



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN NİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**TABAKALI PREPREG KOMPOZİTLERDE KARBON
NANOTÜP TAKVİYESİ İLE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN OPTİMİZASYONU**

Mevlüt KUMDERE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2020
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mevlüt KUMDERE tarafından hazırlanan “Tabakalı Prepreg Kompozitlerde Karbon Nanotüp Takviyesi ile Mekanik Özelliklerinin Optimizasyonu” adlı tez çalışması 30/01/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYRICI

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ

İmza

.....

.....

.....

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

Prof. Dr. Süleyman Savaş DURDURAN
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından 191331001 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.

Mevlüt KUMDERE

Tarih: 30.01.2020

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TABAKALI PREPREG KOMPOZİTLERDE KARBON NANOTÜP TAKVİYESİ İLE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN OPTİMİZASYONU

Mevlüt KUMDERE

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYRICI

2020, 102 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYRICI
Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ

Bu çalışmada, karbon nanotüp takviyesinin önceden reçine emdirilmiş kullanıma hazır karbon kumaş prepreg kullanılarak üretilen karbon nanotüp takviyeli ve takviyesiz karbon kompozit levhaların mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Üretilen karbon levha malzemelerde prepreg kullanımın amacı fiber-matris hacimsel konsantrasyonunun maksimize edilmesi ile mekanik, termal ve kırılma yüzeylerinin karakterizasyonunun belirlenmesidir. Karbon levha üretiminde prepreg malzemenin yanısıra nanotüp katkı ara yüzey oluşturulması amacı ile prepreg malzemelerin arasına otoklav reçinesinden nanotüp katkılı ince film meydana getirilmiştir. Bu şekilde prepreg levhalar arasında daha iyi bir ara yüzey etkileşimi oluşturulmaya çalışılmıştır. Karbon levha üretim sürecinde vakum torbalama yöntemi ile yüksek sıcaklık ve dış basınç kontrolü sağlayan endüstriyel otoklav kullanılmıştır. Bu yöntemin amacı malzeme üzerine açık hava basıncından daha yüksek dış basınç ve vakum uygulayarak malzeme içerisinde hava ve uçucu gaz boşluklarının önlenerek daha kaliteli malzeme üretimidir. Otoklavda belirli sıcaklık ve dış basınç ortamında malzeme kürlenerek doğal soğumaya bırakılmıştır. Araştırmada çok duvarlı karbon nanotüp katkı oranı literatüre uygun olarak ağırlıkça % 0,3 belirlenmiştir. %0.3 Karbon Nanotüp katkısının akma mukavemeti, elastisite modülünde artış darbe hasarında azalma meydana getirdiği bilindiğinden bu özelliklerin prepreg malzeme kullanımında ne kadar değiştiği araştırılmıştır. Bu çalışma çerçevesinde gerçekleştirilen üretim sonucunda kompozitlerde karbon nanotüp ile matris modifikasyonu işleminin mekanik performans özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Kompozitlerde karbon nanotüp ile matris modifikasyonu işleminin mekanik performans özellikleri ASTM uluslararası standart prosedürleri kullanılarak çekme ve darbe testleri ile araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çok Duvarlı Karbon Nanotüp, Darbe Testi, Otoklav Reçinesi, Prepreg Malzeme

ABSTRACT

MS THESIS

Optimization of Mechanical Properties of Layered Prepregated Composites by Carbon Nanotube Reinforcement

Mevlüt KUMDERE

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYRICI

2020, 102 Pages

Jury

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYRICI
Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ

In this study, the effect of carbon nanotube reinforcement on the mechanical properties of carbon nanotube reinforced and non-reinforced carbon composite plates produced using pre-resin impregnated ready-to-use carbon fabric prepreg was investigated. The purpose of prepreg use in produced carbon plate materials is to determine the characterization of mechanical, thermal and fracture surfaces by maximizing fiber-matrix volumetric concentration. In the production of carbon sheets, nanotube-doped thin film was created from autoclave resin between the prepreg materials in order to create nanotube-doped decadents in addition to prepreg material. In this way, a better interfacial interaction between prepreg decks was attempted. Industrial autoclave, which provides high temperature and external pressure control with vacuum bagging method, was used in the production process of carbon sheet. The purpose of this method is to produce higher quality material by applying higher external pressure and vacuum than open air pressure and preventing air and volatile gas gaps in the material. In autoclave, the material is cured in a specific temperature and external pressure environment and allowed to cool naturally. The contribution rate of multi-wall carbon nanotube was determined 0.3% by weight in accordance with the literature. Since the yield strength of 0.3% carbon nanotube additive is known to result in an increase in the modulus of elasticity resulting in a decrease in impact damage, it has been investigated how much these properties vary in prepreg material use. The effect of Matrix modification with carbon nanotube on mechanical performance properties in composites was investigated as a result of the production carried out within the framework of this study. The Mechanical performance properties of Matrix modification process with carbon nanotube in composites have been investigated using tensile and impact tests in line with ASTM International standard procedures.

Keywords: Autoclave Resin, Multi-Wall Carbon Nanotube, Impact Testing, Prepreg Material

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans tez çalışmamda yapılan üretimlerde ve testlerdeki katkılarından dolayı danışman hocam **Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Kayırcı**'ya teşekkür eder, tez çalışmam boyunca desteklerini esirgemeyen Necmettin Erbakan Üniversitesi Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi Dekanı **Prof. Dr. Hüseyin Arıkan**'a teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca destek sağlayan **Eti Alüminyum A.Ş.**'ye teşekkür ederim.

Son olarak eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi olarak hiçbir zaman desteğini esirgemeyen aileme teşekkürü borç bilirim.

Mevlüt KUMDERE
KONYA-2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	2
3. GENEL BİLGİ.....	6
3.1. KOMPOZİT MALZEMELER	6
3.1.1. Kompozitlerin Avantajları	7
3.1.2. Kompozit Kullanmanın Metallere Göre Avantajları	7
3.1.3. Kompozitin Mekanik Avantajı	8
3.1.4. Karbon Fiber Takviyeli Polimer Üretim Teknikleri	9
3.1.4.1. El Yatırma (Hand Lay-Up) Yöntemi.....	9
3.1.4.2. Püskürtme.....	10
3.1.4.3. Profil Çekme (Pultrüzyon).....	10
3.1.4.4. Otomatik Filament Sarımı.....	11
3.1.4.5. Vakum Torbalama Metodu.....	11
3.1.4.6. Vakum İnfüzyon Metodu.....	12
3.1.5 Kompozitlerin Endüstriyel Kullanıma Dönüşmesi	13

3.2. KARBON NANOTÜPLER.....	14
3.2.1. Karbon Nanotüp Yapısı	14
3.2.2. Karbon Nanotüplerin Sınıflandırılması	16
3.2.2.1. Tek Duvarlı Karbon Nanotüpler.....	17
3.2.2.2. Chiral Vektör: Ch.....	18
3.2.2.3. Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler (ÇDKNT).....	21
3.2.3. Karbon Nanotüplerin Özellikleri	22
3.2.4. Karbon Nanotüplerin Isıl Özellikleri	24
3.2.5. Karbon Nanotüplerin Üretim Yöntemleri.....	24
3.2.5.1. Ark Boşalım.....	25
3.2.5.2. Lazer Buharlaştırma.....	27
3.2.5.3. Kimyasal Buhar Birikimi.....	27
3.2.6. Karbon Nanotüplerin Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması	29
3.2.7. Karbon Nanotüplerin Kullanım Alanları	30
3.3. PREPREG KARBON FİBER.....	31
3.3.1. Prepreg Malzemenin Avantajları	32
3.4. OTOKLAV	35
3.4.1. Otoklav Kullanım Nedenleri.....	37
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	40
4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	42
4.2. Kompozit Numunelerin Üretim Süreci	44
4.2.1 ÇDKNT Takviyesiz Prepreg Karbon Fiber Kumaş Plaka Üretim Süreci	44
4.2.2 ÇDKNT Takviyeli Prepreg Karbon Fiber Kumaş Plaka Üretim Süreci.....	48
4.3. Numunelerin Boyutlandırılması	49
4.4 Çekme Deneyi.....	51
4.4.1 Çekme Deneyi Deforme Numuneler	52
4.5 Düşük Hızlı Darbe Testi	53
4.5.1 Düşük Hızlı Darbe Deneyi Deforme Olan Numuneler.....	57
4.5.2 Darbe Testi Sırasında Kompozit Malzemede Oluşan Hasar Türleri	57
4.6. Termal Gravimetri Analizi ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Analizi	58

5. DENEYSEL SONUÇLAR	59
5.1. Çekme Deneyi Sonuçları	59
5.2. Düşük Hızlı Darbe Deneyi Sonuçları	62
5.3 Stereo Mikroskop Görüntüleri	70
5.4.Elektron Taramalı Mikroskop (SEM) Sonuçları	74
5.5 Termal Karakterizasyon Test Sonuçları	75
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ	87



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
Mpa	Megapascal
Gpa	Gigapascal
Tpa	Terapascal
cm^3	Santimetreküp
°C	Santigrat
nm	Nanometre
m	Metre
mm	Milimetre
C	Kiral Vektör
cm	Santimetre
V	Volt
kg	Kilogram
bar	Bar
A	Amper
Mbar	Milibar
H ₂	Hidrojen
N ₂	Azot
CF ₄	Karbon Tetraflorür
He	Helyum
Torr	Torr
Fe	Demir
Co	Kobalt
Ni	Nikel

Atm	Atmosfer
KN	Kilo Newton
Dk	Dakika
$\mu\Omega$	Mikroohm
μm	Mikrometre

Kısaltmalar

Açıklama

KNT	Karbon Nanotüp
ÇDKNT	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
TDKNT	Tek Duvarlı Karbon Nanotüp
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
CCVD	Katalizörlü Kimyasal Buhar Çökeltme
TGA	Termal Gravimetre Analizi
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
RTM	Reçine Transfer Kalıplama
ASTM	Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
VDRTK	Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama
IBM	International Business Machines
NEC	Nippon Electronic Company
BİTAM	Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
NASA	National Aeronautics and Space Administration

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1. Kompozit malzemede fiber ve matris gösterimi.....	6
Şekil 3.2. Geleneksel malzemeler ve kompozitlerin özgül mukavemet değerleri.....	8
Şekil 3.3. Takviye ve matris malzemesine göre üretim yöntemleri.....	9
Şekil 3.4. Elle yatırma (hand lay-up) yöntemi.....	9
Şekil 3.5. Vakum torbalama metodu	11
Şekil 3.6. Vakum infüzyon yöntemi şematik gösterimi.....	12
Şekil 3.7. Grafit (A), grafen levha (B) ve karbon nanotüp (C)	14
Şekil 3.8. Karbon elementinin allotropları.....	15
Şekil 3.9. Üç tip tek duvarlı karbon nano tüpün üç boyutlu modeli	16
Şekil 3.10. Karbon nanotüp yapıları (a) TDKNT'ler ve (b)ÇDKNT'ler	17
Şekil 3.11. Tek katmanlı karbon nanotüp	18
Şekil 3.12. Katlanarak nanotüp birim hücrelerini oluşturan grafen levha.....	19
Şekil 3.13. Değişik yön ve açılarda elde edilebilecek nanotüpler	20
Şekil 3.14. KNT'lerin kristal yapı cinsleri.....	20
Şekil 3.15. Çok katmanlı karbon nanotüp.....	21
Şekil 3.16. Nanotüp ve fulleren üretiminde kullanılan ark boşalım sistemi.....	26
Şekil 3.17. Prepreg kullanımının avantajları.....	32
Şekil 3.18. Prepreglerin performans ve üretim hacimleri açısından karşılaştırılması....	34
Şekil 3.19. Otoklav yapısı.....	35
Şekil 3.20. Malzeme üretim süreci.....	39
Şekil 4.1 Kesim öncesi prepreg kumaş serimi	45
Şekil 4.2 Kesimi tamamlanan prepreg kumaş.....	46
Şekil 4.3. Vakum torbalama.....	46
Şekil 4.4. Otoklav içerisine yerleştirilen numuneler.....	47
Şekil 4.5. Ultrasonik karıştırıcı.....	48
Şekil 4.6. TGA/DSC ve SEM numuneleri.....	49
Şekil 4.7. Çekme testi takviyesiz test numuneleri.....	50
Şekil 4.8. ÇDKNT takviyeli test numuneleri.....	50
Şekil 4.9. Darbe testi numunesi.....	52
Şekil 4.10. Shimadzu AG- IS (100 kN) test cihazı.....	52

Şekil 4.11.Çekme testinden bir görünüm.....	52
Şekil 4.12. Çekme testi deforme olan numuneler.....	52
Şekil 4.13. Ağırlık düşürme darbe testi şematik gösterim.....	53
Şekil 4.14. Düşük hızlı darbe test düzeneği.....	54
Şekil 4.15. Düşük hızlı darbe test cihazı.....	55
Şekil 4.16. NI Signal Express yazılımı.....	56
Şekil 4.17.Düşük hızlı darbe testi tutucu tabla.....	56
Şekil 4.18. Deforme olan numuneler(KNT’li ve KNT’siz).....	57
Şekil 4.19. Hasar türleri.....	57
Şekil 5.1.Gerilme-birim şekil değiştirme grafiği (KNT’li numuneler).....	59
Şekil 5.2.Gerilme-birim şekil değiştirme grafiği (KNT’siz numuneler).....	60
Şekil 5.3.Gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.....	61
Şekil 5.4. KNT takviyeli kuvvet-zaman grafiği.....	62
Şekil 5.5. KNT takviyesiz kuvvet-zaman grafiği.....	63
Şekil 5.6. KNT takviyeli maksimum darbe kuvvet grafiği.....	63
Şekil 5.7. KNT takviyesiz maksimum darbe kuvvet grafiği.....	64
Şekil 5.8. KNT’li ve KNT’siz 75 j kuvvet-zaman grafiği.....	64
Şekil 5.9. KNT’li ve KNT’siz 125 j kuvvet-zaman grafiği.....	65
Şekil 5.10. KNT takviyeli kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	65
Şekil 5.11. KNT takviyesiz kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	66
Şekil 5.12. KNT takviyeli ve takviyesiz kuvvet-yer değiştirme grafiği (125j).....	67
Şekil 5.13. KNT takviyeli ve takviyesiz kuvvet-yer değiştirme grafiği (75j).....	67
Şekil 5.14 KNT takviyeli enerji-zaman grafiği.....	68
Şekil 5.15. KNT takviyesiz enerji-zaman grafiği.....	68
Şekil 5.16. KNT takviyeli ve takviyesiz enerji-zaman grafiği (125j).....	69
Şekil 5.17. KNT takviyeli ve takviyesiz enerji-zaman grafiği (75j).....	69
Şekil 5.18. Darbe deneyi sonrası numune dikey kesit görüntüsü.....	70
Şekil 5.19. Stereo mikroskop ile dikey kesit görüntüsü alınan KNT takviyeli (75j-125j) numuneler.....	71
Şekil 5.20. Stereo mikroskop ile dikey kesit görüntüsü alınan KNT takviyesiz (75j-125j) numuneler.....	72
Şekil 5.21. Optik mikroskop görüntüsü (1).....	73
Şekil 5.22. Optik mikroskop görüntüsü (2).....	73
Şekil 5.23. KNT takviyesiz numune SEM görüntüsü.....	74

Şekil 5.24. KNT takviyeli numune SEM görüntüsü.....	74
Şekil 5.25. KNT takviyesiz numunenin TGA sıcaklık skalası-kütle değişim miktarı grafiği.....	75
Şekil 5.26. KNT takviyesiz numunenin TGA-DSC sıcaklık skalası grafiği(1).....	75
Şekil 5.27. KNT takviyesiz numunenin TGA-DSC sıcaklık skalası grafiği(2).....	75
Şekil 5.28.KNT takviyeli numunenin TGA sıcaklık skalası-kütle değişim miktarı grafiği.....	77
Şekil 5.29. KNT takviyeli numunenin TGA-DSC sıcaklık skalası grafiği(1).....	77
Şekil 5.30. KNT takviyeli numunenin TGA-DSC sıcaklık skalası grafiği(2).....	78



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1. TDKNT'lerin sınıflandırılması	18
Çizelge 3.2. Tek katmanlı karbon nanotüp özellikleri	18
Çizelge 3.3. Çok katmanlı karbon nanotüp özellikleri.....	21
Çizelge 3.4. KNT'lerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri	23
Çizelge 3.5. KNT'lerin ve bazı materyallerin mekanik özellikleri.....	23
Çizelge 3.6. Karbon nanotüplerin ısı ve elektrik taşınım değerlerinin bazı materyallerle karşılaştırılması.....	24
Çizelge 3.7. Çeşitli malzemelerin ısı iletkenlikleri.....	24
Çizelge 3.8. KNT üretim yöntemlerinin karşılaştırılması.....	29
Çizelge 3.9. KNT üretim yöntemlerinin karşılaştırılması.....	30
Çizelge 4.1. Maliyet hesabı.....	41
Çizelge 4.2. Üretim metotlarının karşılaştırılması.....	42
Çizelge 4.3. Prepreg karbon fiber kumaş Özellikleri.....	42
Çizelge 4.4. Çok duvarlı karbon nanotüp özellikleri.....	43
Çizelge 4.5. Epoksi reçine özellikleri(SPM Prepreg Systems).....	43
Çizelge 4.6. Epoksi reçine viskozite sıcaklık eğrileri.....	44
Çizelge 4.7. Test standartlarına göre numune boyutları.....	49

1. GİRİŞ

Kompozitler düşük ağırlık, korozyon direnci, daha hızlı montaj, yüksek yorulma dayanımı gibi avantajları yüzünden günümüz malzemelerinin temel parçası haline gelmiştir. Endüstrinin çeşitli sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Uçaklar, tekneler, otomobiller, rüzgar türbinleri ve spor malzemeleri gibi yüksek performanslı yapılarda çok sayıda uygulamaya sahiptir. Yüksek mekanik özellikleri bu malzemeleri daha da çekici duruma getirmektedir. Ara yüzey özelliklerinin yetersiz olması kompozit malzemelerin dezavantajlarından biridir. Matrisle oluşan çatlak hızlı bir şekilde ilerlerken kompozit malzemenin ara yüzey ve mekanik özelliklerini olumsuz şekilde etkilemektedir. Matris dayanımını artırmak için ise düzgün bir şekilde katkı maddesi disperse edilmelidir.

Fiber-Matris ara yüzeyi matrisin yükü fiberlere ne kadar iyi transfer edeceğini belirler. Ara yüzeyde bulunan fiber ve matrislerin atom ve molekülleri bu birim içinde yayıldığında reaksiyon göstererek bağ oluşturur. Bu yayılım mikro düzeyde fiber ve matrisin özelliklerinden farklı özelliklere sahip, interfaz olarak adlandırılan ayrı bir ara yüze sahiptir. Bu ara yüz katmanı bağ oluşmasına yardımcı olmakla beraber aynı zamanda fiberde mikro çatlaklar oluşturur. Bunlar fiber mukavemetini ve dolayısıyla malzeme mukavemetini azaltarak kompozitin mekanik davranışını etkilemektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde yapılan çalışmalar araştırıldığında teorik ve deneysel olarak yapılan bir çok çalışma bulunmaktadır. Takviye elemanı olarak kullanılan çok duvarlı karbon nanotüpler ile üretilen malzemelerin mekanik, termal ve iletkenlik gibi özellikleri, üretilen malzemelerin çekme, darbe, gibi deneysel konulara sıklıkla yer verildiği gözlemlenmiştir.

Bekyarova ve arkadaşları (2007), nanotüp takviyeli ve nanotüp takviyesiz karbon kumaş kompozit malzemeleri imal etmek için elektroforez yöntemini bu çalışma için kullanmışlardır. Üretilen numunelerin elektriksel ve mekanik özellikleri araştırılmış ve karşılaştırılmıştır. Malzeme üretiminde vakum destekli reçine transfer kalıplama (VDRTK) yöntemi kullanılmıştır. Bu üretim yöntemi ile hava kabarcıklarının oluşumu önlenmiştir. Karbon nanotüp katkısı ile üretilen malzemenin kayma mukavemeti karbon nano tüp ilavesi yapılmayan malzemeye oranla %30 oranında arttığı görülmüştür (Bekyarova, Thostenson, Yu, Kim, Gao & Tang, 2007).

Siddiqui ve arkadaşları (2011) yaptığı çalışmada karbon nanotüp takviyeli epoksi prepreg üretmişler ve bu karbon nanotüp katkısının prepreg üretimine olan etkileri araştırmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda karbon nanotüp kullanımında kompozitin viskozitesinin düştüğü tespit edilmiştir. Kütlece %1 oranından fazla karbon nanotüp katkısının epoksinin kütleme performansını olumlu yönde iyileştirdiği tespit edilmiştir (Siddiqui, Khan, Ma, Li & Kim, 2011).

Rafiee ve arkadaşları (2009) yaptığı çalışmada, epoksiye kütlece % 0,1 oranında takviyeli tek ve çok duvarlı karbon nanotüplerin ilavesinin kompozit malzemenin mekanik özelliklerine olan etkisini araştırmıştır. Yapılan çalışmaya göre nano kompozitlerde modül yaklaşık % 31 oranında artarken, tek duvarlı karbon nanotüp kompozitler incelendiğinde bu oran % 3 olarak tespit edilmiştir (Rafiee, Wang, Song, Yu & Koratkar, 2009).

Rahman ve arkadaşları (2012), ÇDKNT katkılı epoksi matrisi cam elyafta ağırlıkça % 0.1 – 0.2 – 0.3 – 0.4 oranlarında kullanmışlardır. El yatırma yöntemi ve sonrasında sıcak pres yöntemi ile ürettikleri kompozit levhalarda mekaniksel özellikleri araştırmak için testler yapmışlardır. Yaptıkları testlerde ağırlıkça en uygun oranı % 0.3 ile; sırayla akma mukavemeti, elastisite modülü ve gerilme için % 37, % 21 ve % 21 artış gözlemlenmişlerdir (Rahman, Zainuddin, Hosur, Malone, Salam, Kumar & Jeelani, 2012).

Soliman ve arkadaşları (2012) ağırlık oranı % 0,5, % 1,0 ve % 1,5 olan karboksil oranıyla takviye ettikleri çok tabakalı karbon nano tüp takviyeli kompozit levhalara 15, 24, 30, 60 ve 120 joule olarak beş farklı düşük hızlı darbe testi uygulamışlardır. Kompozit levhaların düşük hızlı darbe tepkisini ve meydana gelen hasarları incelemişlerdir. Uygulanmış olan enerji seviyelerinde kompozit levhalarda oluşan hasarlar kuvvet-zaman, enerji-zaman, kuvvet-deplasman eğrilerinde gösterilmiştir. Yapılan çalışmaların sonuçlarına göre karbon/epoksi kompozitin yüzeyi karboksil ile işlem görmüş çok katmanlı karbon nano tüp ile modifiye edilmesi; kompozit malzemelerde darbe etkisinin hasar boyutunda azalma sağladığı tespit edilmiştir. Matris malzemesinde % 1,5 oranında çok katmanlı karbon nano tüp katkısı enerji absorpsiyonunda % 50 oranında artış sağladığı tespit edilmiştir (Soliman, Al-Haik & Taha, 2012).

Siddiqui ve arkadaşları (2009), cam liflerin yüzeylerini KNT katkılı epoksi ile kaplamış, böylece liflerin kırılma çatlaklarını doldurarak malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmişlerdir. Lif yüzeylerine ağırlıkça % 0.3 KNT katkılı epoksi matris kullanarak, yaptıkları testlerde çekme mukavemetinin önemli miktarda arttığını ölçmüşlerdir (Siddiqui, Sham, Tang, Munir & Kim 2009).

Li ve arkadaşları (2012) yaptıkları çalışmada grafen tabakalarından elde edilmiş hibrid karbon nano tüpleri (KNT) epoksi matris içinde takviye ederek hibrid KNT nanopartikül – epoksi karışımının normal bir dağılım sağladığını ve kompozitin %0,5'lik bir oran ile çekme mukavemeti %1/3 oranında, elastiklik modülü %40 artmıştır (Li, Dichiara & Bai, 2012).

Gojny ve arkadaşları (2005), karbon nanotüplerin epoksi matrisli kompozitler üzerindeki mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Kompozit levhalara, TDKNT ve ÇDKNT ile ağırlıkça % 0.1, % 0.3 ve % 0.5'i olacak şekilde ekleyerek elastite modüllerini, akma mukavemetlerini ve darbe dayanımlarını ölçmüşlerdir. Yapılan çalışmalarda tüm mekanik özelliklerinin en fazla % 0.5 oranında ÇDKNT katılan levhada arttığını gözlemlemişlerdir (Gojny, Wichmann, Fiedler & Schulte 2005).

Dong ve arkadaşları (2014), karbon nanotüp ile epoksi karışımının karbon fiberlere dispersiyonu sonucunda ağırlıkça % 1 ve % 2,5 oranında karbon nanotüp dispersiyonu ile hazırlanmış numunelerin arasındaki farklar gözlemlenmiştir. Hazırlanan epoksi/KNT 30 dakika boyunca mekanik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Karbon elyafa emdirilmesinden sonra hava boşluklarını engellemek için reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi kullanmışlardır. Sürekli donma-kurutma işlemine tabii tutulmuş ve

100°C de 2 saat boyunca krlenmesi için frnlama işlemi uygulanmıştır. KNT'lerin yüzeyleri SEM ile analiz edilmiştir (Dong, Hou, Li, Wang, Gao & Tang, 2014).

Ashraf ve arkadaşları (2011), tek duvarlı karbon nanotüpü epoksi/karbon fiber tabakalı kompozitlerde kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmalarda epoksinin ağırlıkça % 0.1 tek duvarlı karbon nanotüp kullanıp, darbe testinden sonra kırılma tokluğunda % 13, tabakalar arası kırılma tokluğunda % 28'lik art gözlenirken; darbe hasarında % 5 azalma elde etmişlerdir (Ashraf, Guan, Mirjalili, Zhang, Chun, Hubert, Simard, Kingston, Bourne & Johnston, 2011).

Kostopoulos ve arkadaşları (2010), çok duvarlı karbon nanotüpleri epoksinin ağırlıkça % 0.5 oranında; karbon elyaf destekli polimer matrisli kompozit malzemelerde kullanmışlardır. Levhanın darbe anında ve darbe sonrası özelliklerini incelemişlerdir. ÇDKNT ilave edilen ve edilmeyen levhaları karılatırdıklarında, darbe dayanımında iyileşmeler olduğunu, yüksek enerji sönümlediğini ve malzemenin yorulma dayanımının da arttırdığını kaydetmişlerdir (Kostopoulos, Baltopoulos, Karapappas, Vavouliotis & Paipetis, 2010).

Siddiqui ve arkadaşları (2013), epoksi matrise KNT ekleyip, bu matrisi karbon lif takviyeli polimer kompozitte kullanmışlardır. Yaptıkları testlerde ağırlıkça % 0.5 KNT takviyesiyle % 12 art gözlemişlerdir. Tp şeklinde içi boş olan numunelerle burulma modülü ve mukavemeti testlerinde sırasıyla %17 ve % 19.5 iyileşme tespit etmişler ve ağırlıkça % 0.5'den fazla KNT içeren testlerde görülen iyilemelerin azaldığını görmüşlerdir. Bunun sebebi olarak KNT içeriğinin bölgesel olarak toplanmasına olarak değerlendirmişlerdir (Siddiqui, Khan & Kim, 2013).

Fan ve arkadaşları (2007), epoksi matrise ağırlıkça % 0, % 0,5 ve % 1 ÇDKNT ilavesi yapılarak cam elyaflı kompozit levhalara, tabakalar arası kayma mukavemetini ölçmüşlerdir. Bu çalışmada araştırmacılar vakum destekli reçine transferiyle kalıplama yöntemiyle, çift vakum destekli reçine transferiyle kalıplama metodunu kullanmışlardır. Çift vakum destekli reçine transferiyle kalıplama metodunun daha fazla basınç sağlayarak reçinenin daha iyi yayılmasıyla ekstra yapma sağladığını görmüşlerdir. Bu metot ile cam elyaflı kompozit tabakalara % 0, % 0.5 ve % 1 ÇDKNT ilave ederek yaptıkları testlerde sırasıyla % 9.7, % 20.5 ve % 33.1' lik iyileşme gözlemişlerdir (Fan, Santare & Advani, 2007).

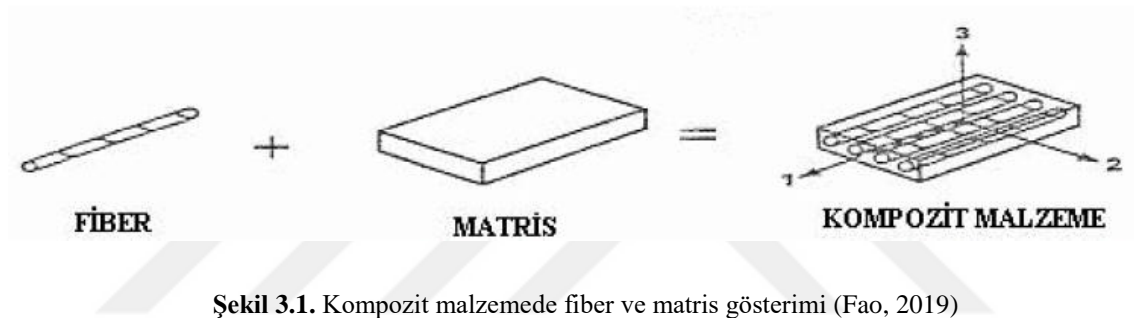
Yapılan literatür taraması sonucunda farklı üretim yöntemleri ile imal edilen karbon takviyeli epoksi kompozit malzemelerin kombinasyonunda karbon nanotüp kullanıldığında ve uygulama sonrasında kompozit malzemelerde performans özelliklerinde iyileşmeler elde edilmiştir.



3. GENEL BİLGİ

3.1. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, 20. yüzyılda, modern teknoloji olarak yeni umutlar vaat eden bir mühendislik malzemesi olarak ortaya çıkmıştır. Kompozit malzeme, farklı fiziksel veya kimyasal özelliklere sahip minimum iki veya daha fazla fazdan oluşan bir malzemedir. Kompozit malzeme, heterojen bir malzeme olarak kabul edilir. Gelişmiş özelliklere sahip yeni bir malzeme yapmak için zayıf özelliklere sahip iki veya daha fazla malzeme veya faz oluşturma fikrine dayanır (Şekil 3.1). Bir faz, mekanik yükün çoğunu taşıdığı yerde takviye görevi görür ve ikinci faz, mekanik yükün takviyeler arasında aktarılmasını sağladığı malzemenin kütlesi olarak işlev görür.



Şekil 3.1. Kompozit malzemede fiber ve matris gösterimi (Fao, 2019)

Polimer kompozitler yüksek mukavemet sağlaması boyutsal ve termal kararlılıkları, sertlik, aşınma yönünden dirençli olmaları gibi özellikleriyle avantaj sunar. Ayrıca, kompozit malzemeler mukavemet ve rijitlik yönünden metal malzemelerle yarışmakla birlikte çok daha hafiftirler. Kompozit malzemelerin üç temel bileşeni bulunmaktadır. Bunlar:

1. Matris: Termoset veya termoplastik olarak süreklilik fazı oluşturur. Termoset gruplarında çoğunlukla polyesterler kullanılır. Vinilester/bisfenol, epoksi reçine ve fenolik reçineler daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Termoplastik kompozitlerde poliamid ve polipropilen matris olarak kullanılır. Bunların yanı sıra polietilen ve polibutilen tereftalat, polietereterketon ve polietersulfon kullanımı hibrit olarak dikkat çekmektedir.

2. Takviye: Kevlar, karbon, grafen, boron elyaf, silisyum karbür parçacıkları, alümina, cam ve polietilen malzemelerin kısa-uzun elyaf formunda ve en az % 60 matris-elyaf oranında güç taşıyan malzemelerdir.

3. Katkılar: Matrise niteliğine dolgular ve kimyasallar geliştirici olarak ilave edilirler.

3.1.1. Kompozitlerin Avantajları

Kompozit malzemelerin özgül ağırlıkları düşüktür. Ağırlığın önemli olduğu yerlerde büyük avantaj sağlar. Burada amaç bir malzeme en iyi özelliklerin bir araya getirilmesinin sağlanmasıdır. Kompozit malzemelerin sağladığı avantajlar şöyle sıralanabilir:

- Yüksek mukavemet/yoğunluk oranı (özgül mukavemet)
- Yüksek rijitlik/yoğunluk oranı (özgül modül)
- Yüksek dielektrik direnç
- Korozyon direnci
- Kalıplama avantajı
- Yüksek sıcaklık kapasitesi
- Yüksek yorulma mukavemeti
- Yüksek aşınma direnci
- Düşük ağırlık

3.1.2. Kompozit Kullanmanın Metallere Göre Avantajları

Örneğin, uydulardaki kafes ve platformlar, uzayda yaklaşık -160°C - $+90^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında çalıştığından boyutsal kararlılığını koruması gerekir. Konvansiyonel malzemeler bu ihtiyacı karşılayamaz ancak grafit-epoksi gibi malzemeler bu ihtiyacı karşılayabilir.

Yüksek rekabetten dolayı hava yolu sektöründe rijitlik ve mukavemeti düşürmek yüksek yakıt verimliliği sağlar. Kompozit malzemelerin maliyeti yüksek olmakla birlikte, montajda parça sayısının azlığı ve hafifliği yakıt maliyeti açısından kompozitleri daha avantajlı hale getirir. Ticari bir uçakta yapılan ölçümde kütlelerinin 0.453 kg kütle azalması yılda yaklaşık 1360 litre yakıt tasarrufu sağlar (Kaw 2005). Kompozitlerin

yüksek mukavemet ve rijitliği yüksek yorulma ve darbe dayanımı termal iletkenlik ve korozyon dayanımı kompozitlerin geleneksel malzemelere kıyasla diğer avantajlarıdır.

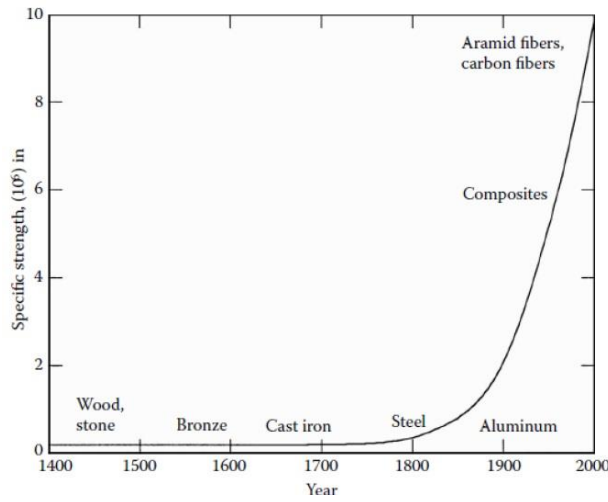
3.1.3. Kompozitin Mekanik Avantajı

$$u = \frac{PL}{AE} \quad M = \frac{PL^2}{4} \frac{1}{E/\rho} \quad M = \rho AL$$

Kompozitin mekanik avantajı özgül modül (E/ρ) ölçülmesi ile hesaplanır. Belirli yük altında sabit bir uzama değeri için en hafif çubuk özgül modülü en yüksek olandır. Tek yönlü grafit epoksi malzemenin özgül mukavemeti çeliğin 3 katı daha fazladır. Kesit alanları aynı olduğunda ise çeliğin kütlesi ise 3 kat daha fazladır.

$$\text{Özgül Modül} = E/\rho$$

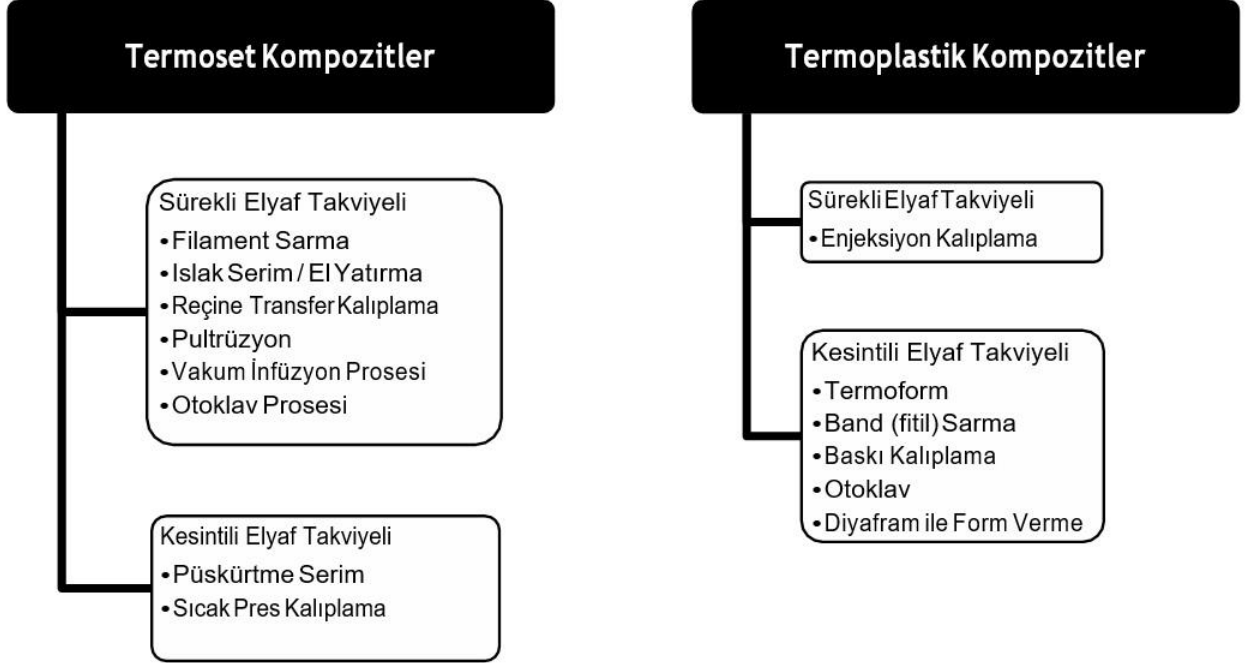
$$\text{Özgül mukavemet} = \sigma/\rho$$



Şekil 3.2. Geleneksel malzemeler ve kompozitlerin özgül mukavemet değerleri (Kaw, 2005)

3.1.4. Karbon Fiber Takviyeli Polimer Üretim Teknikleri

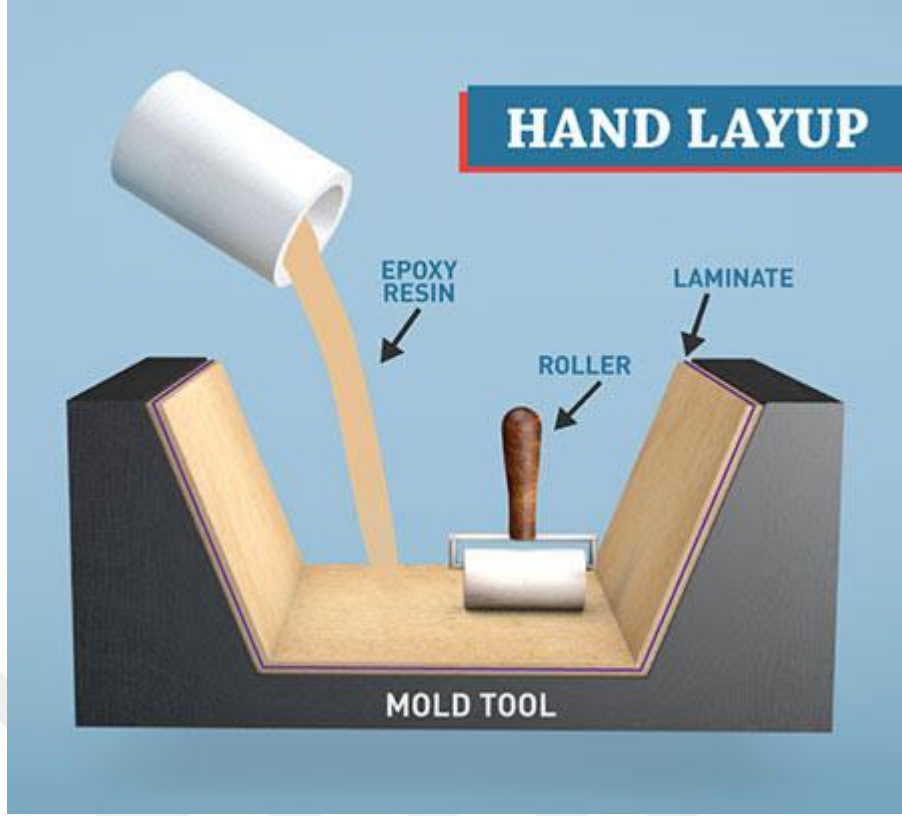
Karbon fiber takviyeli polimerik kompozitlerin birçok farklı üretim yöntemi vardır. Polimer matrisli kompozit malzemeleri üretmek için birçok teknik geliştirilmeye beraber kullanılan matris malzeme cinslerine termoset veya termoplastik reçineli olarak üretilir. Şekil 3.3’de takviye ve matrise göre üretim metotları verilmiştir (İnce, 2014).



Şekil 3.3. Takviye ve matris malzemesine göre üretim yöntemleri (İnce, 2014)

3.1.4.1. El Yatırma (Hand Lay-Up) Yöntemi

El yatırma yöntemi, kompozit üretim metotları arasında en basit yöntemdir. Bu yöntemin altyapı gereksinimi oldukça az ve üretim aşamaları çok basittir. Hazırlanan kalıp içerisine viskozitesi yüksek reçine sürülür. Daha sonra reçine elyaflar üzerine emdirilir. Bu teknikte elyaf kumaşına iyi nüfuz etmesi gerekmektedir. Bu yöntem düşük sayıdaki üretimler için tercih edilirler (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Elle yatırma (hand lay-up) yöntemi (Masterbond, 2019)

3.1.4.2. Püskürtme

Püskürtmeli serim, küçük botlar, küvetler, kaporta kaplamaları gibi hafif yük taşıyan parçalarda kullanılır. Püskürtmeli serim tekniğinin elle yatırma yönteminin bir uzantısı olduğu söylenebilir. Elyaf lar kalıba reçineyle birlikte tabanca ile püskürtülür. Püskürtülme işlemi sonrası reçine içinde kalan havayı çıkarmak ve yüzeyin düzgün olması için yüzey bir rulo ile düzeltilir. Basit ve maliyeti düşük bir üretim yöntemidir.

3.1.4.3. Profil Çekme (Pultrüzyon)

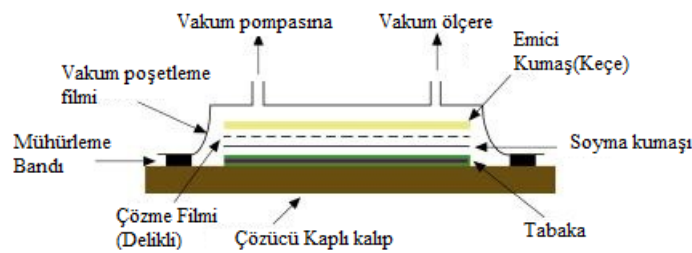
Pultrüzyon metodu; sürekli takviye liflerin, matris olarak termoset reçine emdirilmesinden sonra kompozit profiller oluşturmak üzere ısıtılmış bir kalıptan çekildiği sürekli bir kompozit ürünlerin üretildiği maliyetli seri üretim prosesidir. Kalıplar genellikle krom kaplı çeliktir. Kullanılan elyaf sürekli olduğundan elyaf yönünde yüksek mukavemet elde edilir.

3.1.4.4. Otomatik Filament Sarımı

Bu yöntem, depolama tankları, borular, gemiler, gaz tüpleri, füze kutuları, roket motor kasaları, kanal, yelkenli tekne direği, uçak gövdeleri ve golf sopaları gibi ürünlerin seri üretimine sağlar. Filament sarım yönteminde sürekli elyaf lifleri reçineden geçirildikten sonra ıslatılarak bir makara yardımıyla kalıp üzerine sarılmaktadır. Kompozit üzerindeki fiber yoğunluğu fiber gerginliğine bağlı olduğundan elyaflarını gergisi kritik öneme sahiptir. Elyaf gerginliği, elyafın türüne, geometrisine ve dönen mandrel üzerinde gerekli sargı modeline bağlıdır. Sarım bittikten sonra kompozitin kürleştirilmesi, genellikle bir fırında yapılır ve nihai kompozit ürün mandrelden çıkarılır.

3.1.4.5. Vakum Torbalama Metodu

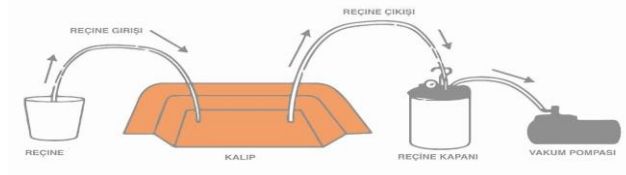
Vakum torbalama, reçine emdirilmiş takviye elyafların reçine kürlenene kadar kalıp formunda tutmak için atmosfer basıncını kullanan bir sıkıştırma yöntemidir. Takviye malzeme olarak ya önceden reçine emdirilmiş elyaflar (prepreg) ya da elle yatırma veya püskürtmeli serim tekniği uygulanarak elyaflar bir kalıp içerisine yerleştirilir (Şekil 3.5). Bu teknikle, üretilecek kompozit malzemede daha iyi bir yüzey kalitesi formu yakalanabilir ve fazla reçinenin dışarı atılması sağlanabilir. Kompozit malzeme tamir işlemlerinde bu yöntem kullanılmaktadır. Bu teknik ile üretilen kompozitler iyi mekanik özelliklere sahiptir.



Şekil 3.5. Vakum torbalama metodu (Gay, 2014)

3.1.4.6. Vakum İnfüzyon Metodu

Vakum infüzyon prosesi, 1980 yılından beri başta farklı sanayi dallarında uygulanmakta olan yüksek kaliteli kompozit parçalar yapmak için uygundur ve maliyetli bir üretim prosesidir. Bu proses, reçineyi laminata emdirmek için vakum basıncını kullanan bir tekniktir. Malzemeler kuru olarak kalıba konur ve reçine verilmeden önce vakum uygulanır. Tam vakum sağlanmasının akabinde, reçine dikkatlice yerleştirilen infüzyon hortumuyla elyaf tabakalara emdirilir (Şekil 3.6). Elyaf tamamen ıslandıktan sonra infüzyon hattı kapatılır. Fazla reçinenin taşma kabına gönderilmesi ve kalan laminalar arasında sıkışan havanın alınması için bir miktar daha vakumlamaya devam edilir. Boşlukta oluşan havanın tümünü çıkarmak ve elyaf ve çekirdek malzemelerini birleştirmek için yüksek vakum pompası (-0,85 bar) kullanılır. Bu yenilikçi metotta karmaşık yapıya sahip parçaların üretimi için reçinenin uygun viskozitede olması önemlidir. Vakum infüzyonu aynı zamanda birçok lif ve çekirdek malzemeden oluşan karmaşık laminat için verimli bir üretim sürecidir. Böylece minimum ağırlıkta çok yüksek mukavemetli ve sert bir parça oluşur (Performance Composites Inc, 2019).



Şekil 3.6. Vakum infüzyon yöntemi şematik gösterimi (FiberGlast, 2019)

3.1.5 Kompozitlerin Endüstriyel Kullanıma Dönüşmesi

Prepreg malzemeler, sahip oldukları hafiflik, yüksek dayanıklılık, tokluk ve ısı direnç sayesinde yeni nesilde kullanılan en üst düzey kompozit malzemelerdir. Bu gelişmiş özellikleri sayesinde başta havacılık sanayisi olmak üzere savunma, uzay, ulaşım, denizcilik, enerji, otomotiv ve inşaat alanlarında zemin panelleri, kabin kaplamaları, tavan panelleri, hava kanalları, hava odaları, hava bölmeleri, dolaplar, uçak kanatçıkları, kapılar gibi aleve dirençli ve yüksek mekanik dayanımlı parçaların imalatında geniş bir kullanım alanına sahiptir (TÜBİTAK, 2019).

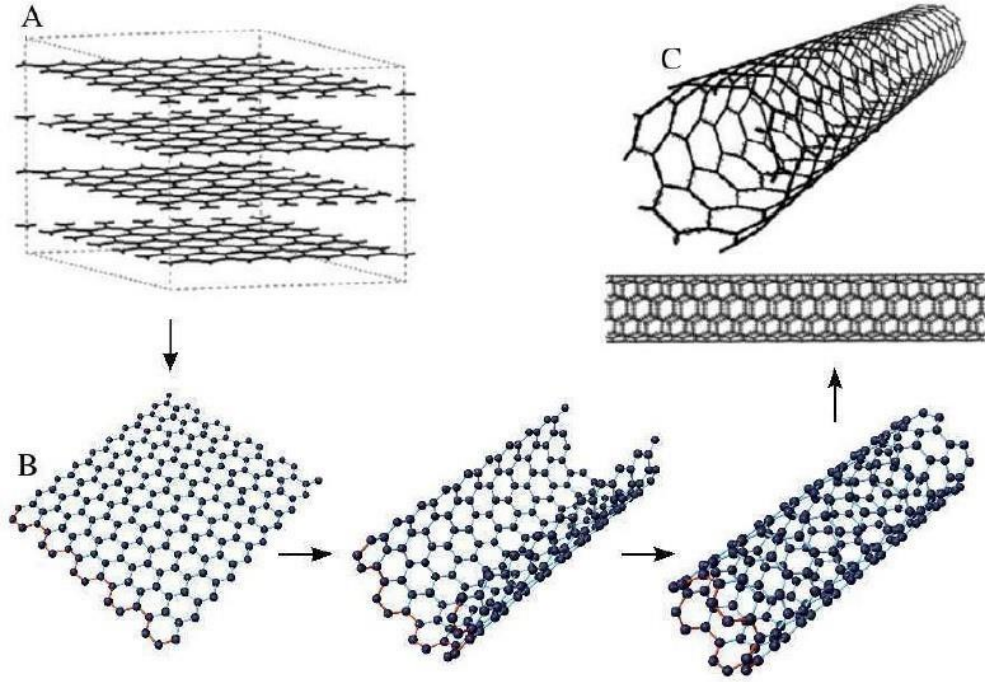
Bu tez çalışması yenilikçi ve yüksek performanslı KNT takviyeli ve takviyesiz prepreg malzemelerin geliştirilmesi amacıyla yapılmıştır. Maksimum dayanım sağlama, daha az kirlenme ve daha az atık malzeme, düşük gözenek, boyut hassasiyeti ve estetik gibi önemli avantajlara sahip oldukları için prepreg tercih edilmiştir. Yapılan bu çalışma kompozit üretim teknolojileri ile üretilebilirliğinin araştırılması, üretilen ürünün yerine geçtiği malzeme ile mekanik ve çevresel performans etkileri açısından karşılaştırılması, prototip üretimi, üretim yöntemlerinin geliştirilmesi, üretim süreçlerinin kısaltılması, optimizasyonu, maliyet, ağırlık azaltıcı ve enerji tasarrufu sağlayabilen yöntemlere yönelik çalışmaları amaçlamıştır.

NASA, Lockheed Martin, Rytheon gibi ticari ve askeri uyduların yanı sıra roket ve füze sistemleri gibi kritik teknolojileri geliştiren kuruluşlar prepreg pazarında büyük bir hacim yaratmaktadır. Örnek vermek gerekirse, Boeing firmasının yeni modeli 787 Dreamliner'da toplam uçak ağırlığının %50'sini büyük kısmı ön emdirilmiş dokumalar kullanılarak üretilmiş kompozit parçalar oluşturmaktadır. Benzer şekilde, A350 ve F-35 jet uçaklarının ana aksamının üretiminde de prepreg malzemelerinin kullanımı çok önemli bir yer tutmaktadır (Nanokomp, 2019).

3.2. KARBON NANOTÜPLER

Karbon nanotüpler, 1991 yılında, Japonya'daki NEC Temel Araştırma Laboratuvarında tespit edilmiştir. Daha sonra, 1993 yılında TDKNT'ler hem NEC'de hem de IBM'de bulunmuştur.

2001'de metalik nanotüpleri elektriksel şok dalgasıyla hasara uğratarak yarı-iletken özellikli transistör yapımında kullanılan karbon nanotüplerin üretimi başarılmıştır. Kovalent bağları ve kesintisiz hegzagonal ağ yapıları dolayısıyla, KNT'ler en güçlü ve esnek malzemelerdir. KNT, nanometre çaplı, µm boylu, silindirik yapılardır (Charlier ve arkadaşları, 2007; Dresselhaus ve arkadaşları, 2004), (Şekil 3.7).

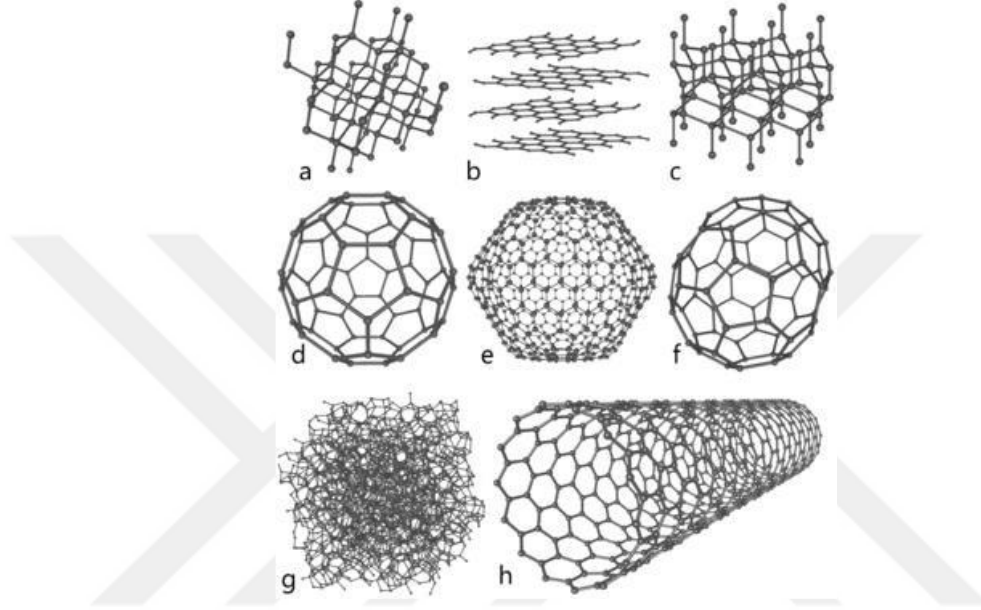


Şekil 3.7. Grafit (A), grafen levha (B) ve karbon nanotüp (C) (Kuchibhatla ve ark, 2007)

3.2.1. Karbon Nanotüp Yapısı

Karbon nanotüp (KNT) nano teknolojinin yapıtaşısıdır. Karbon nanotüp özellikleri ve uygulamaları bakımından günden güne artış gösteren bir ilgi içerisinde. Karbon, grafit, elmas, fulleren, KNT, doğal ve yapay şekilde bulunabilen bir elementtir.

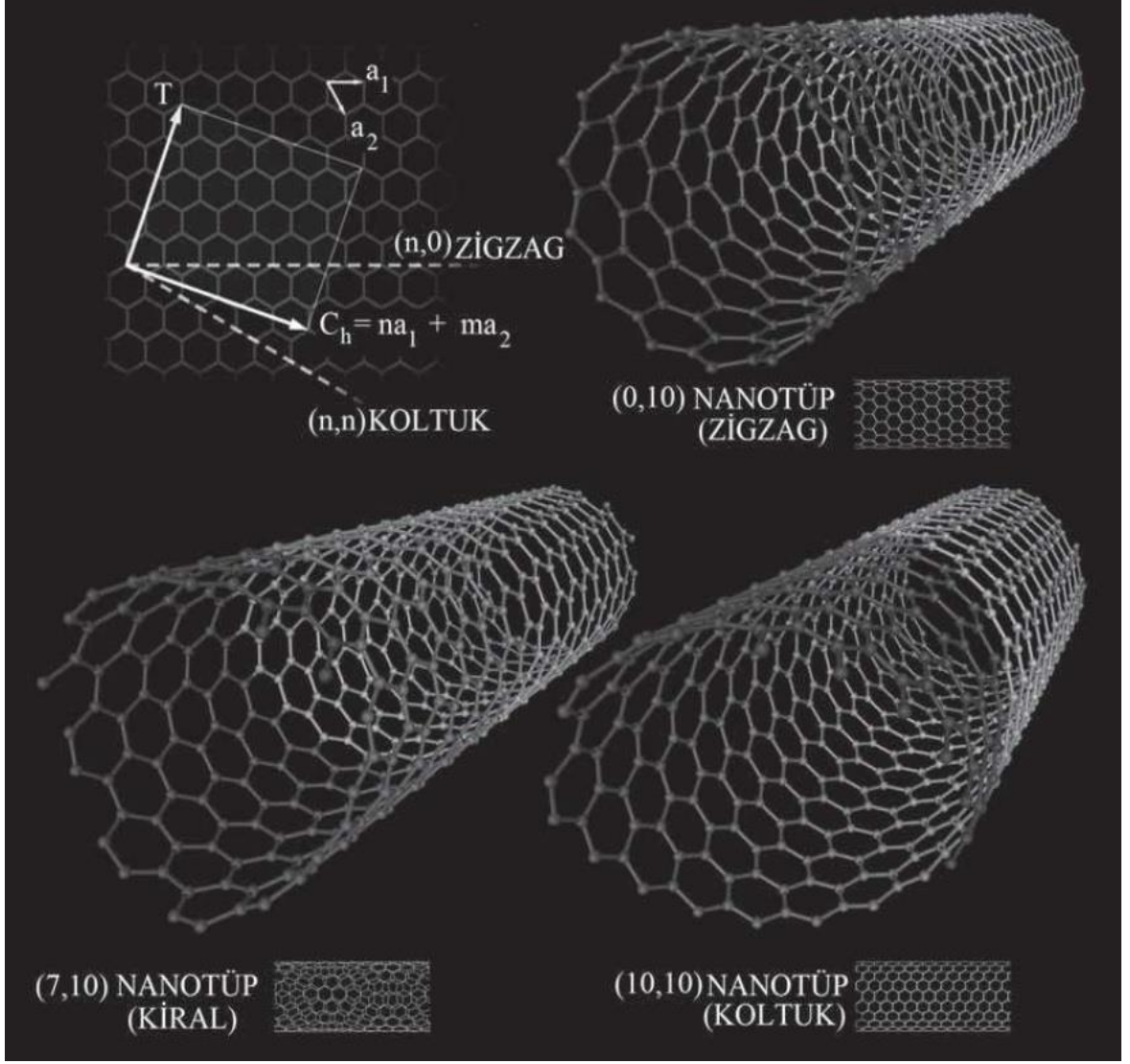
1980'lerin ortasında Rice Üniversitesinde, araştırmacılar “fulleren” kimyasını keşfetmişlerdir. Adını ise mimarlıkta bir mekânı en az malzeme ile örtme olanağı sağlayan jeodezik kubbe'nin tasarımını yapan, (R. Buckminster Fuller) almıştır. Nanotüpler uzun, ince, altıgen yapıdaki karbon(grafit yapısı) fullerenlerin bir araya gelmesiyle tüplerin duvarlarını oluşturan ve genellikle ucu kapalı olan yapılardır.



Şekil 3.8. Karbon elementinin allotropları (a) elmas; (b) grafit (c) altıgen elmas (d-f)fullerenler (g) amorf karbon (h) karbon nanotüp (Yetim, 2011).

Karbon elementinin, uzunluk-çap oranı $28 \times 10^6 : 1$ olan allotropuna karbon nanotüp denilmektedir (Kutucu, 2010). Karbon nanotüpler, karbon atomlarının silindirik biçimde şekillenen, uzunlukları ise birkaç mikron ve nanometre arasında olabilen yapılardır (Eser, 2006).

Şekil 3.9'da gösterildiği gibi, karbon nanotüpler, grafenin tüp eksenine bağlı olarak koltuk (armchair), zikzak (zigzag) ve kiral (chiral) adı verilen biçimlerde bulunmaktadır.



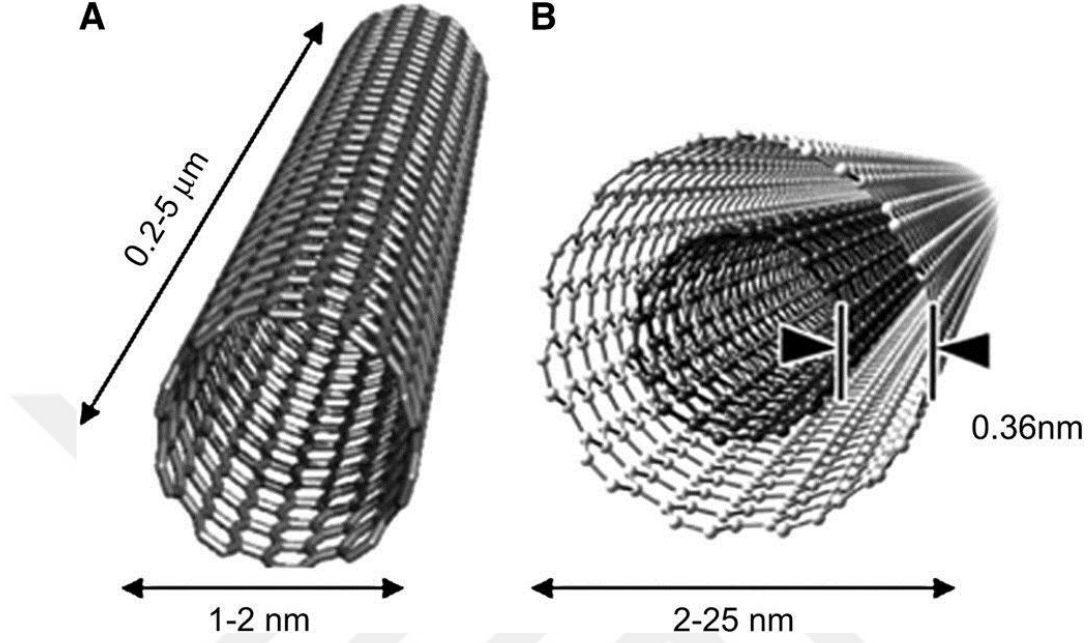
Şekil 3.9. Üç tip tek duvarlı karbon nano tüpün üç boyutlu modeli (Sharifzadeh 2006)

Karbon nanotüpler, çok mukavemetli ve rijit malzemelerdir. Çelikten 100 kat güçlü ve sağlam malzeme olmalarının yanında, kendi ağırlığının 300 milyon katı bir ağırlığa dayanabilen ve bunlara ilaveten oldukça düşük yoğunluğa ve yapıya bağlı olarak elektriksel özellik göstermektedirler (Seyman, 2010).

3.2.2. Karbon Nanotüplerin Sınıflandırılması

KNT'ler genellikle sahip olduğu grafen duvar sayısına göre sınıflandırılmaktadır. Karbon nanotüplerin Tek Duvarlı Karbon Nanotüp (TDKNT)'ler ve Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (ÇDKNT)'ler olmak üzere iki çeşidi bulunmaktadır. ÇDKNT'ler ise iç içe geçen eş merkezli TDKNT'lerden oluşurlar. Çok duvarlı karbon nanotüplerde tabakalar arası

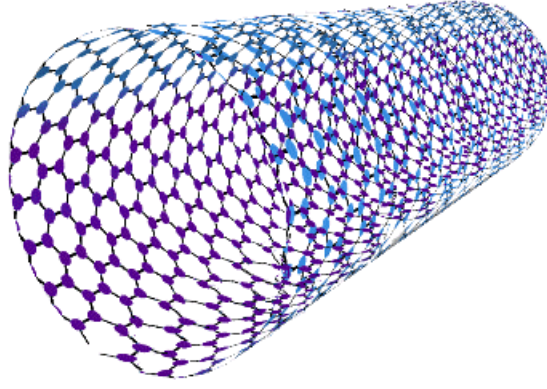
0.36 nm uzunluğunda olup, çapları 2 nm-100 nm arasındadır ve uzunluğu bir kaç mikrona kadar çıkabilmektedirler(Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Karbon nanotüp yapıları (a) TDKNT'ler ve (b) ÇDKNT'ler (Clair, 2016)

3.2.2.1. Tek Duvarlı Karbon Nanotüpler

Tek duvarlı karbon nanotüpler, 1-2 nm çapında silindirlere oluşan ve tekli moleküllerden meydana gelir ve TDKNT'ler grafit levhaların ya da büyük fullerenlerin silindirik izomerleri olarak tanımlanabilir. Genel olarak deney yoluyla görülen TDKNT'lerin çapı 0.6 – 2.0 nm'dir. TDKNT'ler genel olarak, Van der Waals bağ kuvvetinin nanotüpleri bir arada tutmasıyla birlikte oluşmaktadır.



Şekil 3.11. Tek katmanlı karbon nanotüp (Yetim, 2011)

Çizelge 3.1. TDKNT'lerin sınıflandırılması (Yetim, 2011)

TDKNT	θ	C_h	Yapı	Simetri
Zigzag (Metalik)	0°	$(n,0)$		$D_n \otimes C_i$
Zigzag (Yarıiletken)	0°	$(n,0)$		$D_n \otimes C_i$
Chiral (Metalik)	$0^\circ < \theta < 30^\circ$	(n, m)		$C_d \otimes C_{N/d}$
Chiral (Yarıiletken)	$0^\circ < \theta < 30^\circ$	(n, m)		$C_d \otimes C_{N/d}$
Armchair (Metalik)	30°	(n, n)		$D_n \otimes C_i$

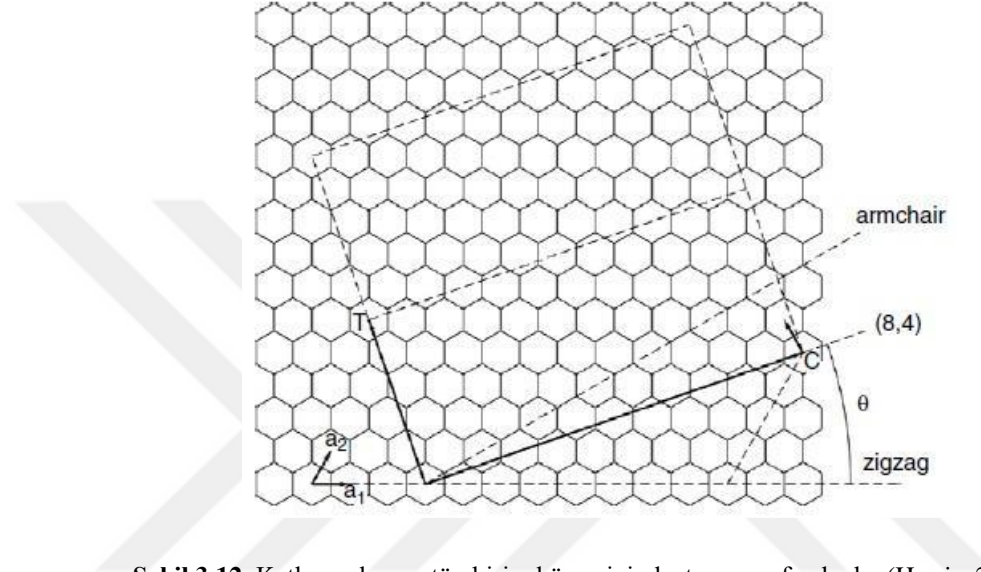
Çizelge 3.2. Tek katmanlı karbon nanotüp özellikleri (Yetim, 2011)

Dış Çap	1-2 nm
İç Çap	0,8- 1,6 nm
Safılık	>90 wt %
Uzunluk	5-30 μ m
Spesifik yüzey alanı	407 m ² /g
Elektriksel iletkenlik	>10 ⁻² S/cm

3.2.2.2. Chiral Vektör: Ch

TDKNT'lerin tek grafit tabakasının, içi boş silindir şeklinde elde etmek için sarılması ile şekillenmektedir. Şekil 3.12 incelendiği zaman, a1 ve a2 vektörleri grafit

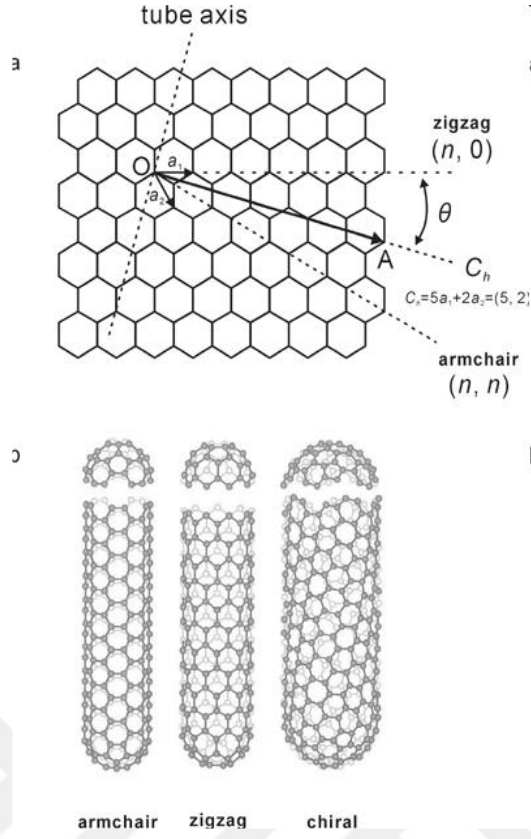
kafes vektörleri olarak tanımlanmıştır. Nanotüpler (n,m), şekil 3.12’de görülen grafit tabakasının C kiral vektörü ($C = na_1 + ma_2$) boyunca sarılması ile oluşturulur. Ayrıca, |C| çap uzunluğu ve kiral açısı θ ile nanotüp karakterizasyonu yapılabilir (Harris, 2009). Bununla birlikte (n,m) değerlerine göre nanotüplerin kristal formu incelendiği zaman ise $m=n$ olduğu durumlarda genellikle *koltuk* tipi yapı oluşurken, $m=0$ olduğu durumlarda zigzag tüpler oluşmaktadır. Geriye kalan tüm durumlarda *kiral* yapılı tüplerin oluştuğu gözlenmektedir.



Şekil 3.12. Katlanarak nanotüp birim hücrelerini oluşturan grafit levha (Harris, 2009)

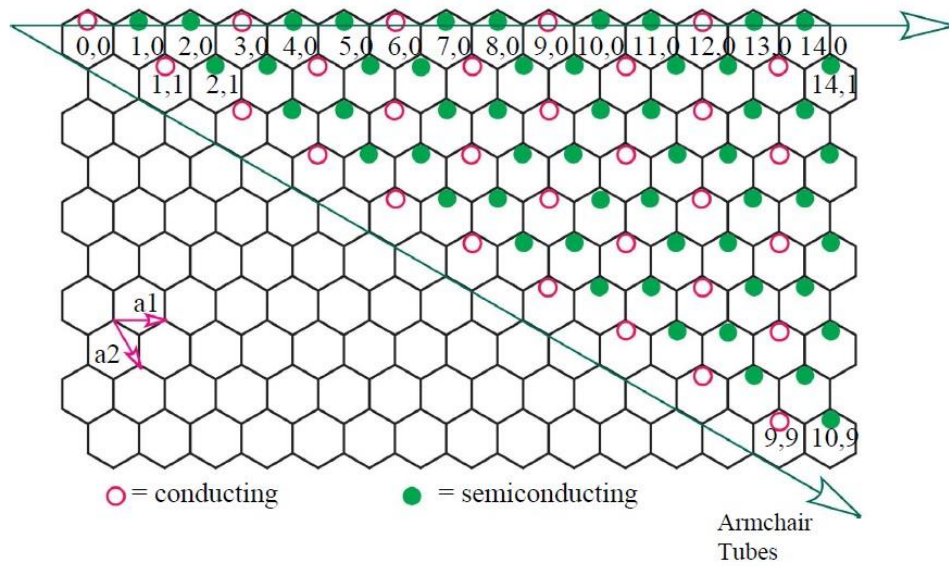
Kiral vektörü C ile zigzag yönü a_1 arasında kalan θ , kiral açısı, aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$\cos \theta = (2n + m) / 2p(n^2 + nm + m^2)$$



Şekil 3.13. Değişik yön ve açılarda elde edilebilecek nanotüpler (Harris, 2009)

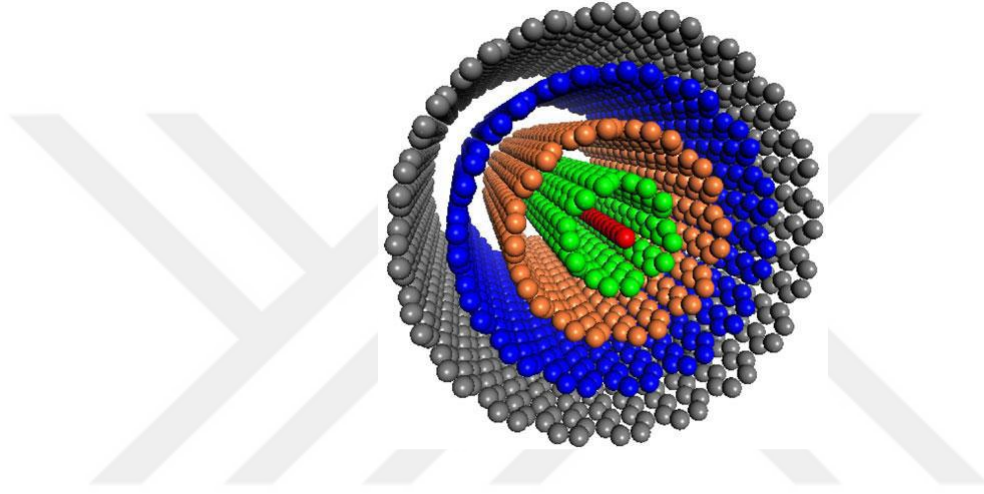
KNT'ler, kristal yapılarına göre metalik ya da yarı-iletken olabilirler. Karbon nanotüpün metalik olmasını sağlayan kiral vektöründeki ilişki $(n-m)/3=p$ denklemi ile açıklanabilir. p : 0 ise nanotüp metalik ve p : bir tam sayı ise metaliktir. Diğer tüm değerler için yarı iletkenidir.



Şekil 3.14. KNT'lerin kristal yapı cinsleri (Harris, 2009)

3.2.2.3. Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler (ÇDKNT)

Çok duvarlı karbon nanotüpler zayıf Van der Waals kuvvetleri altında birbirlerine tutunmuş, birden çok grafen levhanın eş merkezli olacak şekilde iç içe geçmiş tek duvarlı karbon nanotüplerden oluşmuş bir yapıya sahiptir (Şekil 3.15). Özellikler bakımından karşılaştırıldığında tek duvarlı karbon nanotüpler için söylenen özellikler çok duvarlı karbon nanotüpler için de geçerlidir.



Şekil 3.15. Çok katmanlı karbon nanotüp (Nanoteknoloji, 2019)

Birden fazla katmanı olan bu nanotüplerin, her iki katmanı arası yaklaşık 0,34 nm mesafededir. Çok katmanlı karbon nanotüplerin özellikleri, çizelge 3.3’de verilmiştir (Yetim, 2011).

Çizelge 3.3. Çok katmanlı karbon nanotüp özellikleri (Yetim, 2011)

Dış Çap	<8 nm
İç Çap	2-5 nm
Saflık	>95 wt %
Uzunluk	10-30µm
Spesifik yüzey alanı	500 m ² /g
Elektriksel iletkenlik	>10 ⁻² S/cm

3.2.3. Karbon Nanotüplerin Özellikleri

Karbon nanotüpler, üstün mekanik, termal, elektriksel ve optik özellikleri sahiptir. Bu özellikleri sayesinde, çeşitli uygulamalarda çok fonksiyonlu malzemelerin üretimi mümkün olmaktadır.

Literatüre göre karbon nanotüplerin çekme mukavemeti yaklaşık olarak 100-600 GPa değerindedir ve bu değer yüksek mukavemetli karbon fiberlerle kıyaslandığında bile daha yüksektir ve yoğunlukları (1,3 g/cm³) değerindedir bu değerde ticari karbon fiberlerin yoğunluğundan (1,8 g/cm³) daha düşüktür. Ayrıca karbon nanotüpler çok rijit malzemelerdir. Karbon fiberlerin young modülleri 750 GPa civarındayken, karbon nanotüplerin young modülleri 1 ile 5 TPa arasında değişmektedir. Karbon nanotüplerin yaklaşık kırılma gerilimi %10 ile %30 arasındadır, bu değerde karbon liflerle (%0,1 - 2) karşılaştırıldığında çok daha yüksektir (Breuer & Sundaraj, 2004).

Karbon nanotüplerin mekanik özellikleri hem deneysel hem de teorik çalışmaların hepsi, daha yüksek Young modülü ve çekme dayanımı ile nanotüplerin sertliğinin elmasinkine eşit ya da daha fazla olduğunu ortaya koymaktadır (Liew, Wong & Tan 2005). Bu özelliklerinin yanında düşük yoğunlukları sayesinde yapısal uygulamalarda kullanım potansiyelleri oldukça yüksektir.

KNT'ler diğer malzemelere göre, mekanik ve elektronik özellikler açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. KNT'ler çelikten daha hafif, ancak 10 ila 100 kat daha kuvvetli, insanoğlunun bildiği en kuvvetli fiber olarak tanımlanmaktadır.

KNT'ler çekme dayanımı, elastik modül açısından; çelik, beton gibi bilinen yapı malzemelere göre üstün özellikler göstermektedir. Bir nanotüpün Young modülü 1000 GPa ile çelikten yaklaşık 5 kat daha fazladır. Ayrıca KNT'lerin ısı iletkenlikleri ve elektriksel özellikleri de son derece ilgi çekicidir. Çizelge 3.4'de KNT'lerin bazı özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.4. KNT'lerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri (Rosso, 2001)

Özellik	KNT Türü	Değer
Yoğunluk	(10,10) Koltuk KNT	1,33 gcm^{-3}
	(17,0) Zigzag KNT	1,34 gcm^{-3}
	(12,6) Kiral KNT	1,40 gcm^{-3}
Elektriksel direnç	TDKNT ve ÇDKNT	10^{-4} Ohm cm^{-1}
Maksimum akım yoğunluğu	TDKNT ve ÇDKNT	10^{13} A m^{-2}
Isıl iletkenlik	TDKNT ve ÇDKNT	2000 W $m^{-1}K^{-1}$
Young modülü	TDKNT	1 TPa
	ÇDKNT	1,28 TPa
Çekme dayanımı	TDKNT ve ÇDKNT	100 GPa

KNT'ler mekanik açıdan bilinen en sağlam malzemelerdendir. Mekanik açıdan bir malzemenin üstün olup olmadığı temel olarak elastikiyet ve çekme dayanımı özelliklerine göre belirlenmektedir. KNT'lerin boyutundan dolayı çekme testlerini yapmak oldukça zordur.

Yu ve arkadaşları (2006), KNT'lere gerilme, yükleme testleri yapmış ve TDKNT'ler için çekme dayanımını 13 ila 52 GPa değerleri arasında bulmuşlardır (Yu, 2006). ÇDKNT'ler için ise çekme dayanımı 11 ila 63 GPa arasında hesaplamışlardır. Wagner ve arkadaşları yaptıkları çalışmada TDKNT için çekme dayanımını 55 GPa olarak bildirmişlerdir (Wagner,1998).

Çizelge 3.5'de KNT'lerin mekanik, çizelge 3.6'da ise; ısıl ve elektrik iletkenlik özelliklerinin bazı materyallerle karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 3.5. KNT'lerin ve bazı materyallerin mekanik özellikleri (Rosso, 2001)

Materyal	Young Modülü, GPa	Çekme Dayanımı, GPa
TDKNT	1054	150
ÇDKNT	1200	150
Çelik	208	0.4
Epoksi	3.5	0.005

Çizelge 3.6. Karbon nanotüplerin ısı ve elektrik taşınım değerlerinin bazı materyallerle karşılaştırılması (Rosso, 2001)

Materyal	Elektrik İletkenliği	Isıl İletkenliği,
KNT	$10^6 - 10^7$	>3000
Bakır	6×10^7	400
Karbon fiber - Pitch	$2 - 8,5 \times 10^6$	1000
Karbon fiber - PAN	$6,5 - 14 \times 10^6$	8-105

3.2.4. Karbon Nanotüplerin Isıl Özellikleri

Kristal yapılu karbon, ölçülen en yüksek ısı iletkenliğe sahiptir. Saf elmasın ısı iletkenliği, k , 2000-2500 W/mK iken, grafitin oda sıcaklığında ısı iletkenliği 2000 W/mK'dır. Çizelge 3.7'de malzeme çeşitlerini ve ısı iletkenliklerini göstermektedir.

Çizelge 3.7. Çeşitli malzemelerin ısı iletkenlikleri (Rosso, 2001)

Madde	Isıl İletkenlik W/mK
Altın	314-318
Bakır	353-386
Gümüş	406-429
Elmas	2000-2500
Grafit, Grafen katmanına paralel	0.0131
Grafit, Grafen katmanına zıt yönde	1900
TDKNT(Tek duvarlı karbon nanotüp)	6600

3.2.5. Karbon Nanotüplerin Üretim Yöntemleri

Karbon nanotüpler günümüzde en fazla üç farklı yöntem ile üretilmektedir:

1. Ark Boşalım
2. Lazer Aşındırma
3. Kimyasal Buhar Birikimi

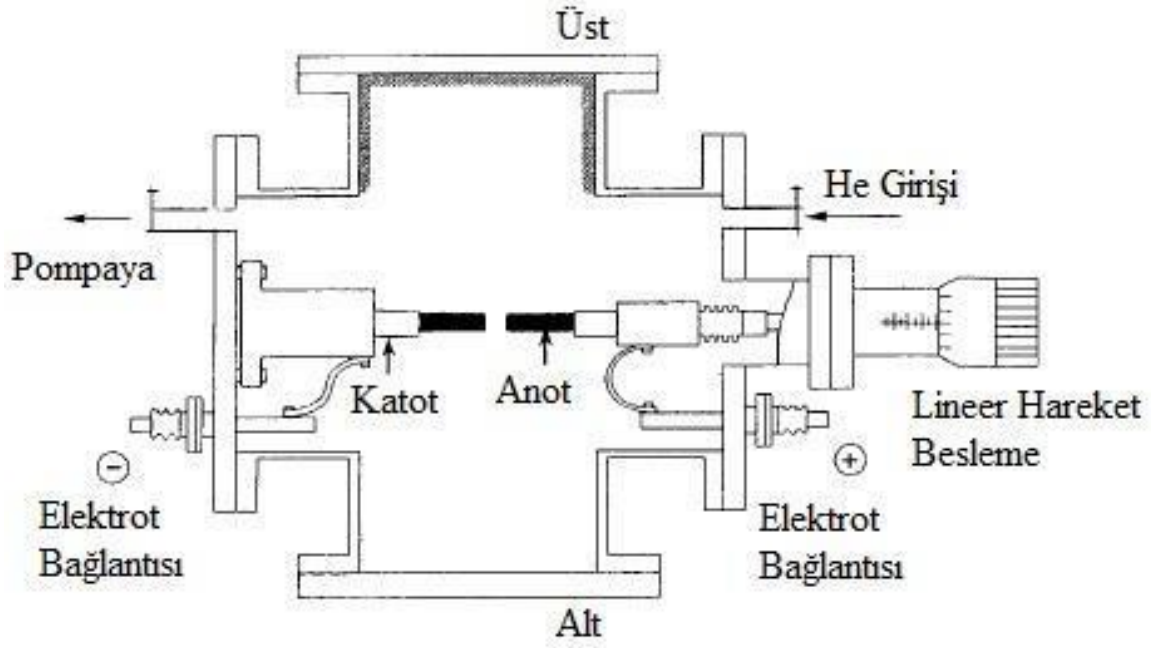
Üretim yöntemi belirlenirken saflık, miktar, yapı ve maliyet özellikleri etkili olmaktadır. Saflık ve üretim kapasitesi, üretim yönteminin belirlenmesinde etkin rol oynar.

Ark boşalım ve lazer aşındırma yöntemlerinde üretim verimi %20-100 arasında değişebilmektedir. Kimyasal buhar birikimi (CVD) yönteminde ise verim %70 ve üzerindedir (Zhao, Ohkohchi & Wang 1994).

Ark boşalım ve lazer aşındırma yöntemleriyle sentezlenen karbon nanotüpler genellikle diğer yöntemlerle üretilenlere nazaran daha az yapısal hata içermektedir. Bunun nedeni, uzun büyüme süreci sıcaklıklarının borumsu grafen tabakalarındaki hataları çok iyi bir şekilde tavlamaştır. Yüksek sıcaklık yöntemleriyle üretilen ÇDKNT'ler, düşük sıcaklıkta metal katalizörlü CVD yöntemi ile üretilen nanotüplere göre mükemmel bir yapıda ve hata içermemektedir.

3.2.5.1. Ark Boşalım

Karbon nanotüp sentezlenmesinde kullanılan en eski yöntemlerden biri olan ark boşalım tekniğinde, biri anot biri de katot olmak üzere hazırlanmış iki grafit çubuk arasında ark oluşacak bir mesafede uygulanan doğru akım sonucu nanotüp sentezlenmesi sağlanır (Şekil 3.16). İşlemin gerçekleşmesi için bir ark reaktörü içerisinde genellikle helyum gazı ile 600 mbar'dan yüksek bir basınç sağlanır ve 6 mm çaplı bir anot ile 9 mm çaplı bir katot arasında 20-40 V arası bir gerilim ve 50-100 A arası bir akım oluşturulur. Stabil arkın oluşma mesafesi 1mm veya daha az olmaktadır. Anoda geçen elektronlar anot ile çarpışarak katot üzerinde bir depozit oluşumuna yol açar. Bu oluşan depozit içinde karbon nanotüpler, nano parçacıklar ve kümelenmiş karbon bulunur. Ayrıca ark reaktörünün iç çeperi de karbon kümeleriyle kaplanır.



Şekil 3.16. Nanotüp ve fulleren üretiminde kullanılan ark boşalım sistemi (Dalkılıç, 2014)

Ark boşalım yönteminde, ilk kullanıldığı dönemden günümüze kadar çeşitli düzenlemeler yapılmıştır. Örneğin, He gazı yerine alternatif gazlar kullanarak yapılan araştırmalar mevcuttur. H₂, N₂, CF₄ ve organik buharlar kullanılan alternatif gazlara örnek verilebilir. Bu çalışmalardan bazılarında oldukça ilginç sonuçlar elde edilmiştir. Çapı 0.4 nm olan KNT, ark boşalım yöntemi ile H₂ gazı ortamında üretilmiştir.

Ark boşalma yönteminde verimi yüksek, kalitesi iyi nanotüp eldesini etkileyen birçok parametre vardır. Bu parametrelerden en önemlisi, ark boşalımın gerçekleştiği odacıktaki He gazı basıncıdır. 20 torr, 100 torr ve 500 torr'da deneyler yapan Ebbesen ve Ajayan, basınç artışıyla nanotüp veriminin arttığını gözlemlemiştir. 500 torr'un üzerindeki basınçlarda, kalitede belirgin bir değişiklik olmasa da toplam verimde düşüş olduğu tespit edilmiştir (Ebbesen & Ajayan, 1992).

Ark boşalım yöntemi için bir diğer önemli faktör ise akımdır. Çok yüksek akımlarda sert, sinterlenmiş ve çok az sayıda boş nanotüp içeren malzeme üretimi gerçekleştirilecektir. Bu nedenle akım olabildiğince düşük tutulmalı ve kararlı plazmayı sağlayacak şekilde uyumlu olmalıdır.

3.2.5.2. Lazer Buharlaşma

Bu teknikte, bir grafit parçanın hedef olarak kullanılıp, 500 Tor basınç altında yaklaşık 1200°C sıcaklıkta çalışan bir fırın içinde lazer ünitesiyle bombardımanı ile KNT sentezi yapılmaktadır. İlk olarak 1995 yılında, Rice Üniversitesinde keşfedilen bu teknikte lazerle buharlaştırılan grafitten çıkan karbon kümeleri, helyum veya argon içeren soygaz ortamında su soğutmalı bakır toplayıcı üzerinde birikirler. Bu birikim içinde karbon nanotüpler olacağı gibi bir miktar da nano parçacığın bulunur. Bu yöntemle yüksek kalitede TDKNT sentezlenmiştir.

Saf grafit hedef ile yapılan bombardıman sonucu elde edilen nanotüpler çok duvarlı olurken, Co, Ni, Fe gibi katalizör içeren hedeflerden elde edilen nanotüpler tek duvarlı yapıda olmaktadır (Reijenga, 2003). Lazerle aşındırma yöntemi, ark boşaltma yöntemine göre akma dayanımı daha yüksek, daha kaliteli tek duvarlı karbon nanotüpler üretmek için daha elverişli olmasına rağmen maliyeti yüksek ve üretim kapasitesi düşük bir yöntem olduğundan pek tercih edilmemektedir.

% 70-90 verimli olan bu yöntemin dezavantajı yüksek güç gereksinimi ve lazer kullanılmasından kaynaklı üretim maliyetinin yüksek olmasıdır. Ayrıca üretilen karbon nanotüpler metal katalizör ve amorf karbon gibi safsızlık içermektedir (Liu ve arkadaşları, 2014).

3.2.5.3. Kimyasal Buhar Birikimi

Karbon gazlarının katalizör yardımıyla kırılarak karbon nano filamanların üretilmesi yöntemi uzun süredir uygulanan bir yöntem olup katalizörlü kimyasal buhar ökeltme (CCVD) olarak bilinmektedir. Bu yöntem ilk defa 1998 yılında geliştirilmiştir. Diğeri yöntemlere göre daha basit ve düşük maliyetlidir. Bu yöntem, 1990'lı yıllara kadar karbon nano filamanlar, katalizörsüz kimyasal buhar çökeltme işlemlerinde kalınlaşma prensibiyle oluşturulan buharda büyütölen karbon fiberler adındaki daha büyük (mikrometrik) karbon fiberlerin üretiminde çekirdek altlığı olarak kullanılmaktaydı. Tek duvarlı ya da çok duvarlı KNT'lerin CCVD metotlarıyla üretilmesi, karbon içeren bir kaynağın küçük metalik parçalar ya da öbekler üzerinde ayrışması prensibine dayanmaktadır. Bu teknikte eğer bir katı altlık kullanımı söz konusuysa işleme heterojen

işlem, eğer her şey bir gaz fazı içinde gerçekleşiyorsa işleme homojen işlem denmektedir. Bu tepkimeler için kullanılan metaller genelde Fe, Co ve Ni gibi geçiş metallere aittir.

Ark ve lazer teknikleriyle karşılaştırıldıklarında daha düşük sıcaklıklarda uygulanan işlemlerdir, fakat KNT'lerin oluşumu 600°C ila 1000°C sıcaklıkları arasında gerçekleşmektedir. Düşük sıcaklık kullanımından ötürü, CCVD yöntemlerinin çok duvarlı KNT'lerin üretiminde kullanılmak üzere seçilmesi daha iyi olacaktır. Örnek olarak ark yöntemiyle üretilen ham tek duvarlı nanotüplerin yanında grafitik parçacıklar ve amorf benzeri karbon kalıntıları da bulunmaktadır. Homojen ve heterojen işlemlerin ikisi de hem kullanılan katalizörün doğasına hem de işlem şartlarına göre oldukça yüksek hassasiyet göstermektedirler. CCVD metotlarıyla üretilen KNT'ler ark yöntemiyle üretilenlerden genellikle çok daha uzunlardır (ark yöntemindekiler birkaç mikrometre uzunlukta iken, CCVD yöntemiyle üretilen onlarca hatta yüzlerce mikrometre uzunluklarında olabilirler).

Bu yöntem yüksek kalitede karbon nanotüp sentezlemek için çokça kullanılan bir yöntemdir. Bu metodun anahtar parametreleri ise;

- Hidrokarbonlar (gaz oranı ve akışı),
- Katalizörler,
- Sıcaklık' tır.

Kimyasal buhar biriktirme yönteminin diğer yöntemlere kıyasla tercih edilmesinin birçok sebebi vardır. Bunlar;

- Düşük miktarlarda karbon nanotüp üretilir.
- Karmaşık olmayan, reaksiyon kontrolü ve işletimi kolay bir sistemdir.
- Yüksek saflıktadır.
- Karbon nanotüplerde bazı kristal hatırlar bulunabilir.
- Yavaştır.
- İstenilen şekilde ve boyutta nanotüp elde etmek mümkündür.
- Bu yöntemde hammaddelere ulaşım kolaydır.
- Diğer üretim yöntemlerine kıyasla ekonomiktir.

3.2.6. Karbon Nanotüplerin Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Başlıca Karbon nanotüp üretim yöntemlerinin, deney koşulları reaksiyon sıcaklıkları, ürün, verim ve maliyet açısından karşılaştırılması aşağıdaki çizelgede verilmiştir (Çizelge 3.8).

Çizelge 3.8. KNT üretim yöntemlerinin karşılaştırılması (Shah & Tali, 2016)

	Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi	Ark Buharlaştırma Yöntemi	Lazer Buharlaştırma Yöntemi
Deney Koşulları	Düşük basınç- İner gaz	500 Torr-Ar veya azot	Atmosfer basıncı
Reaksiyon Sıcaklığı, °C	500-1000	≈4000	Oda sic.-1000
Ürün	TDKNT: 0.6-4 nm çapında uzun KNT ÇDKNT: 10-240 nm çapında uzun KNT	TDKNT: 0.6-1.4 nm çapında kısa KNT ÇDKNT: İç çap 1-3 nm dış çap ≈ 10 nm kısa KNT	TDKNT: 5-20µm uzunluğunda 1-2 nm çapında uzun KNT ÇDKNT: Üretimi mümkün, tercih edilmeyen, yüksek maliyetli üretim
Verim	Yüksek	Düşük	Düşük
Ürün Saflığı	Orta-Yüksek	Orta	Düşük
Maliyet	Düşük	Yüksek	Yüksek

Çizelge 3.9. KNT üretim yöntemlerinin karşılaştırılması (Baddour & Briens, 2005; Balasubramanian & Burghard, 2005)

Yöntem	Elektrik Ark Boşalmı	Kimyasal Buhar Çökeltimi	Lazerle Buharlaştırma
Kâşif	Ebbesen ve Ajayan, 1992, NEC, Japonya	Endo, Shinshu Üni. Nagano, Japonya	Smalley, 1995 Rice Üniversitesi
Verim	%30-90	%20-100	Enfazla %70
Üretim	120 g/gün	50 kg/gün	50 g/gün
TDNT Sentezi	0.6-1.4 nm çaplı kısa tüpler	0.6-4 nm çaplı uzun tüpler	1-2 nm çaplı TDNT'ler 5-20 µm çaplı demetler
ÇDNT Sentezi	İççapı 1-3 nm, dışçapı 10 nm çaplı kısa tüpler	10-240 nm arası çaplı uzun tüpler	Mümkün
Üstünlükler	Kolay, düşük maliyet üstün nitelikli ürünler	Sınai üretime, enuygun, kolay, ucuz yüksek saflık, KNT'ler uzun boylu, basit süreç, TDNT çapı denetlenebilir,	Yüksek nitelikli ürün, birörnek çap dağılımı, yüksek saflık
Sorunlar	Aşırı safsızlık, kısa KNT'ler, rastgele ürünler, ölçek büyütme	Kusurlu ürünler, esasen ÇDNT sentezi	Aşırı yüksek maliyet, ölçek büyütme çok zor

3.2.7. Karbon Nanotüplerin Kullanım Alanları

İleri teknoloji ürünü malzemeler üretiminin bir parçası olan KNT'ler, sahip oldukları üstün özellikler nedeniyle üzerinde en çok çalışılan malzemeler arasında yer almaktadır. KNT'lerin geleceğe ait öngörülerin fark edilmesi, mühendislik açısından günümüzde uygulamalarda sağladıkları farklar rahatça anlaşılmaktadır. Karbon nanotüpler benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde geniş kullanım alanına sahiptir. Bu kullanım alanlarından bazıları aşağıda verilmektedir;

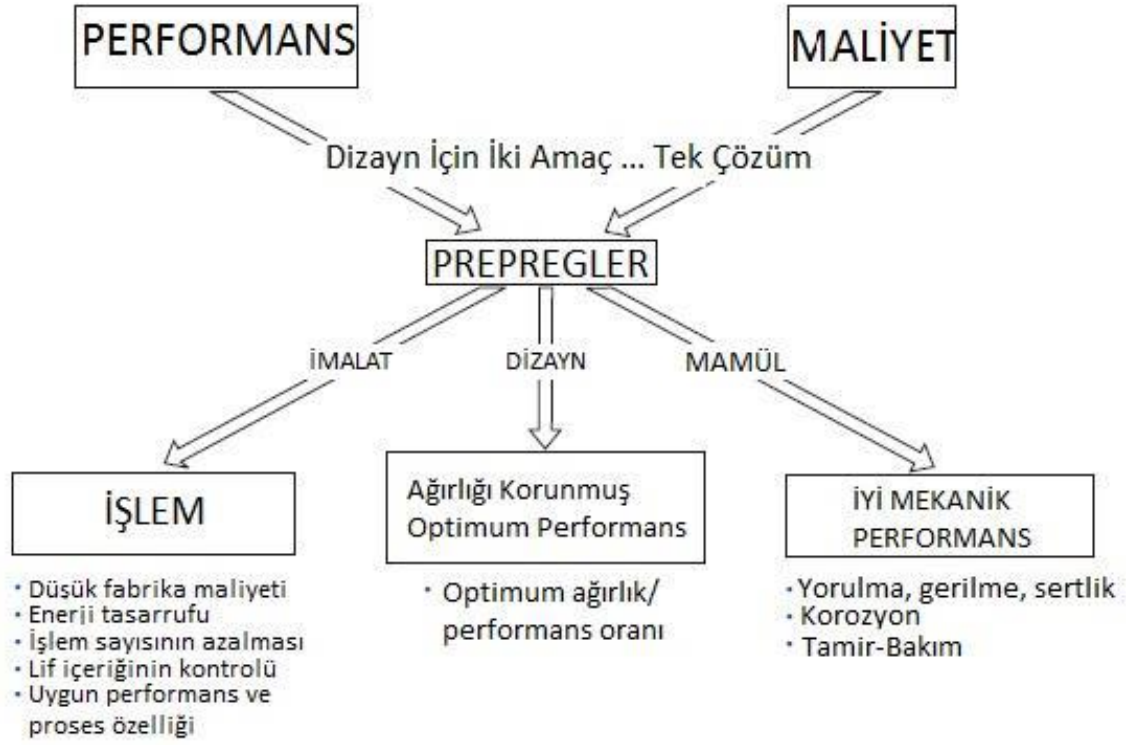
- Kevlardan daha yüksek young modülü ve çekme dayanımına sahip olmasından dolayı kurşun geçirmez yeleklerin yapımında,
- Elektrik alan sarımlı aygıtlar
- Enerji depolama
- Mikroskop problemleri
- Kimyasal sensörler
- Üç boyutlu güneş hücreleri
- Nanotüple alaşımlandırılmış karbon fiberler
- Kanser tedavisi

3.3. PREPREG KARBON FİBER

Prepreg kelime olarak (PRE-imPREGnated levha malzemesi) yani ön emdirilmiş kelimesinin kısa halidir. Bir matris (reçine) ve bir elyaf takviyesinden oluşan malzeme sistemleridir. Takviye elemanı ile istenilen miktarda emdirilmesi ile elde edilen kompozit malzemeye prepreg denir. Dokunmuş ya da tek yönlü cam, karbon ve aramid kumaşlar üzerine reçine sisteminin emdirilmesi ve yarı kürleştirilmesi ile ürün oluşturulmaktadır. Prepregler kürleme için gerekli reçine ve sertleştirici karışımını içerdiğinden ilave reçine işçiliği gerektirmeden serime hazır haldedir. Prepreg levhaların yüzeyleri yapışkan olduğundan daima koruyucu kâğıtlar arasında korunurlar. Kürleşme süresi de el-yatırması, vakum infüzyon ve vakum torbalama yöntemlerine göre daha kısadır.

Havacılık endüstrisindeki birçok kompozit hibrid yapı prepreg yöntemiyle üretilmektedir. Nihai yapıyı elde etmek için örgü tipinin belirlenmesi, fiber tipi, matris seçimi son derece önemlidir. Bilindiği gibi prepreg malzemelerin ana kullanıma amacı performans ve maliyettir. Bu iki ana kriteri en iyi şartlarda elde ederek asıl malzemeye ulaşmak hedefidir.

Prepreg kompozitlerde, reçineler tam olarak kürlenmezler, jel time – jelleşme zamanına kadar ısıtılması beklendikten sonra literatürde B – Stage olarak geçen bir noktaya kadar kürleme prosesi gerçekleştirilir. Prepreg uygulamalarında, kullanıcı daha sonra reçine sisteminin el verdiği sıcaklık ve basınç değerlerinde kürleme prosesine devam edebilir. Prepregler hemen hemen her tür kompozit malzeme üretimine uygundur. Prepreg levhaların yüzeyleri yapışkan olduğundan daima koruyucu kâğıtlar arasında korunurlar. Bu durumda prepreg rulo olarak sarılabilir ve stoklanabilir. Stoklama koşullarına uyulması halinde son kullanma tarihine kadar muhafaza edilebilirler (Reyne, 1990). Uygulamaların özelliklerine göre prepreg seçilirken iki ana kriter vardır, performans ve maliyet. Prepreg kullananların avantajı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Prepreg kullanımının avantajları (Oğuz, 2017)

3.3.1. Prepreg Malzemenin Avantajları

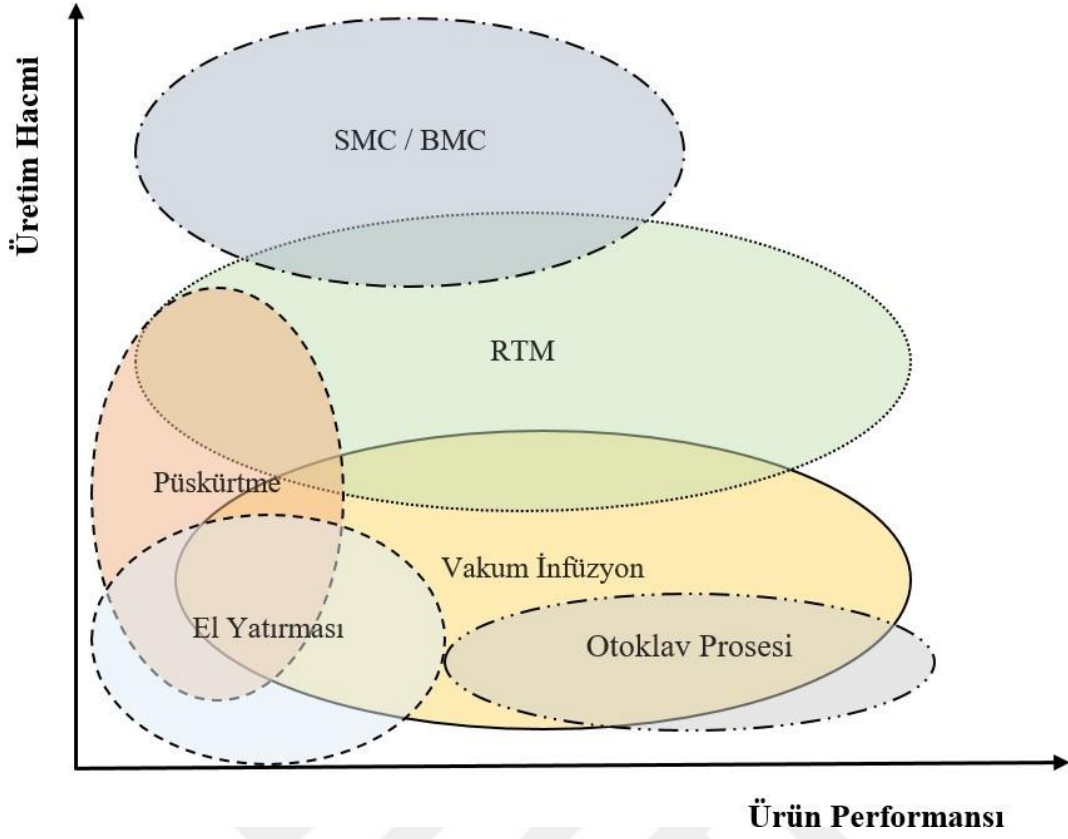
1990'ların başlarında prepregler önemli malzeme sayılırdı. Uçak tasarımlarında %5 kadar ve yan ürünlerde kullanılmaktaydı. Günümüzde havacılık sektörünün temel parçası olup Airbus A350 XWB ve Boeing 787'nin gövdelerinde %50'den fazla bulunmaktadır. Gelişmeyi uzay teknolojisi, rüzgâr enerjisi, otomotiv, spor aletleri ve diğer endüstriyel ekipmanlar takip etti. Son uygulamalarda prepreglerden yararlanılarak petrol ve gaz işletmelerinde boru hattı ve yüksek basınçlı tank yapımında kullanılmaktadır. Gelişen prepregler, kompozit malzemeler de daha yüksek güç ve özgün tasarımlar çıkmasını sağlamıştır.

Mükemmel mekanik performans sağlamak için kullanılan prepregler çok uzun süre ortam sıcaklığında kendisini muhafaza edebilmektedir. Hafifliğin ve dayanımın çok önemli olduğu kanat, pervane, yat, tekne uygulamalar için ideal bir seçimdir.

- Yüksek mekanik mukavemet
- Düşük yoğunluk , 1,8 g/cm³
- İyi ısı iletkenlik, 20 W/mK (Standart modül için)
- Yüksek germe-çekme dayanımı, Germe Modülü; 220-240 GPa,
- Germe Dayanımı; 3450-4850 MPa
- Düşük lif çapı, 5-8 µm
- Elektriksel öz direnç, 1650 µΩ
- Kopma uzaması , %1,6-2,2
- Sınırsız raf ömrü
- Korozyona karşı dayanım, inorganik, asit ve bazlardan etkilenmez.

Prepreglerle yapılan kompozit parça üretimlerinde kalınlık, ağırlık ve yüzey kalitesi gibi son ürün özellikleri diğer yöntemlere kıyasla standardize edilebilir ve tekrarlanabilir, yüksek ürün kalitesi sağlanarak düşük fire oranlarına ulaşılabilir. Ayarlanmış reçine oranı reçine zengin bölge, kuru bölge, hava boşlukları (pinhole) gibi problemleri ortadan kaldırdığı için sürecin verimliliğini artırır. Kuru kumaşların kalıba serilmesine kıyasla prepreg serimi oldukça basittir. Önceden emdirilmiş reçine, kumaş liflerinin bir arada kalmalarını sağladığından ve hiçbir ilave işleme gerek olmadan kalıba ve kendi üzerine yapışabildiğinden kesimi ve serimi oldukça kolaydır. Diğer yöntemlerdeki reçine hazırlama sürecini ortadan kaldırdığından çalışma alanı temizliği ve işçi sağlığı açısından en ideal yöntemdir.

Prepregler kompozit üretiminde verimliliği arttırmaktadır. Out of Autoclave – (otoklavsız üretim) prepregler, kompozit üreticilerine düşük ilk yatırım maliyeti ve düşük üretim maliyetleri ile yüksek kaliteli ve hacimli, verimli üretim yapma imkanı sunmaktadır.



Şekil 3.18. Prepreglerin performans ve üretim hacimleri açısından karşılaştırılması (Daniel & Steven, 2001)

Prepreglerin saklama koşulları da üretici için büyük bir zorluktur. Oda şartlarında 4-6 haftaya kadar saklanabilen çeşitleri olsa da genel olarak -20°C civarında dondurucuda saklanma koşulları vardır. Ayrıca dondurucudan çıkarıldıktan sonra kullanılmaları gerekmektedir.

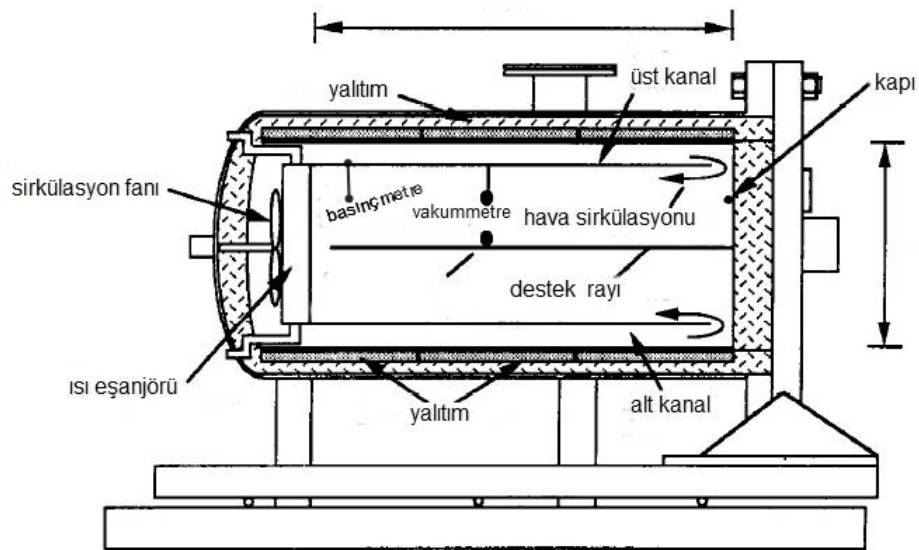
3.4. OTOKLAV

Otoklav Fransız kökenli bir sözcük olup; ‘auto’ yani kendiliğinden ve ‘clavis’ yani anahtar sözcüklerinin birleşiminden meydana gelir. Sözcük anlamı kendinden kilitli cihazdır.

Otoklav ilk biçimiyle; 1861 yılında Fransız bir fizikçi ve buhar makinesi mucitlerinden Denis Papin’in icadı olan buhar basınçlı tencere, yani bizim deyimimizle düdüklü tencere olarak karşımıza çıkar.

Bir kazan ve dayanımı çok yüksek bir kapaktan oluşan yapıya otoklav denir. Otoklavlar sanayide yıllardır kullanılmaktadır. Teknoloji geliştikçe otoklav tasarımına benzer, başlangıçta buharla ısıtılmış kaplardan son derece gelişmiş bilgisayarlı kontrol sistemleriyle en son kaynak tekniklerini kullanarak üretilen basınçlı kaplara dönüşmüştür. Otoklavı endüstride tekstil, gıda, kereste sterilizasyon ve kauçuk endüstrisinde kullanırken, şimdi daha çok özelliklere sahip olan otoklavlar, gelişmiş kompozit malzeme üretimine kullanılmaktadır.

Otoklav yüksek sıcaklığa, basınca dayanıklı bir cihazdır. Otoklav temelde tank ve kapak olmak üzere iki ana parçadan oluşur. Teknik açıdan ele alırsak genellikle çift çeperli metalden oluşan, özel kapağı izolasyonlu ve contalı, gerekli sıcaklık, basınç, zaman parametreleriyle istenilen değerlere ayarlanabilen, yüksek basınca ve sıcaklığa dayanıklı bir cihazdır. Sıcaklık, basınç ve vakum değerlerini kontrol etmek için termometre, barometre ve vakum metre içerir. Otoklav tankına basınç sağlamak için, inert gazlar, genellikle azot gazı kullanılır.



Şekil 3.19. Otoklav Yapısı (Monaghan, 1991)

Otoklavda reçine sistemlerinin devreye girmesi ve havacılık endüstrisi tarafından öngörülen daha sıkı toleranslar dahilinde otoklav içinde homojen bir sıcaklık elde etme kabiliyeti için sıcaklık kontrolü kritik öneme sahiptir. Otoklav üreticileri bunu başarmak için kullandıkları birkaç sistem vardır, bunlar doğrudan ve dolaylı ısıtma sistemleri olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Dolaylı ısıtma sistemleri, otoklavın dışındaki ısı kaynağına sahiptir ve bir ısı eşanjörü vasıtasıyla ısıyı aktarır. Doğrudan ısıtma sistemleri, otoklav içinde ısı kaynaklarına sahiptir ve elemanlardan basınç ortamına ısı transferini en üst düzeye çıkarmayı amaçlamaktadır. Isıtma işlemi, elektrikli ısıtıcı veya doğal gaz gibi farklı ısıtıcılar, Isıtıcı tipi otoklavın boyutuna ve ulaşması gereken maksimum sıcaklığa göre seçilir.

Otoklavda basınçlandırma sistemi ise kullanıcının kütleme işlemi sırasında herhangi bir zamanda iç basınç koşullarını istenen seviyeye ayarlamasına izin verecek şekilde tasarlanmıştır. Basınçlı sistemlerle çalışırken güvenlik çok önemlidir. Gerekli güvenlik şartlarının yerinde olduğundan emin olmak için katı tasarım kodları (örn. PD5500, ASME) belirtilmiştir. Tüm yeni otoklavlar, kullanım sertifikası alınmadan önce, kazanın öngörülen maksimum çalışma basıncının 1,5 katı kadar bir basınç uygulamasına tabi tutulur. Buna ek olarak, tüm kazanlara, aşırı basınç durumunda serbest bırakılacak olan öngörülen maksimum çalışma basıncının %10 üzerinde ayarlanmış bir emniyet valfi bulunur. Bu emniyet valfi, elektronik kontrol sistemi cihazları arızalansa bile tehlikeli bir durumdan kaçınılmasını sağlayan mekanik bir cihazdır.

Otoklavlarla çalışırken güvenlik çok önemlidir. Kapağın doğru ve güvenli bir şekilde kapatılması, yüksek basınç altında kullanıldığı için çok önemlidir. Örnek vermek gerekirse, sadece 0,5 bar'a kadar basınçlandırılmış 1m çapında bir otoklavın önünde durmak (tipik çalışma basınçları 5-7bar'dır), 4 ton ağırlığın altında durmak gibidir. Genel olarak uygulanan güvenlik önlemleri İngiltere Sağlık ve Güvenlik birimi tarafından emniyet cihazlarının takılacağı şekilde "Otoklavlarda Güvenlik" rehberi olarak uygulanmaktadır.

3.4.1. Otoklav Kullanım Nedenleri

Nano mühendislik ve nanokompozitlerin mekanik özellik incelemelerinin araştırılması ve geliştirilmesi açısından en etkili yöntem, kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan otoklav yöntemidir. Otoklav yöntemi, yüksek derecede homojenlik sağlar ve kumaş tabakaları arasında daha iyi bağlantı sağlar. Boşlukları en aza indirmesi açısından, otoklav yöntemi, kompozit malzemelerde, diğer imalat yöntemlerine göre daha az boşluk üretir. Diğer bir taraftan bu yöntem ile elyaflar reçine ile tamamen birleşmekte ve bu durum katmanlar arasında daha iyi bir birleşme yaratmaktadır.

En az iki bileşenden oluşan kompozit malzemeler, imalat kalitesine oldukça bağlıdır. Kompozitlerin iki fazlı olması nedeniyle, imal etmek için özel yöntemler tercih edilmektedir. Kompozit malzemelerin performansını en üst düzeye çıkarmak, fiber-reçine oranında artış ve tüm hava boşluklarının uzaklaştırılmasını gerektirir. Bu malzemeyi yüksek basınçlara ve sıcaklıklara maruz bırakarak başarılabilir. Sonsuz çeşitlilikteki farklı şekil ve ebatlarda bunu başarmanın en kontrol edilebilir metodu, kompozit yapıyı içeren bir basınç kabına sıkıştırılmış bir gaz uygulamaktır. Uygulamada, bu bir otoklavda gerçekleştirilir.

Çok yaygın olarak kullanılan bir yöntem olan yüksek sıcaklık ve basınç altında otoklavlar aracılığıyla kürelemedir; bu da boşlukların minimum olmasını ve çok kaliteli malzeme elde edilmesine yardımcı olur. Otoklavlar işlemlerin fiziksel boyutlarına göre istenilen boyutlarda üretilir ve genellikle vulkanizasyon ve kür esaslı üretimde kullanılırlar. Uygulama alanları havacılık sektöründe çok daha büyük yapıların üretilmesi arasında geniş bir yelpazede bulunmaktadır.

Birçok farklı amaçla kullanılmak üzere üretilmiş olan otoklav sistemlerinde tasarım ve imalat parametreleri cihazın kullanım alanına bağlıdır, ancak genel olarak sıcaklık, basınç ve vakum miktarı en önemli hususlardır.

Boşluksuz veya minimum boşluklu kompozit üretim, polimer takviyeli kompozit malzemeler için yüksek mekanik performans için gerekli kritik noktalardan biridir ve bu süreçte otoklavın iç kısmı tipik olarak 7-8 bar'da yüksek atmosferik basınçlarda basınçlandırılır. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli

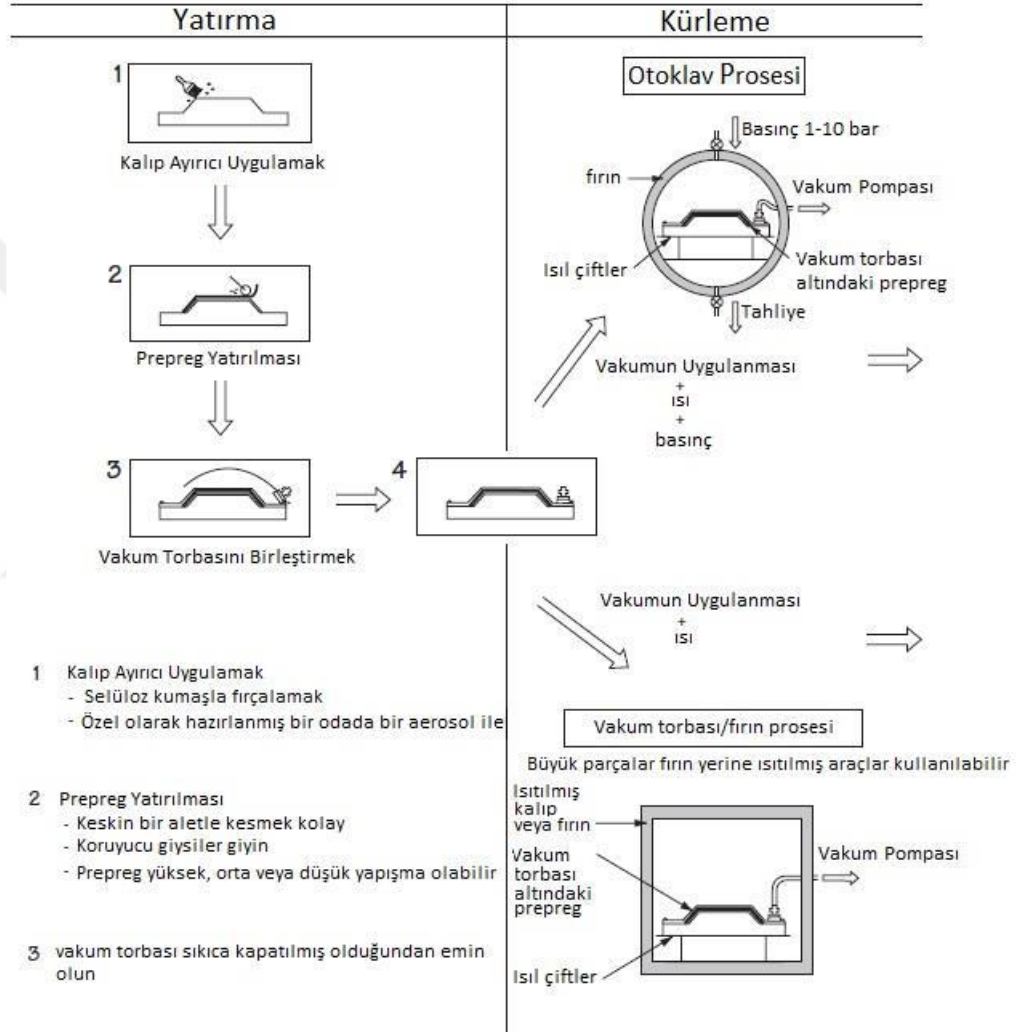
faktörler, üretim aşamasındaki çeşitli üretim parametreleridir. Bu parametreler bir araya getirilen malzemeler, sıcaklık, basınç, nem ve üretim sürecidir. Her parametre doğrudan kompozit malzemenin mekanik özelliklerini etkiler.

Otoklav sistemlerinde ki sıcaklık ve zaman kürleme sürecinin kompozit malzemenin kimyasal bileşimi ile ilgili olmasıdır. Örneğin, genellikle havacılık endüstrisinde kullanılan kompozitleri sertleştiren otoklavlar, 7 bar basınçta bir azot atmosferinde 120-230°C'lik normal çalışma koşullarına sahiptir. Havacılık ve uzay kompozit yapıları esas olarak otoklavlarda işlenecek olan karbon fiber ve epoksi reçineleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Kompozit malzemenin sertleşme süresi, kürleme oranına ve polimerin kimyasal bileşimine bağlı olarak 90 dakika ila 12 saat arasında uzanır. Kısacası, kompozit malzemelerin tümü, kimyasal bileşime ve gerekli mekanik özelliklere bağlı olarak farklı kürleme sıcaklığına ve süresine sahiptir.

Otoklavda vakum kontrolü ise kompozit malzeme, otoklavda önceden çekilmiş bir vakum ile gelir. Torba daha sonra, otoklavın içine yerleştirilmiş esnek hortumlar vasıtasıyla otoklav vakum sistemine bağlanır. Kürleme döngüsü boyunca, torbalanmış her bir bileşendeki vakum seviyesi izlenir ve bir sızıntı veya patlama koşulu meydana gelirse, boşaltma torbası otomatik olarak vakum sisteminin geri kalanından izole edilir, böylece pozitif basıncın diğer torbalara ortak bir yoldan girmesi önlenmiş olur. Sertleştirme işlemi sırasında, torba içinde uçucu maddeler oluşur. Bunlar vakum sistemi tarafından çekilir.

Otoklav sistemlerindeki basınç etkisi, vakum torbası üzerindeki dış basıncın, kumaşlardaki ve epoksideki boşlukların azaltılması açısından kilit nokta olmasıdır. Çünkü üretimden sonra meydana gelen malzemedeki boşluklar, fiziksel gerilme altında malzemenin içinde bozulma çatlakları yaratabilir. Kısacası, boşluklar doğrudan istenen malzemenin mekanik özelliklerini etkiler. Örneğin, Judd ve Wright,% 1 kadar düşük bir boşluk içeriğinin, bükülme, % 3 gerginlik, % 9 burulma, kayma % 8, gerilmede % 8'e kadar dayanımda bir azalmaya yol açtığını bildirdi. Otoklav sistemlerinde boşluk içeriği için yüksek basınca ek olarak, avantaj sağlayan bir yöntemdir çünkü otoklavda gerçekleştirilen sertleştirme işleminin gerçek zamanlı kontrolünü sağlar ve malzemenin çeşitli geometri ve boyutlarda sertleştirilmesini sağlar. Modern kompozit malzemelerin ve reçine transfer kalıp imalat süreçlerinin geliştirilmesiyle birlikte kompozit kür otoklavları için geleceğin belirsiz olduğu yıllarca söylendi.

Bununla birlikte, daha hafif, daha hızlı ve daha çevik uçaklar, daha büyük yolcu uçağı ve gittikçe daha yüksek performanslı motor sporları araçları arayışı, günümüzdeki otoklavın hem büyüklük hem de gelişmişliğinde artan sayılarda artışa yol açmıştır. Alternatif kütleme teknikleri ve bileşenlerin performansının artmasına rağmen, otoklav hala dünyanın havacılık ve motor sporları endüstrileri için her gün iş gücü görevi görüyor ve hala heyecan verici bir geleceğe sahip görünüyor.



Şekil 3.20. Malzeme üretim süreci (Oğuz, 2017)

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, prepreg karbon kumaş kullanılarak üretilen karbon nanotüp takviyeli ve takviyesiz kompozit levhalarda karbon nanotüp takviyesinin darbe dayanımına etkisi araştırılmıştır. Malzeme üretim sürecinde karbon nanotüp takviyeli kompozit malzeme üretiminde takviye elemanı olarak prepreg karbon fiber kumaş (245 gr/m², 2/2 TWILL), arayüzde iyi yapışma sağlanması amacıyla nanotüplü reçine prepreg katmanları arasına fırça ile disperse edilmiştir. Takviye malzemesi olarak çok duvarlı karbon nanotüp (saflık % 92, dış çap 8-10 nm) ve matris takviyesi olarak VTP DA100 epoksi prepreg reçine sistemi kullanılmıştır. Prepreg kullanımının nedeni yüksek fiber-matris oranı sağlamak iken, burada KNT takviyeli reçine ilavesinin amacı iyi bir ara yüz formu elde edilmesi ve bu metodun darbe dayanımı ile test edilmesidir. Yapılan araştırmalar neticesinde literatüre uygun olarak çok duvarlı karbon nanotüp katkı oranı ağırlıkça % 0,3 belirlenmiştir. Karbon levha malzemelerin üretiminde vakum torbalama yöntemi kullanılmıştır. Karbon levhalar üretim prosesinin son aşamasında 6 bar basınçta otoklavda kürlenerek elde edilmiştir.

Bu çalışmalar ışığında üretilen numunelere çekme, darbe ve termal olarak TGA/DSC testi uygulanmış, bu testler sonucunda hasarlı parçalardan stereo ve optik mikroskop ile taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazından alınan yüzey görüntüleri incelenerek karbon nanotüp takviyeli ve takviyesiz kompozit malzemelerde hasar mekanizmaları incelenmiştir.

Otoklav prosesi ile 6 bar basınç altında kürlenerek üretilen prepreg kompozit ve karbon nanotüp takviyeli prepreg kompozit malzemelerden çekme testi için 6 adet deney numunesi ASTM D3039 standartlarına uygun olarak, darbe testi için 8 adet deney numunesi ASTM D7136 standartlarına uygun ölçülerde oluşturulmuştur. Termal gravimetre analizi (TGA) ve diferansiyel taramalı kalorimetre analizi (DSC) için ÇDKNT takviyeli ve takviyesiz olmak üzere 6 deney numunesi hazırlanmıştır. Numuneler iki ayrı plaka 300x300 mm olacak şekilde üretilmiştir. Tüm deney numuneleri bu plakalardan üretilmiştir.

%0.3 Karbon Nanotüp katkısının akma mukavemeti, elastisite modülünde artış, darbe hasarında azalma meydana getirdiği bilindiğinden bu özelliklerin prepreg malzeme kullanımında ne kadar değiştiği araştırılmıştır.

Labscale ölçeğinde maliyet hesabı yapıldığında ise; KNT ilavesinin çok büyük bir maliyet etkisi bulunmamak ile beraber normal el yatırma yöntemine göre kıyaslandığında %80'lik bir fiyat farkı ortaya çıkmaktadır (Çizelge 4.1). Değerler ortalama değerlerdir.

Çizelge 4. 1. Maliyet Hesabı

Malzeme	Miktarı	Birim Fiyatı	Tutar
Prepreg	1.62 m2	170 TL	275TL
Otoklav Reçinesi	1 Adet	410TL	410TL
Karbon Nanotüp	%0.3 gr	50TL	15TL
Vakum Malzemeleri	1 Adet	100TL	100TL
Vakum İşlemi	1 Adet	200TL	200TL
Otoklav + işçilik	1 adet	500 TL	500TL
Toplam			1.500TL

Yukarıdaki tabloda da görüldüğü üzere maliyetler göz önüne alındığında KNT ilavesinin maliyeti ciddi oranda etkilemediği görülmektedir. Yine ağırlıkça KNT'li ve KNT'siz numunelerde herhangi bir avantajlı gerekçe belirtilememiştir.

Üretilen numunelerde 9 kat prepreg ile KNT takviyesiz 200 MPa çekme dayanımı, KNT'li numunelerde ise yaklaşık 300 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir. Elde edilen çekme dayanımını KNT ilavesi yapmadan yaklaşık 15 kat prepreg ile sağlanabileceği öngörülmüş ve bunun üretim maliyetine katkısı, KNT ilavesinden 15 kat daha maliyetli olduğu görülmüştür. KNT ilavesi her ne kadar işçilik konusunda dezavantajlı gözükse de gerek maliyet, gerek mukavemet yönünden ideal oranlar kullanıldığında avantajlı olduğu görülmüştür.

Kompozit üretiminde üretim metotlarının karşılaştırılması Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Üretim metotlarının karşılaştırılması

Prepreg	El Yatırması	Vakum İnfüzyon
Yüksek mekanik Değer Ayarlanabilir reçine/fiber Oranı Standart ve uniform Ürün Düşük proses zamanı Yüksek yüzey kalitesi Yüksek sıcaklık dayanımı Temiz ve firesiz üretim	Yüksek işgücü Yüksek reçine oranı Düşük mekanik değer Düşük sıcaklık dayanımı	Yüksek işgücü ve maliyet Düşük üretim hızı Yüksek üretim maliyeti Üretimde hata olasılığı Düşük mekanik özellikler Pahalı atık malzeme

4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Çalışma kapsamında ÇDKNT takviyeli kompozit malzeme üretiminde takviye elemanı olarak prepreg (245 gr/m² 2/2 TWILL) karbon fiber kumaş, matris malzemesi olarak ÇDKNT (saflık %92, dış çap 8-10 nm) ve VTP DA100 epoksi prepreg reçine sistemi kullanılmıştır.

Çizelge 4.2.Prepreg karbon fiber kumaş özellikleri

Malzeme	Özellikler	Değer
Prepreg Karbon Fiber Kumaş	Yoğunluk	1,8 g/cm ³
	Isıl İletkenlik	20 W/mK
	Çekme Modülü	220 – 240Gpa
	Çekme Dayanımı	3450 – 4850 Mpa
	Lif Çapı	5 – 8µm
	Öz Direnç	1650 µω
	Kopma Uzaması	%1,6 – 2,2

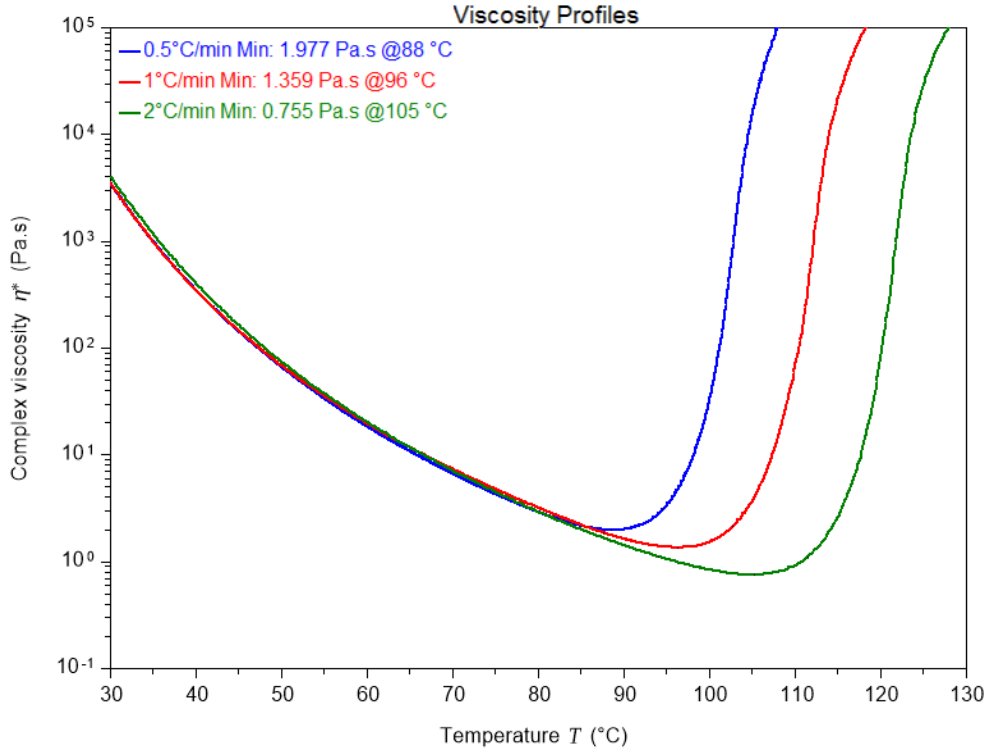
Çizelge 4.3. Çok duvarlı karbon nanotüp özellikleri

Malzeme	Özellikler	Değer
Çok Duvarlı Karbon Nanotüp	Safılık	%92
	Dış Çap	8 – 10nm
	İç Çap	5 – 15nm
	Uzunluk	1 – 3 μ m
	Yoğunluk	2,4 g/cm ³
	Elektrik İletkenliği	98 S/cm

Çizelge 4.4.Epoksi reçine özellikleri(SPM Prepreg Systems)

Neat Resin Properties				
		Cured for 4 hr @ 100°C	Cured for 30 min @ 90°C 2 hr at 120°C	
Glass Transition Temperature T_g (°C)	Onset	110	125	
	Loss	119	135	
	ASTM D7028 3°C/min	Tangent	123	139
		Delta		
3-point Flexural properties (ISO 178)				
Flexural modulus		GPa	3	
Max. flexural strength		MPa	135	
Elongation at flexural strength		%	6.4	

Çizelge 4.5. Epoksi reçine viskozite sıcaklık eğrileri (SPM Prepreg Systems)



4.2. Kompozit Numunelerin Üretim Süreci

Kompozit malzemelerin üretim sürecinde ÇDKNT takviyeli ve takviyesiz olarak aynı parametrelerde üretilmiştir. Üretim sürecinde (300 x 300mm) boyutlarında 9 katmanlı olarak 4 adet plaka üretilmiştir.

4.2.1 ÇDKNT Takviyesiz Prepreg Karbon Fiber Kumaş Plaka Üretim Süreci

Üretim sürecinde kullanılacak prepreg karbon fiber kumaş -18°C 'de muhafaza edilmiştir. Üretim başlamadan önce prepreg kumaş oda sıcaklığında 15 dakika kadar bekletilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Kesim öncesi prepreg kumaş serimi

İstenilen konfigürasyonda hazırlanan prepreg kumaş (300x300mm) ebatlarında dokuz ayrı tabaka olacak şekilde kesilmiştir (Şekil 4.2). Daha sonra tabakalar arasına KNT takviyesiz otoklav reçinesi fırça ile sürülerek 9 tabaka olacak şekilde laminat üretilmiştir. Vakum torbalama içerisinde basınca alınmıştır (Şekil 4.3).



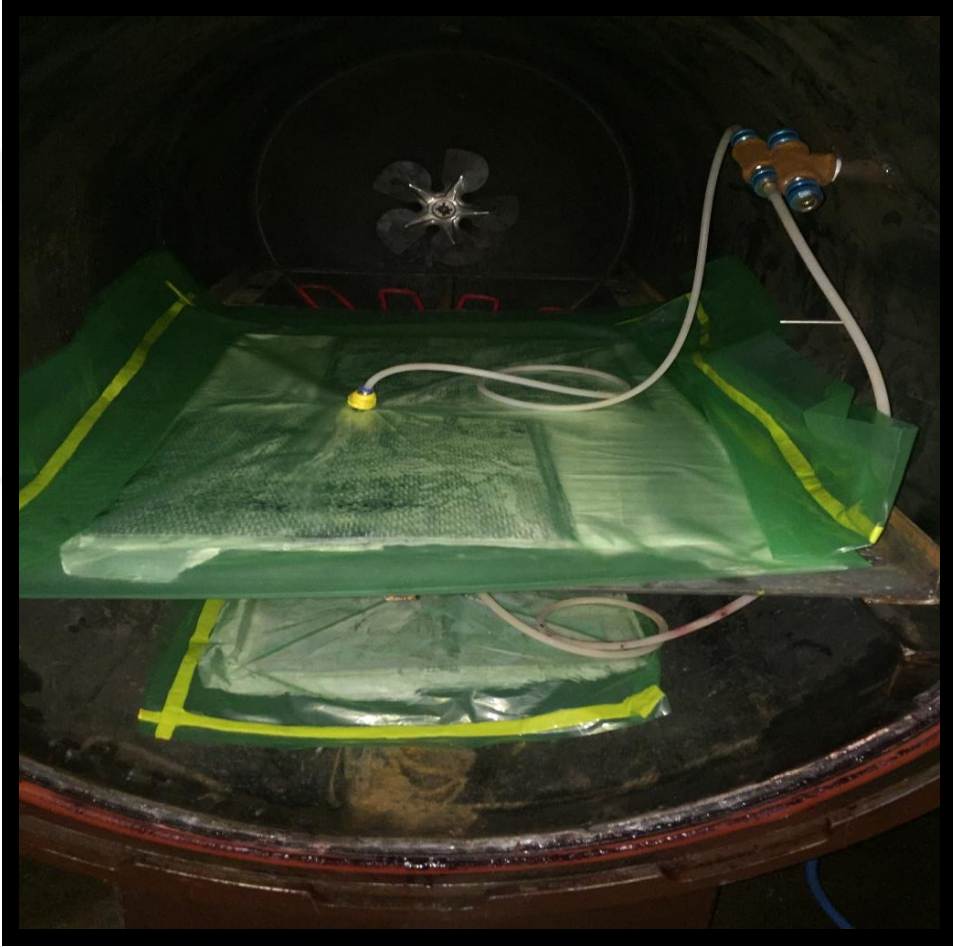
Şekil 4.2. Kesimi tamamlanan prepeg kumaş

Daha sonra vakum torbasının üstüne vakum ağız (yolu) takılmıştır ve vakuma bağlanmıştır. -0.85 atm basınç altında 15 dakika tam vakum uygulanarak prepeg kumaşın homojen dağılımı ve kalıbı sarması sağlanır.



Şekil 4.3. Vakum Torbalama

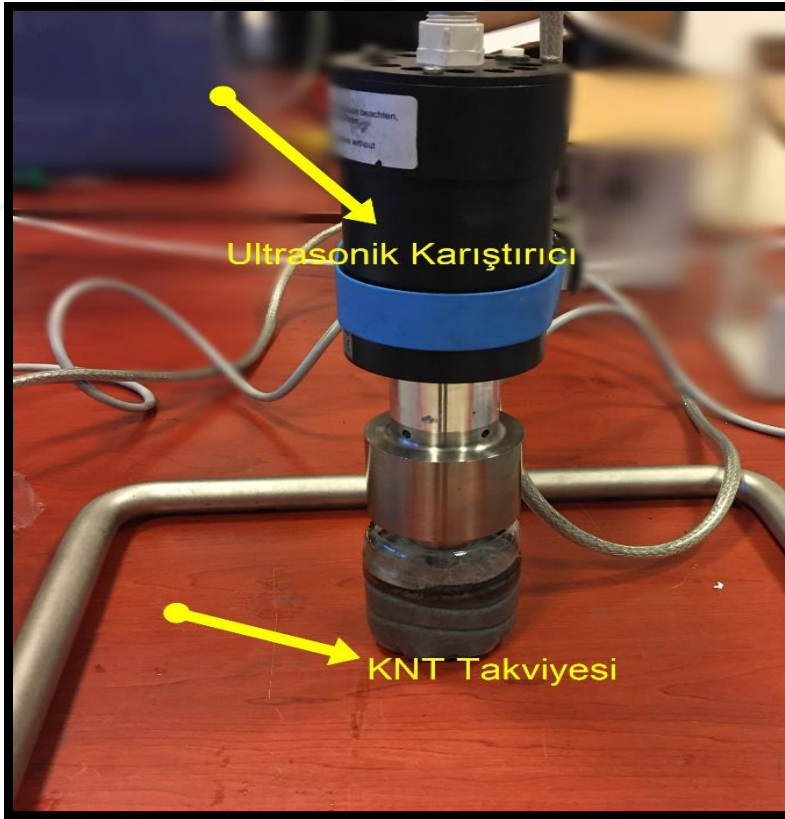
Son üretim aşamasında numuneler otoklav prosesine dahil edilmiş ve vakum kaçırmadığı kontrol edilmiştir. 2 ° C/min ısıtma hızı ile sıcaklık 85 °C' a çıkarılmıştır ve basınç 6 bar'a yükseltilmiştir. 6 bar basınç Azot(N) gazı kullanılarak elde edilmiştir. Yüksek sıcaklıkta yanma ve patlamama olmaması için basınç azot gazı kullanılarak sağlanmıştır. Numune 85 °C 6-8 saat kürlenmiş ve numune otoklavda doğal soğumaya bırakılmış, 12 saat sonra numuneler otoklavdan çıkarılarak üretim tamamlanmıştır. Kalıptan numune çıkarılmıştır ve kenarlarda oluşan çıkıntılar su jeti ile kesilerek düzeltilmiştir.



Şekil 4.4. Otoklav içerisine yerleştirilen numuneler

4.2.2 ÇDKNT Takviyeli Prepreg Karbon Fiber Kumaş Plaka Üretim Süreci

-18 °C’de muhafaza edilen prepreg karbon fiber kumaş üretim başlamadan önce oda sıcaklığında 15 dakika kadar bekletilmiştir. İstenilen konfigürasyonda hazırlanan prepreg kumaş 300x300 (mm) ebatlarında dokuz ayrı tabaka olacak şekilde kesilmiştir. Nanotüp takviyesi için ayrıca 100 gr VTP DA100 reçineye %0,3 Karbon Nanotüp ilave edilerek 15 dakika mekanik karıştırıcı da karıştırılmış, daha sonra ultrasonik karıştırıcıda iki ayrı ara soğutma uygulanarak toplam 15 dakika karıştırılmıştır (Şekil 4.5). Karbon nanotüp prepreg tabakalar arasına eşit oranda Hand Lay Up yöntemiyle disperse edilerek vakum torbalama içerisine alınarak otoklav prosesine dahil edilmiştir. Numune üzerinden vakum kaldırılmadan 85 °C sıcaklık ve 6 bar basınç altında 6-8 saat arası otoklav prosesi uygulanmış, numune otoklavda doğal soğumaya bırakılmış ve 12 saat sonra çıkarılarak üretim tamamlanmıştır.



Şekil 4.5. Ultrasonik Karıştırıcı

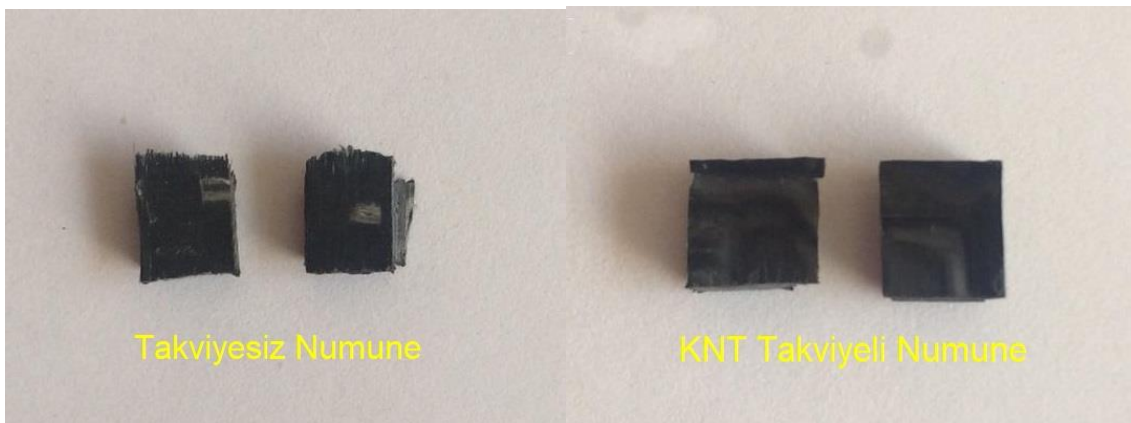
4.3. Numunelerin Boyutlandırılması

Çekme testi ve darbe testi için karbon prepreg ve ÇDKNT takviyeli 300 mm x 300 mm plaka standartlara uygun ölçülerde kesilmiştir. Çekme Testi için 25 mm x 250 mm boyutlarında, Ağırlık Düşürme ile Darbe Testi için 150 mm x 100 mm boyutlarında, termal gravimetre testi ve diferansiyel taramalı kalorimetre testi için ÇDKNT takviyeli ve takviyesiz plakalar standartlara uygun olarak kesim işlemi yapılmıştır.

Çizelge 4.7. Test standartlarına göre numune boyutları

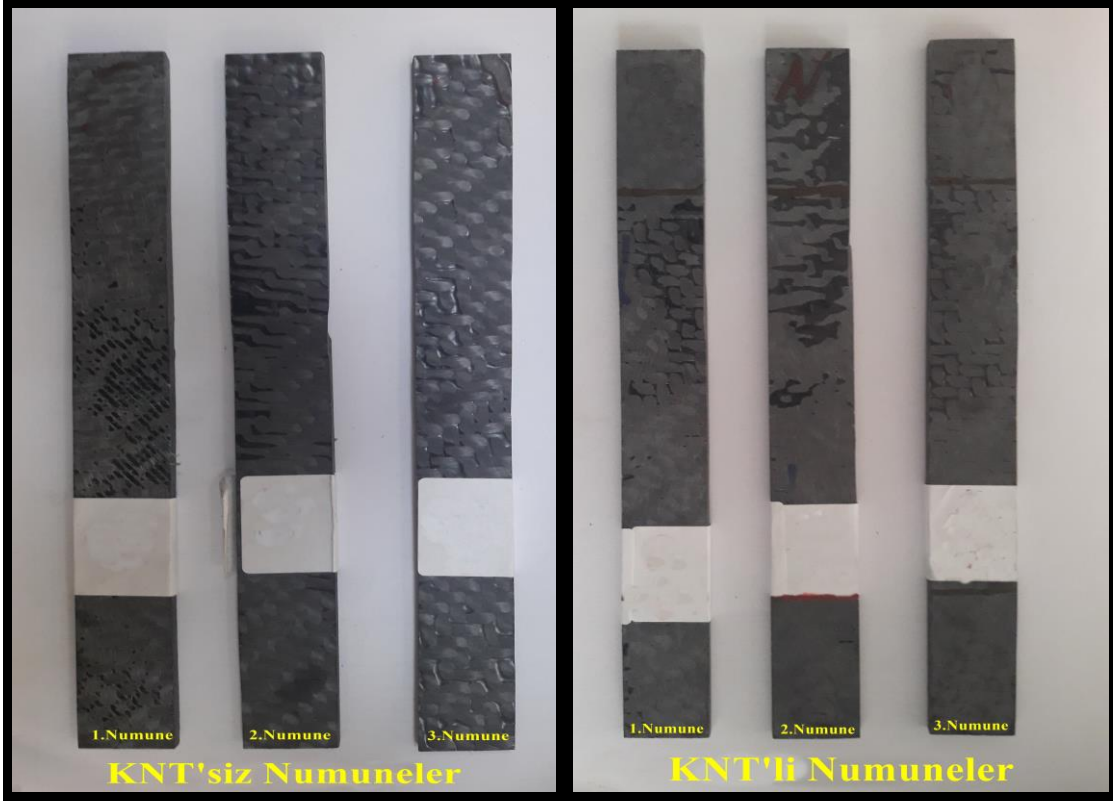
Test Tipi	Test Standart	Numune Eni [w, mm]	Numune Boyu [l, mm]
<u>Çekme Testi</u>	ASTM D3039	25	250
<u>Darbe Testi</u>	ASTM D7136	100	150

Test numunesi sematik gösterimi



Şekil 4.6. TGA/DSC ve SEM Numuneleri

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de çekme testi için ASTM standardına göre hazırlanmış deney numuneleri verilmiştir.



Şekil 4.7. Çekme testi takviyesiz test numuneleri

Şekil 4.8. ÇDKNT takviyeli test numuneleri

Şekil (4.9) darbe testi için ASTM standardına göre hazırlanmış deney numunesi verilmiştir.



Şekil 4.9. Darbe testi numunesi

4.4 Çekme Deneyi

Çekme deneyleri; Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Test Laboratuvarında bulunan Shimadzu AG- IS (100 kN) deney cihazı ve 2 mm / dk çekme hızında test gerçekleştirilmiştir. Bu deney prepreg kompozit ve ÇDKNT takviyeli prepreg kompozit malzemelerden oluşan ASTM D 3039 / D 3039 M standardınca hazırlanan 3'er adet test numunesi toplamda 6 test numunesi için gerçekleştirilmiştir. Her yapılan çekme deneyinden önce test cihazının çenelerinde kayma olmaması için kontrol edilmiştir. Çekme cihazından alınan verilere bilgisayara aktarılmıştır. Deneyin sonucunda test cihazından alınan veriler gerilme-birim şekil değiştirme grafiklerine dönüştürülmüştür.



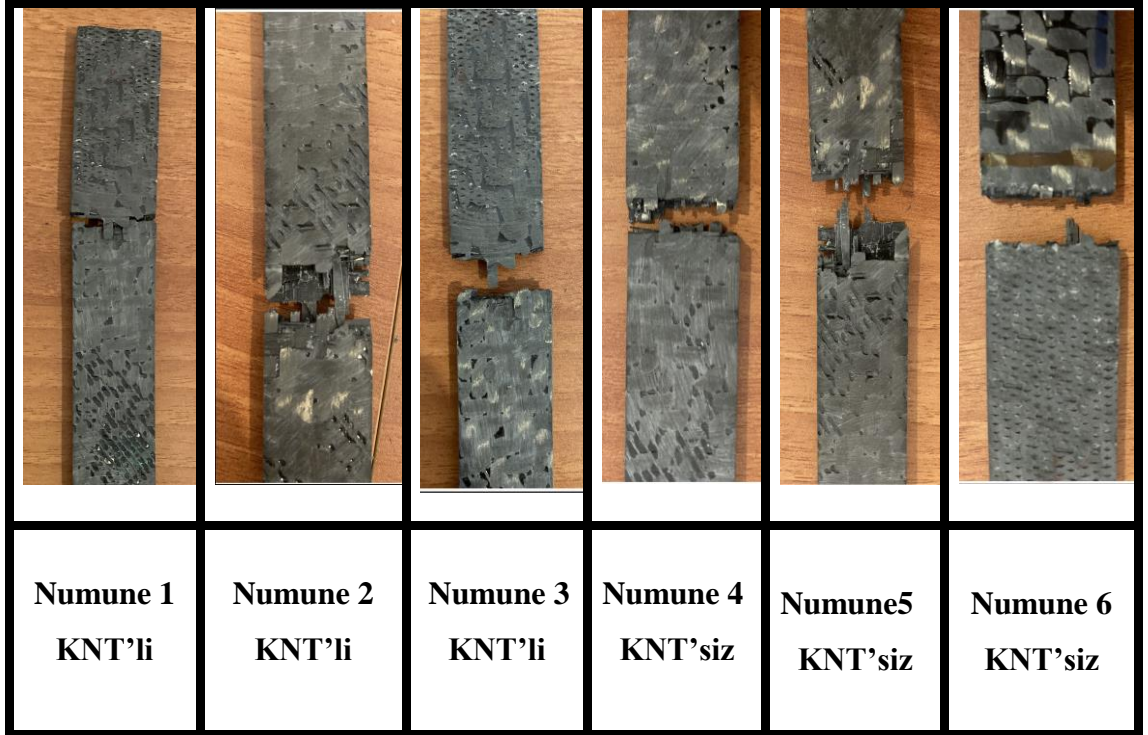
Şekil 4.10. Shimadzu AG- IS (100 kN) test cihazı



Şekil 4.11.Çekme testinden bir görüntüm

4.4.1 Çekme Deneyi Deforme Numuneler

Şekil 4.12’de çekme testi sonrası deforme deney numuneleri görülmektedir.

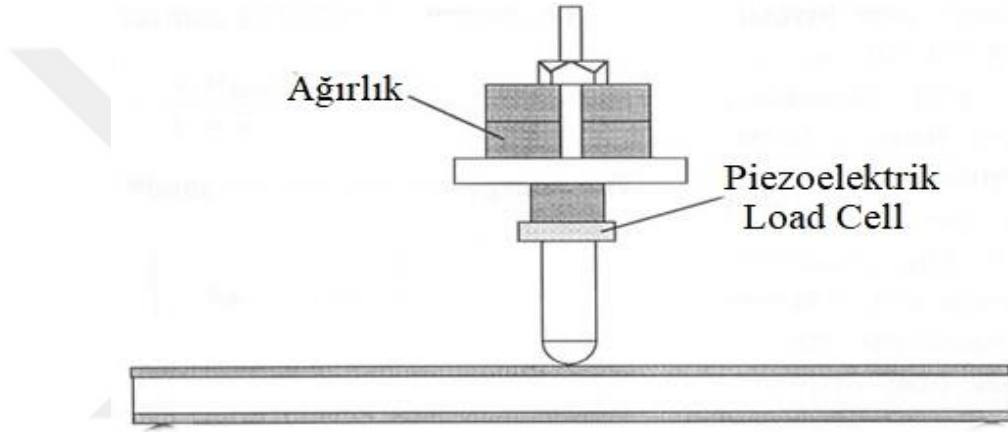


Şekil 4.12. Çekme testi deforme olan numuneler

Deformasyona bakıldığında numunenin katmanlar arasının yapışmasının homojen olduğu saçaklı kopma dolayısıyla karbon kumaş kıvrımlarında meydana gelen artık gerilmelerden dolayı malzemenin kopması homojen olduğu görülmüştür.

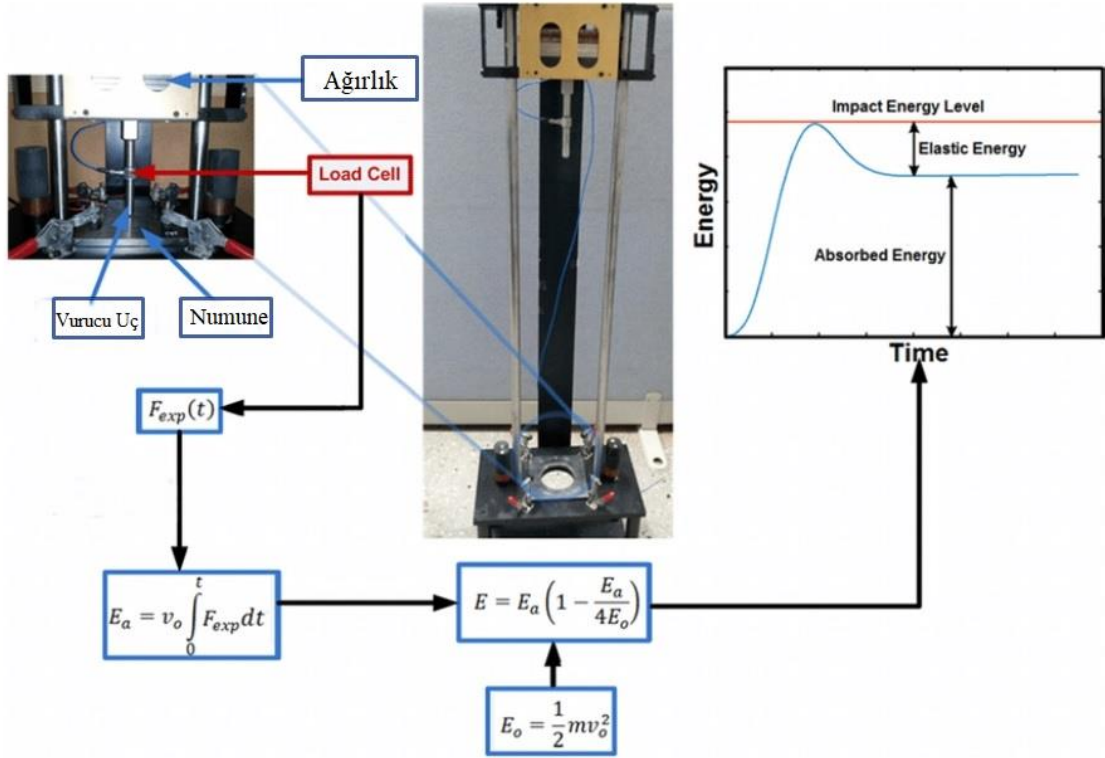
4.5 Düşük Hızlı Darbe Testi

Darbe, etkili bir kuvvetin ani olarak, malzemenin bütününe veya bir kısmına uygulanması olarak tanımlanabilir (Karaca, 2010). Düzenğin şematik gösterimi aşağıda verilmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Ağırlık Düşürme Darbe Testi Şematik Gösterim (AZoM, 2019)

Numunenin deformasyonuna uğramasına izin verilmez. Vurucu ucun anlık çarpma hızı hareket denklemleri ya da algılayıcı sensör teknolojisiyle ölçülebilir. Potansiyel enerji kazandırılan vurucu uç zamana göre enerji dağılımını ölçebilecek yer değiştirme dönüştürücüsüne sahiptir (Şekil 4.14).

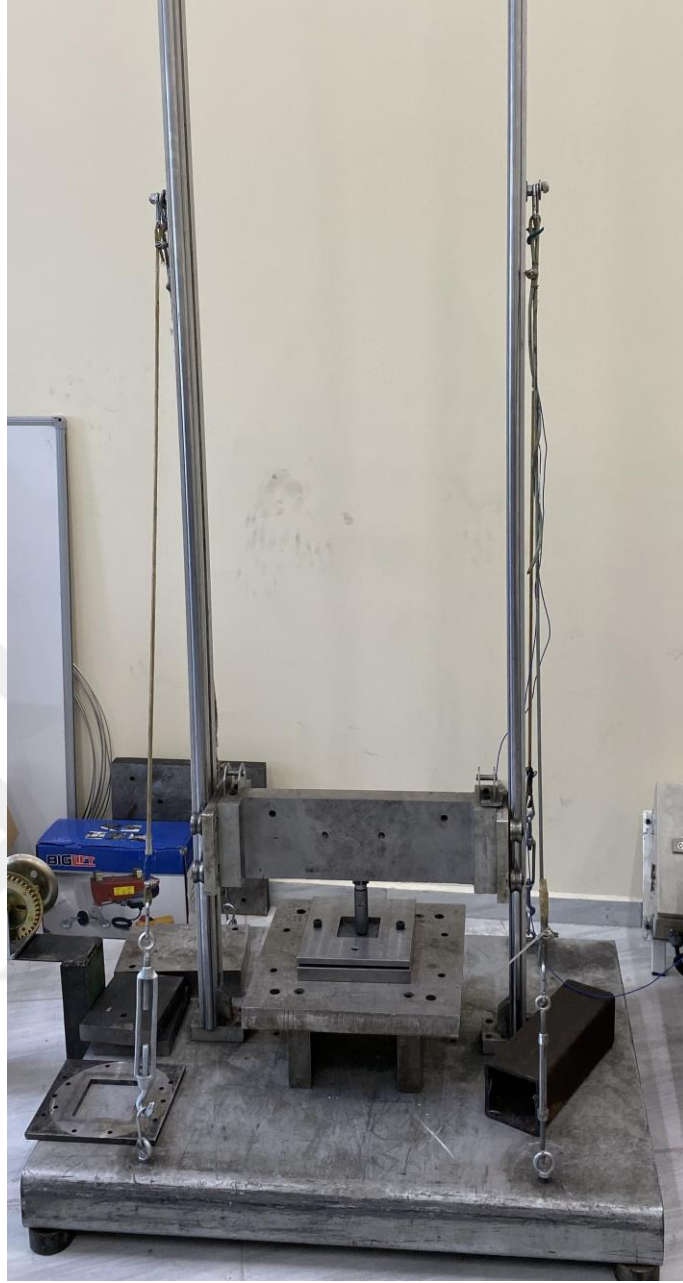


Şekil 4.14. Düşük Hızlı Darbe Test Düzeneği. (Furqan Ahmad, Jung-Wuk & Hong, 2015)

Ürettiğimiz numunelerde daha geniş test parametrelerine ulaşabilmemiz ve test sonuçlarının kolay analiz edilebilir olmasından dolayı düşük hızlı darbe testi yapılmıştır.

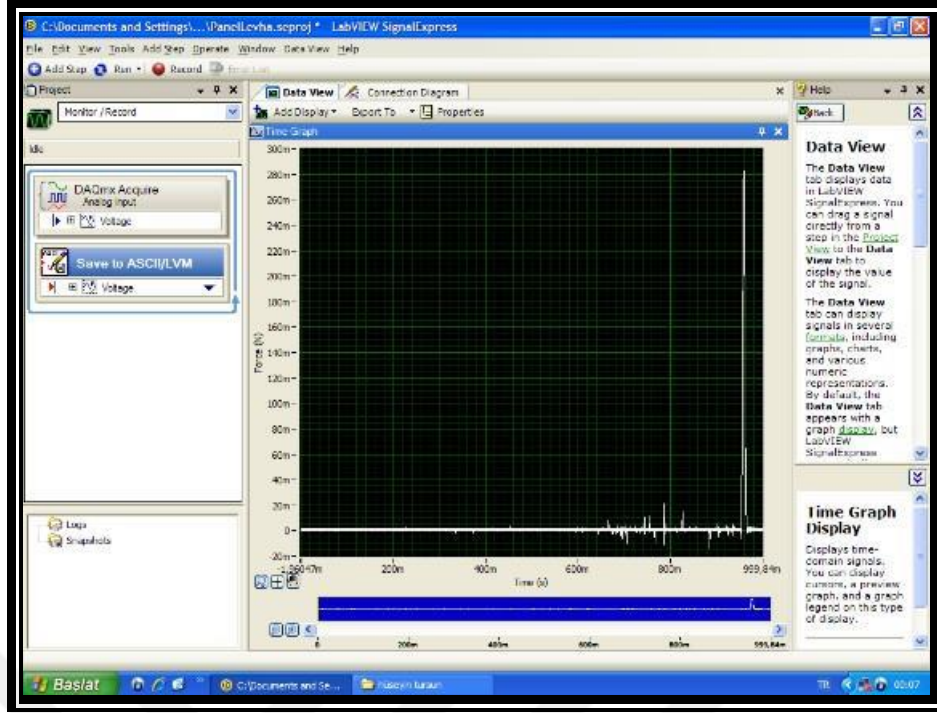
Düşük Hızlı Darbe Testleri; Necmettin Erbakan Üniversitesi Uzay ve Havacılık Fakültesi Test Laboratuvarında bulunan test düzeneğinde, serbest düşme ağırlık sistemiyle çalışan darbe test cihazında 24 mm çapında yarı küresel darbe ucuyla, 75J, 125J enerji seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Düşük hızlı darbe testinde (150×100mm) ölçülerinde hazırlanan darbe test numuneleri kullanılmıştır. Testlerde Takviyesiz prepreg kompozit levha ve ÇDKNT takviyeli prepreg kompozit levhadan oluşan 4'er adet test numunesi toplamda 8 test numunesi için gerçekleştirilmiştir.

Darbe yüklemesi için serbest düşme ağırlık sistemi üzerinde toplam 6,35 kg ağırlık kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan kuvvet algılama CB Quartz ICP Force Sensor modelidir. 6 kN ölçme kapasitesi vardır.

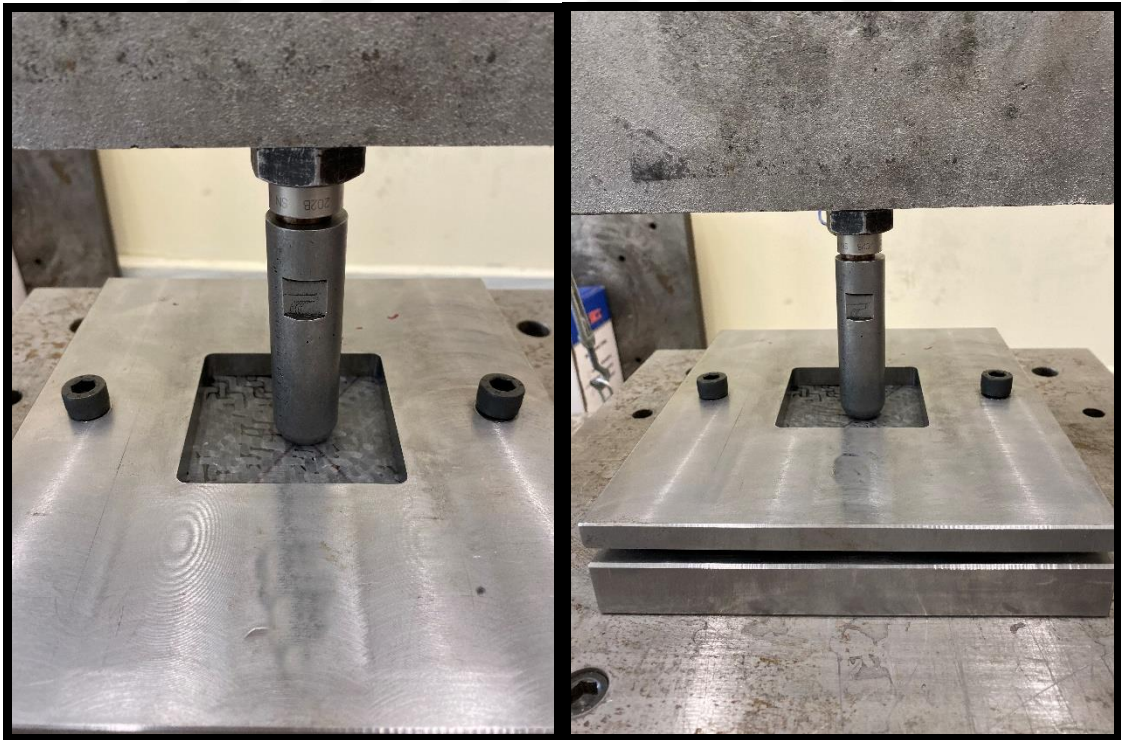


Şekil 4.15. Düşük hızlı darbe test cihazı

NI Signal Express yazılımıyla zamana göre kuvvetin değişim grafiği elde edilmiştir. Yazılım sinyalin özelliklerini belirlemektedir. Yazılım ekranı şekil 4.16'da gösterilmiştir.

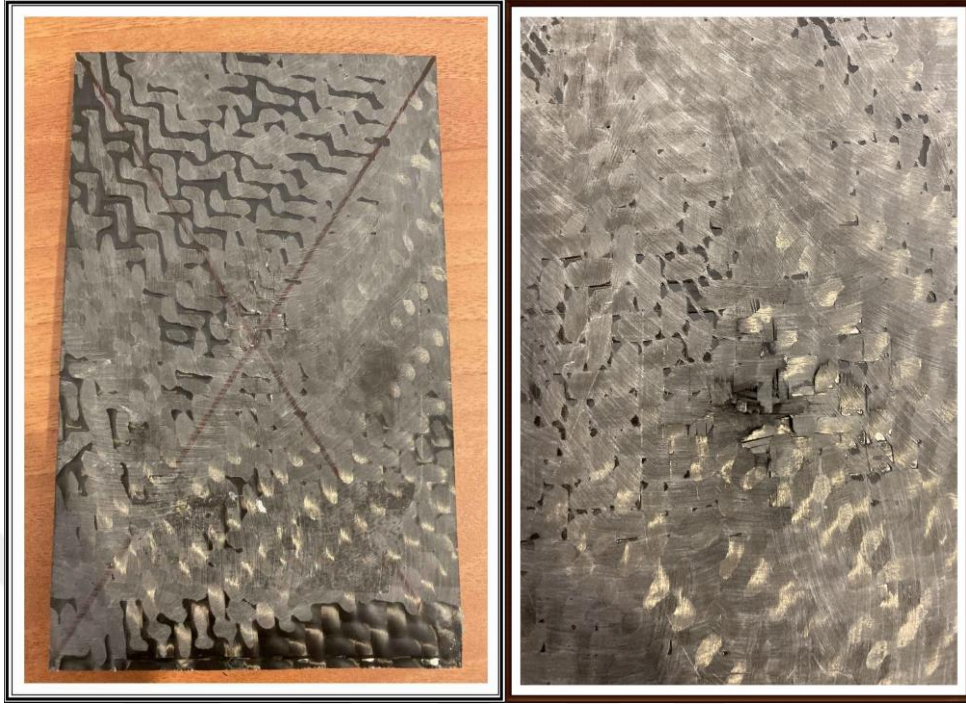


Şekil 4.16. NI Signal Express Yazılımı



Şekil 4.17. Düşük hızlı darbe testi tutucu tabla

4.5.1 Düşük Hızlı Darbe Deneyi Deforme Olan Numuneler



Şekil 4.18. Deforme olan numuneler (KNT'li ve KNT'siz)

4.5.2 Darbe Testi Sırasında Kompozit Malzemede Oluşan Hasar Türleri

Darbe testi sonucunda kompozit numunelerde oluşan hasar türleri, fiberlerin kırılması, kopması matris malzemesinin delinmesi veya kırılması, sonrasında delaminasyon oluşması şeklindedir. Numunelerde meydana gelen hasar türleri darbe enerjisine bağlı olarak değişebilir.



Şekil 4.19. Hasar türleri (Zhu ve arkadaşları, 1992)

4.6. Termal Gravimetri Analizi ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Analizi

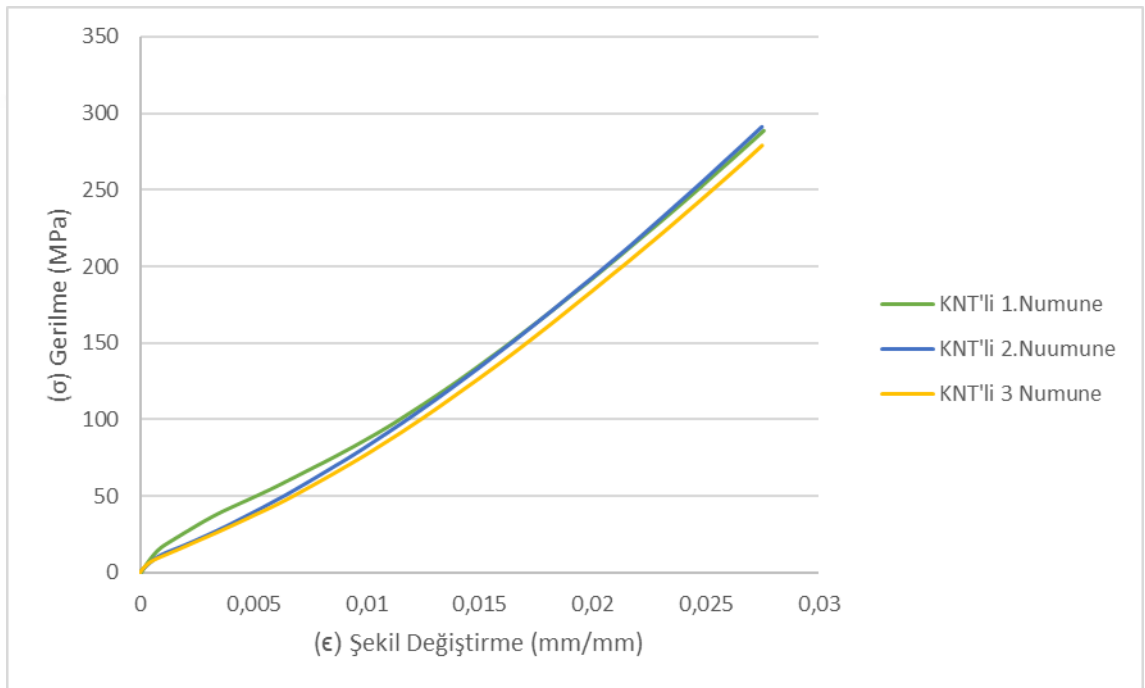
TGA/DSC testi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM) Laboratuvarında bulunan test düzeneğinde, 10 °C/dk ısıtma hızı ve 25-1000 °C ısıtma aralığında gerçekleştirilmiştir. Testlerde, (2x2) mm ölçülerinde hazırlanan numuneler kullanılmıştır. ÇDKNT takviyeli ve takviyesiz olarak oluşan 6'şar adet test numunesi toplamda 12 test numunesi için gerçekleştirilmiştir.



5. DENEYSEL SONUÇLAR

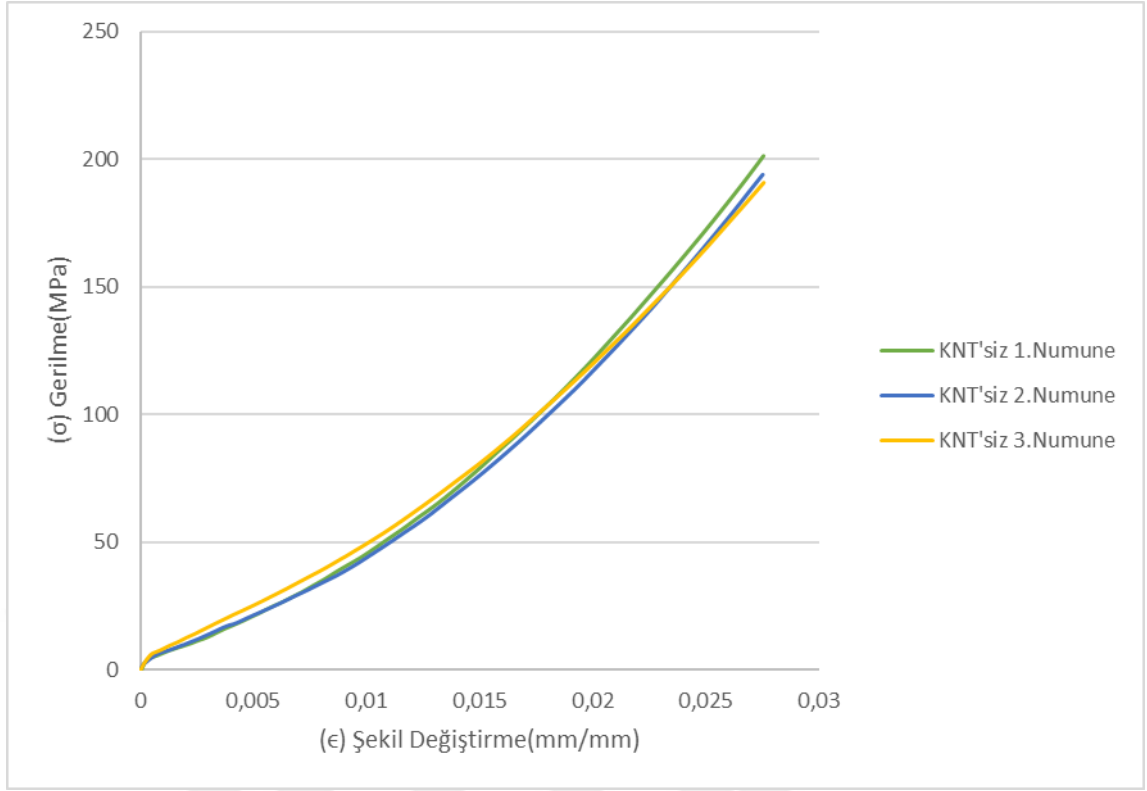
5.1. Çekme Deneyi Sonuçları

Prepreg ve karbon nanotüp takviyeli kompozit numuneden 9 katmanlı olarak, vakum torbalama yöntemiyle üretilen 3'er adet çekme deney numunelerinin ortalamalarından elde edilen Gerilme – Birim Şekil Değişirme grafikleri şekil 5.1'de paylaşılmıştır.



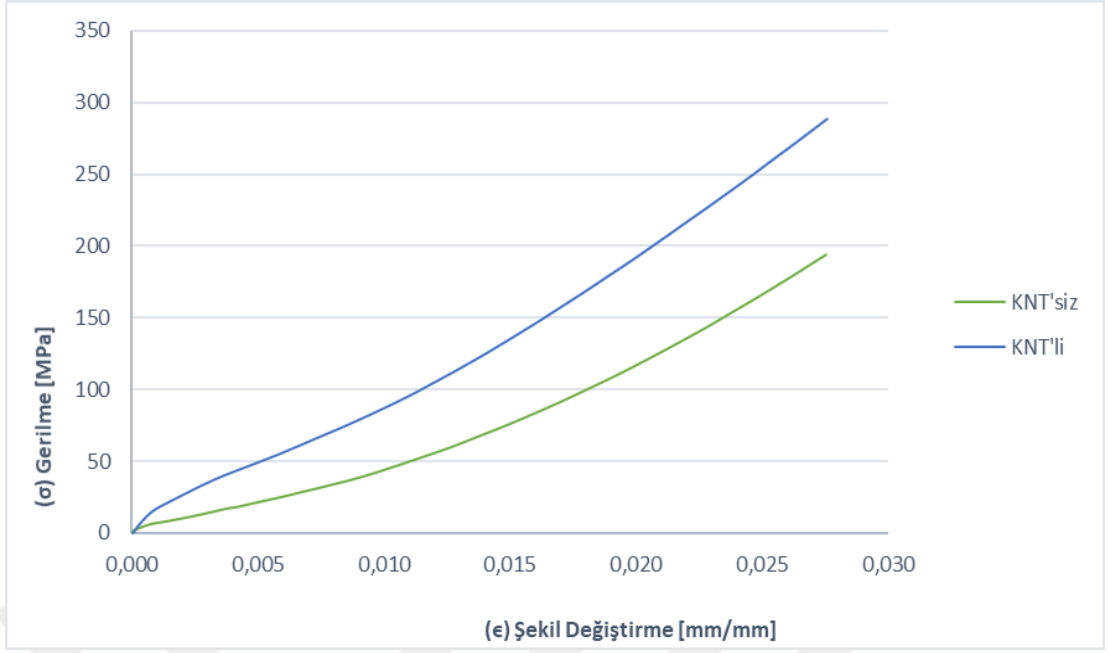
Şekil 5.1. Gerilme-birim şekil değişirme grafiği (KNT'li numuneler)

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi KNT'li numune üretiminin aynı plakadan kesilmiş olduğu gerçeği ile beraber plaka geneli için homojen ve hatasız bir üretim olduğu görülmektedir. Kopma mukavemetlerinin aynı olması malzemenin üretim parametlerinin gerçekliği göstermektedir. KNT'li üretimde KNT'siz üretime göre %35 daha fazla kopma mukavemeti elde edilmiştir.



Şekil 5.2. Gerilme-birim şekil değiştirme grafiği (KNT'siz numuneler)

Şekil 5.2'de görüldüğü gibi KNT'siz üretimde de üretimsel herhangi bir sorun bulunmamıştır. Kopma mukavemeti tüm numuneler aynı plakadan kesildiğinden 200 MPa civarlarında çıkmıştır.

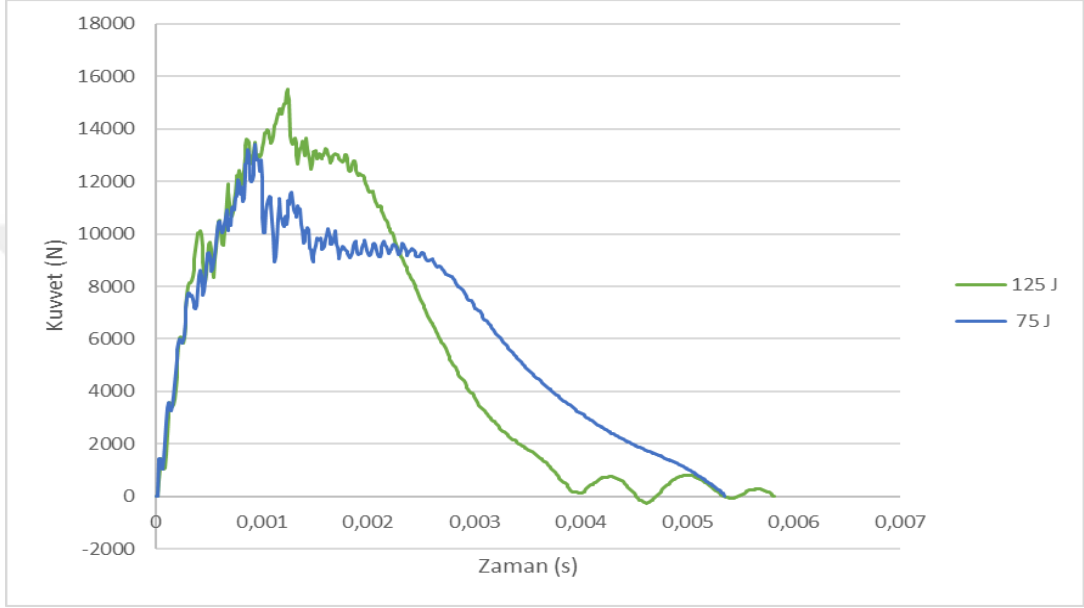


Şekil 5.3. Gerilme-birim şekil değiştirme grafiği

Şekil 5.3'de KNT'li ve KNT'siz numunelerinin ortalama değerleri alındığında %35lik kopma mukavemeti yükselişi net şekilde görülmektedir. Bu değer %0.3 KNT ilavesi ve tabakalar arası KNT'li reçine dispersiyonu sonucunda elde edilen kazanımdır.

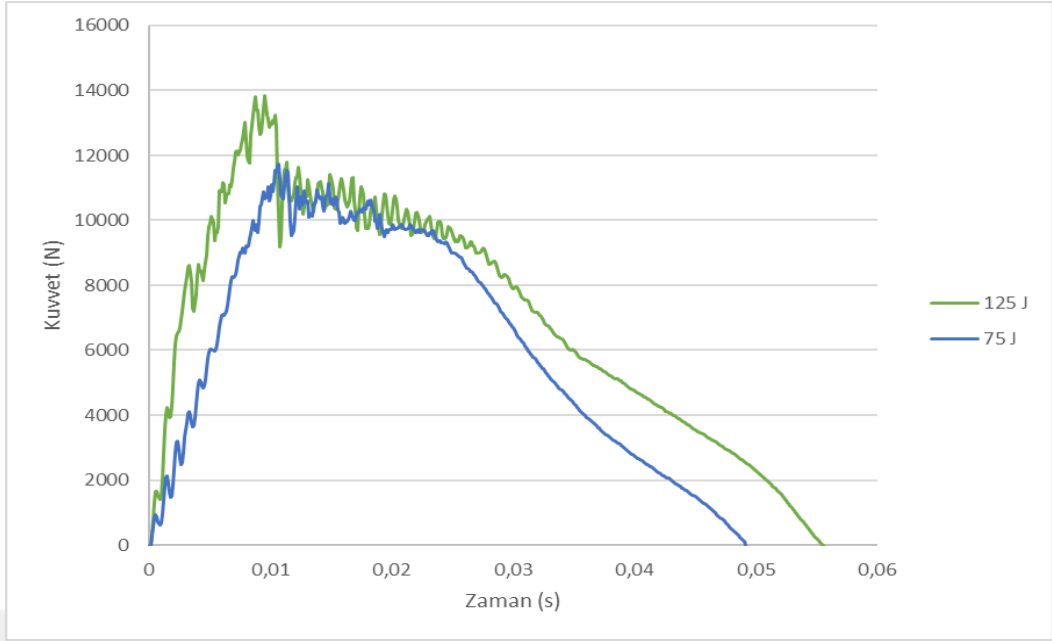
5.2. Düşük Hızlı Darbe Deneyi Sonuçları

ÇDKNT takviyeli ve takviyesiz numuneler vakum torbalama ve otoklav yöntemiyle üretilen numunelere farklı değerlerde (75 ve 125 joule) vurulan düşük hızlı darbe deney numunelerinin ortalamalarından veriler elde edilmiştir.



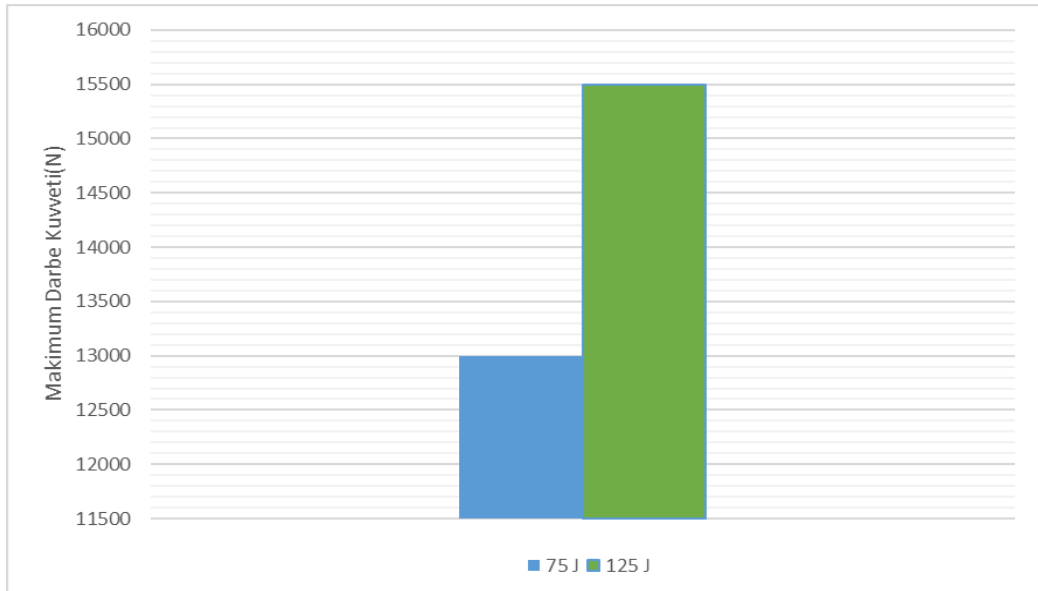
Şekil 5.4. KNT takviyeli kuvvet-zaman grafiği

Şekilde 5.4' de görüldüğü üzere darbe enerjileri yükselirken malzemenin şekil değiştirmesi KNT ilavesi ile bir miktar yavaşlamış ve daha sonra stabil halde artmıştır. Bu da KNT ilavesinin malzemeye çok az miktarda gevreklettiği sonucuna varılabilir.

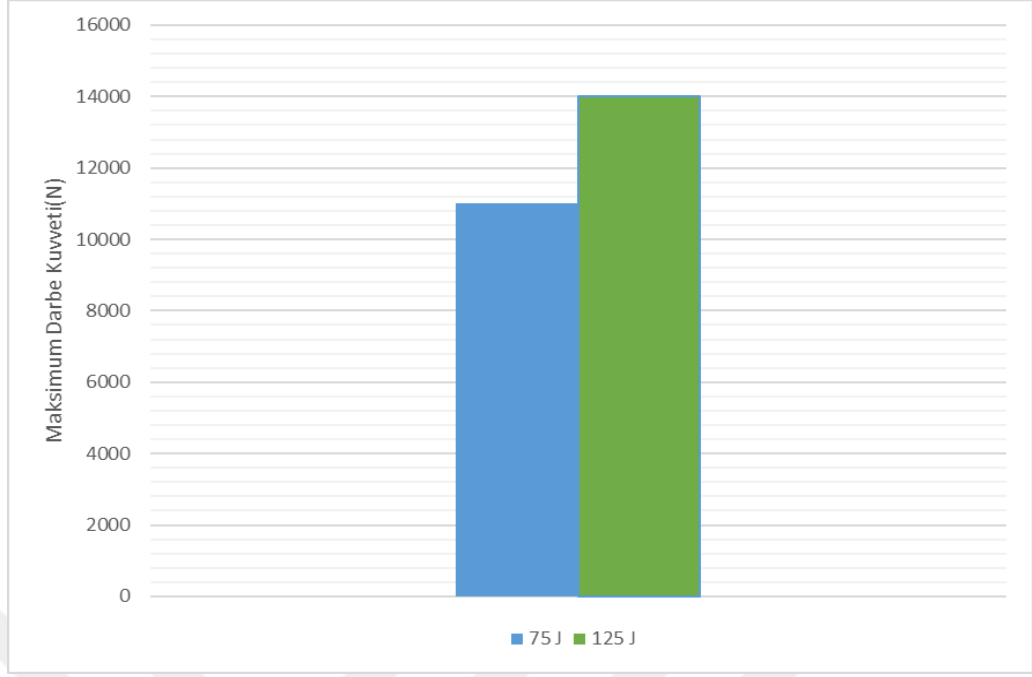


Şekil 5.5. KNT takviyesiz kuvvet-zaman grafiği

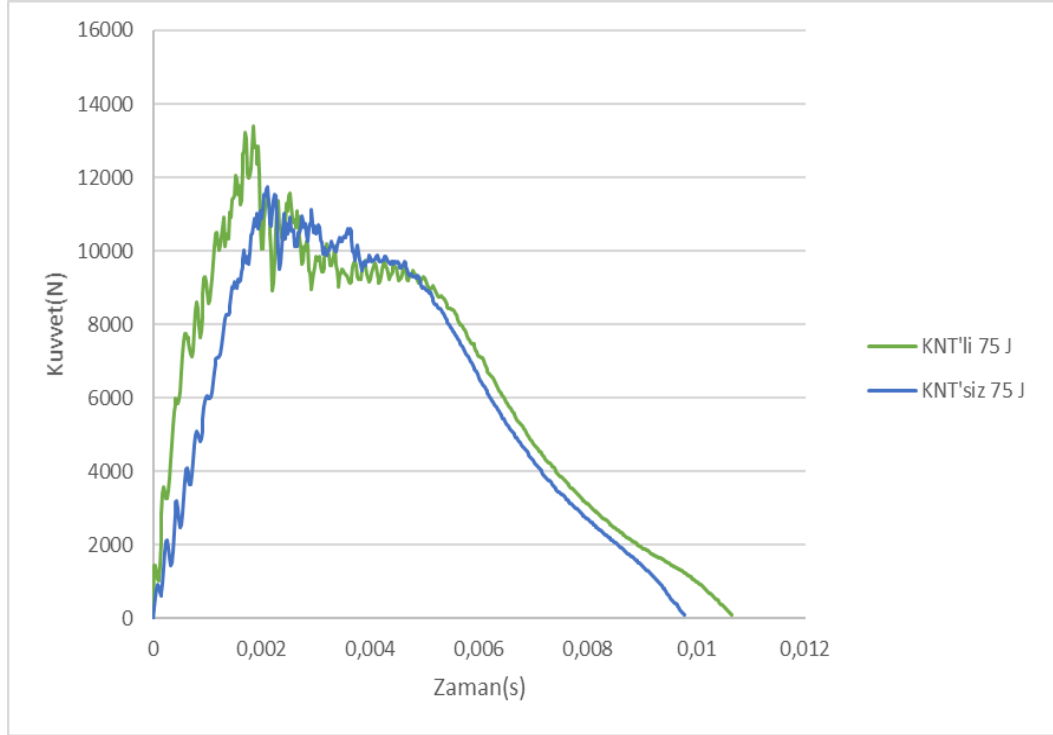
Şekil 5.5’de KNT takviyesiz numunede darbe enerjileri daha düşük kuvvet seviyelerinde numune daha stabil bir deformasyona uğramış, ancak darbe hızları arttığında numunenin özellikle ilk katmanlarında fiber çatlağından dolayı enerji sönümlemesi meydana gelmiştir.



Şekil 5.6. KNT takviyeli maksimum darbe kuvvet grafiği



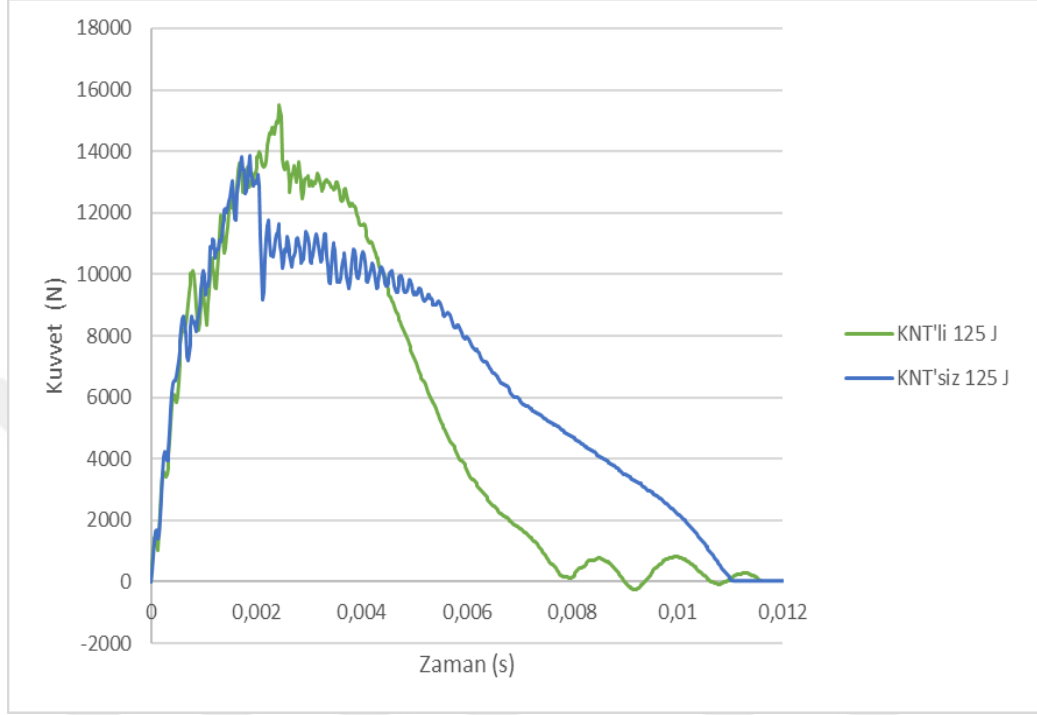
Şekil 5.7. KNT takviyesiz maksimum darbe kuvvet grafiği



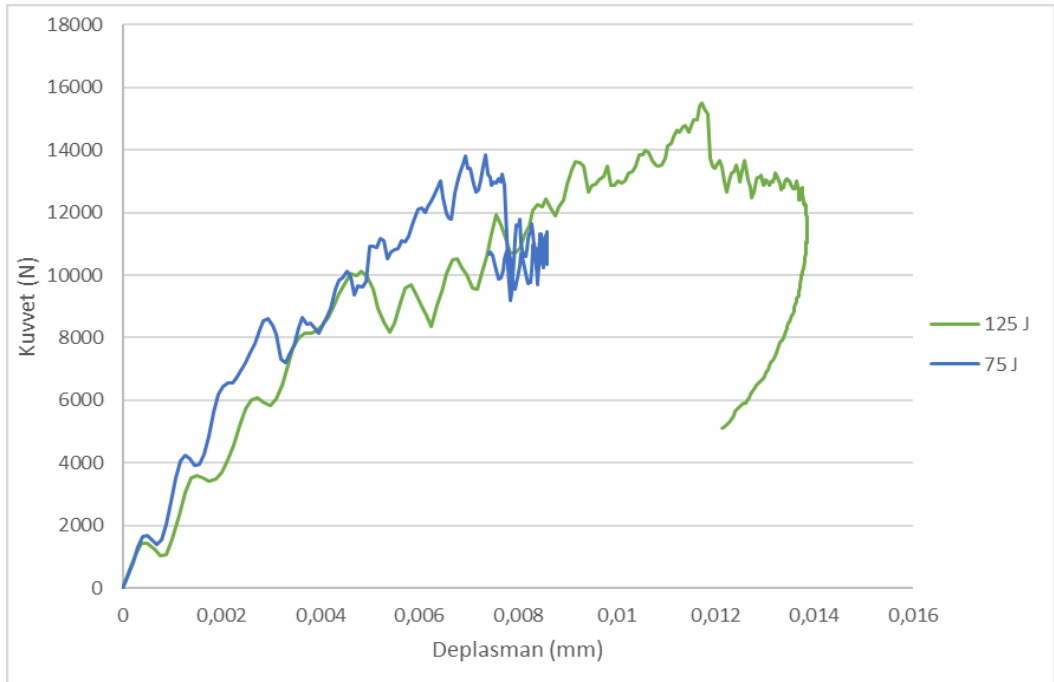
Şekil 5.8. KNT'li ve KNT'siz 75 j kuvvet-zaman grafiği

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'de görüldüğü üzere aynı enerji seviyesinde KNT'li numunelerin ilk katmanlarında matris fiber kırıklarının daha belirgin olduğu grafikten

anlaşılmaktadır. Burada fiber adeta dağılmıştır. Buradan KNT ilavesinin darbe dayanımını artırdığı ancak maksimum darbeden sonra fiber kırılmalarını netleştirdiği görülmektedir.

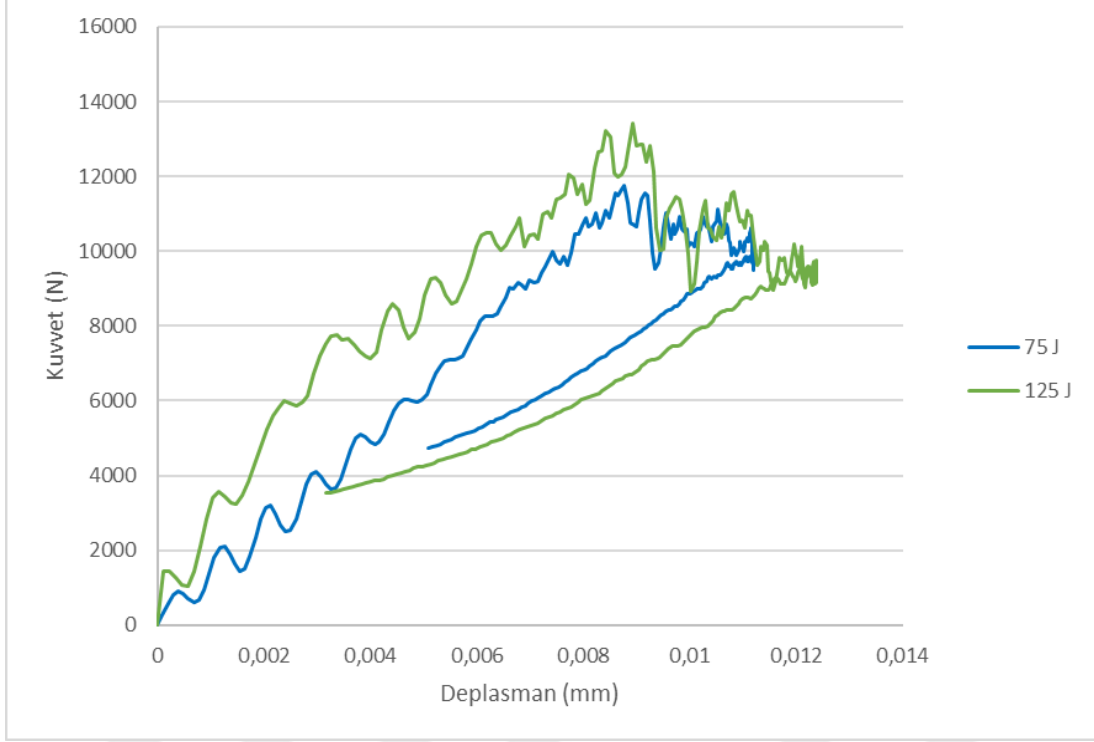


Şekil 5.9. KNT'li ve KNT'siz 125 j kuvvet-zaman grafiği



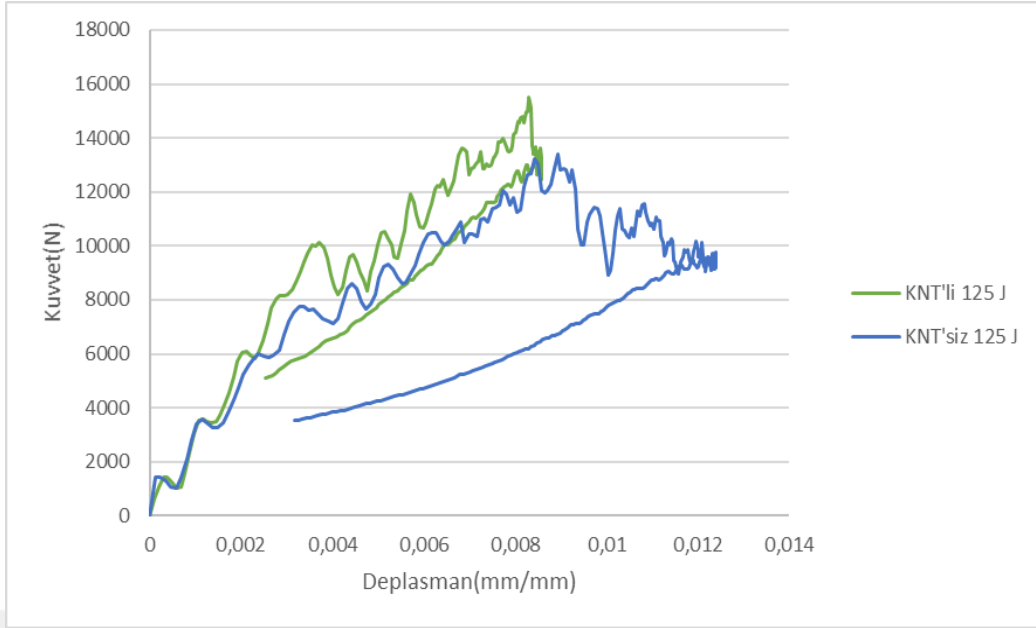
Şekil 5.10. KNT takviyeli kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 5.10’da darbe kuvveti, vurucu ucun numuneye temas etmesiyle başlamış ve yer değiştirme başlamıştır. Kuvvet maksimum değere ulaşınca kadar devam etmiştir.



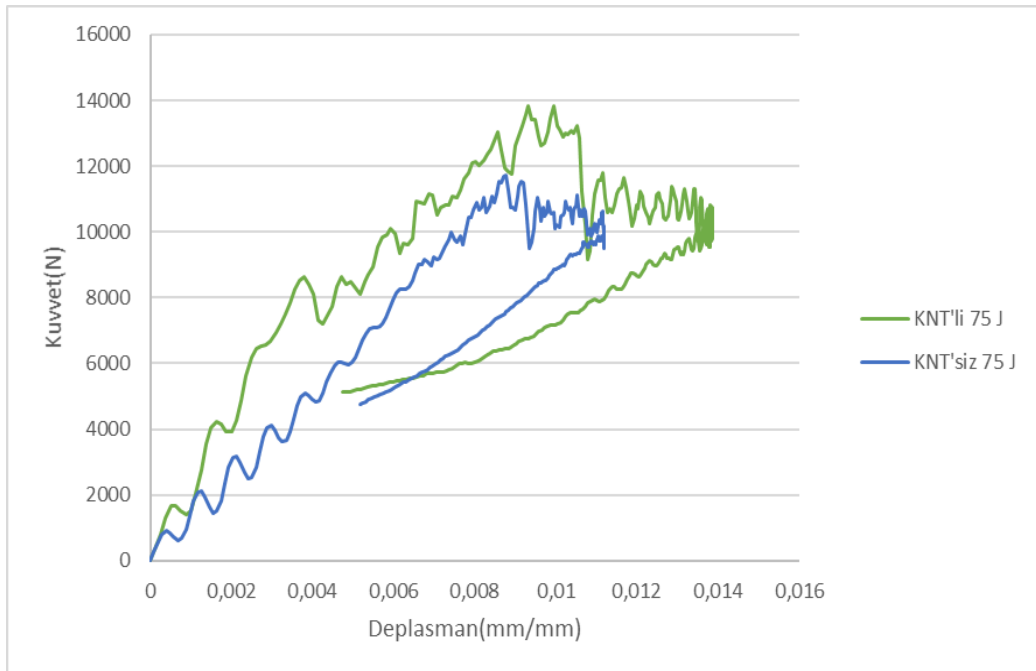
Şekil 5.11. KNT takviyesiz kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 5.11’de kuvvet-yer değiştirme grafiği altında kalan alan numune üzerinde yapılan işi vermektedir. Burada darbe enerjisi arttıkça, numune tarafından yutulan enerji miktarının arttığı görülmektedir.

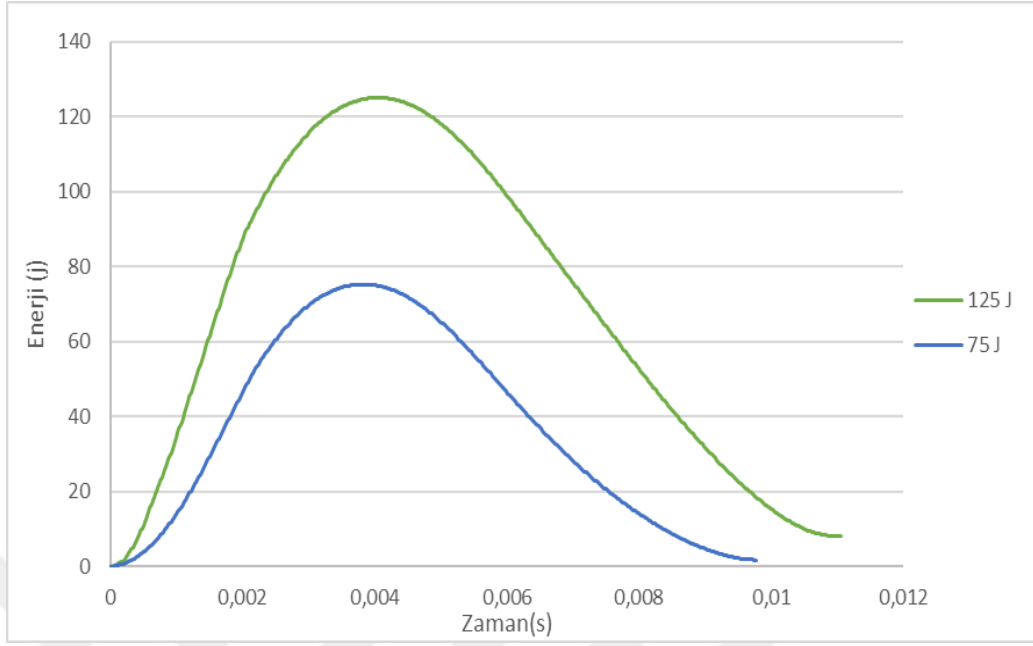


Şekil 5.12. KNT takiyeli ve takviyesiz kuvvet-yer değiştirme grafiği (125j)

KNT takiyeli numunenin yer değiştirmesi KNT'siz numuneye göre daha rijittir. Dolayısıyla KNT'li numunenin malzemeyi dayanım olarak sertleştirdiği ve bir miktar mukavemet artışı olduğu açıktır. Geri tepme enerjisine bakıldığında ise KNT'li numunenin daha kısa periyotlarda geri dönüş enerjisi sağladığı KNT'siz numunenin ise daha düşük enerji ile daha geniş yüzeyde hasar oluşturduğu görülmektedir.

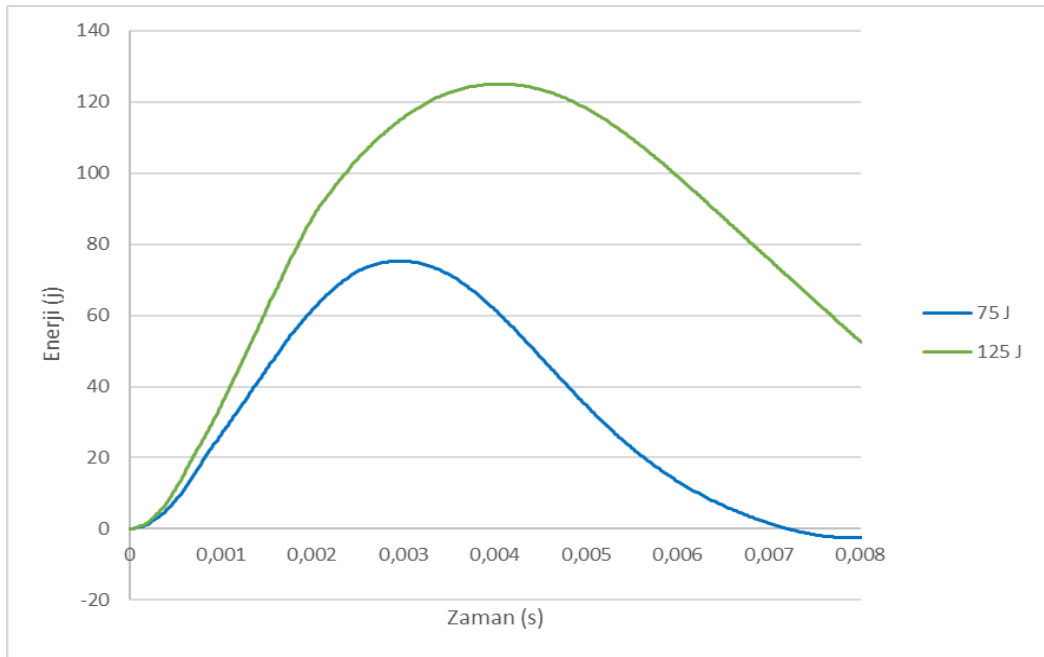


Şekil 5.13. KNT takiyeli ve takviyesiz kuvvet-yer değiştirme grafiği (75j)

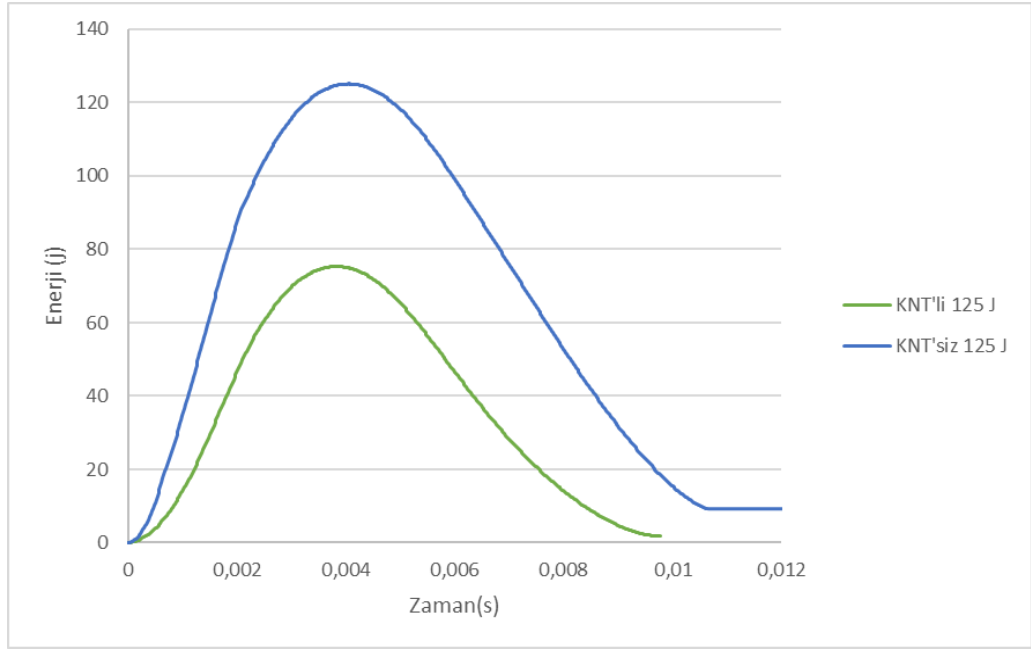


Şekil 5.14. KNT takviyeli enerji-zaman grafiği

Şekil 5.14 ve şekil 5.15'de enerji-zaman grafikleri gösterilmiştir. Darbe enerjisi arttıkça kuvvet değeri ve yutulan enerjinin artmıştır. Bu beklenen bir durumdur.

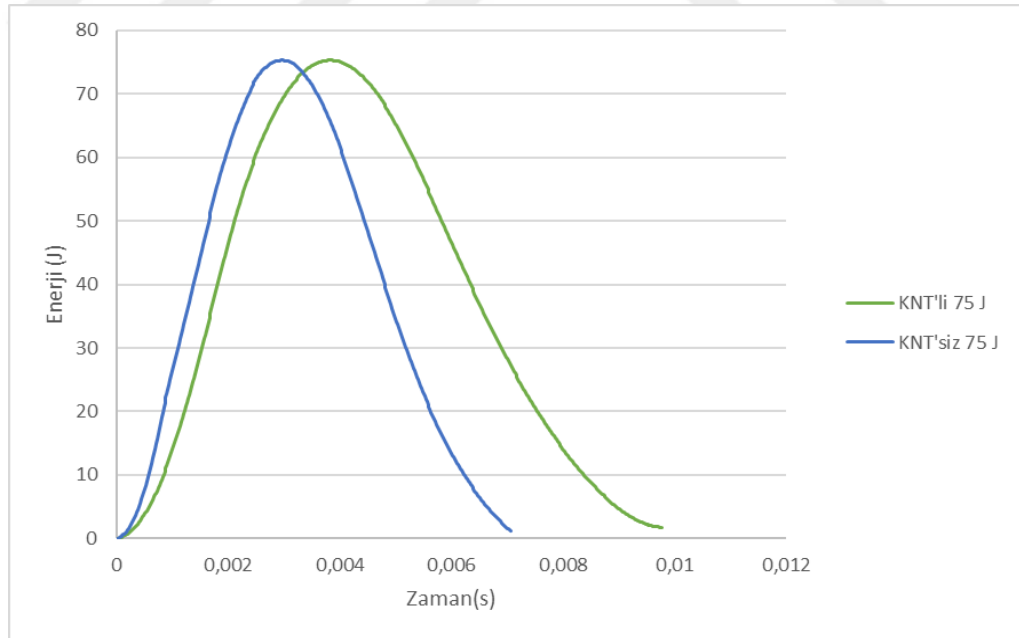


Şekil 5.15. KNT takviyesiz enerji-zaman grafiği



Şekil 5.16. KNT takviyeli ve takviyesiz enerji-zaman grafiği (125j)

125 j darbe enerjisinde KNT farkı enerji absorpsiyonu açısından bariz farklar meydana getirmiştir. Yukarıdaki grafikte (şekil 5.16) enerjinin kısa sürede tabakalar arasında dağıldığı daha sonra geniş zaman aralığında enerjinin geri dönüşümünün sağlandığı görülmüştür.



Şekil 5.17. KNT takviyeli ve takviyesiz enerji-zaman grafiği (75j)

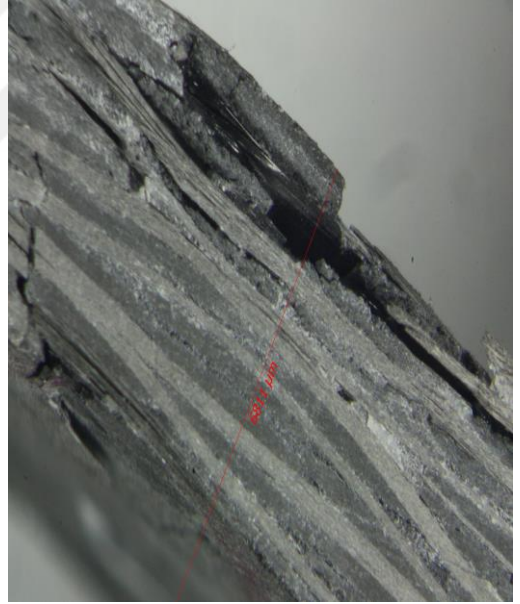
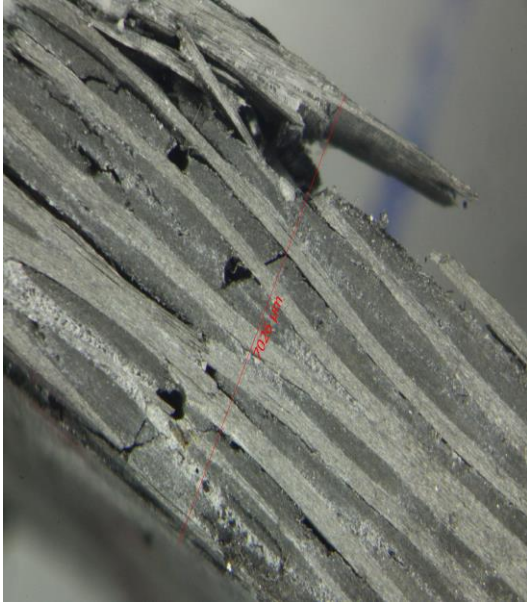
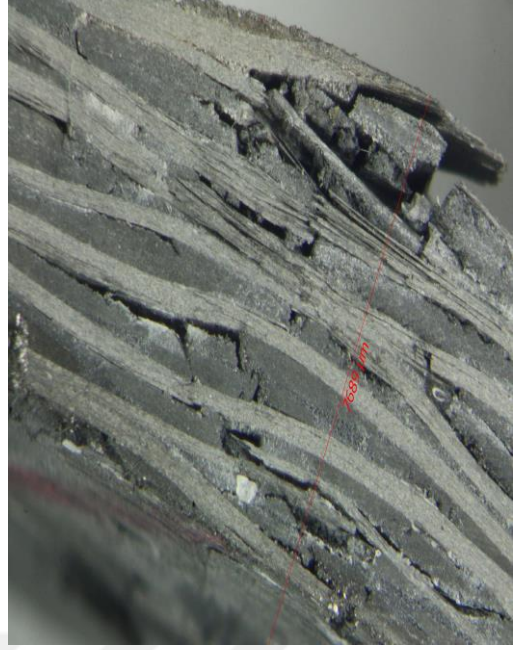
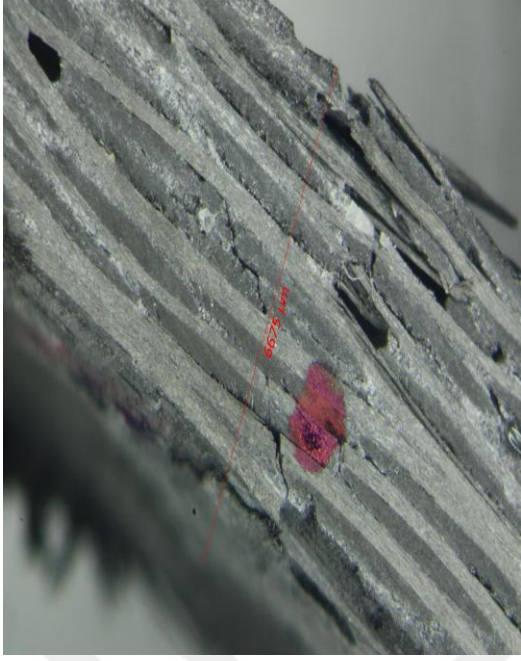
5.3 Stereo Mikroskop Görüntüleri

Tipik olarak numunenin içinden geçen ışık yerine yüzeyinden yansıtılan ışığı kullanarak bir numunenin düşük büyütme gözlemi için, incelenen numunenin 3D (üç boyutlu) olarak görselleştirmesini sağlar. Stereomikroskopi, karmaşık yüzey topografyasına sahip katı numuneleri kaydetme ve inceleme açısından detayları analiz etmek için 3D görünüm gerektiren makrofotografı ile örtüşen bir görüntüleme cihazıdır.

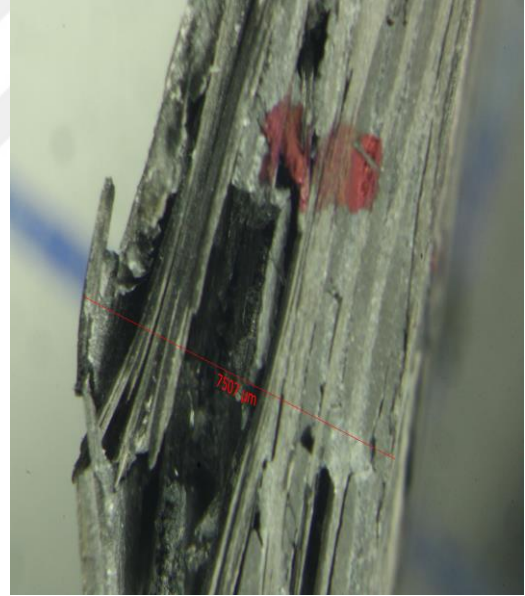
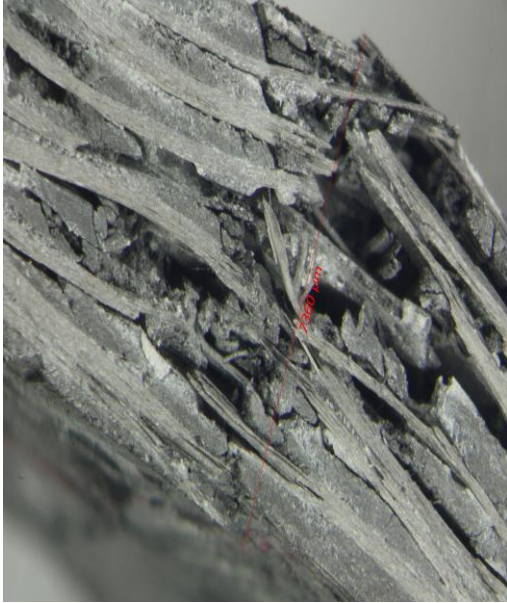
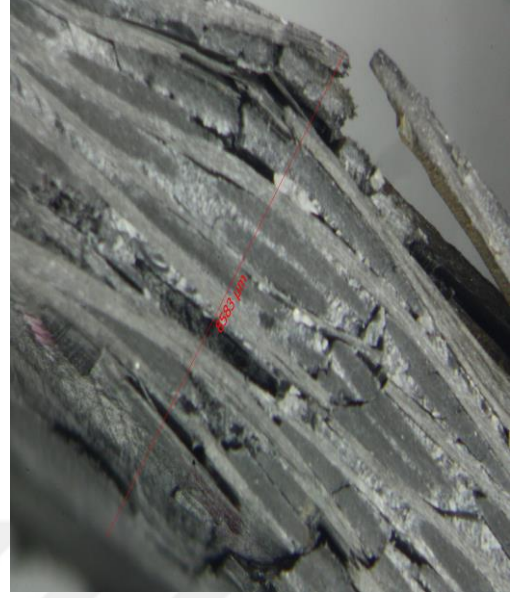
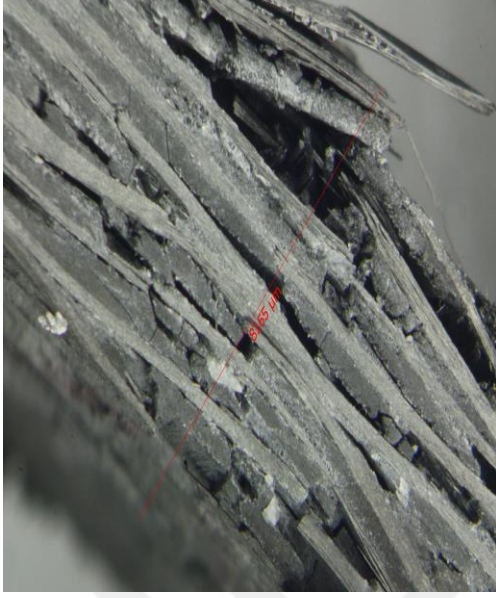


Şekil 5.18. Darbe deneyi sonrası numune dikey kesit görüntüsü

Kesitten anlaşılacağı üzere tabakalar ve tabakaların arasındaki reçine arayüzlerinin homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Fiber matris ayrışması ve fiber kırıkları darbe ucunun etkilediği noktada bariz şekilde görülmektedir.

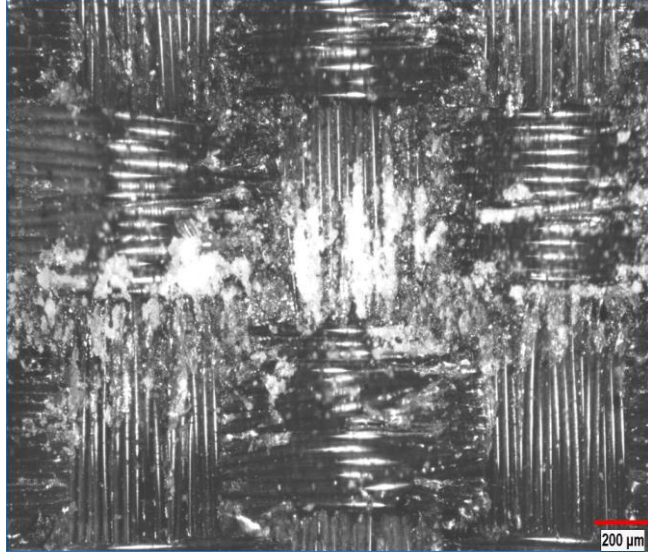


Şekil 5.19. Stereo mikroskop ile dikey kesit görüntüsü alınan KNT takviyeli (75j-125j) numuneler



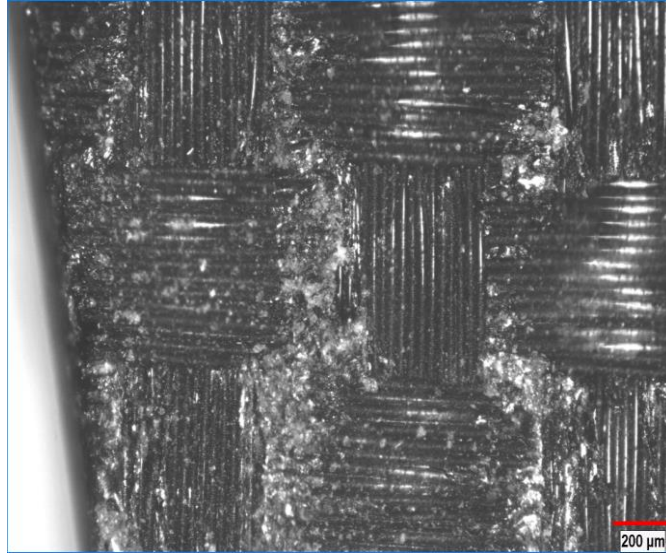
Şekil 5.20. Stereo mikroskop ile dikey kesit görüntüsü alınan KNT takviyesiz (75j-125j) numuneler

Şekil 5.19. ve şekil 5.20’de enerjinin darbe enerjisinin kesit boyunca basit fiber matris kırıkları ile son tabakalarda adeta patlama şeklinde olduğu tüm fiber matris tabakaları dağıttığı görülmüştür.



Şekil 5.21. Optik mikroskop görüntüsü (1)

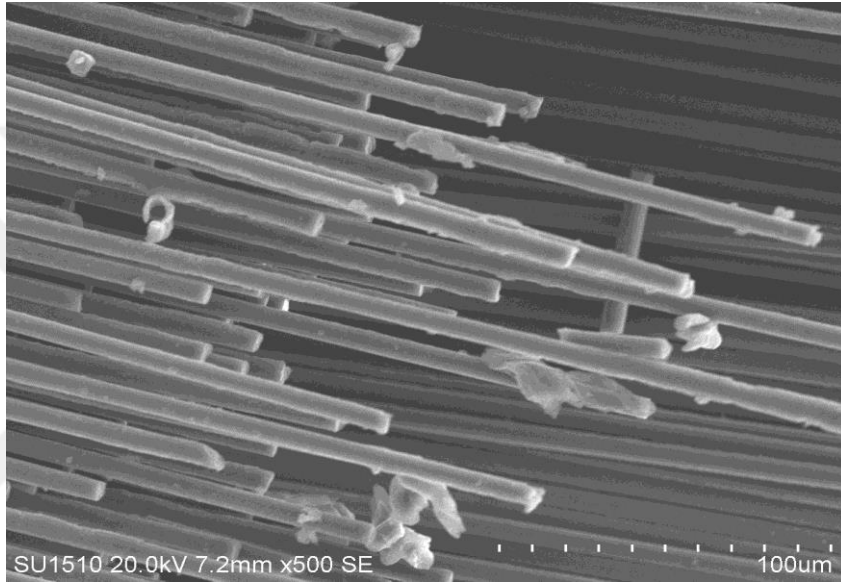
Şekil 5.21 ve şekil 5.22’de optik mikroskobu görüntülerinden anlaşılacağı üzere prepreg malzemenin dokuma kumaşların atgı ve çözgü kıvrım bölgelerinde gerilme yığılmalarının olduğu yerler görülmektedir. Hasar başlangıçları bu bölgelerden başlamaktadır çünkü fiber doğrultuları birbirinden farklıdır.



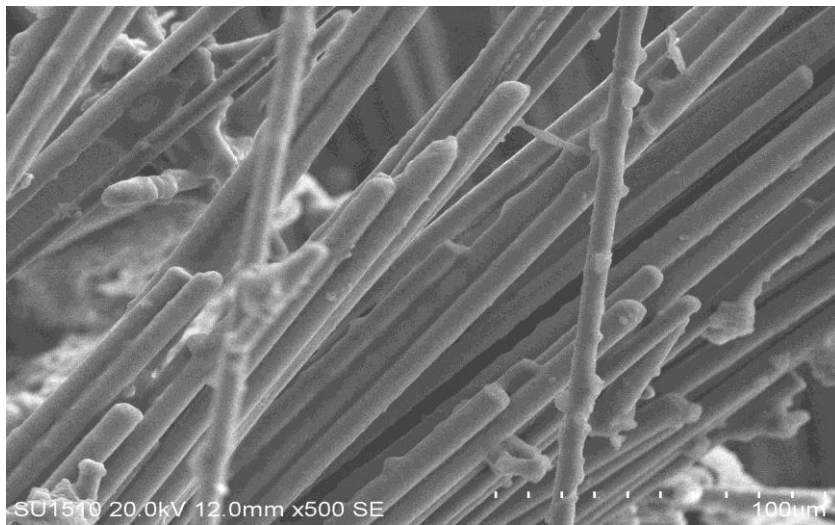
Şekil 5.22. Optik mikroskop görüntüsü (2)

5.4.Elektron Taramalı Mikroskop (SEM) Sonuçları

Yapılan deneylerde numunelerinin mekanik testleri sonucunda elde edilen kırılma yüzeyleri iletken yüzey elde etmek ve daha iyi görüntü alabilmek için Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (BİTAM) altınla kaplanıp Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak çeşitli büyütme oranlarında incelenerek kompozitlerdeki ara yüzeyi ve aralarındaki etkileşim incelenmiştir.



Şekil 5.23. KNT takviyesiz Numune SEM görüntüsü



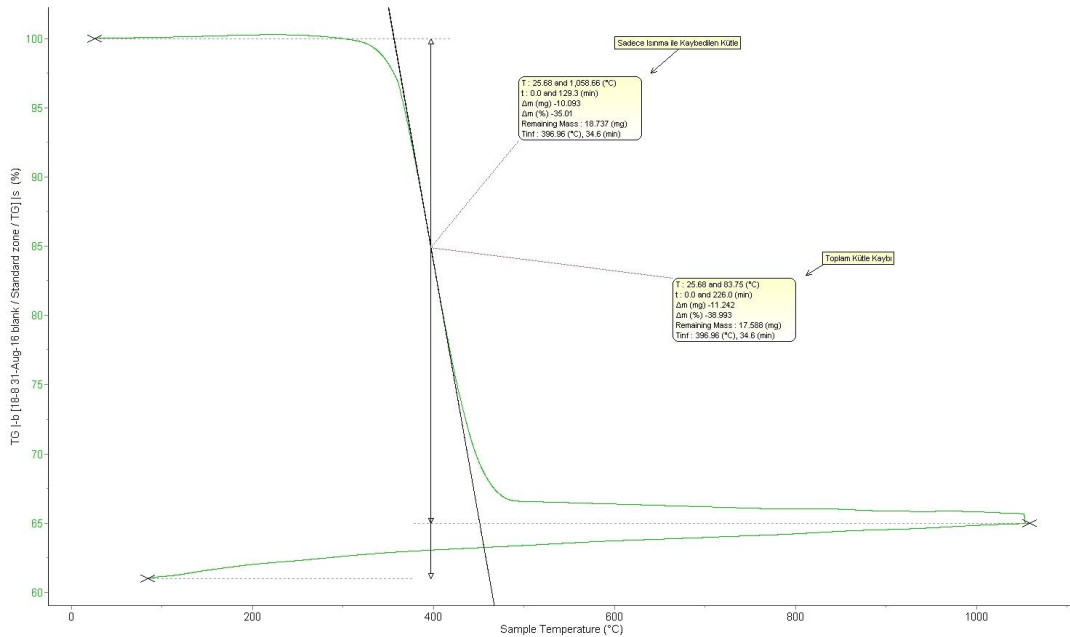
Şekil 5.24. KNT takviyeli Numune SEM görüntüsü

Şekil 5.23 ve şekil 5.24’de bulunun SEM görüntülerinden üretilen kompozit malzemelerde tabakalar arası çatlak oluşumu, elyaf kopması ve tabaka ayrılmaları gözlemlenmektedir.

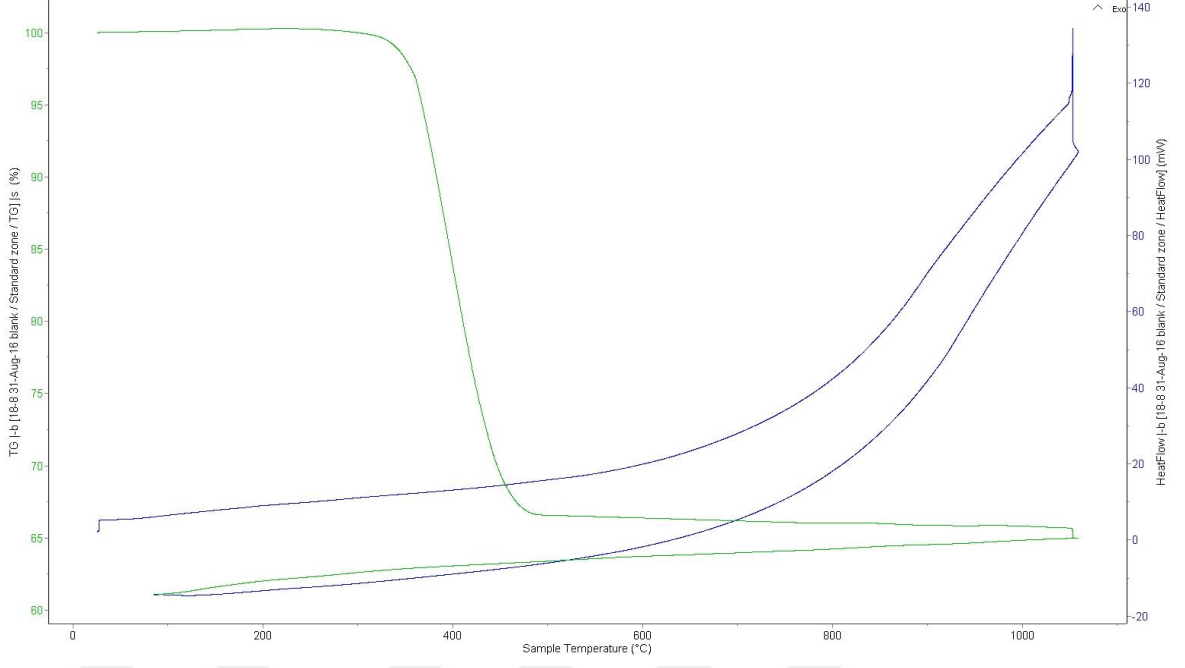
SEM görüntüleri incelendiğinde ise tabakalar arası kopmalar ve ayrılmalar yerine kırılma yüzeyinde çok sayıda mikro çatlak oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu tip kompozit malzemelerde çok katmanlı karbon nanotüp/epoksi ara yüzeyi, takviye elemanı-matris ara yüzeyindeki gerilim konsatrasyonunu azalmaktadır. Dolayısıyla hem takviye elemanı-matris ara yüzeyi doğrultusunda hem de dik doğrultuda çatlak ilerlemeleri azalmaktadır.

5.5 Termal Karakterizasyon Test Sonuçları

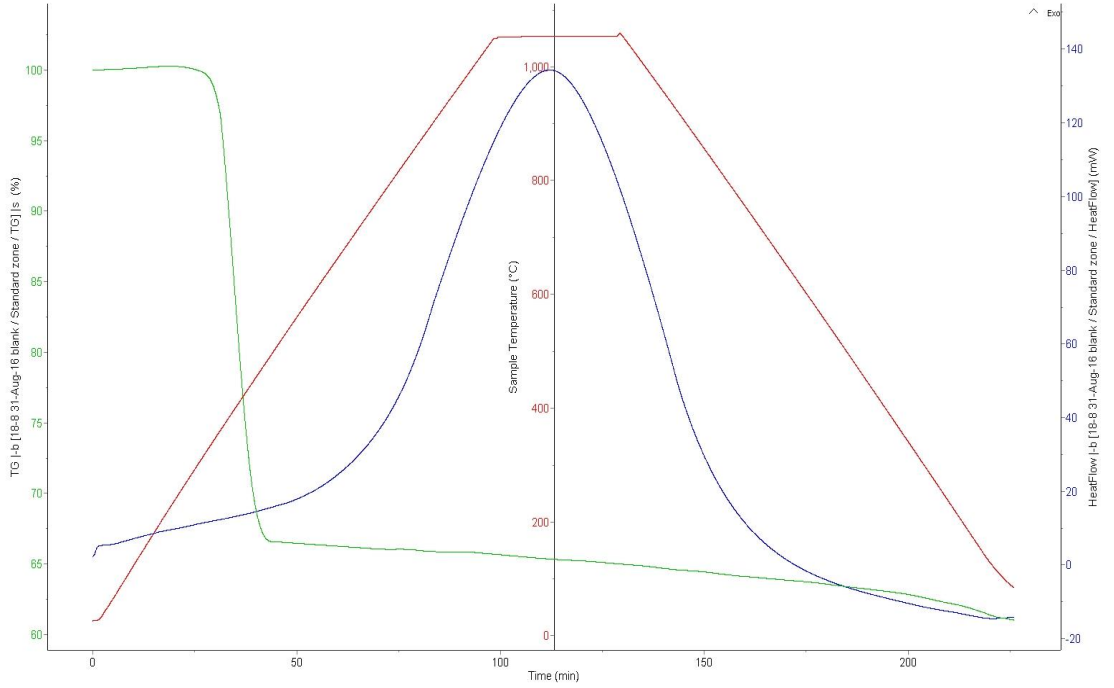
KNT takviyeli ve takviyesiz prepreg kompozit numunelerin termal etki karşısında nasıl etkilendiği incelenmiştir. KNT takviyeli ve takviyesiz numuneleri TGA termogramları incelendiği zaman KNT takviyesiz numuneler için bozunma sıcaklığı değeri 396,96 °C ve toplam kütle kaybı 18,737 mg olarak bulunmuştur (Şekil 5.25). KNT takviyeli numuneler için bozunma sıcaklığı 418,96 °C değeri ve toplam kütle kaybı 26,291 mg olarak bulunmuştur (Şekil 5.28). Genel olarak epoksi reçinelerin bozunma sıcaklığı değeri yaklaşık 300-350 °C civarındadır. Karbon nanotüp ilavesi epoksi malzemenin termal dayanımını arttırmıştır.



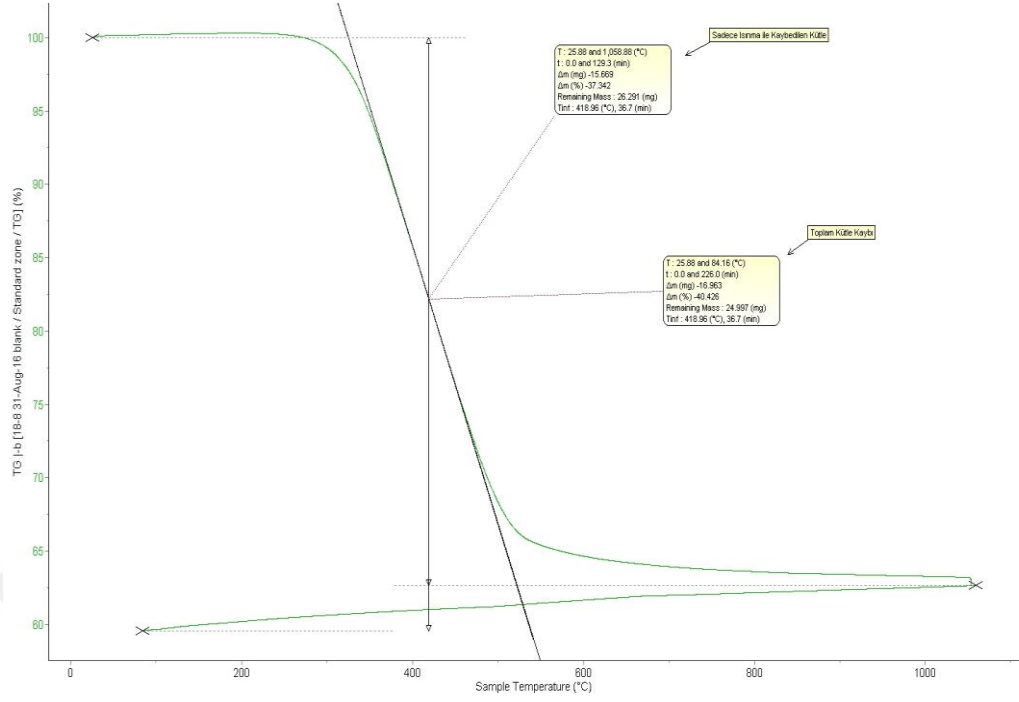
Şekil 5.25. KNT takviyesiz numunenin TGA sıcaklık skalası-kütle değişim miktarı grafiği



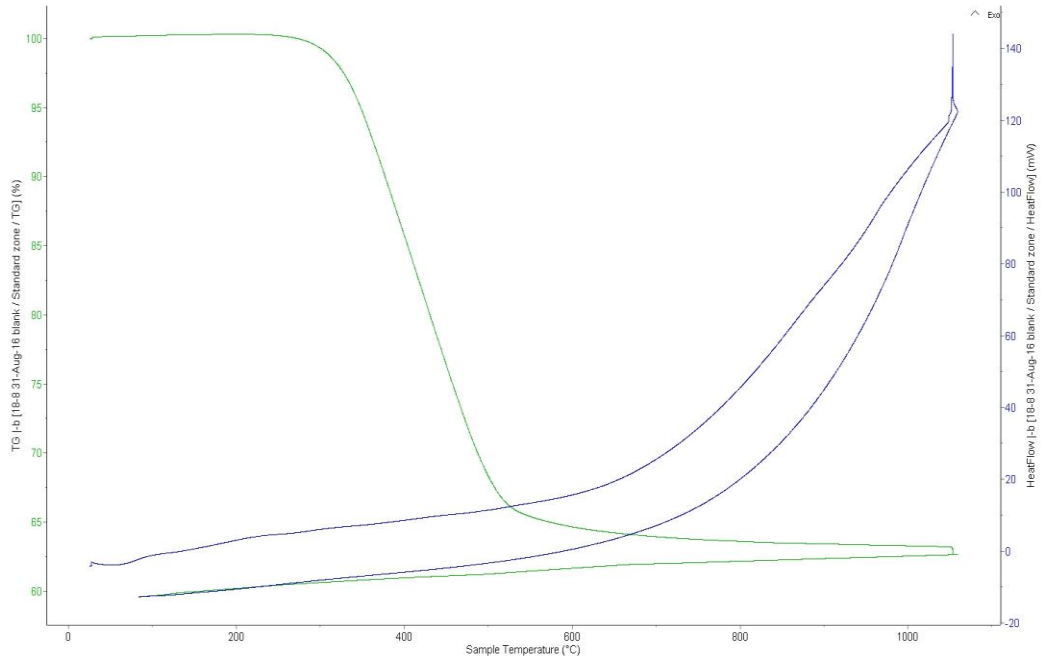
Şekil 5.26. KNT takviyesiz numunenin TGA-DSC sıcaklık skalası grafiği(1)



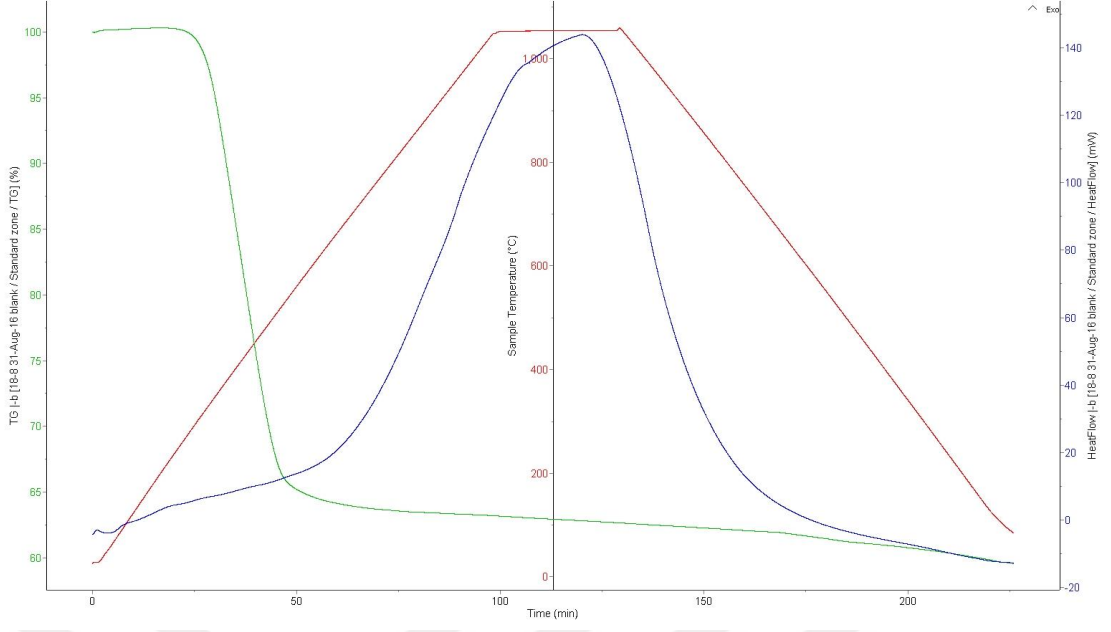
Şekil 5.27. KNT takviyesiz numunenin TGA-DSC sıcaklık skalası grafiği(2)



Şekil 5.28. KNT takviyeli numunenin TGA sıcaklık skalası-kütle değişim miktarı grafiği



Şekil 5.29. KNT takviyeli numunenin TGA-DSC sıcaklık skalası grafiği(1)



Şekil 5.30. KNT takviyeli numunenin TGA-DSC sıcaklık skalası grafiği(2)

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

- Kuvvet-zaman grafikleri incelendiğinde 125 j değerinde KNT takviyeli numunede maksimum kuvvet 16 kN seviyelerinde iken KNT takviyesiz numunede 13kN seviyelerinde gerçekleşmiştir.75 j gibi daha düşük seviyelerde hemen hemen aynı oranlarda kuvvet ve zaman değişimleri gözlenmiştir. Numuneler arasındaki kuvvet artış oranı %20 seviyesinde kalmıştır.
- KNT takviyeli ve KNT takviyesiz numunelere uygulanan maksimum temas kuvvetinin etkisi darbe hızlarının artmasıyla beklendiği şekilde yükselmiştir.
- Kuvvet-yer değiştirme grafiği incelendiğinde darbe hızları artarken elde edilen yer değiştirme literatüre uygun şekilde artmıştır. Grafik incelendiğinde KNT takviyeli numunenin daha yüksek kuvvetlerin daha geniş bir periyoduna sebep olduğu görülmüştür.
- Levha numunelerde maksimum temas kuvvetine ulaşıldığında numunede depolanan elastik enerjinin serbest kalması ile elastik esneme nedenli yer değiştirmeler maksimum temas kuvvetine göre daha düşük değerlerde kalmıştır.
- KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerde kuvvet-yer değiştirme grafiğindeki kuvvetlerin arasındaki farklar %25 olmasına rağmen yer değiştirme periyotları istenen seviyede elde edilememiştir. Bunun sebebinin arayüz oluşturma amacıyla KNT takviyeli matrisin homojen dispersiyonun sağlanamamasına bağlı olduğu değerlendirilebilir.
- Enerji-zaman grafiği incelendiğinde malzemeyi tahrip eden enerji beklendiği gibi geri tepme enerjisinden yüksektir. Geri tepme enerjilerinin yüksek çıkmasının sebebi numunenin KNT takviyesi sırasında hedeflenen kalınlıktan daha fazla kalınlığa sahip olması olmuştur.
- Numunede çöküntü bölgesi incelendiğinde hem radyal hem aksenal yönde lif yönünde fiber kırıkları olduğu gözlenmiş, hasarın fiber ve matris

kırıkları ile darbe bölgesinde en fazla olmak koşuluyla tabakalar arası delaminasyon yapacak şekilde darbe noktasında dışa doğru yayıldığı gözlenmiştir.

- Numune kalınlığı darbe esnasında oluşan en büyük temas kuvvetini büyük ölçüde etkilemiştir.
- KNT takviyesiz numunede aksel ve radyal yönde yapılan incelemelerde atkı ve çözgü sınırlarında kıvrım etkisinden dolayı matris çatlama hasarları meydana gelmiştir. Bu malzemenin mukavemetini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu durum literatürde ki çalışmalar ile uyumludur.
- KNT takviyesiz numunede geri tepme enerjisinin daha fazla olduğunun gözlenmesinin sebebi KNT takviyesinin yüksek darbe hızlarında çatlak etkisini artırdığı değerlendirilmektedir.
- Metal mikroskobunda yapılan darbe hasarının incelenmesi için dört farklı darbe enerjisinde (75j,90j,105j,125j) deney yapılmış ve darbe hasarları incelenmiştir.75 j'de delaminasyon ve darbe ucu temas noktasında fiber kırıkları 90 j'de geniş ölçüde delaminasyonlar görülmüş,105 j'de fiber kırıkları ve arayüz ayrılmaları, 125j'de çok yüksek çöküntü miktarı ile birlikte fiber matris ayrışması meydana gelmiştir.
- Genel olarak otoklav metodunda kullanılan reçinenin bozunma sıcaklığı 300°C-350°C civarındadır. TGA termogramları incelendiğinde numunede bozunma sıcaklığı 396,96°C bulunmuş, bu durumda KNT takviyesinin epoksinin termal dayanımını artırdığı görülmektedir. DSC termogramlarından elde edilen 418°C ise bu durumu doğrulamaktadır.
- KNT takviyesiz numune,KNT takviyeli numuneye göre termal stabilitesi daha fazladır. Literatürde KNT takviyesinin termal stabiliteyi artırdığı söylenmiştir.
- KNT takviyesiz SEM mikrografları incelendiğinde düzgün lif dağılımının gözlenmesi, malzeme üretimi esnasında tabaka geometrisinin bozulmadığını ve malzemenin iki yönde liflere eşit yükleme yapılması dolayısıyla mukavemet artışı sağlayacağı öngörülmüştür.
- KNT takviyeli numunelerin SEM mikrograflarında ise elyaf doğrultularının açıkça görüldüğü, birim alandaki elyaf yoğunluğunun fazlalığı ve düzenli dağılım gösterdiği açıkça görülmektedir. Her iki

mikrograftan karbon elyaflarına nanolu reçinenin düzgün yayıldığı ve tabakaya yapışmasının başarılı olduğu sonucuna varılabilir.

- Epoksi reçine sistemine ÇDKNT ilavesi ile mekanik ve termal özelliklerinde elde edilen iyileşmeler, ÇDKNT dispersiyonu yapılan kompozit malzemelerin kullanım alanının genişlemesine katkıda bulunacaktır. Tez çalışması kapsamında üretilen kompozit numuneler özellikle düzlem içi kayma gerilme özelliklerinin iyileştirilmesi sayesinde çok yönlü kuvvetlerin söz konusu olduğu yeni sektörlerde kullanımı yaygınlaşacaktır.
- ÇDKNT ile modifiye edilerek elyaf-matris ara yüzey etkileşimi artırılarak karbon elyaf-matrisi malzemelerin yapışma kalitesini artırmıştır. Bu sayede dışarıdan uygulanacak kuvvetlere karşı direnç göstermektedir. Matris yapıya eklenen ÇDKNT ile üretilen malzemelerin elyaf hacim oranının azalmasına rağmen malzeme mekanik özellikleri iyileştiği görülmüştür.
- KNT ilavesi literatür araştırmalarında %0.3 oranının gerek darbe,gerek çekme dayanımlarında yükselişlere neden olduğu açıktır. Aynı yükselme prepreg malzeme kullanılarak elde edilmiştir ve bulunan sonuçlarda %50 oranında mukavemet artışı, diğer metotlardan daha avantajlı olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Ahmad, F., Hong, J. W., Choi, H. S., Park, S. J., & Park, M. K. (2015). The effects of stacking sequence on the penetration-resistant behaviours of T800 carbon fiber composite plates under low-velocity impact loading. *Carbon Lett*, 16(2), 107-115.
- Ajayan, P.M., Ebbesen, TW, Ichihashi T, Iijima S, Tanigaki K, Hiura H. (1993). Opening carbon nanotubes with oxygen and implications for filling. *Nature*. 362 (6420).
- Ashraf, B., Guan, J., Mirjalili, V., Zhang, Y., Chun, L., Hubert, P., Simard, B., Kingston, C. T., Bourne, O. & Johnston, A. (2011). Enhancement of mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminate composites using single-walled carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, 71, 1569-1578.
- ASTM D3039/D3039M, A. S. for T. & M. (2017). Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 12 Temmuz 2019 Tarihinde www.astm.org adresinden erişildi.
- Azom. 2019, [online], website: <https://www.azom.com/materials-equipment-index.aspx> [Ziyaret Tarihi: 10 Ekim 2019].
- Baddour, C.E. & Briens C. (2005). Carbon Nanotube Synthesis: A Review. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 3.
- Balasubramanian, K. & Burghard, M. (2005). Chemically Functionalized Carbon Nanotubes. *Small*, 1(29), 180-192.
- Bekyarova, E, Thostenson, E.T., Yu, A., Kim, H., Gao, J., Tang, J. (2007). Multiscale Carbon Nanotube-Carbon Fiber Reinforcement for Advanced Epoxy Composites. *Langmuir*.
- Breuer, O., & Sundararaj, U. (2004). Big returns from small fibers: a review of polymer/carbon nanotube composites. *Polymer composites*, 25(6), 630-645.
- Charlier J.-C., Blase X., Roche S.. Electronic and transport properties of nanotubes, *Reviews of Modern Physics*, Volume 79, April-June 2007
- Chembio, 2019, [online], [Ziyaret Tarihi: 22 Ekim 2019]. website: http://www.chembio.uoguelph.ca/educmat/nano2000_baker/.
- Clair, B. S. (2016). Nanotechnology: Predicting The Future.
- Dalkılıç, Z. (2014) Dikey Karbon Nanotüp Üretimi ve Çeşitli Uygulamalar için Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Daniel, B. M. & Steven, L. D. (2001). ASM Handbooks, 21:Composites.

- Dong, L., Hou, F., Li, Y., Wang, L., Gao, H., & Tang, Y. (2014). Composites Preparation of Continuous Carbon Nanotube Networks in Carbon Fiber/Epoxy Composite. *Composite: Part A*, 56, 248-255.
- Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G., & Jorio, A. (2004). Unusual properties and structure of carbon nanotubes. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 34, 247-278.
- Eser, H. M. (2006). Karbon Nanotüp-Sıvı Kristal Karışımlarının Elektriksel Özellikleri (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli).
- Fan, Z., Santare, M. H. & Advani, S. G. (2007). Interlaminar Shear Strength of Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites Enhanced with Multi-Walled Carbon Nanotubes, *Composites Part A*, 39, 540-554.
- Fao, (2019). [online], [Ziyaret Tarihi: 1 Ağustos 2019]. <http://www.fao.org/3/ad416e/ad416e05.htm>
- Fiberglass, (2019). Vacuum Bagging, [online], [Ziyaret Tarihi: 25 Ağustos 2019]. website: https://www.fiberglass.com/category/Vacuum_Bagging
- Gay, D. (2014). *Composite materials: design and applications*, CRC press, New York, ISBN-13: 978-1-4665-8488-4.
- Gojny, F. H., Wichmann, M. H., Fiedler, B. & Schulte, K. (2005). Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study, *Composites Science and Technology*, 65, 2300-2313.
- Guo, T., Nikolaev, P., Thess, A., Colbert, D. T., & Smalley, R. E. (1995). Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization. *Chemical physics letters*, 243(1-2), 49-54.
- Harris, P. J., & Harris, P. J. F. (2009). *Carbon nanotube science: synthesis, properties and applications*. Cambridge university press.
- Hexcell. (2019). Prepreg, [online], [Ziyaret Tarihi: 10 Ağustos 2019]. website: <https://www.hexcel.com/>
- İnce, E. (2014). *Amfibi zırhlı araçlar için kompozit-alüminyum denge plakası tasarımı, sonlu elemanlar analizi ve üretimi* (Master's thesis, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ankara).
- Judd, N. C. W., and Wright, W. W., 1978, "Voids and Their Effects on the Mechanical Properties of Composites an Appraisal," *SAMPE Q.*, 14, pp. 10–14.
- Kaw, A. K. (2005). *Mechanics of composite materials*. CRC press.

- Kostopoulos, V., Baltopoulos, A., Karapappas P., Vavouliotis, A. & Paipetis, A. (2010). Impact and after-impact properties of carbon fibre reinforced composites enhanced with multi-wall carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, 70, 553-563.
- Kroto, H. W., Heath, J. R., O'Brien, S.C., Curl, R.F. & Smaley, R.E. (1985). Nature, C60 Buckminsterfullerene. 318(3) 162-164.
- Kuchibhatla, S.V.N.T., Karakoti, A.S., Bera, D. & Seal S. (2007). One dimensional nanostructured materials. *Progress in Materials Science*, 52, 699-913.
- Kutucu, B. (2010). *Nanoteknoloji ve çift duvarlı karbon nanotüplerin incelenmesi* (Doctoral dissertation, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul).F
- Li, W., Yuan, J., Dichiaro, A., Lin, Y., & Bai, J. (2012). The use of vertically aligned carbon nanotubes grown on SiC for in situ sensing of elastic and plastic deformation in electrically percolative epoxy composites. *Carbon*, 50(11), 4298-4301.
- Liew, K. M., Wong, C. H., He, X. Q., & Tan, M. J. (2005). Thermal stability of single and multi-walled carbon nanotubes. *Physical Review B*, 71(7), 075424.
- Liu, W., Chai, S., Mohamed, A. R. & Hashim, U. 2014. Synthesis and characterization of graphene and carbon nanotubes: A review on the past and recent developments. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20, 1171-1185.
- Masterbond (2019). [online], [Ziyaret Tarihi: 11 Temmuz 2019]. website; <https://www.masterbond.com/industries/wet-lay-uphand-lay-manufacturing-process-composites>
- Monaghan, P. F., Brogan, M. T., & Oosthuizen, P. H. (1991). Heat transfer in an autoclave for processing thermoplastic composites. *Composites Manufacturing*, 2(3-4), 233-242.
- Nanografi. (2019). [online], [Ziyaret Tarihi: 4 Temmuz 2019].website; <http://nanografi.com.tr/karbon-nanotup/cok-duvarli-karbon-nanotup/>
- Nanokomp (2019). [online], [Ziyaret Tarihi:14 Ekim 2019]. website; <http://www.nanokomp.com.tr/urunler/havacilik.php>
- Nanoteknoloji (2019). [online],[Ziyaret Tarihi:22 Ekim 2019]. website; <https://nanoteknoloji.org/tag/platin-nanopartikuller/>
- NetComposites. (2019). Autoclave Design. [online], [Ziyaret Tarihi: 18 Ağustos 2019]. website: <https://netcomposites.com/guide/manufacturing/autoclave-design/>
- Oğuz, B. (2017). Prepreg Teknolojisi ile Üretilen Kompozit Malzemelerin Performanslarının Araştırılması. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri

Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli.

- Performance Composites. (2019). [online], [Ziyaret Tarihi: 30 Ağustos 2019].
website:<http://www.performancecomposites.com/about-composites.html>
- Rafiee, M.A., Rafiee, J., Wang, Z., Song, H., Yu, Z.-Z. & Koratkar, N. (2009). Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content. *American Chemical Society ACS Nano*, 3 (12), 3884-3890.
- Rahman M., Zainuddin S., Hosur M., Malone J., Salam M., Kumar A. & Jeelani S. (2012). Improvements in mechanical and thermo-mechanical properties of e-glass/epoxy composites using amino functionalized MWCNTs, *Composite Structures*, (94), 2397-2406.
- Reijenga, J.C. (2003). The Wondrous World of Carbon Nanotubes. Eindhoven University of Technology.
- Reyne M., Technologie des composites, Editions Hermes, Paris, France 1990.
- Rosso, M.A. (2001). Origins, Properties, and Applications of Carbon Nanotubes and Fullerenes. Yüksek Lisans Tezi, California State University Fresno, Fresno.
- Seyman, M.C. (2010). Çift duvarlı karbon nanotüplerin incelenmesi (Doctoral dissertation, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul).
- Sglcarbon (2019). [online], [Ziyaret Tarihi: 22 Temmuz 2019]. website; <https://www.sglcarbon.com/>
- Shah, K. A. & Tali, B. A. (2016). Synthesis of carbon nanotubes by catalytic chemical vapour deposition: A review on carbon sources, catalysts and substrates. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 41, 67-82.
- Sharifzadeh, M. (2006). Nanotechnology Sector Report, Cronus Capital Markets, 1st Quarter.
- Siddiqui, N.A., Khan, S.U., Ma, P.C., Li C.Y. & Kim, J.K. (2011). Manufacturing and characterization of carbon fibre/epoxy composite prepregs containing carbon nanotubes, *Composites: Part A* 42, 1412-1420.
- Siddiqui, N. A., Khan S. U. & Kim J.K. (2013). Experimental torsional shear properties of carbon fiber reinforced epoxy composites containing carbon nanotubes, *Composite Structures*, 104, 230-238.
- Siddiqui N. A., Sham M.L., Tang B. Z., Munir A. & Kim J.K. (2009). Tensile Strength of Glass Fibres with Carbon Nanotube-Epoxy Nanocomposite Coating, *Composites: Part A*, 40, 1606-1614.
- Soliman, M., Al-Haik, M. & Taha, M.R. (2012) On and Off-Axis Tension Behavior of Fiber Reinforced Polymer Composites Incorporating Multi-walled Carbon

Nanotubes, *J Compos Mater.*, 46(14), 1661-1675

Spm Kompozit. (2019). Reçine Sistemleri. [online], [Ziyaret Tarihi:[15 Ağustos 2019].
website: <https://www.spmkompozit.com/reine-sistemleri>

TÜBİTAK. (2019). Teydep. [online], [Ziyaret Tarihi: [25 Ekim 2019]. website:
<https://teydeb.tubitak.gov.tr/teydebmevzuat.htm>

Wagner, H. D., Lourie, O., Feldman, Y. & Tenne, R. (1998). Stress-induced fragmentation of multiwall carbon nanotubes in a polymer matrix, *Applied Physics Letters*,72(2), 188-190.

Yetim, A. (2011). Karbon Nanotüpler, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana.

Yu, A., Bekyarova, E., Itkis, M. E., Fakhrudinov, D., Webster, R., & Haddon, R. C. (2006). Application of centrifugation to the large-scale purification of electric arc-produced single-walled carbon nanotubes. *Journal of the American Chemical Society*, 128(30), 9902-9908.

Zhao, X., Ohkohchi, M. & Wang, M. (1994). Preparation of High Grade Carbon Nanotubes by Hydrogen Arc Discharge. *Carbon*, 35, 775.

Zhu, G., Goldsmith, W. & Dharan, C. (1992). Penetration of laminated kevlar by projectiles-I. Experimental investigation. *International Journal of Solid and Structures*,29(4), 399-420.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mevlüt KUMDERE
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Seydişehir/12.10.1990
Telefon : 0536 330 1726
Faks :
e-mail : mevlutkumdere@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Mahmut Esat Anadolu Lisesi-Seydişehir	2008
Üniversite	: Necmettin Erbakan Üniversitesi Makine Müh.	2015
Yüksek Lisans	: Necmettin Erbakan Üniversitesi Makine Müh.	2020
Doktora	:	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2015	Test Makine	Makine Mühendisi
2016	Zirve Mühendislik&Doğalgaz	Makine Mühendisi
2018	Kumdere Mühendislik&Danışmanlık	Makine Mühendisi

BİLDİRİLER

Mehmet KAYRICI , Mevlüt KUMDERE , Hüseyin ARIKAN ‘Tabakalı Prepreg Kompozitlerde Karbon Nanotüp Takviyesi ile Mekanik Özelliklerin Optimizasyonu’ Presented at The International Aluminium-Themed Engineering and Natural Sciences Conference in Seydişehir/TURKEY (IATENS’19), October 4-6 2019