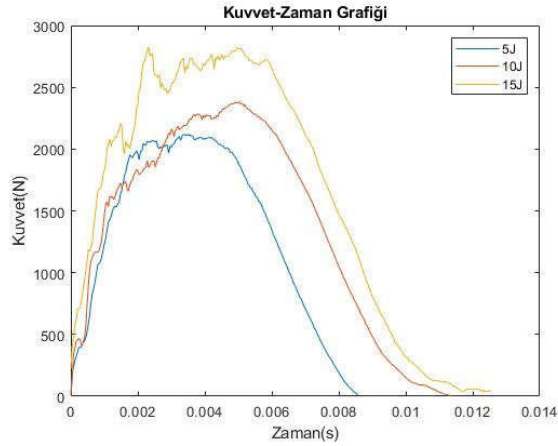
Şekil 3.6'daki gibi test numuneleri üzerinde farklı enerji seviyelerinde nano takviyeli boruların düşük hızlı darbe davranışlarının belirlenmesi için 5 J, 10 J ve 15 J' lük darbe enerjilerinde düşük hız darbe testi cihazında (Şekil 4.1) gerçekleştirilmiştir (Karaoğlu, 2021). Artan darbe enerjisi değerleri elde etmek için kütlenin çökeceği vurucu yüksekliği teorik olarak, serbest düşme ile yapılan deney enerjisi, potansiyel enerji ile denklem (4.1) ile hesaplanmaktadır.

$$E = m. g. h \text{ (J)} \quad (4.1)$$

Denklemi ile yükseklik hesaplanmıştır. Hesaplanan vurucu (çarpıcı) yükseklikleri şöyledir: 0,91 m yükseklik 5 J enerji seviyesi, 1,82 m yükseklik 10 J enerji seviyesi içindir. Son olarak 15 J enerji seviyesi için 2,73 m yükseklikten vurucu serbest düşme yapmıştır. Her numunenin ortasına yarım küre vurucu ile darbe yapılmıştır. Darbe sonrası numunedeki hasar mekanizmalarını darbe enerjisi ile ilişkilendirmek için otomatik mekanizma ile darbe yapıldıktan sonra vurucu kütle tutularak ilk tekrarlanan darbe engellenmiştir.

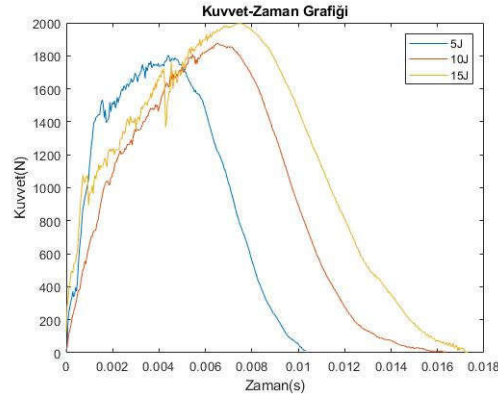
4.1.1 Düşük Hız Darbe Testi

Darbe testleri, ayarlanabilir çarpma yüksekliğine sahip bir düşme kulesi ile gerçekleştirilmiştir, Şekil 4.1 (Karaoğlu, 2021). Çarpma tertibatı yarım küre şeklindedir (12 mm çap ve 5,6 kg kütle). Kuvvet değişimleri, mili volt ölçeğinde bir sensör tarafından izlenir. Darbe testleri 5,10 ve 15 Joule (J) darbe enerjisi seviyelerinde 12 kez tekrarlanmıştır. Daha sonra sinyaller bir PC'ye monte edilmiş veri toplama kartına iletilir.



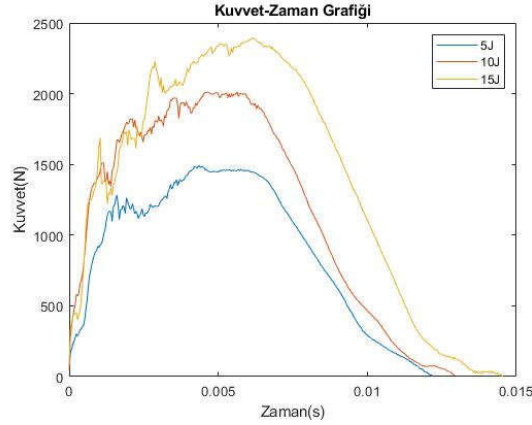
Şekil 4.2. Katkısız numune için Kuvvet – Zaman grafiği

Şekil 4.2. de görüldüğü gibi numuneye uygulanan kuvvet temas süresi oldukça fazladır. Bu da numunede matris çatlakları ile başlayan bir deformasyonu göstermektedir. Beklendiği gibi enerji seviyesi artırıldıkça matris çatlakları yoğunlaşmış ve 15J seviyesinde fiber çatlakları seviyesine doğru çıkmıştır.



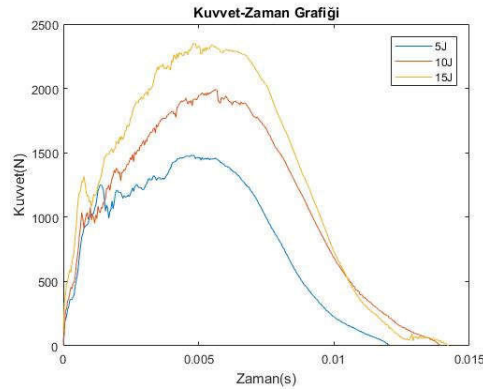
Şekil 4.3. %1 KNT-%1 NK katkılı numune için Kuvvet – Zaman grafiği

Şekil 4.3. de görüldüğü gibi KNT ve NK takviyeli numuneye uygulanan kuvvet temas süresi artmış malzemede matris çatlakları homojen bir şekilde çoğalmış ve beklendiği gibi enerji seviyesi artırıldıkça matris çatlakları yoğunlaşmış ve maksimum kuvvet seviyesi düşmüştür. Bilindiği üzere KNT takviyesi kuvveti artırmakta ancak NK takviyesinin maksimum kuvvet seviyesini düşürdüğü düşünülmektedir.



Şekil 4.4. %1 KNT-%3 NK katkılı numune için Kuvvet – Zaman grafiği

Şekil 4.4. de görüldüğü gibi %1 KNT-%3 NK katkılı numuneye uygulanan kuvvet temas süresi oldukça artmış malzemede matris çatlakları fiber kırıklıklarına dönüşmüş ve malzemede nano kil miktarının artması malzemede daha geniş deformasyon bölgesi oluşturmuştur. Bu durum artan nano kil miktarlarının malzemede daha hızlı deformasyon meydana getirmesiyle açıklanabilir.

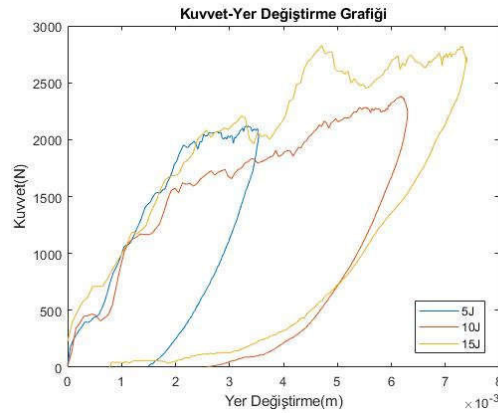


Şekil 4.5. %3 KNT-%1 NK katkılı numune için Kuvvet – Zaman grafiği

Şekil 4.5. de görüldüğü gibi %3 KNT-%1 NK takviyeli numuneye uygulanan kuvvet temas süresi artmış malzemede matris çatlakları homojen bir şekilde çoğalmış ve beklendiği gibi enerji seviyesi artırıldıkça matris çatlakları yoğunlaşmıştır. KNT takviyesinin oransal değeri arttıkça maksimum kuvvet artmakta ve malzeme daha kararlı hale gelmektedir.

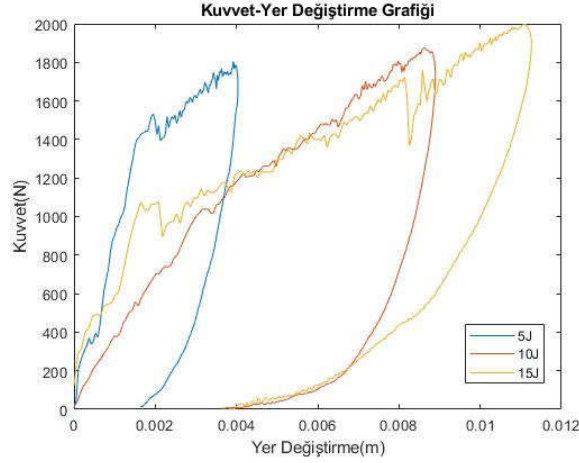
4.1.2.2. 5 J, 10 J ve 15 J Darbe Enerjileri İçin Kuvvet-Yer Değiştirme Grafikleri

Kuvvet-Yer değiştirme (deplasman) grafiği, numuneye uygulanan darbenin dinamik davranışını belirlenmede kullanılan grafiklerden bir diğeridir. Vurucu ucun darbe numunesine değmesiyle yer değiştirme başlar ve maksimum değere ulaşınca kadar devam etmektedir. Maksimum kuvvet değerine ulaşınca maksimum yer değiştirme değeri elde edilmektedir. Numunenin, darbe kuvvetine karşı gösterdiği direnç eğilme rijitliğini vermektedir. Diğer bir tanımlama ile kuvvet-yer değiştirme grafiğinde, yükselmenin olduğu eğrideki eğim, eğilme rijitliğidir. Numunedeki hasarlar eğilme rijitliğindeki eğimin değişmesi vermektedir. Salınımlar ve bükülme sertliğindeki değişiklikler numunedeki hasarı gösterir. Farklı enerji seviyelerinde düşük hızda darbeye maruz kalan nano takviyeli boruların eğilme rijitliklerinde ciddi değişimler olmaktadır (Kara, 2012). Kuvvet-yer değiştirme grafiğinde yükselmenin olduğu eğride, kuvvet bir değere geldiğinde, numunede hasar oluşmasıyla, eğilme rijitliğindeki ani bir azalma görülür (Şahin, 2011).



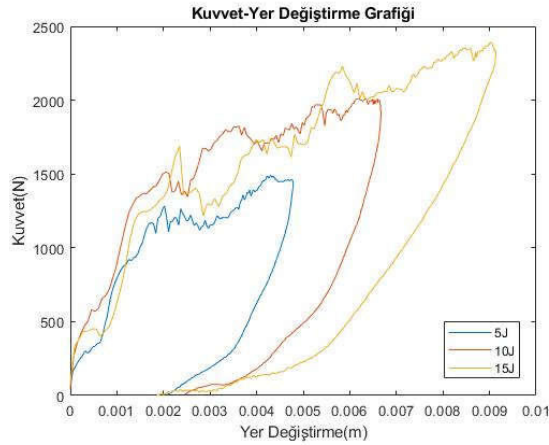
Şekil 4.6. Katkısız numune için kuvvet – yer değiştirme grafiği

Şekil 4.6. da görüldüğü gibi katkısız numuneye uygulanan kuvvet sonucu malzemede kalıcı yer değiştirme oluşmuş ve artan enerji seviyelerinde yer değiştirme miktarı artmıştır. Malzemede herhangi bir delinme oluşmamıştır.



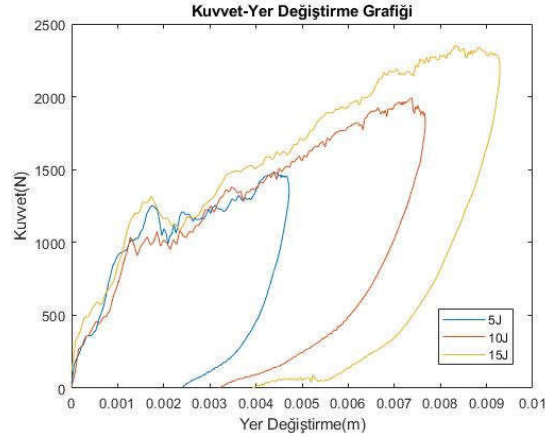
Şekil 4.7. %1 KNT-%1 NK katkıli numune için kuvvet – yer değiştirme grafiği

Şekil 4.7. de görüldüğü gibi %1 KNT-%1 NK katkıli numuneye uygulanan kuvvet sonucu malzemede kalıcı yer değiştirme oranları artmış ve 10-15J enerji seviyelerinde yer değiştirme miktarı sabitlenmiştir. Malzemede ciddi oranda matris kırıkları ve 15J enerji seviyesinde kısmi fiber kırıkları meydana gelmiştir.



Şekil 4.8. %1 KNT-%3 NK katkıli numune için kuvvet – yer değiştirme grafiği

Şekil 4.8. de görüldüğü gibi %1 KNT-%3 NK katkıli numuneye uygulanan kuvvet sonucu malzemede kalıcı yer değiştirmeler oluşmuş ve artan enerji seviyelerinde yer değiştirme miktarı hemen hemen birbirine yakın çıkmıştır. Ancak özellikle 10J enerji seviyesinde matris kırıkları yoğunlaşmış ve 15J enerji seviyesinde malzeme deformasyon bölgesi oldukça genişlemiştir.

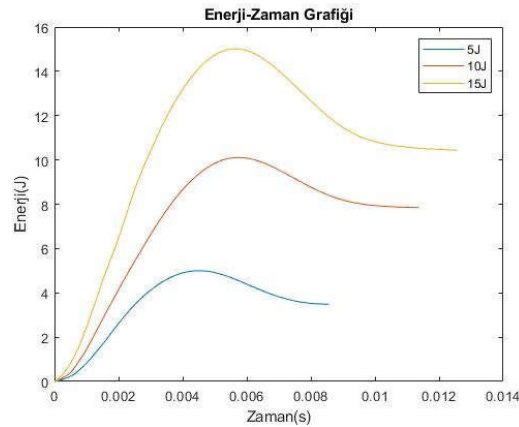


Şekil 4.9. %3 KNT-%1 NK katkılı numune için kuvvet – yer değiştirme grafiği

Şekil 4.9. da görüldüğü gibi %3 KNT-%1 NK katkılı numuneye uygulanan kuvvet sonucu malzemede kalıcı yer değiştirmeler oluşmuş ve artan enerji seviyelerinde yer değiştirme miktarı lineer olarak artmıştır. Malzeme uygulanan enerji seviyeleri yükseldikçe daha kararlı deformasyon tepkisine ulaşmıştır.

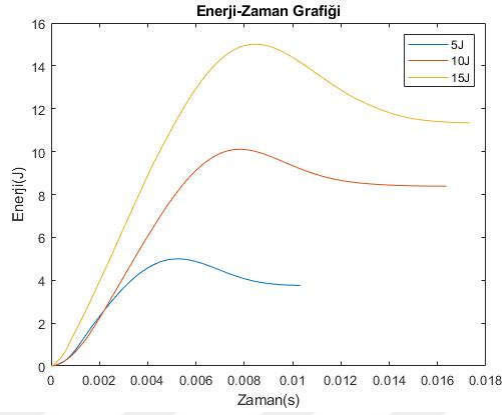
4.1.2.3. 5 J, 10 J ve 15 J Darbe Enerjileri İçin Enerji – Zaman Grafikleri

Şekil 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9’da elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiklerinin altında kalan alanlar, Excel VBA programı tarafından hesaplanmış ve çizelge haline getirilmiştir. Sonra bu çizelgedeki veriler kullanılarak enerji- zaman grafikleri Matlab’da çizdirilmiştir. Tüm numunelerde uygulanan enerji değerleri 5,10 ve 15 J, hesaplamalarda ve sonrasında grafiklerde (Şekil 4.10, 4.11, 4.12 ve 4.13) doğru bir şekilde görülmektedir.



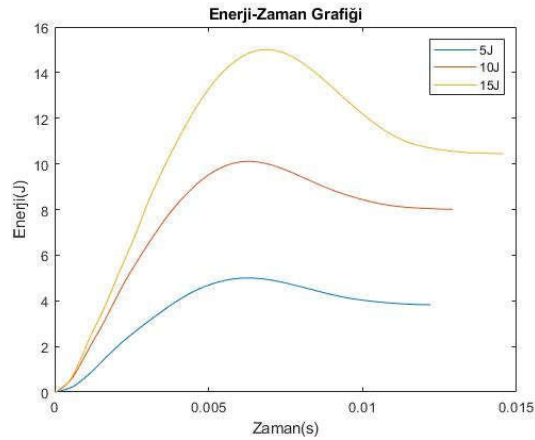
Şekil 4.10. Katkısız numune için enerji – zaman grafiği

Şekil 4.10. da görüldüğü gibi katkısız numuneye uygulanan enerji eşit süre içerisinde maksimum seviyeye ulaşmış ve geri tepme enerjisi lineer değişim göstermiştir. Artan enerji seviyelerinde herhangi bir değişim olmamıştır.



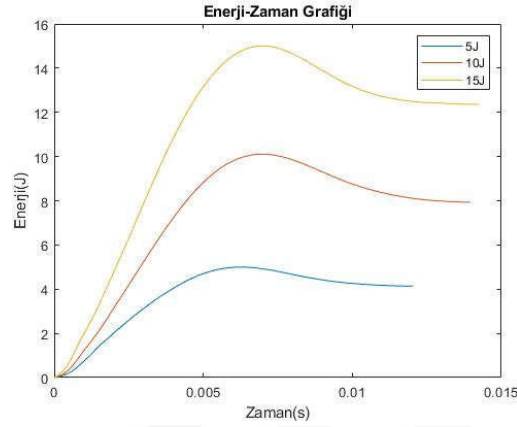
Şekil 4.11. %1 KNT-%1 NK katkılı numune için enerji – zaman grafiği

Şekil 4.11. de görüldüğü gibi %1 KNT-%1 NK katkılı numuneye uygulanan enerji artan enerji seviyelerinde daha uzun sürede maksimum seviyeye ulaşmış ve geri tepme enerjisi lineer değişim göstermiştir.



Şekil 4.12. %1 KNT-%3 NK katkılı numune için enerji – zaman grafiği

Şekil 4.12. de görüldüğü gibi %1 KNT-%3 NK katkılı numuneye uygulanan enerji artan enerji seviyelerinde daha uzun sürede maksimum seviyeye ulaşmış ve 15J enerji seviyesinde geri tepme enerjisi daha kısa sürede daha yüksek seviyede gerçekleşmiştir.

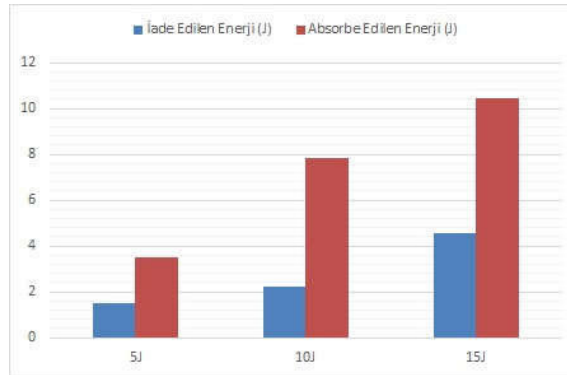


Şekil 4.13. %3 KNT-%1 NK katkılı numune için enerji – zaman grafiği

Şekil 4.13. de görüldüğü gibi %3 KNT-%1 NK katkılı numuneye uygulanan enerji artan enerji seviyelerinde daha uzun sürede maksimum seviyeye ulaşmış ve 15J enerji seviyesinde geri tepme enerjisi daha kısa sürede daha yüksek seviyede gerçekleşmiştir.

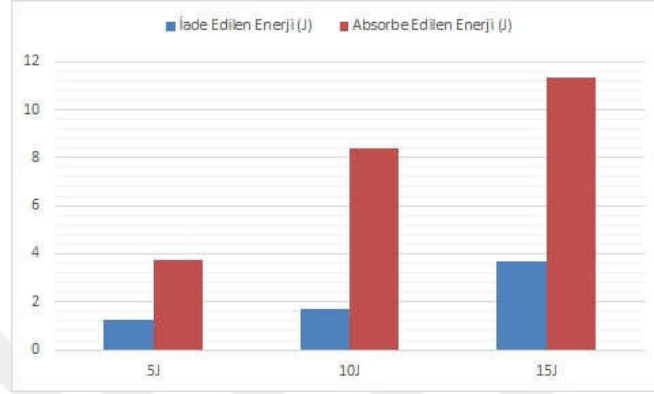
4.1.2.4. 5 J, 10 J ve 15 J Darbe Enerjileri İçin Absorbe edilen Enerji – Geri verilen Enerji Grafikleri

Kuvvet-yer değiştirme grafiğinin altındaki alan, numune üzerinde yapılan işi gösterir. Numuneye uygulanan darbe enerjisinin hepsi yutulan (absorbe) edilen enerji değildir. Absorbe enerji numune tarafından yutulur, sıçrama (geri sekme) enerji ise vurucu ucun yani darbenin geri çekilmesini sağlayan enerjidir.



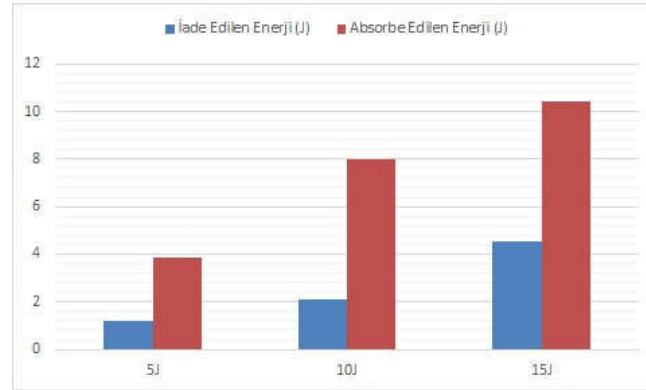
Şekil 4.14. Katkısız numune için yutulan enerji – geri tepme enerjisi grafiği

Şekil 4.14. de görüldüğü gibi katkısız numunede artan darbe enerji seviyelerinde yutulan enerji artmakla beraber daha yüksek oranda enerji malzeme tarafından iade edilmiştir.



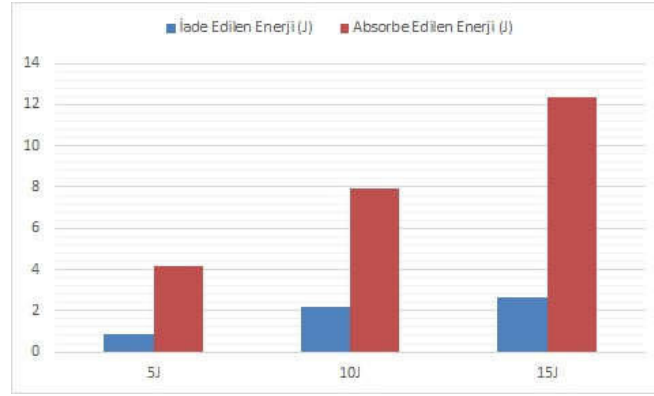
Şekil 4.15. %1 KNT-%1 NK katkılı numune için yutulan enerji – geri tepme enerjisi grafiği

Şekil 4.15. de görüldüğü gibi %1 KNT-%1 NK katkılı numunede artan darbe enerji seviyelerinde geri tepme enerjisi daha az artmakta yutulan enerji miktarı ise matris ve fiber kırıklıklarından dolayı daha yüksek oranda artmıştır.



Şekil 4.16. %1 KNT-%3 NK katkılı numune için yutulan enerji – geri tepme enerjisi grafiği

Şekil 4.16. da görüldüğü gibi %1 KNT-%3 NK katkılı numunede artan darbe enerji seviyelerinde yutulan enerji lineer olarak yükselmiş iade edilen enerji ise yine matris ve fiber kırıklıklarından dolayı lineer olarak artmıştır.



Şekil 4.17. %3 KNT-%1 NK katkılı numune için yutulan enerji – geri tepme enerjisi grafiği

Şekil 4.16. da görüldüğü gibi %3 KNT-%1 NK katkılı numunede artan darbe enerji seviyelerinde yutulan enerji lineer olarak oldukça fazla yükselmiş, iade edilen enerji ise çok az artmıştır. Bu da KNT takviyesinin malzeme mukavemetini ve gevrekliğini artırmasının bir sonucudur.

4.2. Dijital Mikroskop ve SEM ile Nano Takviyesiz ve Takviyeli Boru Numunelerinin Detaylı Görüntülenmesi

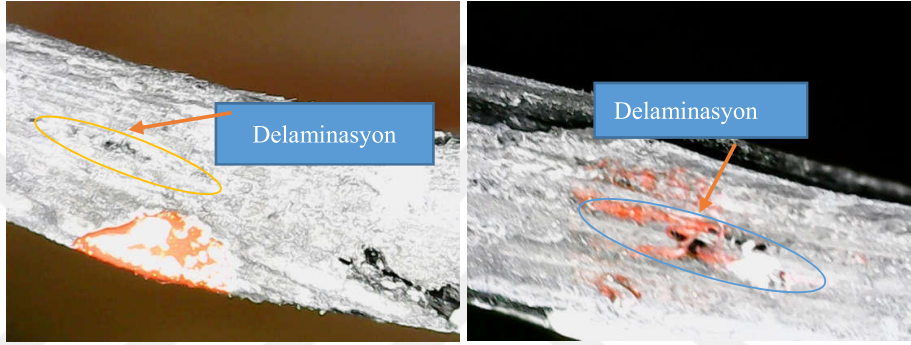
Şekil 4.18 ve 4.19 da görüldüğü gibi malzemelerin boyutlarını 1600 katına kadar büyütebilen dijital mikroskop kullanılmıştır. Mikroskop görüntüyü, bilgisayar yollamakta ve bir program yardımıyla büyütülmüş görüntünün ekranda görünüşü fotoğraf olarak saklanabilmektedir.



Şekil 4.18. Karbon fiber kumaşın Dijital Mikroskop görüntüsü (Ölçek 1mm).



Şekil 4.19. Karbon fiber kumaşın Dijital Mikroskop görüntüsü (Ölçek 1mm)



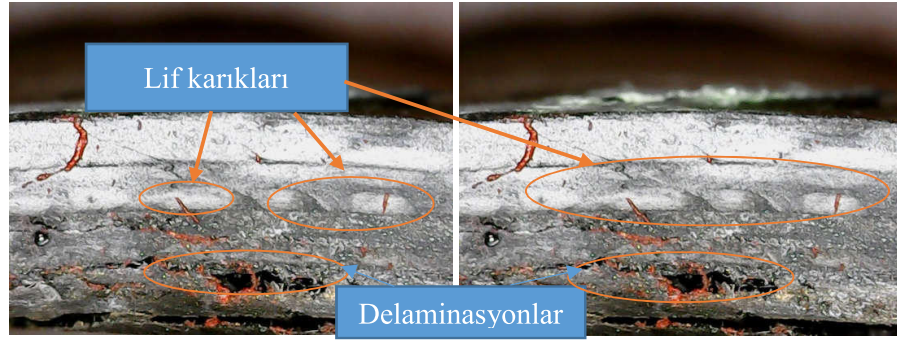
Şekil 4.20. Katkısız kompozit boru, 5 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü.

5 J enerji seviyesinde malzemede kısmi delaminasyonlar meydana gelmiştir.



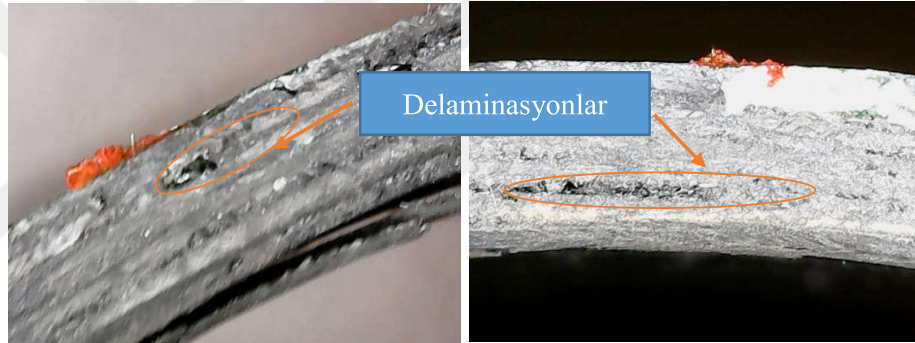
Şekil 4.21. Katkısız kompozit boru 10 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü.

10 J enerji seviyesinde delaminasyon miktar ve boyları artmıştır.



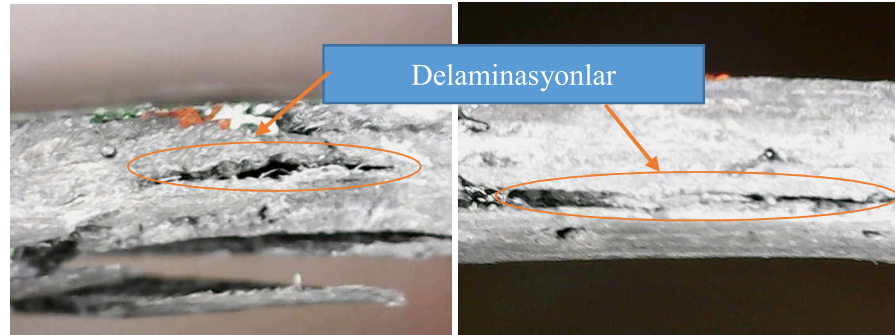
Şekil 4.22. Katkısız kompozit boru 15 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü.

15 J enerji seviyesinde ise lif kırıkları artmış ve delaminasyonlar tabaka ayrılmasını sonuç vermiştir.



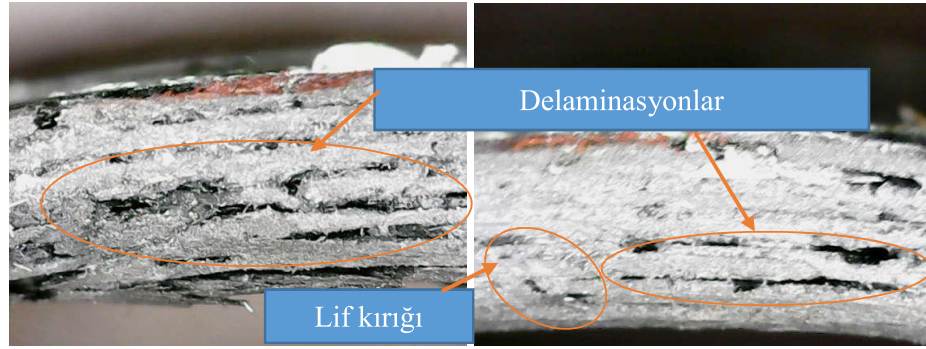
Şekil 4.23. %1 KNT-%1 NK katkılı kompozit boru 5 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü.

5 J enerji seviyesinde bu katkı oranlarında delaminasyonlar daha belirgindir.



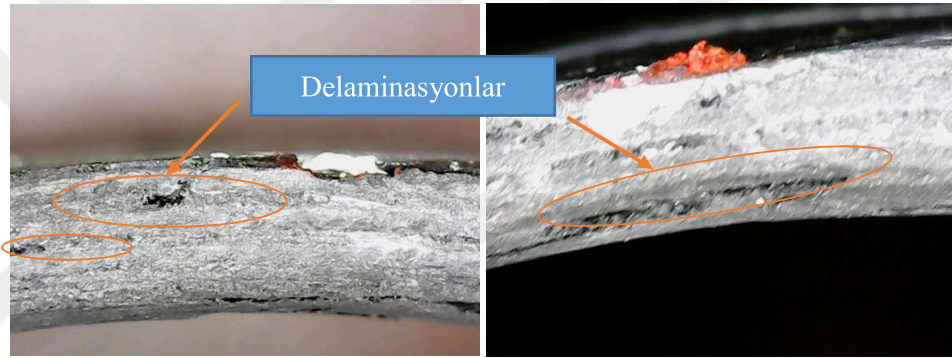
Şekil 4.24. %1 KNT-%1 NK katkılı kompozit boru 10 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü.

10 J enerji seviyesinde ise delaminasyonlar tabaka ayrılmasına kadar büyümüştür

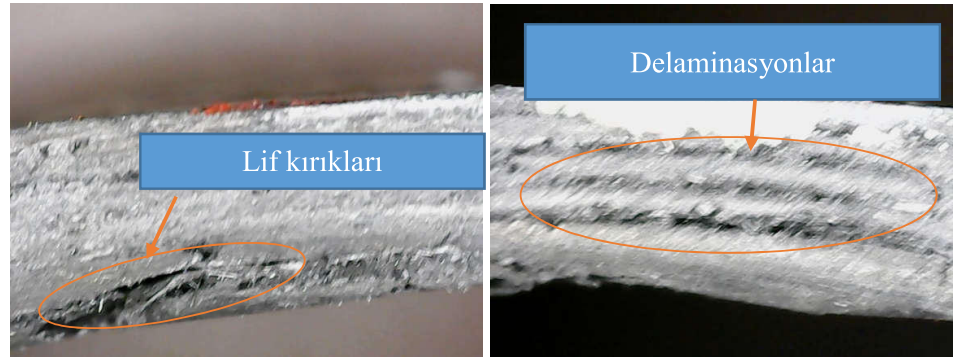


Şekil 4.25. %1 KNT-%1 NK katkılı kompozit boru 15 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü

15 J enerji seviyesinde ise lif kırıkları ile deformasyon ilerlemiştir.

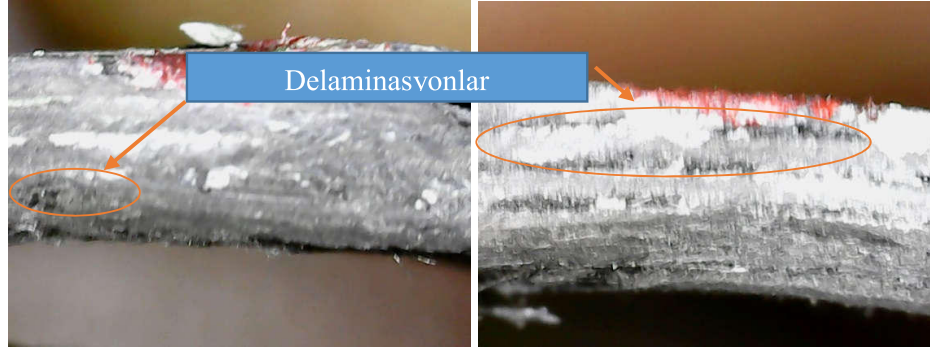


Şekil 4.26. %1 KNT-%3 NK katkılı kompozit boru 5 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü



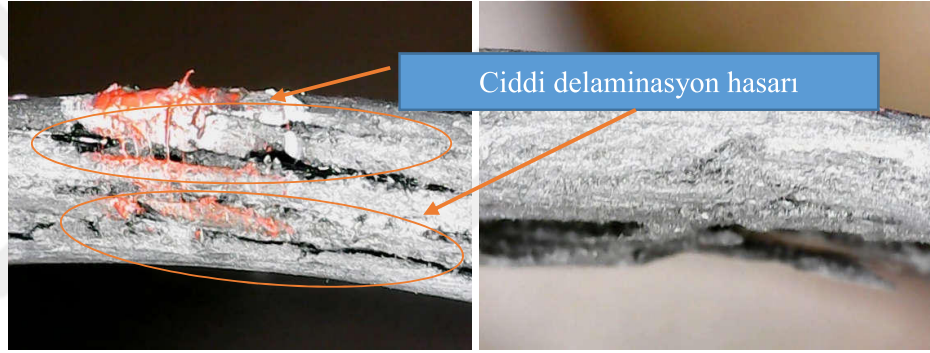
Şekil 4.27. %1 KNT-%3 NK katkılı kompozit boru 10 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü

Bu enerji seviyelerinde delaminasyon yoğunluğu artmış ve lif kırıkları başlamıştır.



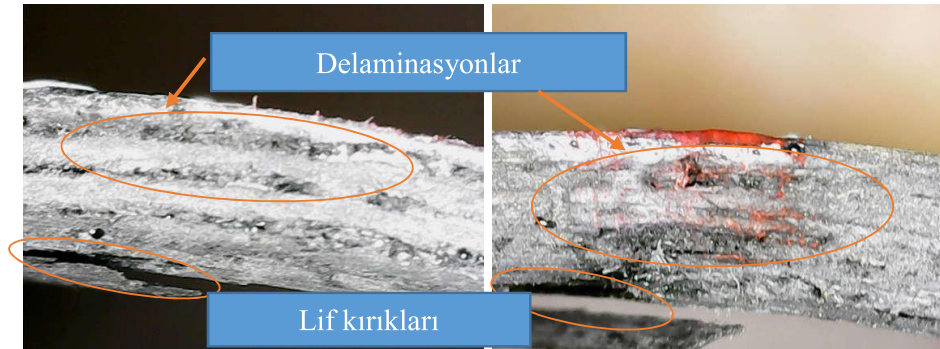
Şekil 4.28. %1 KNT-%3 NK katkıli kompozit boru 15 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü

15 J enerji seviyesinde numunede delaminasyon dışında herhangi bir belirgin hasara rastlanmamıştır.



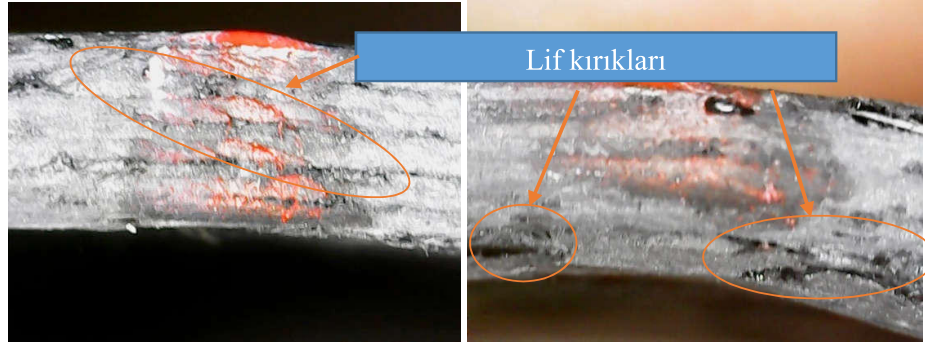
Şekil 4.29. %3 KNT-%1 NK katkıli kompozit boru 5 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü

Bu katkı oranlarında malzeme ciddi delaminasyon hasarına uğramıştır.



Şekil 4.30. %1 KNT-%3 NK katkıli kompozit boru 10 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü

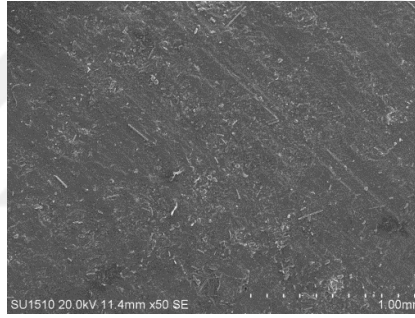
10 J enerji seviyesinde delaminasyonlar yayılmış, lif kırıkları baş göstermiştir.



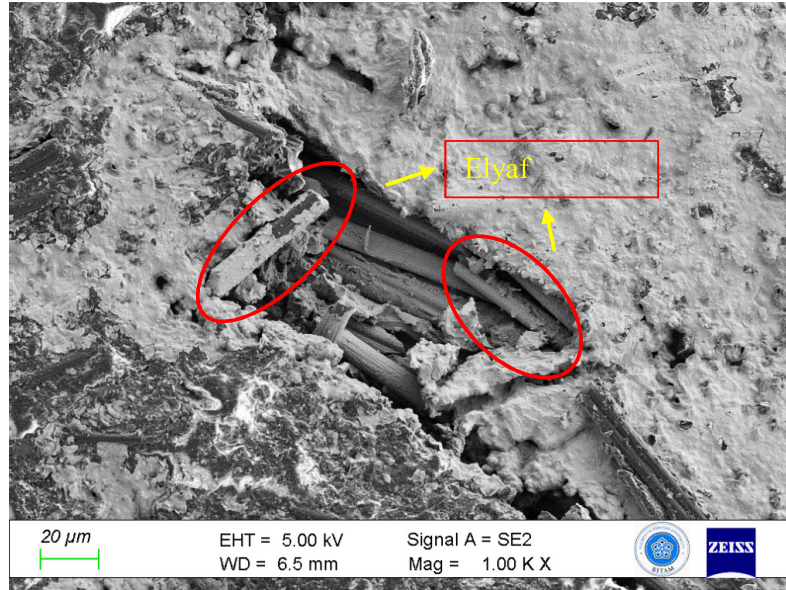
Şekil 4.31. %1 KNT-%3 NK katkılı kompozit boru 15 J enerji seviyesi darbe testi sonrası yandan kesit dijital mikroskop görüntüsü

Beklendiği gibi 15 J enerji seviyesinde lif kırıkları yoğunlaşmıştır.

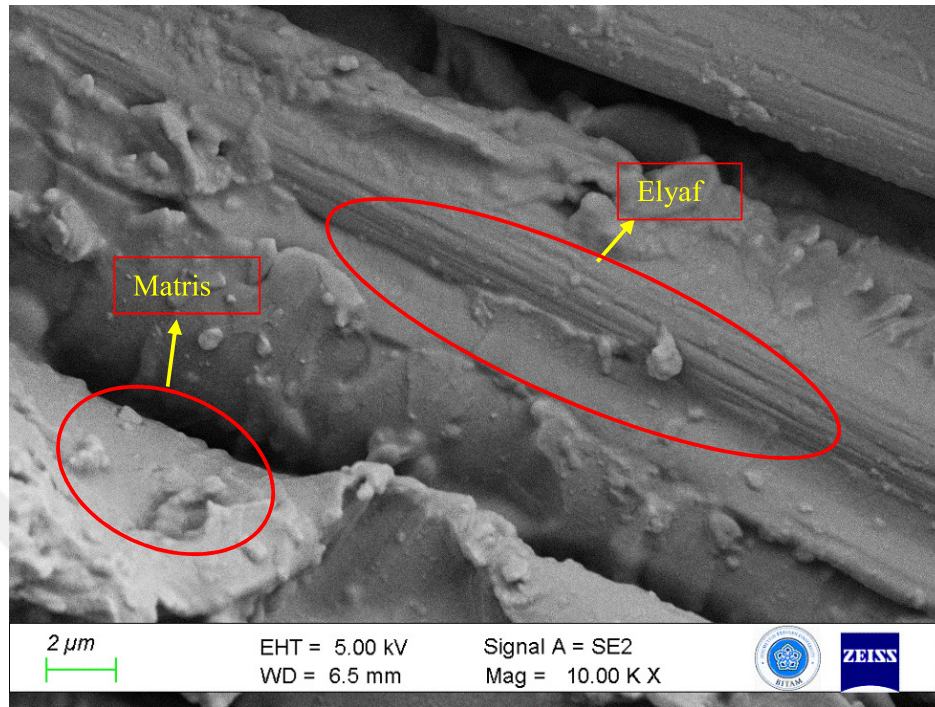
SEM Görüntüleri:



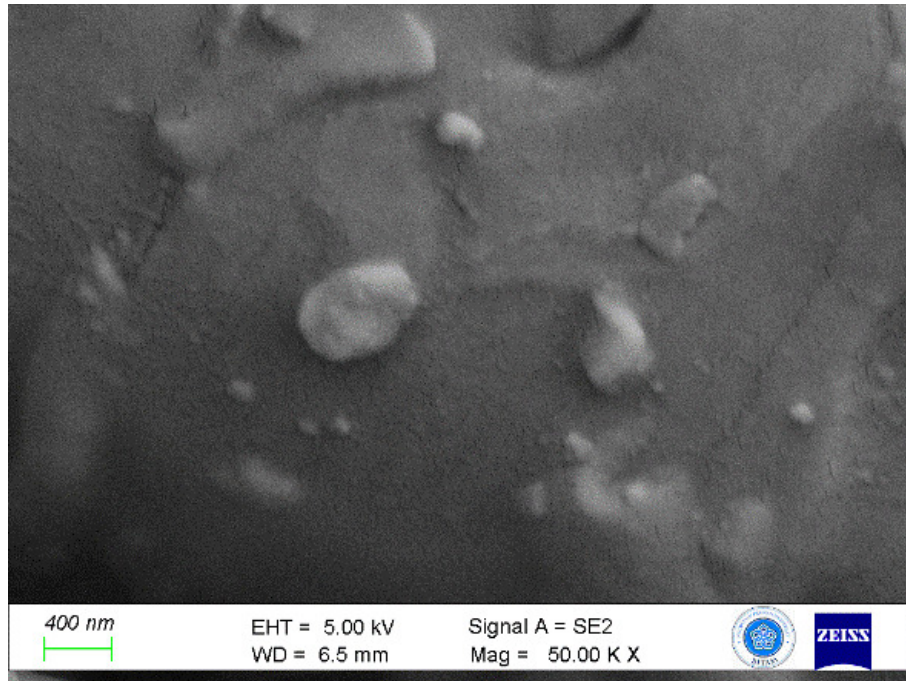
Şekil 4.32. Katkısız numune kompozit boru hasarsız SEM görüntüsü



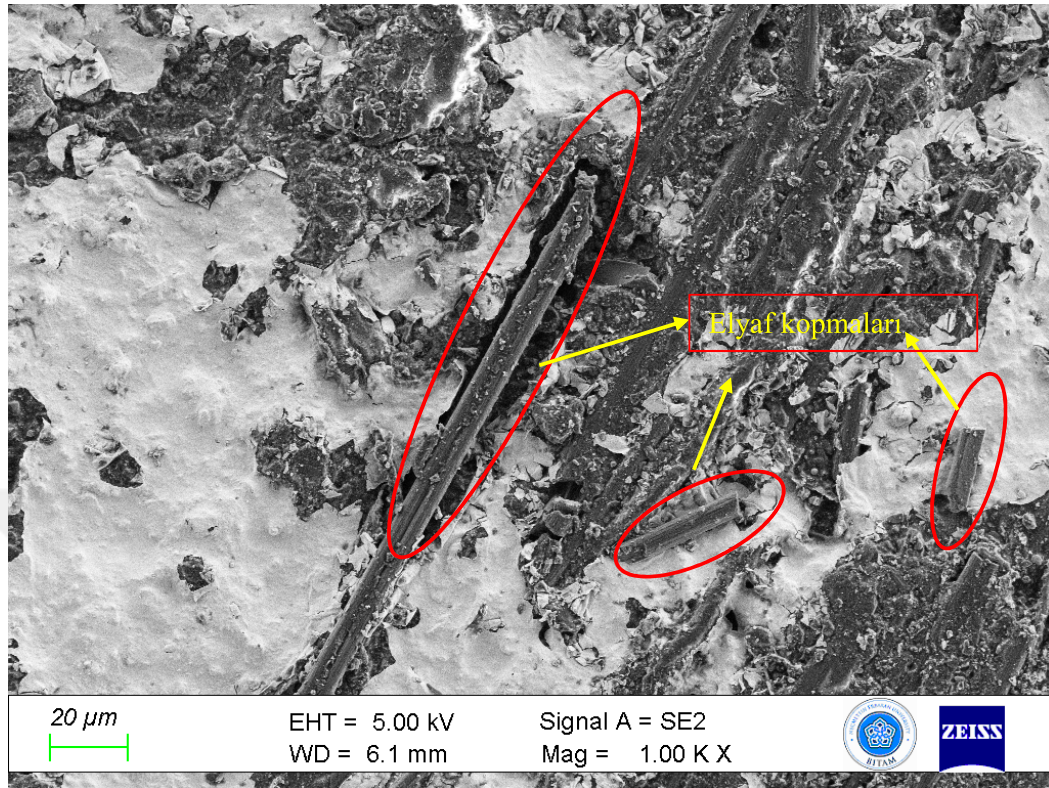
Şekil 4.33. Katkısız numune kompozit boru SEM görüntüsü



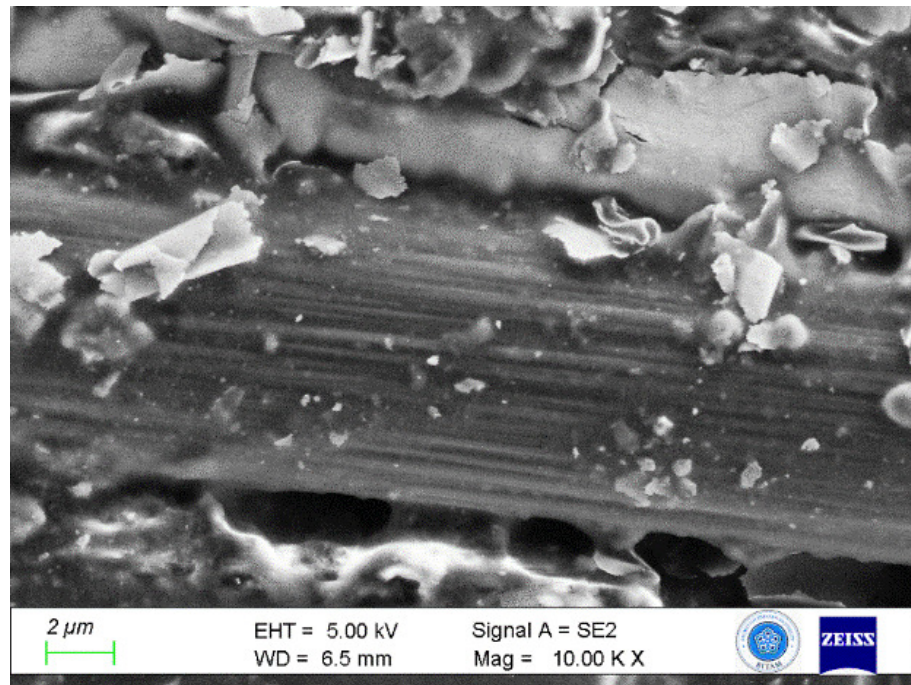
Şekil 4.34. Katkısız numune kompozit boru 15 J darbe enerjisi SEM görüntüsü.



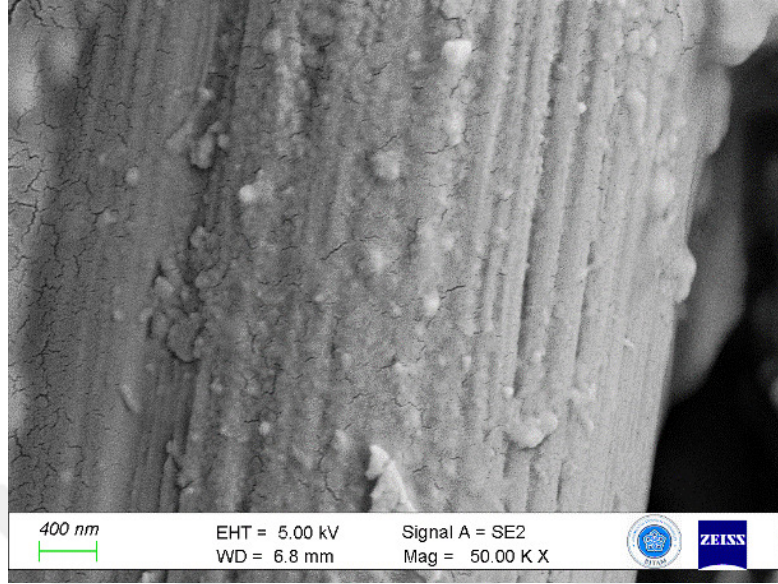
Şekil 4.35. Katkısız numune kompozit boru 15 J darbe enerjili SEM görüntüsü.



Şekil 4.36. %1 KNT-%1 NK katkılı numune kompozit boru darbe enerjisi uygulanmamış SEM görüntüsü

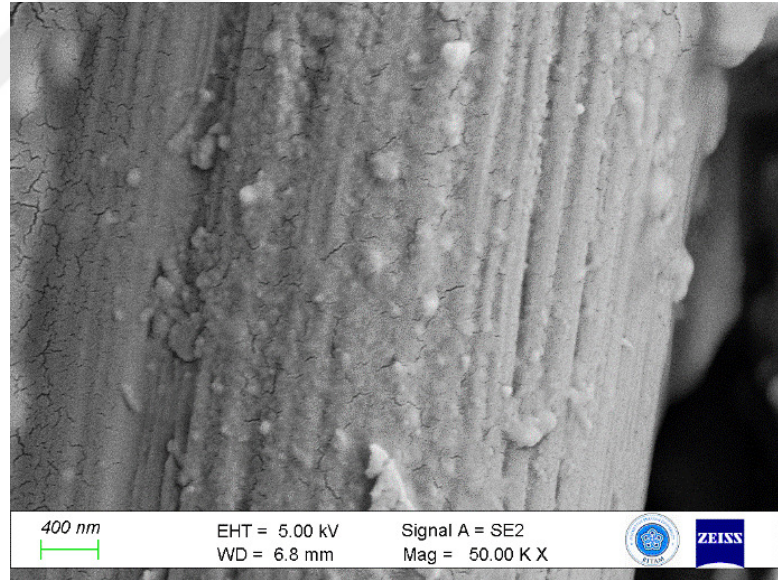


Şekil 4.37. %1 KNT-%1 NK katkılı kompozit boru 15 J darbe enerjili SEM görüntüsü.



Şekil 4.38. %1 KNT-%1 NK katkılı kompozit boru 15 J darbe enerjili SEM görüntüsü.

Sol taraftaki kılcal damarlar nanotüp ve iri parçacıklar nano kil.



Şekil 4.39. %3 KNT-%1 NK katkılı kompozit boru 15 J darbe enerjili SEM görüntüsü.

Sol taraftaki kılcal damarlar nanotüp ve iri parçacıklar nano kil.

4.3. Yakma Testi

Nano takviyeli boru kompozit boru numunelerine ait elyaf hacim oranlarının belirlenmesi için ASTM D 2584 standardına göre yakma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yakma deneylerinde kullanılmak üzere karbon kumaştan imal edilmiş kompozit

borulardan dört adet yakma deney numunesi kesilmiştir (Şekil 4.40). Yakma numunelerinin ilk olarak boyutlarından hacimleri hesaplanmış, sonra da hassas terazi kullanılarak kütleleri tartılmıştır. Yakma numuneleri sıcaklığı 600 ° C olan fırında reçine tamamen yanınca kadar bekletilmiştir (Şekil 4.41, 4.42, 4.43). Yakma işlemi sonrası geriye sadece cam elyaf kalmıştır (Şekil 4.44). Hassas terazide tartılarak her bir yakma numunesine ait cam elyafın kütlesi belirlenmiştir (Şekil 4.44). Daha önce elyaf ve reçinenin toplam kütlesi bilindiği için, toplam kütleden elyafın kütlesinin çıkarılması ile reçine kütlesi tespit edilmiştir (Çizelge 4.2).

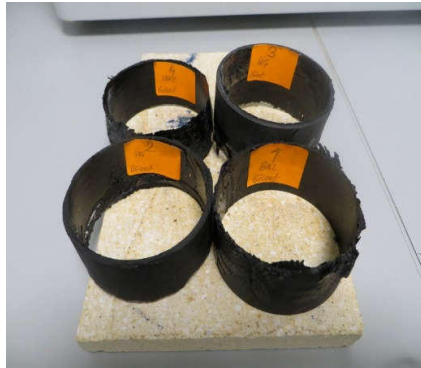
Çizelge 4.2. Yakma Testi sonuçları.

	İlk Tartım (gr)	Yakma Testi Sonrası (gr)
Katkısız numune	28,1600	11,5818
%1 KNT-%1 NK katkılı numune	27,0259	14,2236
%1 KNT-%3 NK katkılı numune	26,7351	14,0491
%3 KNT-%1 NK katkılı numune	23,2776	12,8976

ASTM D 2584 standardına göre yakma numunelerine ait elyaf hacim oranı değerleri Denklem 4.3 ile belirlenir:

$$V_f = (W_f / \rho_f) / (W_c / \rho_c) \quad (4.3)$$

Burada W_f elyafın, W_c kompozitin kütlesi ve ρ_f elyafın, ρ_c kompozitin yoğunluğudur.



Şekil 4.40. Yakma testi için numunelerden kesilen parçalar.



Şekil 4.41. Yakma fırını.



Şekil 4.42. Numunelerin 600 °C 'de tek tek yakılması işlemi için fırına konulması.



Şekil 4.43. Numunelerin 600 ° C yakılması işlemi.



Şekil 4.44. Numunelerin yakma testinden sonraki hali ve hassas terazide tartılması

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Şekil 4.2.'den 4.5'e kadar 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerjilerinde elde edilen temas kuvveti-zaman değişiminin tıktırtı eğrisi şeklinde olduğu görülmektedir. Her eğimli yük, elde edilen maksimum kuvvet değerinde bir artışa ve ayrıca boşaltmada bir azalma kısmına sahiptir. Tüm grafikler, numune ile temas ettikten sonra numune yüzeyinden geri dönen vurucu tarafından oluşturulmuştur. Yani uygulanan darbe enerjisinin çoğu numune tarafından absorbe edilmiştir. Emilen enerjinin geri kalanı, darbe ucunu geri döndürmek için kullanılmıştır.

Kuvvet-yer değiştirme eğrisinin artan kısmındaki eğim, numunenin darbe yüküne karşı direncinden dolayı eğilme rijitliği olarak adlandırılır (Şekil 4.6'dan Şekil 4.9'a). Salınımlar ve bükülme sertliğindeki değişiklikler numunedeki hasarı gösterir. Farklı enerji seviyelerinde düşük hızda darbeye maruz kalan hibrit nano takviyeli boruların eğilme rijitliklerinde ciddi değişimler olmaktadır. %1 KNT-%1 NK katkılı, yer değiştirmelerde tüm enerji seviyelerini ciddi şekilde azaltır. Kuvvet-yer değiştirme grafiğinin altındaki alan, numune üzerinde yapılan işi (numunede emilen enerji) verir. Darbe enerjisi arttıkça kuvvet-yer değiştirme eğrisi altında kalan alan artar ve buna bağlı olarak numune yön değiştirir. Bu durum Şekil 4.6'dan 4.9' e açıkça görülmektedir ve emilen enerji miktarının da arttığını göstermektedirler.

Şekil 4.10' dan 4. 13' e kadar malzemeye uygulanan enerjinin zaman skalasında daha geniş bir skalada enerji uygulandığı görülmektedir. Bu da numunelerin Nk oranı azaldıkça mukavemet ve maks. kuvvet değerlerinin arttığını ve malzemenin darbe enerjisine daha fazla cevap verdiği şeklinde yorumlanabilir.

Şekil 4.14'ten 4.17'e kadar yutulan ve geri verilen enerji miktarlarını göstermektedir. Buna göre katkısız numunelerle karşılaştırıldığında %3 KNT - %1 NK katkılı numunede mukavemet artışı ve malzeme iade edilen enerji miktarı açısından değerlendirildiğinde en ideal katkı oranı olduğu tespit edilmiştir.

5.2 Öneriler

Kompozit kumaşın sarıldığı kalıptan daha kolay ayrılması için kalıp yüzeyinin gres yağı ile iyi şekilde yağlanması gerekmektedir. İmalat vakum altında ve normal oda sıcaklığında yapıldığından, kalıba sıkı şekilde oturma olmaktadır. Matris olan epoksi

reçinenin hesaplanandan biraz fazla konulması, imalat sonrası yüzey düzeltmede kolaylık sağlamaktadır, eğer reçine az olursa kumaş yüzeyi liflerine ayrılabilir. Kısaca malzeme üretim parametrelerinde daha hassas olmak gereklidir.

Darbe deneyinde, enerji seviyelerinin yüksek değerlerde de olması toplanan verilerin daha sağlıklı olmasını sağlayabilir. Darbe deneyi sırasında numunenin yerleştirildiği yatağın boru geometrisine uygun olmasına dikkat edilmelidir. Çünkü, darbe testi yapılan cihazlar çoğunlukla lamine levhalar için hazırlanmıştır.

Dijital mikroskop görüntüleri, hasarsız ve hasarlı parçaların yüzeyleri, yandan kesitleri için net görüntüler ortaya koymaktadır. Mutlaka dijital mikroskopla çalışılmalıdır. Ama nano boyut için de SEM görüntüleri bilgilendirici olmaktadır.

Bundan sonraki aşamada darbe hasarına uğramış boruların, yama yapılarak patlatma testi uygulanması amacı vardır.

6. KAYNAKLAR

- Acatay,K., 2017,Carbon fibers,Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites, M. Özgür Seydibeyoğlu, Editor, *Wood-head*,USA, Chapter 6.
- Askeland, D. R. ,1996,The Science and Engineering of Materials, 3rd Ed. SI,Springer Science,5
- www.basfiber.com, 2021, Basalt fiber [online], basfiber.com [Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2021].
- Beşergil, B., 2021, Kompozitler [e-kitap, online] ,http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/kompozitler_18.html [Ziyaret Tarihi: 17 Eylül 2021]. 116
- Carey, J. P., 2016, Handbook of Advanced in Braided Composite Materials Theory, Production, Testing Application,3.
- Chawla,K.K.,2019,Composite Materials Science and Engineering,4th.ed., Springer,4,17,78,
- Cihangir, E., 2003, Tekstil ve Hazır giyimde Kullanılan İngilizce-Almanca-Türkçe Terimler, İTKİP.
- Chung, D. L.2003, Composite Materials Functional Materials for Modern Technologies Springer, 17.
- Chung, D.D.L., 2001,Applied Materials Science Applications of Engineering materials, CRC ,USA, Appendix J.
- Chung, D. D. L., 2006, The Road to Scientific Success, World Scientific, USA,12.
- Hull, D., 1996, An Introduction to Composite Materials ,2nd.ed.,3.
- Hoa, S.V., 2009, Principles of the Manufacturing of Composite Materials, (DEStech Publications, USA, 45.
- Jawaid, M., 2019, Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced, Hybrid Composites, Woodhead Publishing, UK171-191.
- Kara, M.,2012, Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama ile Tamir Edilmiş Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya.
- Karaoğlu,B.,2021, Effect of Mechanical Properties on Carbon Nanotubes, Nanoclays Reinforced Epoxy Carbon Fabric Composite Pipes, European Journal of Science and Technology Special Issue 28, 198-206.
- Kurtuluş, C.,2020, Epoksi Reçinelerin Foto polimerizasyon Kürlenmesi Kompozitlerde Kullanımı, [online], <https://www.turkchem.net/epoksi-recinelerin-fotopolimerizas>

yon-ile-kurlenmesi-ve-kompozitlerde-kullanimi.html [Ziyaret Tarihi: 10 Kasım 2021]

Kutz,M.,2015, Mechanical Engineers' Handbook.,4th. Edition ,Volume 1, Myer Kutz (ed.), Four Volume Set,Wiley,315

Kayıran, E., 2009, Malzeme Teori ve Pratik,Hatay,i.

Khan, A.,2020, Hybrid Fiber Composites Materials, Manufacturing, Process Engineering, Wiley,7

Klopsteg, P.E., 1987, Turkish Archery and the Composite Bow (Simon Archery Foundation ,36-54

Kompozit Sanayicileri Derneği,2019, Potential of Basalt Fiber Composites [online], <https://kompozit.org.tr/tr/potential-of-basalt-fiber-composites/> [Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2021].

Kumar, B., 2017, Textiles for Advanced Applications , 31,

Lewis, R. J.,2007,Hawley's Condensed Chemical Dictionary, 15th. Edition , Wiley, USA,342,1010

Loades, M., 2016,The Composite Bow (Weapon 43) ,Osprey,6-35

Mallick , P. K.,1997, Composites Engineering Handbook ,3

McDonald,J.,2021, Understanding wear characteristics of basalt fiber reinforced polymers [online], <https://ceramics.org/ceramic-tech-today/basic-science/understanding-wear-characteristics-of-basalt-fiber-reinforced-polymers> [Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2021].

Miracle, D., 2001,ASM Handbook Vol. 21 Composites,39.

Morgan, P., ,2005,Carbon Fibers and Their Composites ,CRC Press,USA, 501-549.

Naumann, R. J., ,2008,Introduction to the Physics and Chemistry of Materials, 203.

Olabisi, O. ,2016, Handbook of Thermoplastics, CRC Press,USA,xi.

Palucka, T. and Bensaude-Vincent, B., Composites Overview [Online], http://authors.library.caltech.edu/5456/1/hrst.mit.edu/hrs/materials/public/composites/Composites_Overview.htm [Ziyaret Tarihi: 25 Eylül 2021].

Perez, L., 2021,Recycling Thermoset Epoxy Resin Using Alkyl-Methyl-Imidazolium,R. L. Perez , ACS Appl. Polym. Mater., October 11,1

Resin matrices for composites (Material & Processes_ Resin matrices for composites _ CompositesWorld 2016 , <https://www.compositesworld.com/articles/the-matrix> [Ziyaret Tarihi: 16 Kasım 2021]

Tufar, W., 2005, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 6e, Volume 32, Silicates, 46.

Saçak, M. Lif ve Elyaf Kimyası (Gazi Kitabevi, Ankara, 2002) 163, 164

Şahin, A., 2011, Düşük Hızlı Darbe Görmüş Filaman Sarım E-Camı/Epoksi Boruların İç Basınç Altında Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2011, 38

Şahin, Y., 2000, Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, Ankara, 40, 65-66, 79-81

Shackelford, J. F., 2015, Introduction to Materials Science for Engineers, 8th edit., 384

Shreve Chemical Process Industries, Fifth Ed., Randolph Shreve (1984) , Page 684,

wikipedia.org, 2021, Basalt Fiber [online] , https://en.wikipedia.org/wiki/Basalt_fiber#cite_note-11 [Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2021].

Willie, G., 2010, A Comprehensive Dictionary of Chemistry, 38, 189