



**İSKENDERUN TEKNİK**

ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**KARBON NANOTÜP VE CAM ELYAF  
TAKVİYELİ YÜKSEK YOĞUNLUKLU  
POLİETİLEN HİBRİT KOMPOZİT  
MALZEMELERİN MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Hakan GÜĞÜL**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2018



**KARBON NANOTÜP VE CAM ELYAF TAKVİYELİ YÜKSEK  
YOĞUNLUKLU POLİETİLEN HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERİN  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Hakan GÜĞÜL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

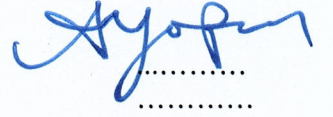
**HAZİRAN 2018**

Hakan GÜĞÜL tarafından hazırlanan “KARBON NANOTÜP VE CAM ELYAF TAKVİYELİ YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Ahmet YAPICI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

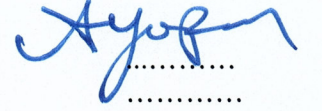
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



**Başkan:** Prof. Dr. Ahmet YAPICI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

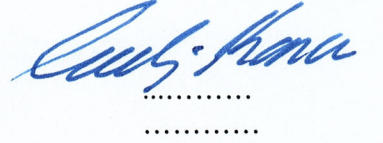
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Erdoğan KANCA

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Durmuş Ali BİRCAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

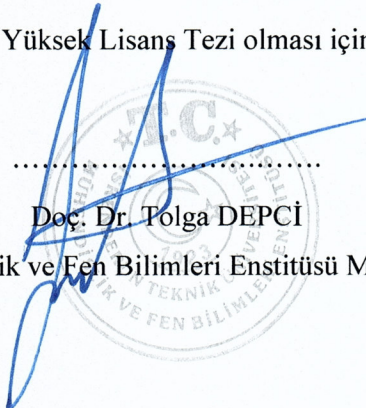


Tez Savunma Tarihi: 08/06/2018

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

Doç. Dr. Tolga DEPCİ

Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü V.



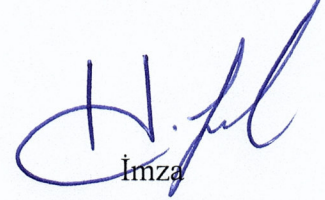


## ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



İmza  
Hakan GÜĞÜL

08/06/2018

KARBON NANOTÜP VE CAM ELYAF TAKVİYELİ YÜKSEK YOĞUNLUKLU  
POLİETİLEN HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)

Hakan GÜĞÜL

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2018

ÖZET

Ülkemizde ve dünyada son yıllarda kompozit malzemelerin gelişmesiyle birlikte karbon nanotüp (KNT) üzerinde araştırmalar ve sentezlenme işlemleri yaygınlaşmıştır. Karbon nanotüp, çok hafiftir ve yüksek dayanıma sahiptir. Cam elyaf ise yüksek çekme ve aşınma dayanımına sahip olması sebebiyle plastik esaslı malzemelerde güçlendirici olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) ile ağırlıkça %0,5; %1 ve %1,5 oranlarında KNT, aseton ile karıştırılmıştır. Ultrasonik karıştırıcı ve manyetik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra aseton buharlaştırılmıştır. YYPE ve KNT karışımı, çift vidalı ekstruderden geçirilerek tamamen homojen hale gelmiştir. Granül haldeki bu malzemeye cam elyaf takviyesi yapılarak sıcak pres makinası yardımıyla kompozit plakalar üretilmiştir. Plakalar lazer kesim cihazında kesilerek deney numuneleri elde edilmiş ve numunelerin testleri yapılarak mekanik özellikleri incelenmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda, cam elyaf ve tüm oranlarda yapılan KNT takviyesinin mukavemet değerlerini arttırdığı görülmüştür. Bu takviyelerle malzemede iyi bir dayanım artışı sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler : Kompozit, karbon nanotüp, cam elyaf, yüksek yoğunluklu polietilen

Sayfa Adedi : 73

Danışman : Prof. Dr. Ahmet YAPICI

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON NANOTUBES  
AND GLASS FIBER REINFORCED HIGH DENSITY POLYETHYLENE HYBRID  
COMPOSITE MATERIALS

(M. Sc. Thesis)

Hakan GÜĞÜL

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

June 2018

ABSTRACT

In recent years, research and synthesis processes on carbon nanotubes (CNTs) have become widespread with the development of composite materials in our country and the world. CNTs are so lightweight and high strength material. Because of high tensile strength and abrasion resistance of glass fiber, is used as a strengthening in plastic-based materials.

In this work, high density polyethylene (HDPE) and 0,5; 1 and 1,5% by weight of CNTs were mixed with acetone. The acetone was evaporated after mixing in the ultrasonic mixer and magnetic stirrer. Mixtures of HDPE and CNTs have become completely homogeneous by passing it through a twin-screw extruder. The composite plates made from glass fiber, HDPE and CNTs by hot press machine. Plates were cut by laser cutting machine, so test samples were obtained. This samples were tested and then their mechanical properties have been examined.

The result of the experiments showed that reinforcement of glass fiber and all proportions of CNTs increased strength values. With these reinforcements, provided a good strength increase on the material.

Key Words : Composite, carbon nanotubes, glass fiber, high density polyethylene  
Page Number : 73  
Supervisor : Prof. Dr. Ahmet YAPICI

## TEŞEKKÜR

Bu alıőmanın tamamlanmasında yüksek lisans eğitimine baőladıđım ilk günden itibaren desteklerini eksik etmeyen, her zaman Őukranlarımı sunacağım, hayatı baőarılarla dolu danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet YAPICI'ya sonsuz teőekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarda yardımcı olan ve desteklerini esirgemeyen Selçuk Üniversitesi öğretim üyelerinden Sayın Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN ve Sütçü İmam Üniversitesi öğretim üyelerinden Sayın Yrd. Doç. Dr. Kadir KARAKUŐ'a teşekkür ederim. Ayrıca malzeme üretim çalışmaları sırasında homojenlik için granül malzemeyi çift vidalı ekstruder cihazından geçiren Simav Teknoloji Fakóltesi Ar. Gör. Dr. Sayın Ferhat YILDIRIM'a teşekkür ederim.

En önemlisi, bu tezin tamamlanması aşamasında ve eğitim hayatım boyunca bana en büyük maddi ve manevi desteği veren başta annem ve babam Emine-Süleyman GÜĞÜL olmak üzere eőim Meryem GÜĞÜL, ablalarım ve eőleri Raziye-Ahmet SATIRLI ve Sakine-Ali GENÇ'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	6
3.1. Kompozitlerin Tarihçesi.....	6
3.2. Kompozit Malzemenin Tanımı ve Özellikleri .....	7
3.3. Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları.....	9
3.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	10
3.4.1. Matris malzemesine göre kompozitler .....	10
3.4.2. Takviye elemanına göre kompozitler.....	15
3.5. Nanokompozitler .....	17
4. MATERYAL VE YÖNTEM .....	18
4.1. Materyaller.....	18
4.1.1. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE).....	18
4.1.2. Karbon nanotüp (KNT) .....	22
4.1.3. Cam elyaf.....	35



	<b>Sayfa</b>
4.2. Yöntem .....	37
4.2.1. Kompozit malzemelerin üretimi .....	37
4.2.2. Deney numunelerinin hazırlanması .....	47
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....	53
5.1. Çekme Deneyi Sonuçları .....	53
5.2. Izod Darbe Deneyi Sonuçları .....	56
5.3. Düşük Hızlı Darbe Deneyi Sonuçları .....	58
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR .....	64
ÖZGEÇMİŞ .....	72
DİZİN.....	73

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.1. KNT ve bazı malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılması .....	28
Çizelge 5.1. Çekme numuneleri kodlarının tanımı.....	55



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Sektörlere göre kompozit kullanım oranları .....	9
Şekil 4.1. YYPE üretim şeması.....	20
Şekil 4.2. İki boyutlu grafın yapısı üzerinde kiral vektör, birim hücre vektörü ve katlanarak nanotüpün birim hücreğini oluşturan grafen parçası.....	24
Şekil 4.3. Ark boşalım Sistemi.....	30
Şekil 4.4. Lazer buharlaştırma sistemi şematik gösterimi .....	31
Şekil 4.5. a) Sabit yataklı CVD, b) Akışkan yataklı CVD.....	33
Şekil 4.6. Cam elyaf üretim şeması .....	35
Şekil 5.1. Çekme deneyi sonuçları-maksimum gerilme .....	53
Şekil 5.2. Numunelere ait çekme deneyi kuvvet-uzama grafiği .....	54
Şekil 5.3. Izod darbe deneyi sonuçları .....	56
Şekil 5.4. Kuvvet-zaman grafiği .....	58
Şekil 5.5. Hız-zaman grafiği .....	59
Şekil 5.6. Kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	60
Şekil 5.7. Yer değiştirme-zaman grafiği.....	61
Şekil 5.8. Kuvvet-enerji grafiği .....	61
Şekil 5.9. Enerji zaman dağılımı.....	62

## RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matrisli kompozitler.....	11
Resim 3.2. Takviye elemanına göre kompozit malzemeler.....	15
Resim 3.3. Nano boyuta sahip dolgu malzemelerinin şematik gösterimi.....	17
Resim 4.1. Polietilenin yoğunluk ve kristallik oranına göre şematik karşılaştırılması...	19
Resim 4.2. YYPE'nin yapısı.....	21
Resim 4.3. YYPE.....	21
Resim 4.4. a) Grafit yapısı, b) Grafen yapısı ve KNT oluşum aşaması, c) KNT TEM görüntüleri.....	22
Resim 4.5. Bucky-Balls modeli.....	23
Resim 4.6. KNT tipleri.....	25
Resim 4.7. TDKNT şematik yapısı.....	26
Resim 4.8. ÇDKNT şematik yapısı.....	27
Resim 4.9. ÇDKNT.....	34
Resim 4.10. Cam elyaf kumaş.....	36
Resim 4.11. Hassas terazi ile tartım işlemi.....	37
Resim 4.12. YYPE ve KNT karışımına aseton eklenmesi.....	38
Resim 4.13. YYPE ve KNT'nin ultrasonik karıştırıcıda karıştırılması.....	38
Resim 4.14. YYPE ve KNT'nin manyetik karıştırıcıda karıştırılması.....	39
Resim 4.15. YYPE ve KNT karışımı.....	40
Resim 4.16. Çift vidalı ekstruder cihazı.....	40
Resim 4.17. Ekstruderden çıkan ürün.....	41
Resim 4.18. Farklı oranlarda KNT takviyeli YYPE.....	41
Resim 4.19. Sıcak pres makinası.....	42

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 4.20. Teflon kaplı kalıp.....	43
Resim 4.21. KNT katkılı YYPE ve cam elyafın kalıba yerleştirilmesi .....	43
Resim 4.22. Üretime hazır hale gelen KNT katkılı YYPE ve cam elyaf.....	44
Resim 4.23. Sıcak üretimin başlangıcı.....	45
Resim 4.24. Üretim sırasında sıcaklık kontrolü.....	45
Resim 4.25. Sıcak pres makinasında üretilen kompozit plakalar .....	46
Resim 4.26. Plakaların lazer kesim cihazı ile kesimi.....	47
Resim 4.27. Kompozit plakalardan kesilen deney numuneleri.....	47
Resim 4.28. Çekme numunesi ölçüleri .....	48
Resim 4.29. Çekme deneyi numuneleri .....	48
Resim 4.30. Çekme deney cihazı.....	49
Resim 4.31. Izod numunesi ölçüleri .....	50
Resim 4.32. Izod deney numuneleri .....	50
Resim 4.33. Çentik açılmış izod numunesi.....	51
Resim 4.34. Izod deney cihazı .....	51
Resim 4.35. Düşük hızlı darbe deney numuneleri .....	52
Resim 4.36. Düşük hızlı darbe deney cihazı.....	52
Resim 5.1. Deney sonu kopmuş çekme numuneleri .....	55
Resim 5.2. Çentik noktalarından kırılmış izod numuneleri .....	57
Resim 5.3. Düşük hızlı darbe deneyinde kuvvet etkisi altında kalan numuneler .....	59

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### Simgeler

### Açıklamalar

<b>m<sup>3</sup></b>	Metreküp
<b>m<sup>2</sup></b>	Metrekare
<b>kJ</b>	Kilojoule
<b>N</b>	Newton
<b>g</b>	Gram
<b>°C</b>	Santigrat derece
<b>nm</b>	Nanometre
<b>µm</b>	Mikrometre
<b>TPa</b>	Terapascal
<b>Gpa</b>	Gigapascal
<b>mm</b>	Milimetre

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

<b>ASTM</b>	American society for testing and materials
<b>AYPE</b>	Alçak yoğunluklu polietilen
<b>CVD</b>	Kimyasal buhar biriktirme
<b>ÇDKNT</b>	Çok duvarlı karbon nanotüp
<b>KNT</b>	Karbon nanotüp
<b>TDKNT</b>	Tek duvarlı karbon nanotüp
<b>TEM</b>	Transmission electron microscope
<b>YYPE</b>	Yüksek yoğunluklu polietilen



## 1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin ülkemiz ve dünya genelinde her alanda gelişmesiyle birlikte buna paralel olarak malzeme bilimlerinde de araştırma ve geliştirmeler yaygınlaşmıştır. Malzeme alanında iyileştirmeler devam ederken her geçen gün gelişen teknoloji ile özellikle kompozit malzemeler üzerinde çalışmalar artmıştır.

Kompozit malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar sonrasında bu malzemelerin kullanım alanları da artış göstermiştir. Özellikle hafif olması ve mukavemet değerlerinin oldukça yüksek olması şu an birçok sektörde kompozit malzeme kullanılmasında önemli bir etken olmuştur. Kullanım alanları artarken aynı zamanda farklı tip kompozit malzemelerin araştırılması, kullanımı veya takviye yapılarak daha dayanıklı kompozit üretimi ve geliştirme çalışmalarını da beraberinde getirmiştir [1, 2].

Kompozit malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar devam ederken öte yandan günümüz teknolojisinin olmazsa olması nano teknoloji de hızla gelişmektedir. Bu durumda nano teknoloji, malzeme bilimine de konu olarak kompozit malzemelerde yaygın bir kullanıma ulaşmıştır. Bu şekilde nanokompozit adını alan birçok malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir [3-5].

Nanokompozitlerin en önemli bileşeni olarak bilinen karbon nanotüp, bu malzemelerin mekanik özelliklerinde oldukça iyi bir artış sağlamıştır. Karbon nanotüpün fiber takviye malzemeleri içerisinde bilinen en dayanıklı fiber olması daha çok ön plana çıkmasında önemli bir etken olmuştur. Ayrıca çok hafif ve yüksek elastiklik modülüne sahip olması da önemli özelliklerindedir [6].

Karbon nanotüp sentezleme işlemlerinin son yıllarda yaygınlaşmasının yanı sıra cam elyafın ise uzun yıllardan beri üretimi ve kullanımı sıklıkla görülmektedir. Cam elyaf kompozit üretiminde en çok kullanılan malzemelerden biridir. Oldukça sağlam, yanmaz ve darbelere karşı dayanıklıdır. Bu özelliklerinden dolayı özellikle teknelerde tamirat amaçlı reçinelerle birlikte kullanılırlar.

Karbon nanotüp ve cam elyafın ayrı ayrı ya da birlikte plastik esaslı malzemelerde kullanılması bu malzemelerin özelliklerinde iyileşme olmasını sağlamıştır. Bu tez çalışmasında da karbon nanotüp ve cam elyaf katkısı yapılarak yüksek yoğunluklu polietilenden hibrit kompozit malzeme üretilmiş ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada farklı oranlarda bileşen eklenerek oluşturulan kompozit malzemenin mukavemet değerlerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Tang, W. (2003), çok duvarlı KNT takviyeli YYPE kompozit filmlerin eritme prosesi kullanarak mekanik özelliklerini incelemiştir. Çok duvarlı nanotüpler, YYPE içerisine çift vidalı ekstruder kullanarak dağıtmışlardır. Yaptıkları testler sonucunda, çok duvarlı nanotüp oranının artmasının kompozit filmlerde kırılma tokluğunu arttırdığını gözlemlemiştir. Bunun yanında sertlik ve akma mukavemetinin de arttığını gözlemlemiştir [7].

Johnson, B. B. ve ark. (2009), KNT takviyeli YYPE'den ürettikleri kompozit malzemelerin aşınma davranışlarını üzerinde çalışmışlardır. %1; %3; %5 oranlarında KNT ilave ederek ürettikleri kompozit malzemelerde, nanotüp oranı arttıkça aşınmaların azaldığını tespit etmişlerdir [8].

Mirik, M. (2010), YYPE ile KNT'yi farklı bileşimlerde hazırlayarak elde edilen ürünlerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada YYPE içerisine %1, %3 ve %5 oranlarında KNT ekleyerek hem sıcak preste hem de plastik enjeksiyonla ayrı ayrı plaka üretmiştir. Ürettiği malzemelerin çekme ve darbe dayanımlarını incelemiştir. Çekme testlerine göre sıcak presle ürettiği malzemelerin, plastik enjeksiyonla ürettiği malzemelere göre KNT oranı arttıkça çekme mukavemetleri artmıştır. Ancak darbe testlerine göre, her iki üretim yönteminde de KNT oranı arttıkça dayanımların azaldığı sonucuna varmıştır [9].

Yakovlev, G. (2013), çok duvarlı karbon nanotüp ve eriyik cam kullanarak inşaat yapı malzemelerinin yapısal değişikliklerini incelemiştir. Yapılan çalışma neticesinde yapı malzemelerinin çok duvarlı nanotüplerle iyi oranda dayanımının arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca eriyik cam ve çok duvarlı nanotüp takviyesi hem yapısal olarak dayanım hem de yanma konusunda direnç kazandırmıştır [10].

Yıldızhan, İ. (2013), hibrit kompozit malzemelerde darbe davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada epoksi ve takviye elamanı olarak karbon elyaf ve cam elyaf kullanmış, bu malzemelerden farklı kalınlıklarda kompozit numune üretimi yapmıştır. Deney sonucunda, karbonlu yüzeyin delinme ve saplanma sınırının, cam yüzeyinkine göre daha yüksek olduğu tespit etmişlerdir [11].

Sevkat, E. ve ark. (2014), karbon fiber ve cam fiber takviyeli hibrit kompozit millerin burulma davranışlarını incelemişlerdir. Fiberler mile sarım yöntemi uygulanarak takviye edilmiştir. Cam fiberin ve karbon fiberin milin mekanik özelliklerini oldukça iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir [12].

Anggoro, B.M. (2015), çok duvarlı KNT ve düşük yoğunluklu polietileni çift vidalı ekstruderde karıştırıp, sıcak pres uygulamasıyla nanokompozit filmler üretmiştir. Takviye edilen KNT ile malzemede mekanik özelliklerin arttığı görülmüştür. Çalışmasında, mekanik özellik ve gaz geçirgenlik özelliklerinin iyileştirilmesinde çok duvarlı KNT'lerin boyutlarının değil, daha çok miktarının etkili olduğu kanısına varmıştır [13].

Tekin, F. (2015), farklı oranlarda KNT ile güçlendirilmiş cam elyaf takviyeli kompozit malzeme üretimi yaparak bu malzemelerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Kompozit malzemeleri KNT takviyesi olmadan ve %0,5; %1; %2 oranlarında KNT takviyesi yaparak elde etmiştir. Çalışmasında mekanik özelliklerle beraber çekme, darbe ve elektrik iletkenliği özelliklerini de tespit etmiştir. Yaptığı incelemeler sonucu, kompozit malzemede %0,5 KNT oranında en iyi mekanik özelliği tespit etmiş ve bu katkı oranından daha fazla KNT takviyesinde mekanik özellikler azalmaya başlamıştır [14].

Gürkan, İ. (2015), yalıtkan özellikteki epoksiye KNT ilavesi yaparak iletkenlik kazandırmaya çalışmıştır. Bu çalışmada amacı, özellikle havacılık sektöründe yıldırım çarpması, buzlanma gibi olaylar sonucu oluşabilecek kaza ve hasarları en aza indirmek olmuştur [15].

Ağma, O. (2015), KNT takviyeli malzemelerin farklı sıcaklıklarda mekanik ve elektriksel analizlerini yapmıştır. Çalışmada, matris malzemesi olarak epoksi kullanılmış, cam ve karbon elyaf takviyesiyle aynı analizler yapılmıştır. KNT katkılı kompozitlerde elektrik iletkenliği olan malzeme türleri elde edilebileceği ispatlanmıştır [16].

Shahbaz, S. (2016), KNT ile karbon/cam hibrit kompozitlerin özelliklerindeki değişimi incelemiştir. Matris olarak epoksi, takviye elamanı olarak da E-cam ve karbon elyaf kullanılmıştır. Numuneler ayrı ayrı vakumla kalıplama tekniği ve matris içinde dağıtma yöntemleriyle üretilmiştir. Her iki üretim tekniğinde kompozit malzemelere KNT takviyesi mekanik özelliklerde iyileşme sağlamıştır [17].

Tanın, M. (2016), yüksek yoğunluklu polietilene %1 oranında karbon nanotüp (KNT) takviyesi yaparak kompozit plaka üretimi yapmış ve deneysel çalışma yapmıştır. Mekanik özellikleri karşılaştırmak ve iyileştirmek amacıyla saf YYPE, cam elyaf takviyeli YYPE ve KNT-cam elyaf takviyeli YYPE'den oluşan dört farklı plaka üretmiştir. Plaka üretimlerini sıcak pres makinası yardımıyla yapmıştır. Sıcak üretim öncesinde, KNT ve YYPE'nin homojen bir şekilde karışması için, ultrasonik prop, manyetik karıştırıcı ve çift vidalı ekstruder kullanılmıştır. Sıcak üretimden sonra malzemenin soğutulması oda sıcaklığında basınç altında yapılmıştır. Yaptığı deney sonuçlarına göre izod darbe testinde YYPE'ye tüm takviye türlerinde darbe dayanımlarında düşüş gözlemiştir. Çekme testinde ise takviye elemanlarıyla birlikte YYPE'nin çekme dayanımı artmıştır. En çok dayanım artışı, KNT, YYPE ve cam elyaf hibrit kompozit malzemede görmüştür [18].

Öner, G. ve ark. (2016), farklı oranlarda karbon nanotüp katkılı düz örgü cam ve epoksi tabakalı kompozit malzemelerin düşük hızlı darbeye karşı davranışlarını incelemiştir. Üretilen kompozit plakalar el yatırma yöntemi ile üretilmiştir. %1 ve %1,25 oranlarında KNT kullanılarak üretim yapılmış ve test sonuçlarında KNT katkılı numunelerin saf numuneye göre daha fazla hasar alanına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, ağırlıkça %1 KNT oranlı plakaların en yüksek reaksiyon kuvvetine sahip olduğunu gözlemlemiştir [19].

Demir, O. (2017), KNT takviyeli cam elyaf, karbon elyaf ve epoksi hibrit nanokompozitlerin mekanik özelliklerini ve düşük hızlı darbe davranışlarını incelemiştir. Hibrit kompozit malzemeler vakum destekli elle yatırma yöntemiyle üretilmiştir [20].

Gör, A. (2018), cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzeme üretimi yapmış, mekanik özelliklerin tespiti amacıyla izod darbe testi, çekme testi, üç nokta eğilme testi ve pin bearing testlerini kullanmıştır. Ürettiği malzeme türlerinden en yüksek mukavemet özelliklerini, dokuma kumaş yoğunluğu  $300 \text{ g/m}^2$  olan cam elyafı malzemede tespit etmiştir [21].

Yapılan literatür araştırmalarının sonucunda karbon nanotüp ve cam elyafın polimer malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılması, elde edilen kompozit malzemenin mukavemet değerlerini arttırmıştır. Buradan yola çıkarak farklı oranlarda nanotüp katkısı ve beraberinde cam elyaf takviyesiyle yüksek yoğunluklu polietilenin mukavemet değerlerinin incelenmesi ve iyileştirilmesi için bu tez çalışma konusu tercih edilmiştir.

### 3. KOMPOZİT MALZEMELER

#### 3.1. Kompozitlerin Tarihçesi

Kompozit malzemeler nispeten yeni bir malzeme alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. 1930'lerden öncesinde kerpiç, asfalt ve betonarme gibi sınırlı sayıda kompozit malzemenin kullanımı çok eski zamanlara dayanmaktadır. Ancak kompozitlerin geliştirilmesi ve ticari boyutta üretilmesi 1930-1940'lı yıllardan itibaren başlamıştır [22, 23].

İkinci Dünya Savaşı sırasında o zamanların teknolojisi karşısında mevcut konvansiyonel malzemeler tek başlarına belli ihtiyaçları karşılayamaz hale gelmiş ve yeni malzeme araştırmasına yönelim olmuştur. Savaşın yapıldığı 1946 yılı sonrasında da günümüze kadar kompozit malzemeler üzerinde araştırma, geliştirme ve mekanik özelliklerinde iyileştirme çalışmaları her geçen gün genişleyerek devam etmiştir [22].

Kompozitin ilk uygulamalarından bu yana birçok çalışmada hem takviye malzemelerinde hem de matris malzemelerde yeni kombinasyonlar uygulanmış, çok daha yüksek performanslara sahip yeni kompozit malzemeler ortaya çıkarılmıştır. Bu da kompozit malzemelerin hızla geliştirilmesi ve kullanım alanlarının artırılmasına neden olmuştur.

Kompozit malzemenin ilk örneklerinden biri olan kerpiç hemen hemen ilk çağlardan beri kullanılmaktadır. Kerpiç üretimi, killi çamur içerisine saman veya bitkisel liflerin katılmasıyla yapılmıştır. Bu katkı malzemeleriyle çamur daha sağlam ve dayanıklı bir hal alması sağlanarak kullanılmıştır. Kerpiç genellikle eski zamanlarda ev, sığınak yapımında kullanılmıştır [23].

Eski zamanlarda genel ihtiyaçlar için kullanılan ve kompozit sayılan malzemelerden sonra dünya genelinde beton, cam, metal alaşımları, ahşap malzemeler, karbon, plastikler vb. gibi malzemeler üzerinde çalışmalar yaygınlaşmıştır. Günümüzde de bu malzemelerin kompozit olarak kullanımı veya birbirleri arasında takviye yapılarak kullanımı ile çok farklı sektör ve çok sayıda uygulama alanlarında yüksek mukavemet değerlerine sahip yapılar, makineler ve araçların üretimi sağlanmıştır.



### 3.2. Kompozit Malzemenin Tanımı ve Özellikleri

Kompozit malzemeler; iki ya da daha fazla malzemenin özelliklerini yeni ve tek bir malzemede toplayarak yeni özellikli malzeme elde etmek amacıyla, makro düzeyde (birbirleri içerisinde çözünmeyecek şekilde) birleştirilmesi sonucu oluşturulan malzemelerdir. Kompozit malzemelerin farklı malzemelerin birleşiminden elde edilmesindeki amaç, tek başına yeterli olmayan bazı özelliklerin geliştirilmesi ve bir araya getirilmesidir.

Kompozit malzemelere ayrıca çok fazlı malzeme, donatılı malzeme, çok bileşenli malzeme ve pekiştirilmiş malzeme gibi tanımlar da verilmektedir.

Kompozit malzemeler en az iki malzeme olmak üzere metalik, plastik veya diğer organik ya da inorganik bileşen ve katkılardan oluşabilir. Bu durumda önemli olan elde edilmek istenen yeni malzemenin özelliğine göre hemen hemen tüm malzemelerden kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilebilir.

Kompozit malzemelerin klasik metal malzemelere göre üstün yanı, malzeme kombinasyonunun sonsuz sayıda olması söylenebilir. Bu malzeme avantajı kompozitlere istenildiği gibi değiştirme avantajı da tanımaktadır. Bu duruma göre yapıda var olması istenen düşük ağırlık, mukavemet, rijitlik, iletkenlik ve estetik görünüm gibi özellikler kompozit malzemelerle daha iyi elde edilebilir.

Bir kompozit malzeme bünyesinde, çekirdek olarak bilinen takviye elemanı ve çekirdeğin etrafını saran matris malzemesini içermektedir. Takviye elemanı olarak farklı şekillerde elyaflar, seramikler gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bu takviye malzemelerin genel fonksiyonu, malzemeye gelen yükü taşımak ve matrisin dayanımını ve rijitliğini arttırmaktır. Matrisin fonksiyonu ise takviye elemanlarına yük ve gerilim transferi sağlamak için elyaf ve matrisi bir arada tutmaktır. Bunun yanında matrisin diğer bir fonksiyonu takviye elemanlarının yüzeylerini dış etkilere karşı korumaktır. Bunun sebebi ise takviye elemanlarının gevrek ve kırılma olmalarıdır. Ayrıca plastiklik ve süneklik özelliklerindeki üstünlüğü ile de takviye elyaflarında kırılma çatlakların oluşumu ve yayılmasını önler. Plastik deformasyon ve çatlaklar varsa da elyaflara paralel olacak şekilde yönlerini değiştirir. Bunlarla beraber bir kompozit malzemenin içerisinde olabilecek destekleyici yapılar fiber,

partikül, pulcuk, lamine ya da dolgu olarak bulunabilir [24].

Kompozit malzemelerin üretimi ve kullanımı ile ilgili aşağıdaki avantajlı özellikleri sıralanabilir:

- Yüksek mukavemet değerlerine sahip olması (aşınma ve yorulma direnci, çekme ve eğilme dayanımı)
- Yüksek rijitlik
- Düşük ağırlık
- Korozyon direnci ve kimyasal etkilere karşı dayanıklılık
- Kırılma tokluğu
- Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık
- Kolay şekillendirilebilir
- Estetik görünüm

Bu özelliklerin elde edilebilmesi için gerekli şartlar; uygun matris ve takviye elemanları, üretim metodu, bileşenlerin mukavemet özelliklerinin uygunluğudur. Özellikle uygun matris ve takviye elemanı seçimi, kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerinde en önemli faktördür. Bunun sebebi de kompozit malzeme içerisindeki yükün matris tarafından takviye elemanına iletiminde takviye elemanı ile matris arasındaki ara yüzey bağının oldukça güçlü olması gerekmektedir. Bunun yanında üretim sırasında takviye elemanının matris içinde homojen dağılımı da mekanik özellikler açısından önemlidir. Homojen dağılım da malzeme çiftlerinin uygun olarak seçilmesine bağlıdır [23-25].

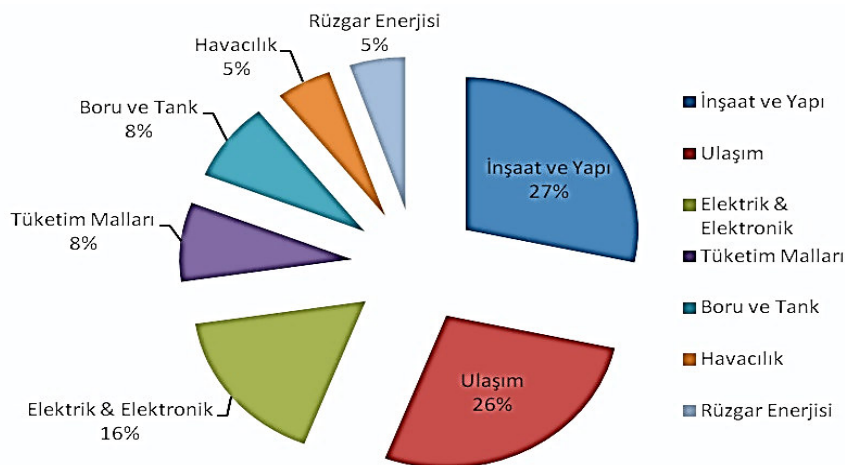
Kompozit malzemelerin yukarıda belirtilen üstün özellikleri dışında dezavantajları da vardır. Bunlardan bazıları aşağıda belirtilmiştir.

- Üretim zorluğu
- Yüksek maliyet
- İşleme güçlüğü ve buna bağlı olarak gerekli yüzey kalitesinin elde edilemeyişi
- Geri dönüşümün olmaması
- Düşük kırılma uzaması
- Gevrek yapıya sahip olması

### 3.3. Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları

Kompozit malzemeler yapıları ve özellikleri sayesinde çok çeşitli kullanım alanlarına sahiptirler. Gelişen teknoloji ile birlikte hemen hemen her sektörde farklı ihtiyaçlara göre kompozit kullanımı yaygınlaşmıştır. Sektörlere göre kullanım oranı Şekil 3.1’de verilmiştir. Kompozitlerin bazı kullanım alanları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- İnşaat ve yapı sektörü (İç ve dış cephe kaplamaları, dekoratif malzemeler, yağmur ve gider suyu taşıma sistemleri, izolasyon malzemeleri, beton ve beton kalıbı vs.)
- Otomotiv sektörü (otomobil kaportaları ve ön panelleri, cam silecekleri vs.)
- Savunma sanayi ve havacılık sektörü (Uçak ve helikopter gövde parçaları, uçak burun ve kanat parçaları, kurşun geçirmez paneller, miğferler vs.)
- Gıda ve tarım sektörü (Gıda depolama tankları, seralar, tahıl depoları vs.)
- Denizcilik sektörü (Tekneler, şamandıralar, kanolar, dubalar vs.)
- Enerji sektörü (Rüzgâr türbinleri, izolatörler, antenler, sigorta-panel kutuları, aydınlatma gövdeleri, elektrik ve aydınlatma direkleri, kablo taşıyıcıları vs.)
- Uzay teknolojisi
- Robot teknolojisi
- Tıbbi sektörler (Tıbbi cihazlar ve medikal ürünlerin imalatı)
- Elektrik-elektronik teknolojisi
- Spor araçları
- Müzik aletleri



Şekil 3.1. Sektörlere göre kompozit kullanım oranları [26]

### 3.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin oluşum seçenekleri çok fazla olduğundan dolayı sınıflandırılmaları oldukça geniştir. Kompozit malzeme ana bileşen matris ve yüksek mukavemete sahip takviye elemanından oluşmakta ve genel olarak iki ana başlık altında sınıflandırmak mümkündür. En yaygın sınıflandırma şekli de yapısında bulunan matris ve takviye malzemeye göre yapılmaktadır [23].

1. Matris malzemesine göre kompozit malzemeler
2. Takviye elemanına göre kompozit malzemeler

#### 3.4.1. Matris malzemesine göre kompozitler

Matris malzemesinin kompozit yapılarda elyafları bir arada tutma, yükü elyaflara iletme ve elyafları dış etkilerden koruma gibi önemli fonksiyonları vardır. İdeal bir matris tek başına düşük viskoziteye sahip iken elyaf takviyesinden sonra elyafları sağlam bir şekilde tutup çevreleyebilmesi için mümkün oldukça hızlı bir şekilde katı forma geçebilmelidir. Üretim esnasında ve sonrasında matris malzeme ve elyaflar arasında diğer etkileşimler olmamalı ve matris zaman geçtikçe kararlı kalabilmelidir [22, 23].

Kompozit malzemelerin sıcaklık, nem ve kimyasal etkilere karşı dayanımı ilk olarak matris tarafından belirlenir. Ayrıca yükü taşıyan elyafların istenilen düzeyde fonksiyon gösterebilmeleri açısından matrisin sahip olduğu mekanik özellikler önemli rol oynamaktadır.

Matrisin kompozit yapıdaki genel görevleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Elyafları bir arada tutmak ve yükün elyaflara taşınmasını sağlamak,
2. Yapısal formu korumak ve rijitliği sağlamak,
3. Yüzey kalitesi sağlayarak son ürün halinde üretimi sağlamak,
4. Elyafları dış etkenlere karşı korumak,
5. Elyafları izole ederek bireysel bir lifin çatlaması veya kırılması durumunda kompozitin kırılmasını yavaşlatmak ve durdurmak.

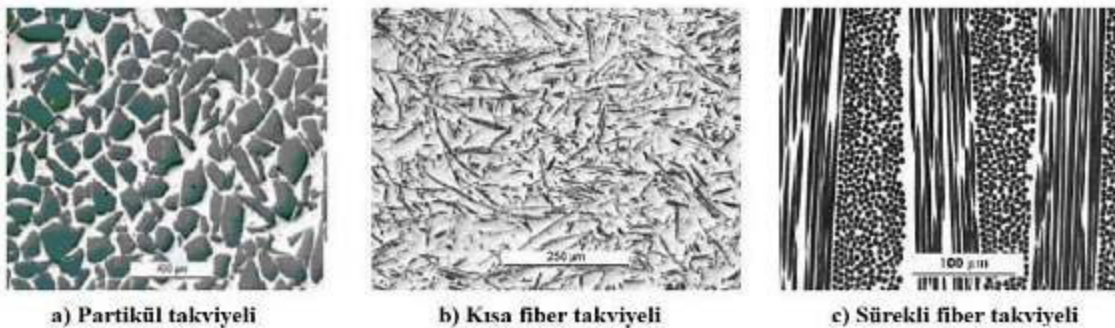
Matris malzemeler, kompozit malzemenin kullanım amacına ve üretim metoduna bağlı olarak metal, seramik ve polimer olarak üç grupta toplanabilir.

### Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozit malzemeler, ana malzemesi alüminyum, bakır, magnezyum, titanyum gibi hafif metal veya bunların alaşımlarından oluşan matris faz ile takviye fazının bir araya gelmesiyle oluşur. Özellikle hafif metaller, kompozit malzemeler için iyi bir matris görevi görmektedir. Metaller plastiklerden daha yüksek dayanım ve tokluğa sahip olduklarından plastik esaslı malzemelere göre özellikleri çok daha iyidir. Ancak metal matrisli kompozitlerin üretimi ise plastik esaslı kompozitlere göre daha zordur. Çünkü metaller her elyaf ile ara yüzey bağı oluşturamadıklarından birleşmeleri sonucunda kompozit bir malzeme oluşturamamaktadırlar. Ayrıca metallere göre kompozitlerin süneklikleri daha düşüktür [23, 27].

Metal matrisli kompozitlerin üretiminde en çok kullanılan matris malzemesi Al ve Al alaşımlarıdır. Al doğada çok bulunan, hafif ve işleme kolaylığına sahip bir metaldir. Ayrıca yüksek dayanım ve korozyon direncinin yanı sıra düşük maliyetli olarak üretilebilirliği ile de ön plana çıkmaktadır [22, 23, 27].

Metal matrisli kompozitler takviye malzemesinin geometrisine göre üç gruba ayrılır. Bunlar partikül takviyeli, kısa fiber takviyeli ve sürekli fiber takviyeli kompozitlerdir (Resim 3.1).



Resim 3.1. Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matrisli kompozitler [28]

Metal matrisli kompozitlerde genel olarak kullanılan takviye elemanları, alümina ( $Al_2O_3$ ), silisyum karbür (SiC), karbon, bor fiber, titanyum karbür (TiC) olarak bilinmektedir. Bu kompozitler yaygın olarak otomotiv, havacılık ve savunma sanayiinde kullanılmaktadır [27, 29].

### Seramik matrisli kompozitler

Seramikler, bir veya birden fazla metalin metal olmayan başka elementlerle birleşmesi sonucunda oluşan inorganik yapıli bileşiklerdir. Genel olarak kayaların doğada dış etkenler altında parçalanmasıyla oluşan kil, katoen gibi maddelerin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ile oluşurlar. Seramikler bağ yapılarından dolayı çok kararlı bir yapıya sahiptir. Bu nedenle aşırı sert ve gevrek bir malzemedir. Kırılgan oldukları için çok düşük kopma uzaması gösterirler, düşük tokluğa sahiptirler ve termal şoklara karşı dayanıksızdırlar. Bu özelliklerinden dolayı genel olarak seramikler liflerle takviye edilirler. Ancak basma dayanımları çok yüksektir. Ayrıca en önemli özelliklerinden olan yüksek sıcaklıklara dayanımı ve hafif olmasından dolayı da seramikler oldukça kullanışlı hale gelmiştir. Seramik matrisli kompozitler de genellikle yüksek sıcaklık altında çalışması gereken ekipmanlar için kullanılmaktadır.

Seramik matrisli kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak genelde  $Al_2O_3$ , SiC,  $Si_3N_4$ ,  $B_4C$  kullanılmaktadır. Takviye elamanı olarak da genellikle  $Al_2O_3$  ve SiC seramikleri fiber formuna getirilerek kullanılmaktadır.  $Al_2O_3$  ve SiC gibi seramik malzemeler çok sert olduklarından dolayı endüstride aşındırıcı olarak kullanılmaktadır. Bu seramikler ile üretilen seramik matrisli kompozitler yaklaşık 1200 °C sıcaklığa kadar dayanım gösterebilmektedir [24].

Seramik matrisli kompozitler sürekli fiberli, süreksiz fiberli ve partiküllü kompozitler olmak üzere 3 gruba ayrılır. Sürekli fiberlerle takviye edilen seramik matris zayıflasa bile fiberler, uygulanan yükü taşımaya devam ederler. Ancak çatlak veya çentik durumunda bu tip matrisli kompozit malzeme özelliklerini kaybeder. Sürekli fiberler en çok kullanılan takviye elemanlarıdır. Tercih edilme sebebi ise sürekli fiberlerin tokluk değerlerinin diğerlerine göre daha yüksek olmasıdır. Sürekli fiber kompozitler ayrıca son derece gelişmiş olan ileri teknoloji kompozit malzemelerdir. Bu kompozitlerin yüksek sıcaklıklarda kararlılığı ve yüksek korozyon direnci nedeniyle havacılık ve uzay sanayiinde de kullanımı mevcuttur.



Bunların yanı sıra sürekli fiber kompozitler, türbin motorlarında bazı parçalar, sıcak gaz filtreleri, ısı değiştirici tüpleri, zırhlar, petrol ve gaz hatlarında korozyona maruz kalan parçalar, ısıl işlem fırınları, seperatörler, dizel motorlarda egzoz valflerinde, motor ısı yalıtımında ve fren diskleri gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir [28].

### Polimer matrisli kompozitler

Polimer malzemeler son yıllarda endüstrinin hemen hemen her dalında yaygın bir şekilde kullanılan malzemelerdir. Polimer matrisli kompozit malzemeler genellikle petrokimya esaslı malzemelerdir. Bu tip kompozitler günümüzde en yaygın kullanılan kompozit türlerinin başında gelmektedir [23].

Polimer matrisli kompozit malzemeler isminden de anlaşılacağı gibi matris malzemesi polimerlerden oluşan plastik özellikleri gösteren kompozitlerdir. En önemli özellikleri hafiflik, korozyona karşı dirençlerinin yüksek olması, yalıtkan olmaları, kimyasal etkilere karşı dayanıklılık olarak gösterilebilir. Bu önemli avantajlar polimer kompozitleri metal ve diğer malzemelere göre çoğu kullanım alanında daha çok ön plana çıkarmıştır.

Avantajlı özellikleriyle öne çıkan polimer kompozit malzemelerin uygulamalarda bazı dezavantajları da ortaya çıkmaktadır. Bunların başında çalışma sıcaklıklarının düşük olması gelir ve plastik özellik gösterdiklerinden yük altında yorulmalara karşı dayanıklılıkları düşüktür.

Polimer matrisli kompozit malzemelerde kullanılan takviye malzemeleri ise genel olarak cam fiber, bor fiberi kevlar fiber ve karbon fiberlerdir. Özellikle polimer kompozitlerde mukavemet özellikleri takviye edilen malzemelerle direkt olarak alakalıdır. Takviye malzemeleri kompozite mukavemet ve rijitlik özelliği katarken, matris malzemesi olarak polimer başta korozyon dayanımı sağlamak üzere diğer matrislerde olduğu gibi yükün dağıtılması ve yapının bütünlüğünün korunması görevlerini üstlenmektedir [22].

Polimer matrisli kompozit malzemeler özellikle korozyon direnci sayesinde genellikle denizcilikte kullanılmaktadır. Bunun yanında otomotiv ve havacılık sektörlerinde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Polimer matrisli kompozitler kullanılan matrise göre termosetler ve termoplastikler olarak iki gruba ayrılır.

### *Termoset matrisler*

Termosetler, monomer moleküllerin kimyasal reaksiyonlarla güçlü bağ yapısına sahip polimer molekülleri haline gelmesiyle oluşan matris malzemeleridir. Bu polimerlerde sıvı halde moleküller birbirinden bağımsızdırlar. Termoset polimerlerin katı hale gelmesi ve bu kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için sertleştirici veya katalizör katılması, bazı durumlarda da dışarıdan enerji verilmesi gerekmektedir. Sertleşme sırasında kovalent bağlarla 3 boyutlu olacak şekilde çapraz bir bağlantı yapısı oluşur. Bu sebepten dolayı rijit bir malzemedir. Ancak yine aynı sebepten dolayı da ısıtıldıkları zaman yumuşamazlar, çözünmezler ve erimezler. Isıtıldıklarında yumuşamama nedeni, polimerizasyon reaksiyonunun tersinir olmaması da denilebilir. Yumuşamadıkları için de termosetlere şekil verilemez. Polimer matrisli kompozit malzemelerde en çok kullanılan termoset matrisler epoksi, polyester, fenolik, silikon, poliüretan ve yüksek sıcaklık reçineleridir [22, 23, 31].

### *Termoplastik matrisler*

Termoplastik malzemeler termosetlerin tam tersi olarak çapraz bağ yapmazlar. Molekül zincirleri birbirlerine zayıf Van Der Walls bağları ile bağlanır ve rijit değildir [9]. Termoplastikler ısıtıldıkları zaman yumuşar, erir ve soğutuldukları zaman tekrardan katı hale dönebilir. Bu işlem sırasında malzemenin mikro yapısında herhangi bir değişiklik meydana gelmez. Bu süreçte buharlaşma etkisi veya diğer etkilerden dolayı malzemenin yapısı etkilenmedikçe erime ve sertleşme işlemi defalarca yapılabilir.

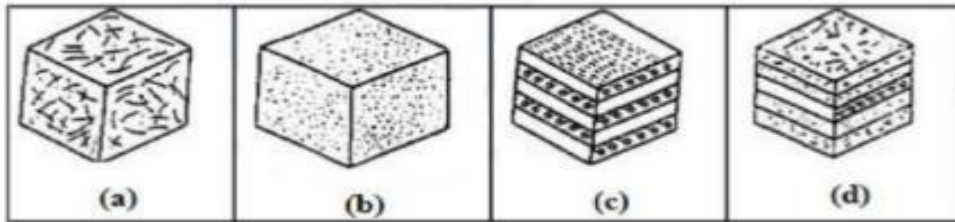
Termoplastiklerin raf ömürleri oldukça uzundur. Oda sıcaklığında katı halde bulunurlar. Ayrıca geri dönüşüm kabiliyetleri vardır ve sertleşmeleri için termosetlerde olduğu gibi herhangi bir katalizör veya sertleştiricilere ihtiyaç duyulmaz. Diğer önemli özellikleri de yeniden şekillendirilebilme, yüksek süneklik, iyi elektrik yalıtkanlığı, yüksek kırılma tokluğu ve darbelere karşı dayanımlarının yüksek olmasıdır.

Termoplastik matrislerin kullanım sıcaklıkları termosetlere göre daha düşüktür. Sağlıklı kullanım için ortalama sıcaklıklar 0-55 °C aralığındadır. Termosetlerde yüksek sıcaklıklarda erime olmadan bozulma meydana gelirken termoplastiklerde ise düşük sıcaklıklarda erime meydana gelir. Bunun dışında başlıca dezavantajları düşük mukavemet ve düşük sertliğe sahip olmaları ve ham maddelerinin termosetlere göre daha maliyetli olmasıdır [9, 22, 23].

Endüstride kompozit malzemelerde kullanılan termoplastik matrisler polietilen, polipropilen, polivinilklorür, poliamid (nylon), akrilik, polikarbonat, poliasetaldir. 4. bölümde, kullanılan polietilen grubundan yüksek yoğunluklu polietilen detaylı olarak incelenecektir.

### 3.4.2. Takviye elemanına göre kompozitler

Kompozit malzemeler, ikinci sınıflandırma grubu olan takviye elemanı ve takviye elemanlarının şekil-yerleşimine göre elyafli kompozitler, parçacıklı kompozitler, tabakalı kompozitler ve karma (hibrit) kompozitler olarak dörde ayrılır (Resim 3.2).



Resim 3.2. Takviye elemanına göre kompozit malzemeler a) elyafli, b) parçacıklı, c) tabakalı, d) karma [32]

#### Elyafli kompozitler

Elyafli kompozitler ince elyafın matris içerisinde yer almasıyla oluşur. Bu kompozitlerde elyafların sahip olduğu mukavemet çok önemlidir. Kompozit yapının mukavemetini direkt olarak belirleyecek olan elyaflardır. Elyafların ayrıca hatasız olması ve matris içerisinde yerleşimi de mukavemeti doğrudan etkilemektedir. Boyutları uzun olan elyafların matriste yerleşimi paralel olursa mukavemet yüksek, birbirlerine dik olursa mukavemet düşük olur. Takviye elemanı olarak kullanılan başlıca elyaflar karbon elyaflar, cam elyaflar, aramid elyaflar, boron elyaflar ve organik elyaflardır.

### Parçacıklı kompozitler

Parçacıklı kompozitler, takviye malzemesinin matris içerisinde yayılmış parçacıklar halinde bulunması ile elde edilir. Bu kompozit yapılarda tüm yönlerde malzeme davranışı aynıdır. Bu durum izotrop yapıda olduğunu gösterir. Yapının mukavemeti içerisinde bulunan sertliklerine bağlıdır. En yaygın kullanılan parçacıklı kompozit tipi plastik matris içerisinde metal parçacıklardır. Ayrıca metal matris içinde seramik parçacıklar içeren parçacıklı kompozitler sert ve yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. Bu sebeple uçak motor parçalarının üretiminde kullanılmaktadır [24].

### Tabakalı kompozitler

Matris, kendisinden daha mukavemetli çubuk ya da örgü fiber malzemelerle birleştirilerek kompozit tabaka oluşturulur ve bu kompozit tabakalardan en az ikisinin birleştirilmesi ile tabakalı kompozit malzeme elde edilir. Bu tip kompozitler en yaygın kullanılan kompozitler arasındadır. Genel olarak uçak yapılarında, kanat ve kuyruk kısımlarında kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır.

### Karma (Hibrit) kompozitler

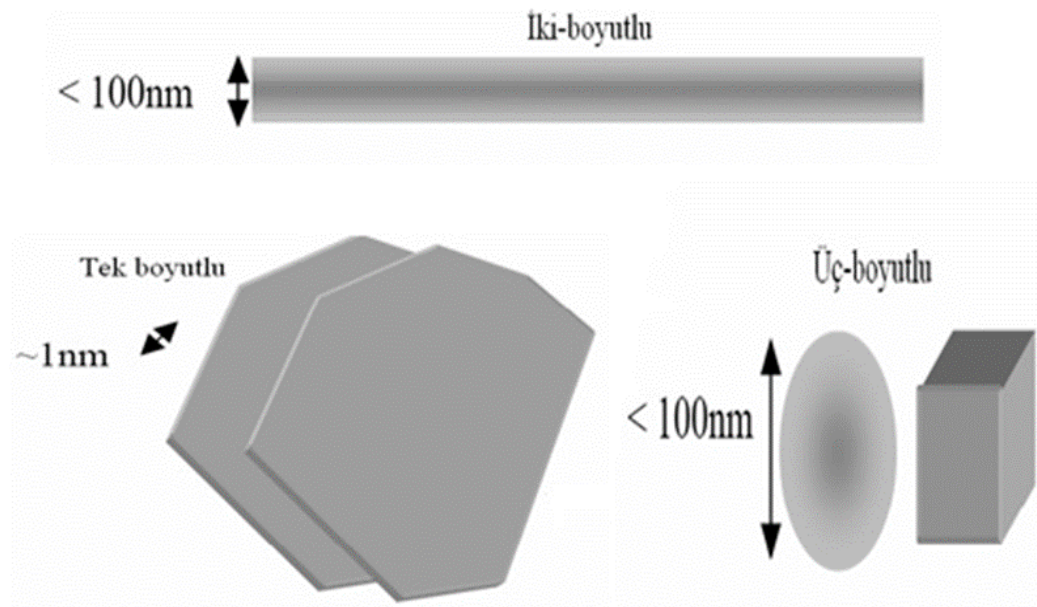
Bir kompozit yapıda matris dışında iki ya da daha fazla elyaf çeşidi bulunuyorsa bu yapıya karma (hibrit) kompozit adı verilir. Hibrit kompozitlerde takviye edilen elyaflara bağlı olarak tek elyafli kompozitlere göre çok daha iyi mukavemet özellikleri elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada üzerinde çalışılan, üretimi ve deneysel çalışmaları yapılan kompozit malzeme bir tip hibrit kompozit malzemedir. Matris olarak yüksek yoğunluklu polietilen, elyaflar olarak da cam elyaf ve karbon nanotüp kullanılmış olup hibrit kompozit elde edilmiştir.

### 3.5. Nanokompozitler

Kompozit malzemeyi oluşturan fazlardan en az bir tanesinin boyutunun nanometre (nm) seviyesinde olması ile elde edilen, kompozit malzemelerin yeni ve modern bir sınıfı olarak bilinen malzeme sınıfıdır. Bu tip kompozitler diğer kompozit malzemelerden farklı olarak moleküler, atomik ve makromoleküler seviyede incelenmektedir ve günümüzde de nanokompozit malzemeler hem endüstride üretimde kullanımı gelişmekte hem de akademik çalışma ve araştırmalarda ön plana çıkmış durumdadır. Nanokompozitler konusunda birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir [4, 33-37].

Nanokompozit malzemeler nano ebatla kaç boyutu olduğuna bakılarak sınıflandırılabilir. Resim 3.3'te gösterildiği gibi eğer nanokompozitlerde üç boyutta nanometre seviyesinde ise eş boyutlu nanopartiküller (küresel nanokompozitler), iki boyutta nanometrik seviyede diğer boyutta büyük boyda ise nanotüpler veya kil kristalleri (lif veya tüp şeklinde olan nanokompozitler), yalnızca tek boyutta nanometrik seviyede ise de tek boyutlu nanokompozitler (silikat tabakalı nanokompozitler) olarak sınıflandırılabilir [38].



Resim 3.3. Nano boyuta sahip dolgu malzemelerinin şematik gösterimi [39]

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1. Materyaller

#### 4.1.1. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)

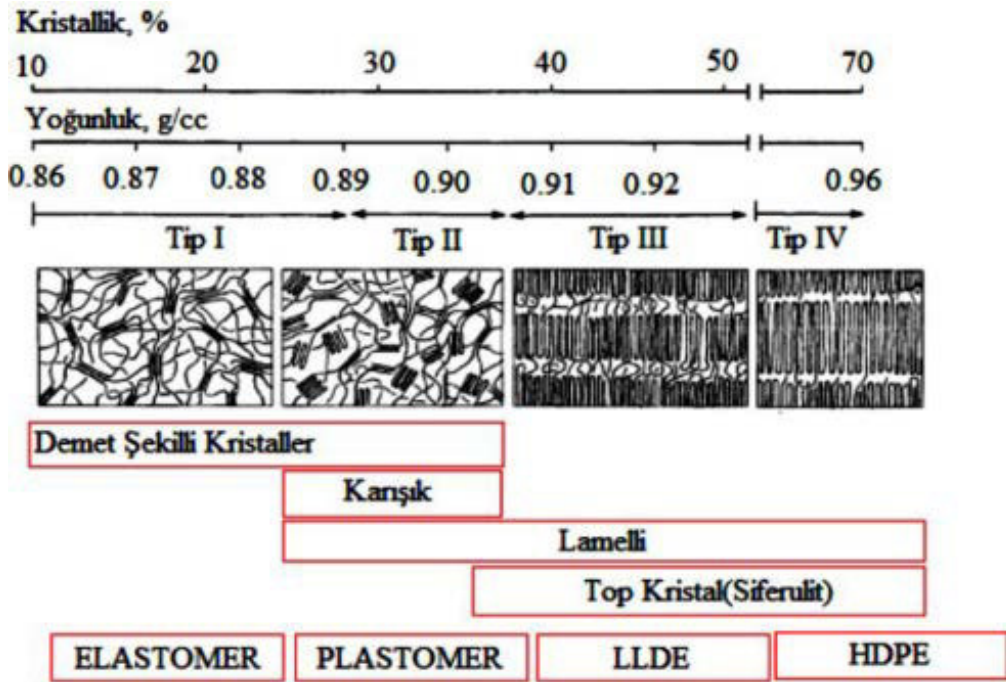
YYPE, etilen gazlarından oluşan ve bu gazın Ziegler-Natta tipinde koordinasyon katalistleri eşliğinde, heksan ortamında düşük sıcaklık ve düşük basınçlarda polimerizasyon yöntemleriyle elde edilen bir tür plastik termoplastik malzemedir. YYPE, esasında bir petrol ürünüdür. Monomer ham maddesi olan etilen, ham petrolden elde edilmektedir. Etilen ayrıca doğalgazdan da elde edilebilmektedir. YYPE'nin kimyasal formülü ise  $CH_3-(CH_2)_n-CH_3$ 'tür [9, 40].

YYPE'nin yoğunluğu  $0,94-0,97 \text{ g/cm}^3$  aralığındadır. Genel olarak ortalama yoğunluğu  $0,96 \text{ g/cm}^3$  olarak bilinmektedir. Düşük yoğunluklu polietilen (AYPE-Alçak yoğunluklu polietilen) ise  $0,915-0,926 \text{ g/cm}^3$  aralığındadır. YYPE ve AYPE arasında görünüm olarak herhangi bir fark yoktur. Ancak YYPE, AYPE'ye göre çok daha sert yapıda ve dayanıklıdır [41,42]. Polietilenin yoğunluk ve kristallik oranına göre karşılaştırması Resim 4.1'de verilmiştir.

YYPE kullanım sıcaklığı  $-80 \text{ }^\circ\text{C}$  ile  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  arasındadır. Ancak kullanım alanlarında basınç, nem gibi dış etkenlere bağlı olarak  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar kullanılabilir. Erime sıcaklığı da  $130-135 \text{ }^\circ\text{C}$  arasındadır [38, 41, 42].

YYPE'nin kristalleşme oranı soğutma hızlarına bağlı olarak değişir. Soğutma işleminin yavaş yapılması kristalleşme oranı yükseltir. Yavaş yapılmasında ise kristalleşme oranı daha düşüktür. Bu sebeple soğutma süreci malzemenin ilk haldeki fiziksel özelliklerinin değişmesine neden olabilir. Enjeksiyon kalıplama veya ekstrüzyon sürecinde erimiş halde bulunan polimerin akışı farklı yönler ile ilerler ve bu durum anizotropik bir yapının oluşmasına neden olur. Bu yapının oluşması da mekanik özelliklerde önemli oranda farklılıklar ortaya çıkarır. Moleküler oryantasyon mukavemetin, çatlak direncinin, tokluğun ve katılığın artmasını sağlar [43].

YYPE'nin mikroyapısı amorf faz ve kristal faz olmak üzere 2 fazdan oluşur. Her iki faz da malzemenin yapısı açısından önemli rol oynar. Amorf faz, oda sıcaklığında kauçuk gibidir ve kristal fazın belli oranlarda hareketine ve değişmesine izin verir. Bu hareket ve değişim sırasında malzeme yapısında herhangi bir ayrılma olmaz. Gerçekleşen bu deformasyon biçimi plastik olarak adlandırılır. Plastik yapının bu deformasyonunda moleküler zincirde kopma meydana gelmez.

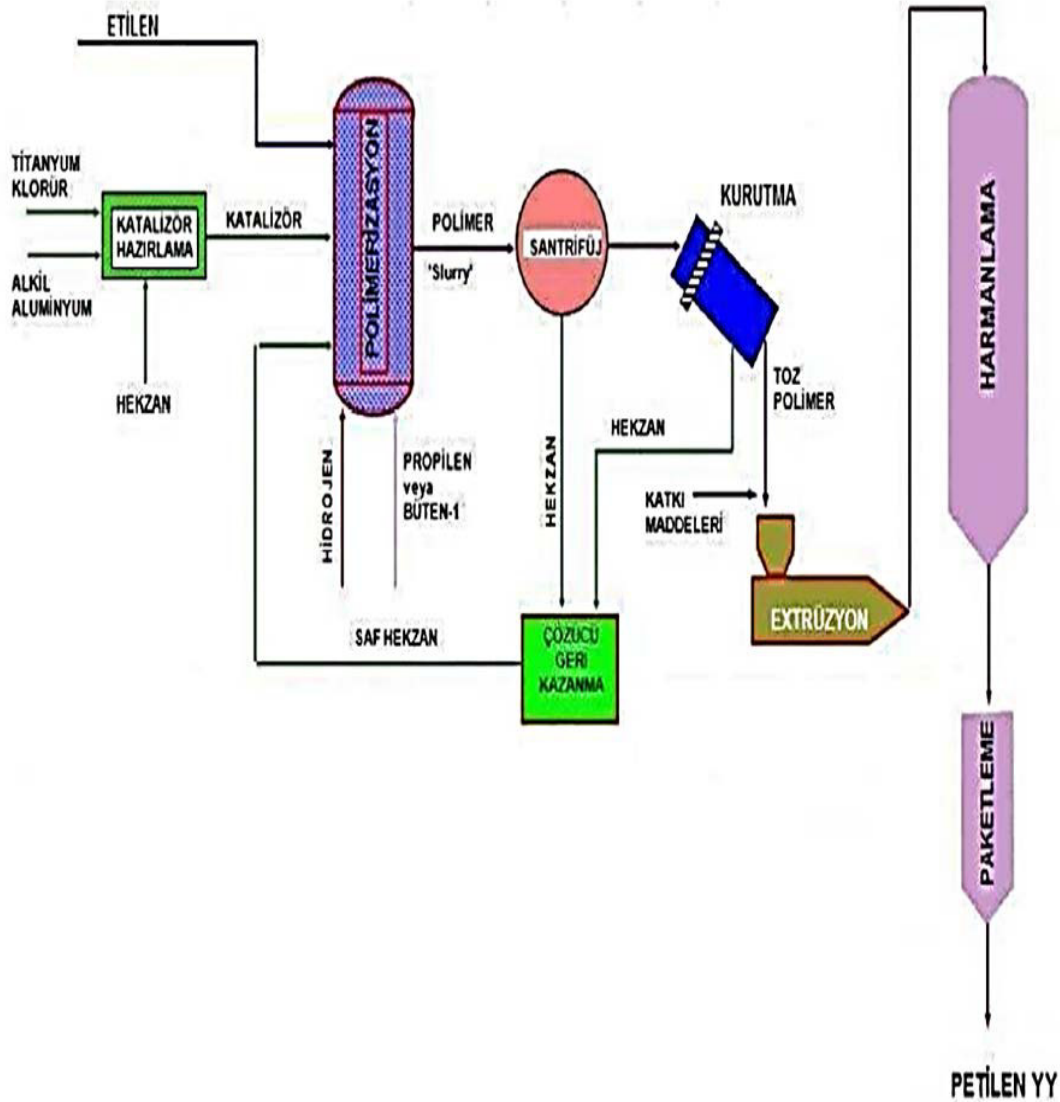


Resim 4.1. Polietilenin yoğunluk ve kristallik oranına göre şematik karşılaştırılması [44]

YYPE'nin birkaç farklı üretim yöntemleri mevcuttur. Bunlar radikal polimerizasyon yöntemi ve koordinasyon polimerizasyonudur. Radikal polimerizasyonda yüksek basınç uygulanır. Koordinasyon polimerizasyonunda ise alçak basınç ve düşük sıcaklık uygulanarak katalizör yardımıyla üretim sağlanır. Üretim sırasında kullanılan basınç 10-20 atm, sıcaklık da 50-75 °C değerleri altında yapılır. Bu yöntemde kullanılan katalizörler titanyum tetraklorid ve organometalik malzemelerdir. Organometalik katalizöre örnek olarak alüminyum alkil verilebilir. Polimerizasyonda ısı soğutma işlemi ile giderilir. Üretimden sonra çıkan polimer ürün toz veya granül haldedir. Sıvı ortamdan süzülür ve kurutulduktan sonra ambalajlanır [9].

YYPE üretiminin diğer bir yolu metal oksit katalizörü kullanmaktır. Metal oksit katalizörü kullanılan bu polimerizasyonda etilen gazı parafin içerisinde çözülür. Üretim 35 atm basınç

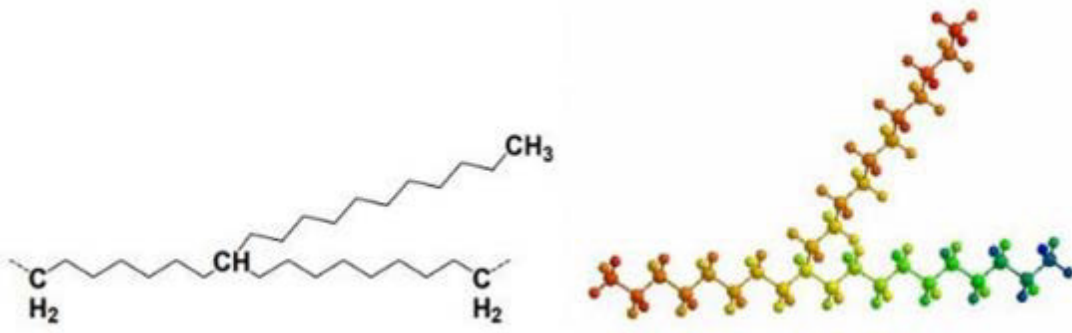
altında ve 60-200 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilir. Çözücü buharlaştıktan sonra ve soğutma işleminden sonra ürün elde edilmiş olur. YYPE'nin genel üretim şeması Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. YYPE üretim şeması [9]

Kristal hali %90 oranında olan YYPE'nin ana zinciri en az 200 adet karbon atomu içerir. YYPE ASTM standartlarında Tip III ve Tip IV olarak tanımlanır. YYPE ayrıca 150000-400000 molekül kütlesine sahip bir polimerdir [9]. YYPE yapısı Resim 4.2'de verilmiştir.





Resim 4.2. YYPE'nin yapısı [42]

YYPE'nin mukavemet değerleri, özellikle çekme ve darbe dayanımı çok yüksektir. Bu değerler takviye malzemeleriyle daha çok arttırılabilir. Su ve kimyasallara karşı direnci fazladır. Düşük sıcaklıklarda diğer mekanik özellikler bakımından da çok iyi sonuçlar verir. Ayrıca insan sağlığı açısından zararsızdır.

Geniş bir kullanım alanına sahip olan YYPE günümüzde oyuncaklar, plastik kutular, kaplar, mutfak eşyaları, paketleme ve ambalaj filmleri, şişe, bidon ve su ve kanalizasyon borularının üretiminde yaygın olarak kullanılır. YYPE'den üretilen ürünler, genellikle hava üflemeli döküm yöntemi, enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon yöntemi kullanılarak imal edilir.

Bu çalışmada kullanılan YYPE (Resim 4.3), Petkim firmasının üretimi olup erime sıcaklığı 134 °C ve yoğunluğu 0,961 g/cm<sup>3</sup>'tür.



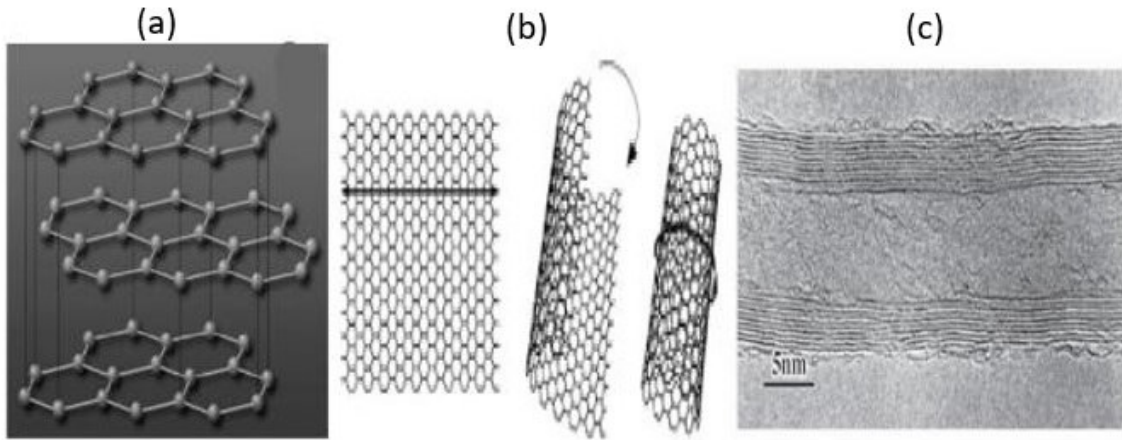
Resim 4.3. YYPE

#### 4.1.2. Karbon nanotüp (KNT)

Teknolojide yaşanan gelişmeler nanoteknolojiyi de beraberinde getirmiştir. Nano parçacıklar teknolojiye hem ayak uydurması hem de teknolojinin ihtiyaçlarına karşılık verebilmesinden dolayı bu tür malzemeler çok büyük bir kullanım alanı sunmaktadır. Karbon nanotüpler ise her geçen gün biraz daha gelişen nanoteknolojinin en önemli konularından biridir. Karbon nanotüp, kristal haldeki grafitlerden oluşan hegzagonal örgüdeki karbon atomlarından oluşan silindirik şekilli yapılardır [2, 45-48].

KNT'ler önemli derecede mekanik ve elektronik özelliklere sahip nano boyutlu yapılardır. Ayrıca çelikten çok daha dayanıklı ve sert yapıya sahiptir. Nanometrik boyuttaki elektronik devrelerde ve diğer malzemelerde takviye elemanı olarak kullanımı artmıştır [45].

Düzenli yapıya sahip karbon nanotüplerde atomlar birbirleriyle  $sp^2$  şeklinde bağlanır. Bu bağlantı tipinde atomlar altıgen geometri oluşturur ve her bir atomun üç adet komşu atomu bulunur. Karbon nanotüpler çok farklı yapılara sahiptirler. Farklı kalınlıklarda, farklı boylarda, spiral tipte veya çok katmanlı yapıda olabilir. Tek bir grafitin silindirik şeklinde kıvrılmasıyla tek duvarlı karbon nanotüpler (TDKNT) elde edilir. Grafit, grafen yapısı ve KNT oluşumu Resim 4.4'te gösterilmiştir. TDKNT'lerin çapları 1-5nm boyutlarındadır. TDKNT ve ortak eksenli tüplerin bir araya gelmesiyle de çok duvarlı karbon nanotüpler elde edilir. ÇDKNT'lerin de çapları 2,5-30 nm aralığındadır [9, 33, 49, 50].

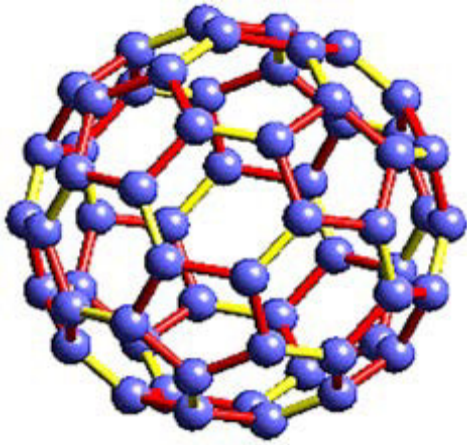


Resim 4.4. a) Grafit yapısı, b) Grafen yapısı ve KNT oluşum aşaması, c) KNT TEM görüntüleri [51]

### Karbon nanotüplerin tarihi gelişimi

Karbon nanotüpler ilk olarak 1985 yılında 60 ya da daha fazla karbon atomunun birleştirilmesiyle oluşmuş top şeklindeki moleküllerin keşfedilmesi ile ortaya çıkmıştır. Bu topların diğer moleküller veya atomlarla yaptığı bileşiklere fulleren adı verilir. Bu şekilde yapılan ilk keşiften sonra çeşitli laboratuvarlarda karbon atomlarından top şeklindeki moleküller elde edilmeye çalışılmıştır. Bu deneme süreçlerinde de farklı tip ve boyutlarda küre şeklinde yapılar elde edilmiştir [45, 52].

Fulleren adı verilen top şeklindeki moleküllere R. Buckminster'in mimari tasarımından dolayı bucky-balls da denmektedir (Resim 4.5).



Resim 4.5. Bucky-Balls modeli [53]

1985 yılında Rice Üniversitesi'nde bir grup araştırmacı fulleren yapısındaki karbon atomlarını izole etmeyi başarmışlardır. Bu durumda fullerenin yapısının çözülmesi konusunda ilk adım atılmış ve bu çalışmalardan dolayı da 1996 yılında araştırmacılar Nobel Kimya Ödülü kazanmışlardır [45, 52].

Nanotüpler ilk olarak 1991 yılında Simio Lijima tarafından bulunmuştur. Simio Lijima bir elektron mikroskobu uzmanı olup, nanotüpleri ark buharlaştırma tekniği ile keşfetmiştir. Bu teknik yardımıyla keşfi, fullerenlerin sentezi sırasında katot üzerinde biriken maddeler üzerinde çalışırken yapmıştır. Ancak ark buharlaşma yöntemi ile yalnızca çok katmanlı tüplerin üretimi mümkün olmuştur. Daha sonra yapılan araştırma ve çalışmalar sonucu 1993 yılında grafit elektroduna bazı metallerin eklenmesi ile tek katmanlı tüpler elde edilmiştir.

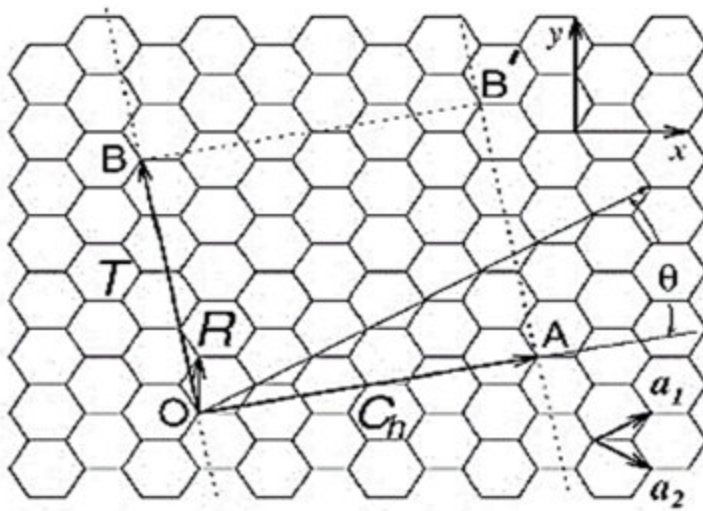
Bu da karbon nanotüplerin gelişiminde ikinci önemli aşama olmuştur [54, 55].

Yine Rice Üniversitesinde farklı yöntemlerle nanotüp üretmeleri bu çalışmanın önünü daha çok açmıştır. Bu tüpler karbonun lazer buharlaştırılması ile elde edilmiştir. Karbonun buharlaştırılması 1200 °C sıcaklıktaki fırında yapılmıştır. Sonrasında Montpellier Üniversitesi'nden Catherine Journet ve arkadaşları ark buharlaştırma yöntemiyle iyonlaşmış karbondan tek katmanlı nanotüp üretmişlerdir [52].

Karbon nanotüpler yapılan bilimsel çalışmalarda tesadüfen keşfedilmiştir. Buna rağmen dünyanın her yerinde karbon nanotüplerin araştırılması ve kullanımı yaygınlaşmıştır. En önemlisi de bu konuda çalışan araştırmacılar nanotüplerin nano ölçekte fiziksel, elektriksel, kimyasal ve optik özelliklerinin olduğunu bulmuşlardır.

#### Karbon nanotüplerin yapısı

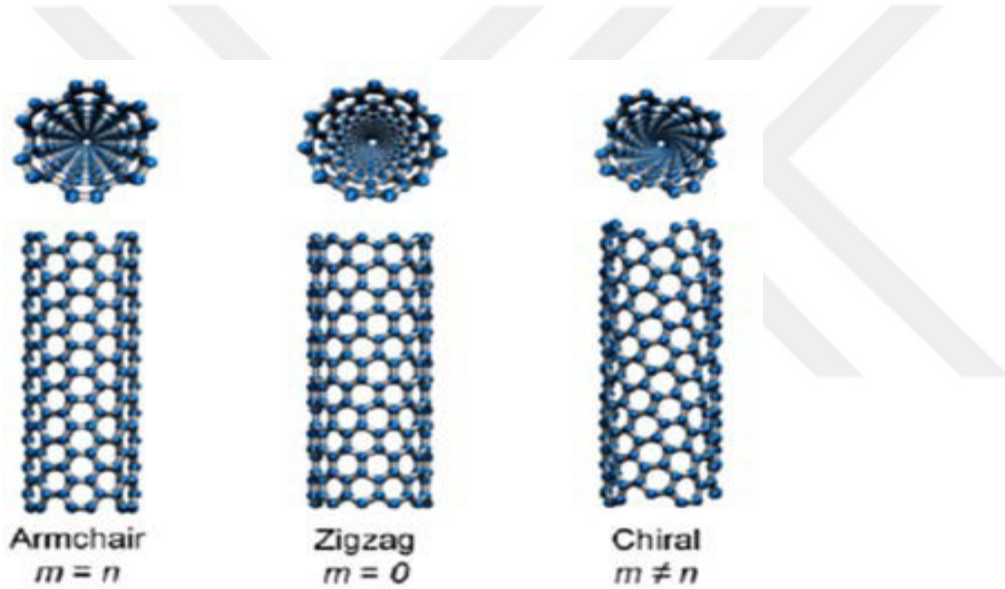
Karbon nanotüpler yapılarına göre 3 tipte incelenebilir. Bunlar kiral, koltuk (armchair) ve zig-zag nanotüplerdir. Karbon nanotüplerin kristal yapısını tanımlamak için bazı terimler kullanılır. Bu terimler, birim hücreyi tanımlayan birim vektörlerle ifade edilen kiral vektör ve dönüşüm vektörüdür. Bu vektörel tanımdan dolayı nanotüp yapıları  $(n, m)$  şeklinde birim vektörlerle ifade edilirler [45,56].



Şekil 4.2. İki boyutlu grafen yapısı üzerinde kiral vektör, birim hücre vektörü ve katlanarak nanotüpün birim hücreğini oluşturan grafen parçası [56]

Şekil 4.2’de verilen vektörel yapıda  $\vec{OB}$  vektörü nanotüp ekseninin yönünü ifade eder.  $\vec{OA}$  vektörü bir karbon nanotüpün  $C_k$  kiral vektörünü tanımlar.  $C_k$  kiral vektörü de altıgen örgünün  $a_1$  ve  $a_2$  gerçel birim vektörleriyle ifade edilir.  $\vec{T}$  vektörü öteleme vektörüdür ve birim hücrede tanımlanır.  $\vec{R}$  simetri vektörü de  $C_h$  kiral vektöre aynı yönde en küçük bileşene sahip olan örgü noktası vektörü olarak tanımlanır [45, 56].

Zig-zag nanotüpler  $(n,0)$  vektörel formda kiral vektörlere sahiptir ve bu sebeple örgü yapının hücreleri nanotüpün eksenini dik keser. Koltuk nanotüpler de  $(n, n)$  formunda kiral vektörlere sahiptir, bağlar nanotüplerin eksenine dik olarak uzanır.  $0-30^\circ$  arasında kiral vektör açılına sahip geri kalan tüm nanotüpler kiral nanotüp olarak tanımlanır [45, 56, 57].



Resim 4.6. KNT tipleri [52]

Zig-zag nanotüpler, koltuk nanotüpler ve kiral nanotüpler kristal yapıları bakımından TDKNT türleridir. Kristal yapıdan kasıt aslında geometrik şekillerine göre yapılanmadır. Resim 4.6’da belirtildiği gibi vektörel boyutlarına göre farklı tipte şekillenmişlerdir (Bkz. Şekil 4.2). KNT’lerin simetrisi çizgi grubu adı verilen simetri grupları ile açıklaması yapılır ve 1B sistemlerinin uzay grupları olup öteleme ve nokta gruplarını içerir. Her bir  $(n, m)$  nanotüp ayrı gruba dahildir. Sadece aynı  $n$  değerine sahip nanotüpler aynı simetri grubuna dahil olur. Bir tek karbon atomundan yola çıkıp, çizgi grubuna ait simetri işlemleri uygulanarak tüm bir nanotüp yapılandırılabilir [58].

## Karbon nanotüp türleri

### *Tek duvarlı karbon nanotüpler (TDKNT)*

TDKNT'ler grafit tüplerinin her iki ucu da kapatılmış haldeki nanotüp türüdür. Çapları 1-2 nm arasında değişiklik gösterir. Ancak zeolit gözenekleri içerisinde sentezleme işlemleri ile daha küçük çaplı, yaklaşık 0,4 nm çapında tek duvarlı nanotüpler üretilmiştir. TDKNT'ler genellikle altıgen paketlenmiş kristal demetleri halinde bulunurlar (Resim 4.7). Bu kristal demetleri birbirlerine Van der Waals kuvvetleri ile bağlanır. Tek duvarlı nanotüpler, çok duvarlı türlerine göre daha esnek özellik gösterirler. Bu sebeple kırılma olmadan küçük halkalar haline getirilebilir. Ayrıca düzleştirme ve bükme işleri de daha kolay yapılabilir [59].



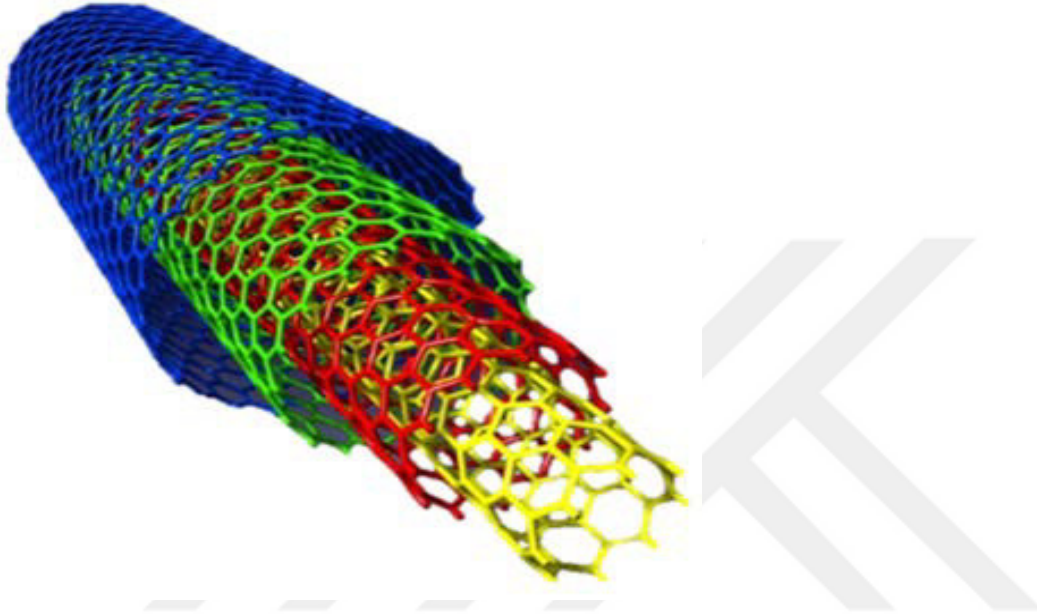
Resim 4.7. TDKNT şematik yapısı [15]

### *Çok duvarlı karbon nanotüpler (ÇDKNT)*

ÇDKNT'ler farklı çaplarda tek duvarlı nanotüplerin iç içe geçmesiyle oluşur (Resim 4.8). ÇDKNT'lerin iç çap ölçüleri 0,4 nm seviyelerine kadar inebilmektedir. Ancak genel olarak bakıldığında 5 nm civarındadır. Dış çapları ise ortalama 15 nm civarlarındadır. XRD ve TEM analizlerinde, grafen duvarlarının birbirleri arasındaki uzaklık 0,34-0,39 nm aralığında ölçülmüştür. Ayrıca hesaplamalarla birlikte ÇDKNT'lerde komşu duvarlar arası etkileşimin az olduğu ve bu sebeple duvarların birbirlerinden bağımsız şekilde öteleme ve dönme hareketi yapabileceği görülmüştür [9, 59-62].



ÇDKNT'lerin iç kısmında bulunan komşu tüplerin dönme hareketlerinde sürtünme olmaması bu tür nanotüplerde önemli bir özellik olarak karşımıza çıkar. Bu durum nanoteknolojide kullanılan ve nanoteknoloji ile üretilen makinalarda kusursuz çalışma imkanını sunabilir. ÇDKNT'ler TDKNT'lere göre çok daha kusursuz yapıya sahiptir. Bu tezin deneysel çalışmalarında kullanılan KNT tipi de ÇDKNT'dir.



Resim 4.8. ÇDKNT şematik yapısı [63]

#### Karbon nanotüplerin özellikleri

KNT'ler boyutları, şekilleri ve alışılmışın dışındaki üstün özellikleri ile önemli bir nano molokül haline gelmiştir. Bilinen en dayanıklı fiber olması ve hafif olması KNT'yi daha çok ön plana çıkarmıştır. KNT'ler çok iyi derecede mekanik, kimyasal, elektriksel ve optik özelliklere sahiptir.

KNT'ler mekanik özellikler açısından da bilinen en sağlam malzemelerdir. Mekanik özellikler bakımından dayanıklılık, çekme dayanımı ve elastikiyetine göre belirlenir. Özellikle elastiklik ve çekme dayanımı bakımından çelik ve betona göre çok daha üstün mekanik özellikler göstermektedir. KNT çelikten daha hafiftir, ancak çelikten çok daha kuvvetlidir [45, 59].

Diğer tüm malzemelerde olduğu gibi KNT'lerin de elastikiyetleri Young modülü değerleri ile belirlenir. KNT'lerin yaklaşık elastik modülü 1-1,4 TPa arasındadır. Bu da çok iyi bir çekme dayanımı olduğunu gösterir [56, 57, 64].

KNT'leri kuvvetli yapan bir anlamda kimyasal yapılarıdır. Kafes yapısı içerisinde birbirlerine kuvvetli bir şekilde bağlanmış C atomlarından dolayı dayanıklı bir yapı oluşur. Her bir C atomu 3 adet C atomuna kovalent bağ ile bağlanır [57].

Küçük çaplı KNT'ler kiral vektörleri oluşturan birim vektörlere bağlı olarak hem yarı iletken hem de metalik olabilir. Teorik olarak (n, m) birim vektörlerinin toplamı 3'e bölünüyorsa ise metalik, bölünmüyorsa yarı iletken özellik gösterir. Koltuk yapıdaki bir KNT metalik özellik gösterirken, zig-zag yapıdaki KNT yarı iletken özellik göstermektedir [65].

Çizelge 4.1'de KNT türleri ve bazı dayanıklı malzemelerin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. KNT ve bazı malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılması [62]

Malzeme	Young Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (GPa)	Yoğunluk g/cm <sup>3</sup>
Tek Duvarlı Karbon Nanotüp	1054	150	1,4
Çok Duvarlı Karbon Nanotüp	1200	150	1,74
Elmas	600	130	3,5
Kevlar	186	3,6	1,44
Çelik	208	1,0	7,8

KNT'lerin başka bir önemli özelliği de ısı iletkenliklerinin yüksek olmasıdır. KNT'ler aynı ortam şartlarında ısı iletkenliği en yüksek olan malzemelerin başında gelir. Isı iletkenlik değerleri ortalama 3000 W/mK civarındadır. Ayrıca KNT'ler ısı iletkenliği açısından oldukça kararlı yapıya sahiptirler. Vakum ortamında 2800 °C, atmosferik şartlarda ise 750 °C sıcaklığa kadar dayanıklılık gösterebilirler. Diğer çoğu metalik iletkenler ise 600-1000 °C sıcaklık değerleri arasında kararlı yapılarını yitirmeye başlarlar [57, 66, 67].



## Karbon nanotüp üretim yöntemleri

KNT üretimi için günümüzde çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu üretim yöntemleri, uygulanan sıcaklık, basınç, kesikli veya sürekli proses, kullanılan karbon kaynağı, katalizör ve üretim kapasitesine bağlı olarak farklı gruplara ayrılabilir. Ancak genel olarak 3 temel üretim yöntemi mevcuttur. Bunlar ark boşalımı, lazer buharlaştırma ve kimyasal buhar biriktirme yöntemleridir [6, 67, 68].

Kullanılan en eski KNT üretim yöntemi ark boşalımı yöntemidir. Lazer buharlaştırma ve kimyasal buhar biriktirme yöntemleri sonradan daha kaliteli, saf ve ekonomik üretim için geliştirilmiştir. Ancak son yıllarda üretim yöntemlerini geliştirmek için çalışmalar devam etmektedir.

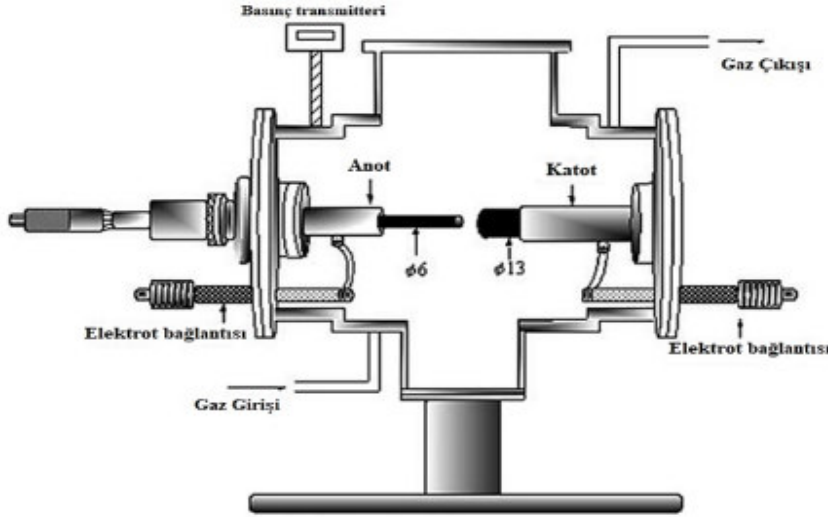
### *Ark boşalımı yöntemi*

Ark boşalımı yöntemi, KNT üretiminde kullanılan en basit ve en eski yöntemdir. En eski yöntem olmasına rağmen hala en yaygın kullanılan üretim yöntemidir [6].

Ark boşalımı yöntemi grafit elektrotlara inert gazlı ortamda bir akım uygulanmasına dayanmaktadır. Elektrotlar arasında ark oluşturularak grafitin buharlaşması sağlanır. Bu yöntemde inert gaz olarak helyum veya argon gazları kullanılabilir. Düşük gerilim ve yüksek akım uygulanır. Elektrotlara verilen gerilim 10-35 V, akım da 50-120 A aralıklarındadır. Elektrotlar arasındaki mesafe ortalama 1 mm olacak şekilde sabit tutularak ark oluşumu gerçekleştirilir. Bu ark oluşumunda iki türlü ürün gözlenir. Birincisi, yüksek sıcaklıkta süblimleşen anot tarafındaki grafit soğuk reaktör çeperlerinde is şeklinde yoğunlaşır ve içinde, deney parametrelerine bağlı olacak şekilde KNT'ler bulunur. İkinci ürün de katodik çökeltide gözlenir. Anot elektrotun bir kısmı katot üzerinde katodik bir çökelti oluşturur ve bu çökeltide yüksek oranda KNT bulunmaktadır. Bu şekilde elde edilen KNT'ler çok duvarlı yapıya sahiptirler [6, 9, 55, 69].

Anotun buharlaşma hızı genelde dakikada birkaç mm'dir. Anot buharlaştığı zaman enerji kesilmeli ve buharlaşma odası açılmadan soğuması sağlanmalıdır. Bu koşullarda anottan buharlaşan karbonun bir kısmı, katot üzerinde silindirik yapıda tekrar yoğunlaşır. İijima tarafından bu silindirik yapının merkezinde hem nanotüp hem de nano parçacıklar olduğu

gözlemlenmiştir. İlk yapılan deneylerde alınan verim düşük olduğu için yeni yöntemler ve yenilikler geliştirilerek ark boşalımı ile daha verimli üretim yapılması sağlanmıştır [55]. Şekil 4.3'te ark buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi verilmiştir.



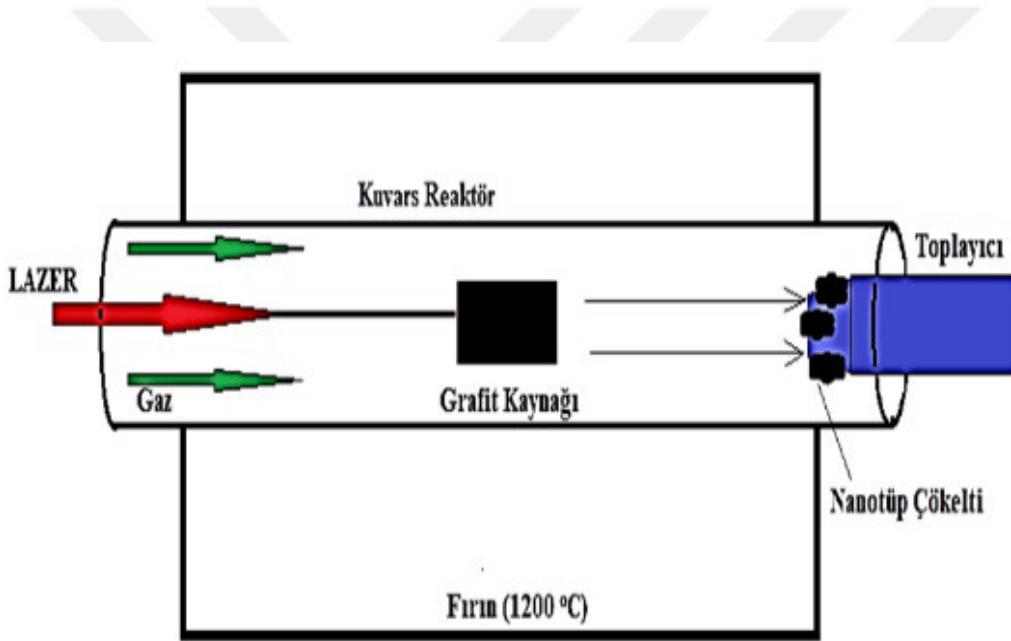
Şekil 4.3. Ark boşalım sistemi [69]

Ark boşalımı yönteminde üretim sırasında ark ortamının sıcaklığı  $5000\text{ }^{\circ}\text{C}$  civarındadır. Bu nedenle KNT'lerin kristal yapıları neredeyse kusursuzdur. Yapılan ölçümler sonucunda, helyum ve argon gazlarının karışımına bağlı olarak üretilmiş olan nanotüplerin farklı çaplarda dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir. İnert karışımlar farklı ısıl iletkenliğe ve difüzyon sabitlerine sahiptir. Bu özellikler karbon ve katalizörün soğuma ve difüzyon hızına etki etmektedir. Ayrıca karbon ve katalizörün yoğunlukları nanotüplerin çap dağılımını da etkilemektedir [54].

#### *Lazer buharlaştırma yöntemi*

Lazer buharlaştırma yöntemi ile KNT üretimi ark boşalma yöntemi ile benzerlik göstermektedir. Lazer buharlaştırma yöntemi ile yüksek saflıkta, yani saflığı %90 ve üzerinde olan nanotüpler üretilir. Üretilen bu nanotüpler, ark boşalım yöntemi ile elde edilen nanotüplere göre daha kusursuz yapıya sahiptir. Lazer yönteminin dezavantajı ise az miktarda karbon çökeltisinin oluşmasıdır. Genellikle bu yöntem tek duvarlı nanotüplerin üretiminde kullanılmaktadır, ancak özel reaksiyon koşulları sağlandığı takdirde çok duvarlı nanotüpler de üretilmektedir [69].

Lazer buharlaştırma yönteminde üretim bir fırın içerisinde gerçekleştirilir (Şekil 4.4). Fırın sıcaklığı 1000-1200 °C değerlerindedir ve fırın içerisine reaktörler yerleştirilir. Reaktörün içerisine ise karbon kaynağı olarak grafit yerleştirilir. Basınç 500 Torr değerinde olacağı için bu basıncı sağlamak amacıyla argon ve helyum gazları fırın içine doldurulur. Grafit kaynağa lazer ışınları yollanır ve her seferinde kopan parçalar lazer ışınının etkisiyle ve reaksiyon bölgesinde oluşan sıcaklıkla buharlaşır. Bu sırada reaktör sıcaklığı 5000-10000 °C arasındadır. Buharlaşma ile ark boşalma yönteminde olduğu gibi bir is oluşur ve reaktörden 500 Torr basınçla argon gazı geçirilerek buharlaşan bu is su soğutmalı toplayıcıda toplanır. Oluşan bu is karbon nanotüp içerir ve toplayıcı veya az da olsa fırın çeperlerine yapışan isin çökmesi sağlanarak KNT elde edilmiş olur [6, 67].



Şekil 4.4. Lazer buharlaştırma sistemi şematik gösterimi

Lazer buharlaştırma yöntemi, küçük miktarlarda ve yüksek kalitede nanotüp üretmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Verim yüksektir, ancak verimli ve kaliteli KNT üretiminin yanı sıra dezavantajları da bulunmaktadır. Birincisi, bu yöntemle nanotüp üretmek için yüksek güç ve enerji gerekmektedir. İkinci dezavantaj ise hem fazla güç gereksiniminden hem de lazer kullanıldığından üretim maliyetinin yüksek olmasıdır. Ayrıca buharlaştırma yöntemleri nanotüplerle metal katalizörlerin karışmasına neden olabilmektedir [70].

### *Kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi*

Kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile, katalizör olarak geçiş metali veya bu metallerin bir bileşimini kullanarak, karbon kaynağının 600-1200 °C sıcaklık aralığında kimyasal yollarla ayrıştırılması ile karbonun katalizör üzerinde birikmesini sağlayarak KNT üretimi yapılır. Burada karbon kaynağı olarak karbon bakımından zengin gazlar kullanılır. Bu yöntemde KNT'nin yanı sıra farklı formlarda kimyasal yapılar da elde edilir [6, 71].

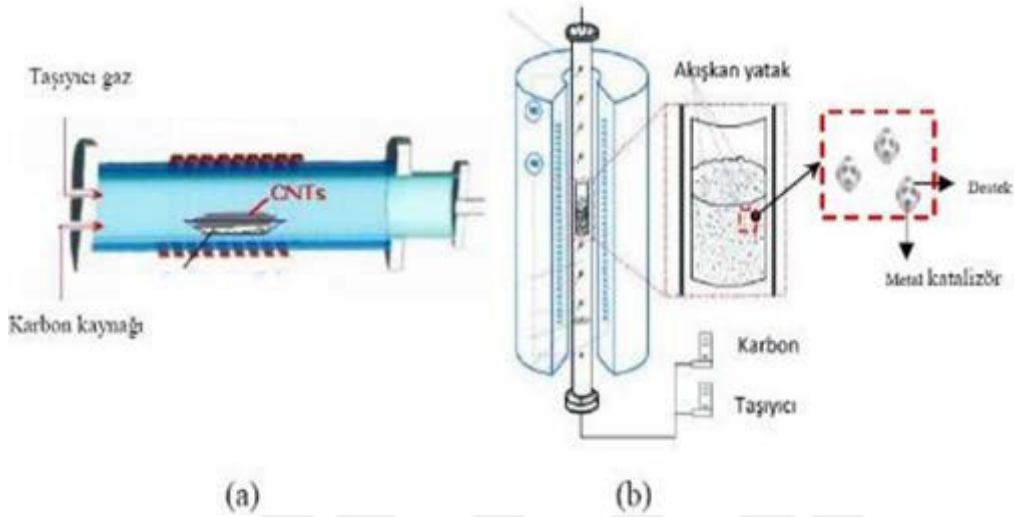
Kimyasal buhar biriktirme yöntemi 1996 yılından itibaren büyük çaplı KNT üretimi için kullanılmaya başlanmıştır [71]. Nanotüpler için kimyasal buhar biriktirme yöntemi ilk olarak 1998 yılında Z. F. Ren tarafından geliştirilmiştir. 1993 yılında Yacaman ve Ç.A. ile 1994 yılında Ivanov ve Amelinkx çok duvarlı nanotüp üretiminde kullanmışlardır [50].

Ark boşalım ve lazer buharlaştırma yöntemleri kesikli olup üretim kapasiteleri sınırlıdır. Kontrollü üretim ve sürekli işletim açısından kimyasal buhar biriktirme yönteminin kullanılması daha çok tercih edilir. Bir diğer tercih sebebi ise diğer yöntemlere göre proses ve harcanan güç bakımından daha basit ve düşük maliyetli olmasıdır. Kimyasal buhar biriktirme yönteminde kullanılan prosesinin temeli, yüksek sıcaklıkta karbon bakımından zengin gazların metal katalizörlerin eşliğinde pirolizi ve ortaya çıkan ürünlerinin KNT'ye dönüştürülmesidir.

CVD yöntemi iki ayrı tipte gerçekleştirilebilen bir üretim yöntemidir. Bunlar sabit yataklı ve akışkan yataklı üretim yöntemleridir (Şekil 4.5). CVD yönteminde katalizör, reaktör içine yerleştirilir ve istenilen sıcaklık değerlerine ulaştıktan sonra reaktör içerisinde karbon kaynağı gaz ve taşıyıcı inert gaz akışı sağlanarak reaksiyon gerçekleştirilir. İntert gaz olarak bu yöntemde de helyum ve argondur. Sabit yatak uygulamasında, üzerine katalizör yerleştirilen destek yapı toz halinde değilse katalizör yerleştirme sıklığı, boyutu ve şekli ayarlanabilir olduğundan akışkan yatağa göre daha kolay kontrol edilebilir. Diğer bir sabit yataklı CVD uygulamasında da toz halindeki katalizör taşıyıcı bir kaba yerleştirilir ve gaz akışı sağlanarak reaksiyon gerçekleştirilir [56].

Akışkan yataklı CVD yönteminde, benzer şekilde destek ve metal katalizör ikilisi kullanılır ve toz formda reaktör içindeki bir diskin üzerine konulur. Gaz akışı sonucu akışkan forma gelen katalizör parçacıkları karbon kaynağı gaz ile karışır ve katalizör üzerinde KNT

oluşumu gerçekleşir. Akışkan yataklı üretim yöntemi, sabit yataklı yöntem kadar kontrollü bir metot değildir ancak katalizör ve gazların temas ettiği alan büyüdüğünden daha verimli KNT üretimi yapılır [56].



Şekil 4.5. a) Sabit yataklı CVD, b) Akışkan yataklı CVD [56]

CVD sentezi iki türde gerçekleştirilebilir;

1. Heterojen katı-katalitik tepkimelerle
2. Homojen gaz evre tepkimeleriyle

Katı-katalitik tepkimelerle üretimde, destek malzeme üzerine çökeltilen katalizörler, fırın içerisindeki boru şeklindeki reaktöre yerleştirilir. 500- 1100 °C sıcaklık değerleri arasında reaktöre karbonca zengin gaz verilir. Reaktöre verilen gazlar katalizör üzerinde parçalanarak KNT'lere dönüşür. Bu yöntemde en çok kullanılan destek malzemeleri, metalik Si, Si ve SiO<sub>2</sub> esaslı malzemelerdir. Bunların dışında grafit ve çeşitli metalik ince yapılı filmler de kullanılır. CVD üretim sürecinde en başarılı katalizörler olarak da Fe, Co ve Ni kullanılır. Bunlardan en sık kullanılanı demirdir. Katı-katalitik tepkimeler daha çok ÇDKNT üretmek için elverişlidir. Gaz evre tepkimeleri ile üretim de daha çok TDKNT'ler için başarılıdır. Bu yöntemde ise katı-katalitik tepkime yöntemine benzer şartlar altındaki akış ortamına katalizör ve karbon kaynağı sisteme aynı zamanda, buhar/gaz biçiminde veya aerosol biçiminde beslenir. Bu şekilde uygulanan yöntemle tepkimenin tamamı ya gaz evrede gerçekleşir ya da bileşenlerin kendi kendine çökelmelerini takiben gerçekleşir [9, 45].

### Karbon nanotüp kullanım alanları

KNT'ler üstün özelliklere sahip olduklarından dolayı endüstride birçok alanda kullanılmaktadır. KNT'ler çok iyi derecede mekanik özelliklerin yanı sıra aynı derecede kimyasal, elektriksel ve optik özelliklere de sahiptir. Bu avantajlardan yola çıkarak kullanım alanları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Nanoteknoloji sistemleri veya cihazları
- Kompozit malzemelerde takviye ile güçlendirme amaçlı kullanımı
- Elektriksel özelliklerinden dolayı manyetik alan yayma cihazları, transistörler, sensörler, kapasitörler, hafıza elemanları ve elektronik anahtarların yapımı
- Enerji depolama sistemleri
- Biyolojik ve medikal uygulamalar
- Uzay sistemleri ve havacılık uygulamaları

Karbon nanotüpler üzerinde son yıllarda birçok çalışma yapılmış ve hem takviye elemanı olarak hem de sentez işlemlerinde geliştirme çalışmaları devam etmektedir [73-77].

Bu tez çalışmasında deneysel amaçlı kullanılan KNT çok duvarlı olup (ÇDKNT) Resim 4.9'da gösterilmiştir. ÇDKNT Nanocly firmasından temin edilmiş olup 10-50 nm çapında ve 10-30 µm uzunluğundadır. Üretim de kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle yapılmıştır. ÇDKNT bundan sonraki bölümlerde kısaca KNT ya da karbon nanotüp olarak bahsedilecektir.



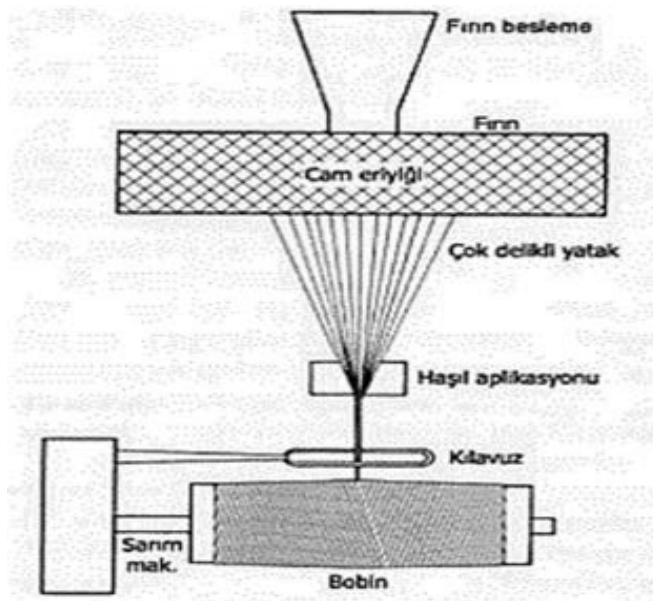
Resim 4.9. ÇDKNT

### 4.1.3. Cam elyaf

Cam elyaf eriyik halde bulunan camın çekilmesiyle elde edilen bağımsız yapıdaki ince liflerdir. 1940'lı yıllardan bu yana farklı tipte cam elyaflar özellikle plastiklerde takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır. Cam elyaf takviyesiyle plastiklerin çekme, eğilme ve darbe dayanımlarıyla rijitlik ve diğer fiziksel özellikleri artırılabilir [78].

Cam elyafın ana maddesini silis kumu ( $\text{SiO}_2$ ) oluşturmaktadır. Ancak cama kazandırılmak istenen özelliklere göre diğer silikatlar, kalsiyum, sodyum, alüminyum, magnezyum, bor gibi malzemelerin oksitleri de ilave edilir [9, 18].

Cam elyaf üretimi, gerekli hammaddelerin birlikte karıştırılarak bir fırına beslenmesi ile başlar ve fırın yaklaşık  $1600\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtılır. Yüksek sıcaklıkta hammaddeler erir ve cam eriyiği halini aldıktan sonra akıtılmak üzere kanallara alınır. Burada cam liflerini akıtmak için ısıtılmış kovanlar bulunur. Eriyik cam kovan deliklerinden çekilerek geçmesiyle yüksek hızda dönen mandrel üzerine sarılarak cam elyaf elde edilir. Her bir kovandan binlerce cam lifi üretimi yapılabilir. Üretilen ince cam lifleri soğutma işlemlerinden sonra makaralara sarılarak kullanıma uygun şekilde nakliye edilir [79, 80]. Üretim şeması Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Cam elyaf üretim şeması [80]

Cam elyaflar yapılarına göre çok farklı türlere ayrılır. Bunlardan en yaygın kullanılanlar A cam, C cam, E cam ve S cam elyaflardır. A camı yüksek oranda alkali içerir. Kimyasal dirençleri yüksektir ancak elektriksel yalıtkanlıkları zayıftır. C camı da kimyasallara karşı çok iyi direnç gösterir, bu sebeple daha çok depolama tanklarında kullanılır. E camı günümüzde en çok kullanılan takviye elemanıdır. Alkali oranı düşüktür ve iyi bir yalıtandır. Suyu ve kimyasallara karşı dayanıklıdır ve mukavemet değerleri oldukça yüksektir. S camı ise yüksek mukavemetli bir camdır. Çekme mukavemeti E camına oranla daha fazladır. Genellikle havacılık ve uzay uygulamalarında tercih edilirler [81].

Genel olarak cam elyafların özellikleri çekme ve darbeye dayanıklı olmalarıdır. Ayrıca su, nem, kimyasallar ve ısıya dayanıklıdır. Cam elyaflar yanmazlar fakat 1150 °C gibi yüksek sıcaklıklara çıktığında yumuşama eğilimi gösterirler [79, 81].

Cam elyaflar takviye elemanı olarak birçok alanda kompozitlerin geliştirilmesinde kullanılmaktadır [82-91]. Cam elyaflar sahip olduğu özelliklerden dolayı özellikle plastiklerde olmak üzere birçok malzemede takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Diğer kullanım alanları olarak kompozit malzemeler, denizcilik, inşaat, otomotiv, elektrik-elektronik sektörleri ve spor malzemeleri örnek gösterilebilir. Ayrıca cam elyafların ve karbon nanotüpün ayrı ayrı ya da birlikte takviyesiyle polimer malzemelerin geliştirilmesi üzerinde çalışmalar yapılmaktadır [92-98].

Bu tez çalışmasında kompozit malzeme üretimi için kullanılan cam elyaf dokuma kumaş, E cam tipi ve 300 g/m<sup>2</sup> ağırlığa sahip olup Resim 4.10'da verilmiştir.



Resim 4.10. Cam elyaf kumaş



## 4.2. Yöntem

Bu bölüm, YYPE ve KNT'nin bir araya getirilerek homojen karışımını, sonrasında cam elyaf takviye edilerek kompozit malzeme üretimi ve bu malzemelerden deney numuneleri oluşturarak uygulanan testleri içermektedir.

KNT'ler YYPE granülleriyle farklı oranlarda karıştırılmış ve sonrasında cam elyaf ilave ederek plakalar üretilmiştir. Üretilen bu plakalardan lazer kesim cihazı yardımıyla deney numuneleri kesilmiştir. Belli standartlar çerçevesinde hazırlanan deney numuneleri çekme deneyi, izod darbe deneyi ve düşük hızlı darbe deneyleri ile teste tabi tutulup mekanik özellikleri tespit edilmiştir.

### 4.2.1. Kompozit malzemelerin üretimi

KNT ve saf YYPE öncelikle hassas terazi (Resim 4.11) yardımıyla tartılarak YYPE granülleri içerisine ilave edilmiştir. Yapılacak karışımın toplam ağırlığına oranla YYPE tartılıp buna %0,5 oranında, %1 oranında ve %1,5 oranında KNT'ler ayrı ayrı eklenerek karıştırılmıştır.



Resim 4.11. Hassas terazi ile tartım işlemi

KNT ve YYPE karışımları beher içerisinde yapıp bu karışımı homojen hale getirmek için yapılacak işlemlerin kolaylığı açısından beher içerisine granüllerin çözünmeyeceği aseton ilave edilerek karıştırılmıştır (Resim 4.12).



Resim 4.12. YYPE ve KNT karışımına aseton eklenmesi

Aseton ortamındaki YYPE ve KNT karışımı, homojen hal alması için ilk olarak ultrasonik karıştırıcıda 30 dakika karıştırılmıştır (Resim 4.13). Karışım sırasında dışarıya taşma olmaması amacıyla beher üzeri alüminyum folyo ile sıkıca kapatılmıştır.



Resim 4.13. YYPE ve KNT'nin ultrasonik karıştırıcıda karıştırılması

Ultrasonik karıştırıcı, yüksek frekansta akım göndererek su haznesi içinde bulunan beherdeki parçacıklarda bir titreşim meydana getirir ve birbirlerine yapışmasını sağlar. Burada da bu titreşimle KNT partikülleri YYPE üzerine yapışarak belli oranda homojen karışım elde edilmiştir.

Ultrasonik karıştırıcıda belli bir oranda homojen hale gelen karışım, daha fazla homojenlik için ikinci aşamada ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır (Resim 4.14). Manyetik karıştırıcı 70 °C sıcaklığa ayarlanıp, alüminyum folyo üzerinde delikler açılıp karışım içerisindeki aseton tamamen buharlaşana kadar işlem devam ettirilmiştir. Asetonun kaynama noktası 56 °C olduğu için sıcaklık 70 °C ayarlanmıştır. Asetonun buharlaşması ortalama 2-3 saatte tamamlanmıştır.



Resim 4.14. YYPE ve KNT'nin manyetik karıştırıcıda karıştırılması

Manyetik karıştırıcıda asetonun buharlaşması sonucu ve manyetik karışım etkisiyle KNT partikülleri iyice YYPE granülleri üzerine yapışmış ve homojen bir hal almıştır. Isı etkisiyle hem aseton buharlaşmış hem de buharlaşma sonucu ıslak olan malzemenin kuruması sağlanmıştır. Bu haldeki karışım görünümü Resim 4.15'te verilmiştir.



Resim 4.15. YYPE ve KNT karışımı

Birbirlerine iyice yapışan KNT ve YYPE karışımını tamamen homojen hale getirmek için son aşamada çift vidalı ekstruder cihazı kullanılmıştır. Karışım çift vidalı ekstruder ve polimer kırıcıdan geçirilerek istenilen homojenlik sağlanmıştır (Resim 4.17 ve Resim 4.18).

Kullanılan çift vidalı ekstruder, Aysa marka ve AES Lab-30 modeli cihazdır (Resim 4.16). Ekstruderin L/D oranı 32, vida çapı 22 mm'dir. Ürün işlemede vida devri 70 d/dk, sıcaklık ise 200-230 °C'dir.



Resim 4.16. Çift vidalı ekstruder cihazı





Resim 4.17. Ekstruderden çıkan ürün



Resim 4.18. Farklı oranlarda KNT takviyeli YYPE

Çift vidalı ekstruderden elde edilen ürün (Bkz. Resim 4.17) sıcak pres makinası kullanılarak, kalıp yardımıyla ve cam elyaf takviyesi yapılarak plakalar üretilmiştir. Her bir orandaki KNT'li ürün ayrı ayrı cam elyaf takviyesi yapılarak üretim yapılmıştır. Ayrıca saf YYPE'den de deney numunesi elde etmek amacıyla plaka üretimi yapılmıştır.



Resim 4.19. Sıcak pres makinası

Sıcak pres makinası (Resim 4.19), 15 ton kapasiteli kollu hidrolik tiptedir. Alt ve üst tabla içlerinde rezistans mevcuttur ve ısıtma bu rezistanslarla sağlanmaktadır. Yine tablalar içerisinde bulunan termostatlı sıcaklık sensörü yardımıyla ısıtma işlemi kontrol altında yapılmıştır. Tablalar üzerine üretim sırasında ve sonrasında eriyik malzemenin yapışmaması için 1 mm kalınlığında teflon levha yerleştirilmiştir. Ayrıca makinanın tablaları için su kanalları mevcut olup soğutma işlemi de su ile yapılmıştır.

Plaka üretimi Resim 4.20’de gösterilen endüstriyel teflon kaplı kalıp yardımıyla yapılmıştır. Kalıp malzemesi çelik olduğundan dolayı eriyik malzeme kalıba yapışmasını önlemek amacıyla püskürtme yöntemiyle kaplama yaptırılmıştır. Kalıp 4 mm kalınlığında, iç ölçüleri 295 x 165 mm’dir.



Resim 4.20. Teflon kaplı kalıp

Pres makinası alt tablası üzerine 4 mm kalınlığında kalıp yerleştirilip içerisine ilk olarak 2 mm olacak şekilde KNT katkılı YYPE granülleri koyulup kalıp içinde düzgünce dağıtılmıştır. Bu tabakanın üzerine kalıp ölçülerinde cam elyaf kumaş yerleştirilip cam elyaf üzerine de 2 mm olacak şekilde yine granüller koyulup (Resim 4.21) düz bir biçimde dağıtılmış, üst tabaka da bu şekilde oluşturularak üretime hazır hale getirilmiştir.



Resim 4.21. KNT katkılı YYPE ve cam elyafın kalıba yerleştirilmesi





Resim 4.22. Üretime hazır hale gelen KNT katkılı YYPE ve cam elyaf

Resim 4.22’de gösterilen durumda ürün sıcak üretime hazır hale gelmiştir. Bu şekilde KNT, YYPE ve cam elyafın birleşerek oluşturduğu kompozit malzeme hibrit kompozit malzeme türüdür. Yani bir adet ana matris malzemesi ve en az iki adet takviye elemanı ile oluşmak üzere bu çalışmada matris malzemesi olarak YYPE, takviye elemanı olarak da KNT ve cam elyaf kullanılarak hibrit kompozit malzeme elde edilmiştir.

Üretimin ilk aşamasında pres makinesinin enerjisi açılarak ısıtılmaya başlanmış ve üst tabla, malzemeye sadece temas edecek şekilde bastırılmıştır (Resim 4.23). İlk sıcaklık değeri için de termostat 120 °C’ye ayarlanmıştır. Bu şekilde granülleri tamamen eritmeden yavaş yavaş akışkan forma getirip, öncelikle granüller arasındaki boşlukların dolması amaçlanmıştır. Sıcaklık değeri her iki tablada 120 °C’ye ulaştığında 5 dakika beklenerek 130 °C’ye çıkarılmış ve pres makinesi biraz daha sıkıştırılmıştır. Aynı şekilde 130 °C sıcaklığa ulaşıldığında yine 5 dakika sonra son sıcaklık değeri 140 °C’ye çıkarılmış ve pres makinesi daha fazla sıkıştırılmıştır. Sıcaklık 140 °C’ye ulaştığında pres makinesi iyice sıkıştırılmış ve eriyik malzemenin bu sıcaklık ve basınç altında homojen bir şekilde kalıbın şeklini alması sağlanmıştır. Bu şekilde son olarak 10 dakika daha bekletildikten sonra enerji kesilmiş ve soğutma suyu açılarak üretilen malzeme ve kalıp soğumaya bırakılmıştır. Pres makinesi, kalıp ve malzeme soğuduktan sonra kalıp çıkarılmış ve kompozit plaka üretimi tamamlanmıştır (Resim 4.25).





Resim 4.23. Sıcak üretimin başlangıcı



Resim 4.24. Üretim sırasında sıcaklık kontrolü



Resim 4.25. Sıcak pres makinasında üretilen kompozit plakalar

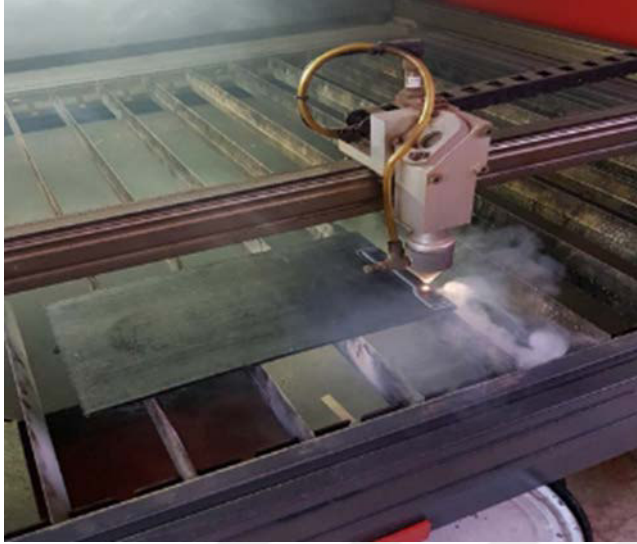
Kompozit plakaların üretimi için geçen süre, sıcak üretim için ortalama 45 dakika ve malzemenin soğutulması için 20-30 dakika arasındadır. Bütün plakalar aynı şartlarda ayrı ayrı periyotlarda üretilmiştir.

Farklı oranlarda KNT'li YYPE ve cam elyaf ile elde edilen plakaların yanı sıra mukavemet değerlerinin karşılaştırılması amacıyla, sıcak pres makinası yardımıyla aynı şartlarda saf YYPE'den ve saf YYPE'ye diğer plakalarda uygulandığı gibi cam elyaf takviye edilerek 2 farklı tipte daha plaka üretimi yapılmıştır. Bu durumda elde edilen plaka tipi toplam 5 adettir. Plakaların malzeme türleri aşağıda listelenmiştir.

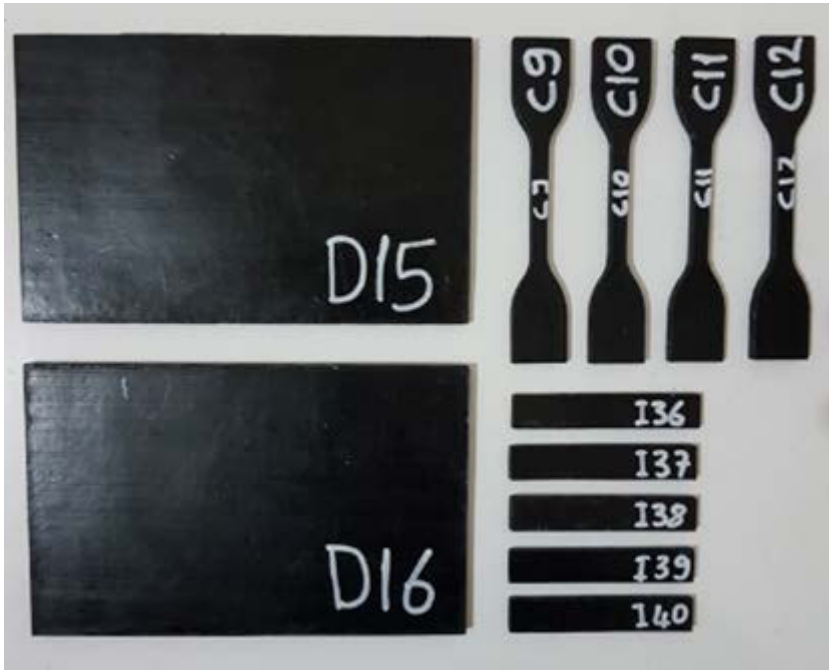
1. Saf YYPE
2. Saf YYPE + Cam elyaf takviyesi
3. %0,5 KNT katkılı YYPE + Cam elyaf takviyesi
4. %1 KNT katkılı YYPE + Cam elyaf takviyesi
5. %1,5 KNT katkılı YYPE + Cam elyaf takviyesi

#### 4.2.2. Deney numunelerinin hazırlanması

Üretimi yapılan kompozit plakalar ve saf YYPE plakalar bilgisayar destekli lazer kesim cihazı ile kesilerek (Resim 4.26) çekme deneyi, izod darbe deneyi ve düşük hızlı darbe deneyi numuneleri elde edilmiştir (Resim 4.27).



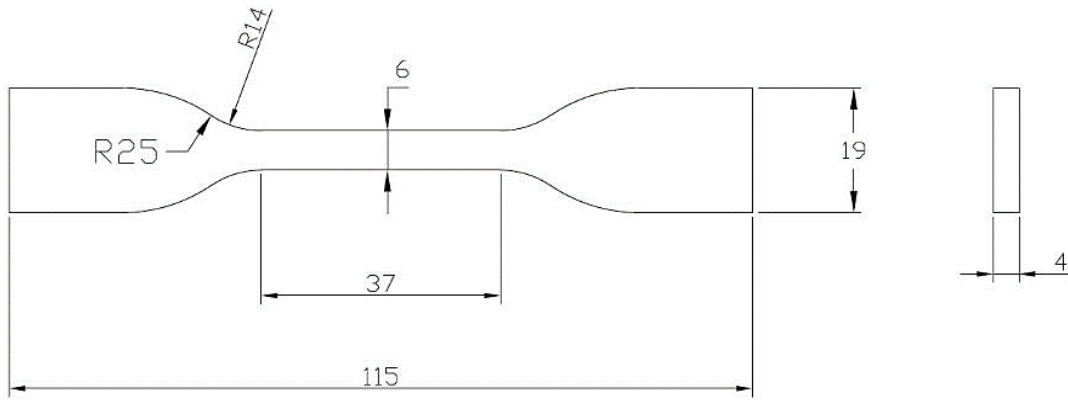
Resim 4.26. Plakaların lazer kesim cihazı ile kesimi



Resim 4.27. Kompozit plakalardan kesilen deney numuneleri

### Çekme deneyi

Saf YYPE, Saf YYPE ve cam elyaf, %0,5; %1; %1,5 oranlarında KNT katkılı YYPE ve cam elyaf olmak üzere 5 adet plakanın her birinden 4 adet çekme deneyi numunesi kesilmiştir ve test sonunda ortalama değerler ele alınmıştır. Çekme deneyi numuneleri ASTM D638 standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır (Resim 4.29). Hazırlanan numunelerin kesim ölçüleri mm cinsinden Resim 4.28’de gösterilmiştir.

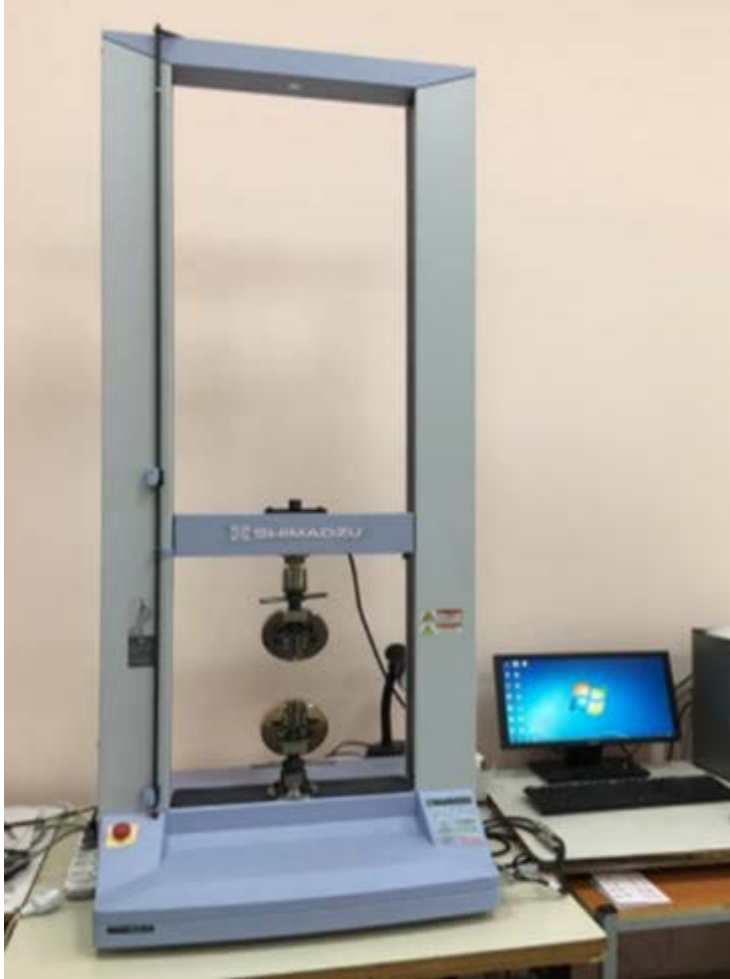


Resim 4.28. Çekme numunesi ölçüleri



Resim 4.29. Çekme deneyi numuneleri

Hazırlanan numunelerin çekme testleri Selçuk Üniversitesi laboratuvarında yapılmıştır. Testler Resim 4.30'da görülen Shimadzu marka AGS-X modeli çekme cihazında yapılmıştır. Cihazın kapasitesi 10 kN'dur. Çekme testi 2 mm/dakika hızla yapılmıştır. Deney sonuçları 5. bölümde detaylı olarak verilmiştir.

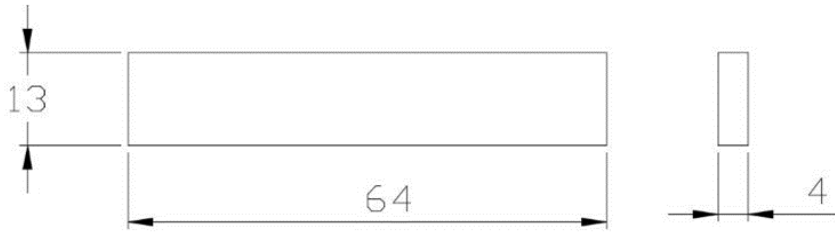


Resim 4.30. Çekme deney cihazı

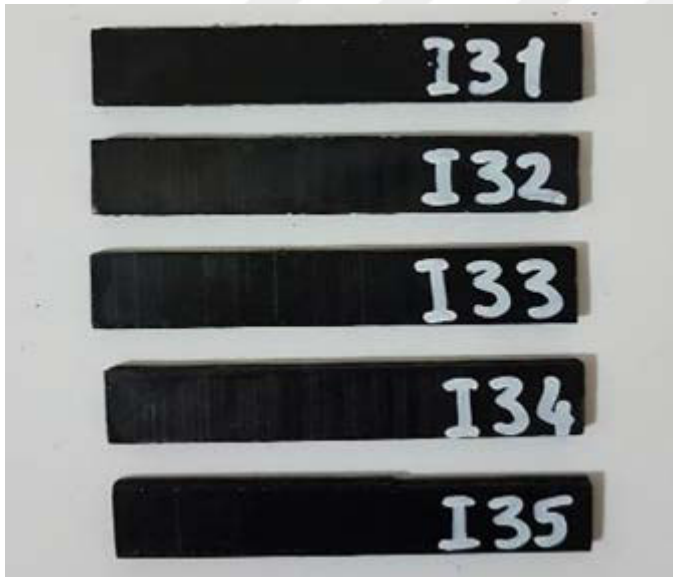
Çekme testi, bir numunenin kopana kadar eksenî boyunca çekme kuvvetine maruz bırakıldığı temel bir ölçüm testidir. Numune cihazın çenelerine yerleştirilir ve kopana kadar kuvvet uygulanır. Kuvvetin uygulama süresi boyunca kesitteki daralma ve uzama miktarı uygulanan kuvvetle birlikte sisteme kaydedilir. Bu test yoluyla maksimum çekme gerilmesi, maksimum uzama ve kesit alanındaki daralmalar direkt olarak elde edilir.

### Izod darbe deneyi

Izod darbe deneyi için yine tüm malzeme türlerinden numuneler oluşturulmuştur. Her bir malzeme türünden 5 adet numune kesilmiş ve test sonucunda ortalama değerler ele alınmıştır. Numune ölçüleri mm cinsinden Resim 4.31’de verilmiştir. Numuneler ASTM D6110 standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır (Resim 4.32). Deney sonuçları 5. bölümde detaylı olarak verilmiştir.



Resim 4.31. Izod numunesi ölçüleri



Resim 4.32. Izod deney numuneleri

Izod deneyi için hazırlanan numunelerin testleri Sütçü İmam Üniversitesi laboratuvarında yapılmıştır. Resim 4.34’te gösterilen Zwick/Roel marka HIT5.5 P modeli deney cihazında testler yapılmıştır. Test öncesinde numunelere çentik açılarak (Resim 4.33) izod deney cihazına yerleştirilmiştir.



Izod deneyinde, malzemenin dinamik bir zorlama altında kırılması için gerekli enerji miktarı elde edilir. Malzemenin kırılması için gerekli olan enerji miktarı, o malzemenin darbe direnci veya darbe mukavemeti olarak tanımlanır. Resim 4.34'te görüldüğü gibi ucunda çekiç olan bir sarkaç belli bir yükseklikten serbest bırakılır. Bırakıldıktan sonra numuneyi kırar ve ters tarafta belli bir yüksekliğe kadar çıkar. Sarkacın serbest bırakıldığı ilk yükseklik ve malzemeyi kırdıktan sonra çıktığı ikinci yükseklikteki potansiyel enerjileri farkı o malzemenin darbe direncini verir.



Resim 4.33. Çentik açılmış izod numunesi



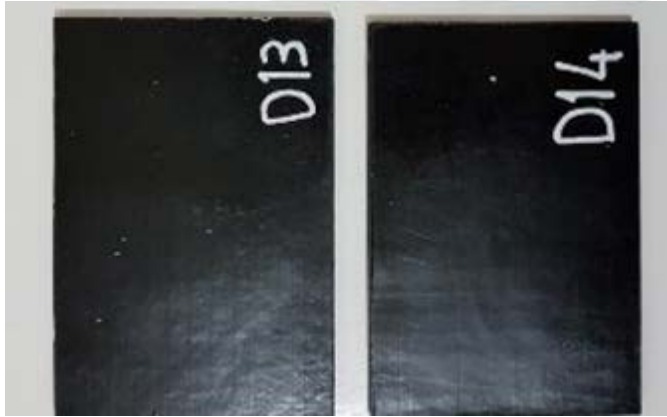
Resim 4.34. Izod deney cihazı

### Düşük hızlı darbe deneyi

Düşük hızlı darbe deneyi için tüm malzeme türlerinden 2'şer adet numune kesilerek teste tabi tutulmuştur. Kesilen numuneler Resim 4.35'te gösterilmiştir. Numuneler 100x150 mm ebatlarındadır.

Test cihazı (Resim 4.36) vurucu ucu 5,6 kg ağırlığındadır. Test hızı da 2 m/sn olarak alınmıştır. Deney sonuçları 5. bölümde grafiklerle verilmiştir.

Düşük hızlı darbe testinde, belirli bir ağırlıktaki vurucu uç belli bir hızda cihaza bağlanmış numuneye çarptırılarak numune yüzeyindeki deplasman/hasar ve absorbe edilen enerjiler elde edilir. Bu sonuçlara bakarak da malzemenin rijitliği, sünekliği, kırılma çabukluğu vb. özellikleri hakkında yorum yapılabilir.



Resim 4.35. Düşük hızlı darbe deney numuneleri



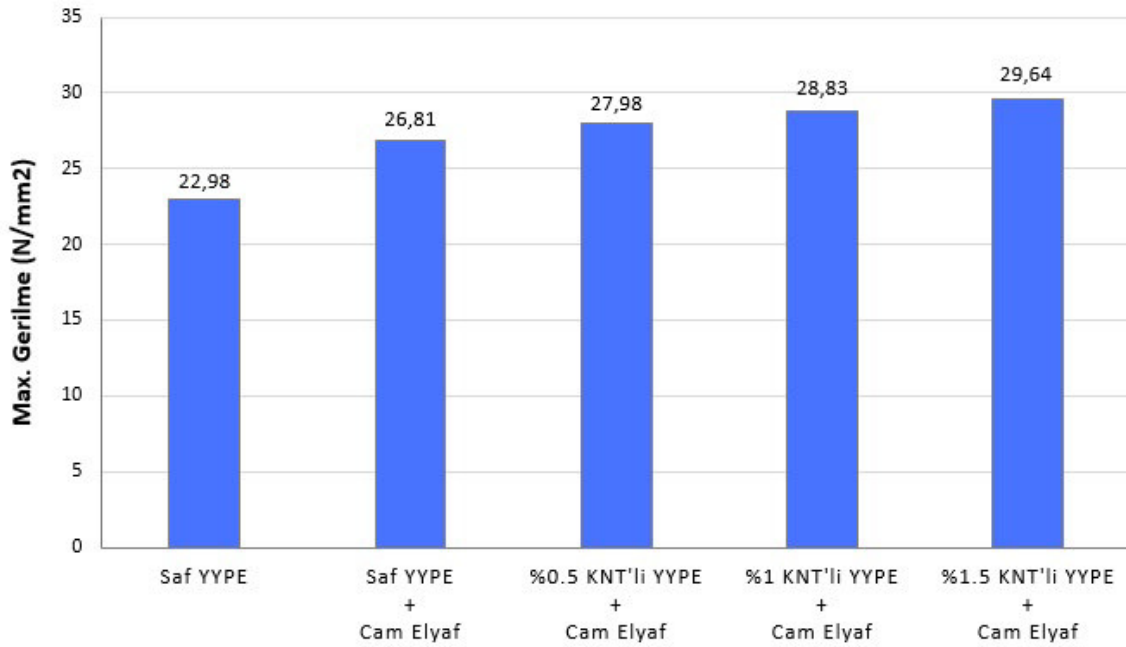
Resim 4.36. Düşük hızlı darbe deney cihazı



## 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 5.1. Çekme Deneyi Sonuçları

Yapılan çekme deneylerinden her bir malzeme türüne ait maksimum gerilme, uygulanan kuvvet ve uzama miktarları elde edilmiştir. Malzemenin dayanımı olarak nitelendirilen akmaya başladığı andaki maksimum gerilmeler (akma dayanımı) Şekil 5.1’de her bir malzeme için karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Elde edilen maksimum gerilmeler  $N/mm^2$  cinsinden verilmiştir.



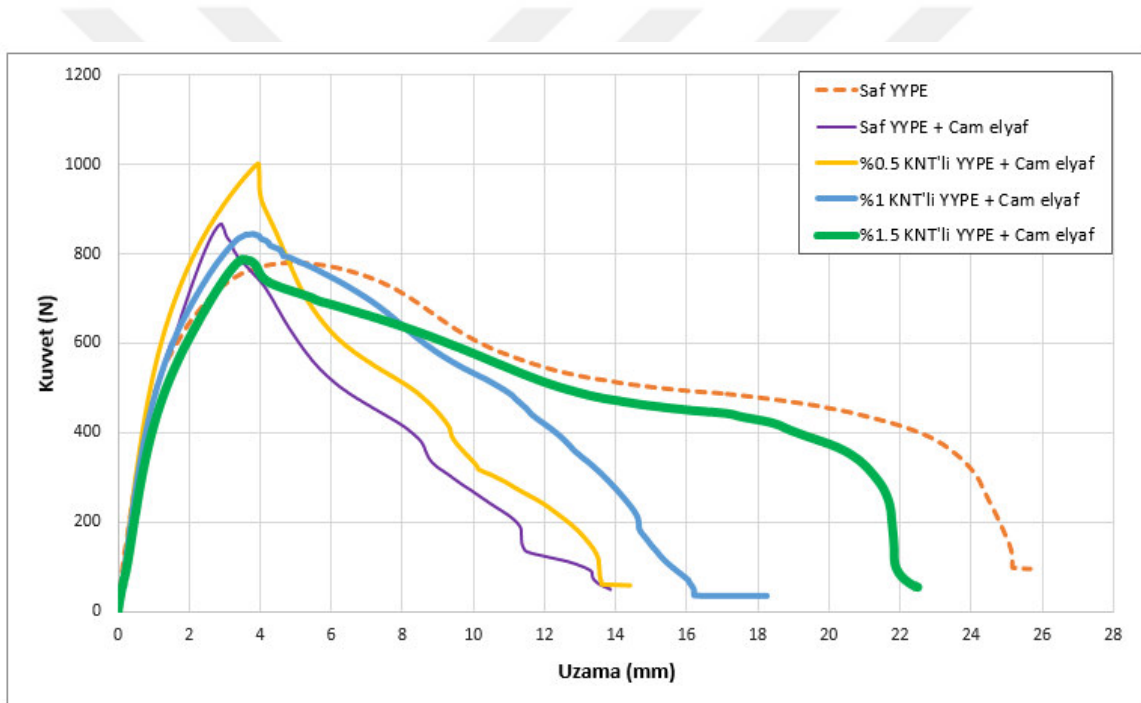
Şekil 5.1. Çekme deneyi sonuçları-maksimum gerilme

Değerler incelendiğinde saf YYPE'nin akma değeri olan maksimum gerilmesi  $22,98 N/mm^2$  olarak belirlenmiştir. Saf YYPE'ye cam elyaf takviye edilmesi ile bu değer  $26,81 N/mm^2$ 'ye çıkmış ve malzemede %16,66 oranında bir mukavemet artışı elde edilmiştir. Bu dayanım artışında, cam elyafın yüksek çekme mukavemetine sahip olması direkt etkili olmuştur. Cam elyafı birlikte %0,5 oranında KNT takviyesiyle maksimum gerilme değeri  $27,98 N/mm^2$  olmuş ve bu durumda da saf YYPE ve cam elyaftan oluşan kompozite göre %4,36 oranında dayanım artışı görülmüştür. Malzemeye takviye edilen KNT oranı %1'e çıktığında, %0,5 KNT'li malzemeye göre %3,03'lük bir mukavemet artışıyla maksimum gerilme değeri  $28,83$

$N/mm^2$  olmuştur. Son olarak %1,5 KNT takviyesinde ise  $29,64 N/mm^2$  değerinde akma dayanımı elde edilmiş ve %1 KNT'li malzemeye göre %2,80 oranında bir dayanım artışı gerçekleşmiştir.

Elde edilen deney sonuçlarına göre saf YYPE'ye yalnızca cam elyaf takviyesi ve cam elyaf ile birlikte tüm oranlarda KNT takviyesi, malzemenin mukavemet değerlerini arttırmıştır. Ancak mukavemet artış oranı, %0,5'ten %1,5 KNT takviye oranına doğru azalmaktadır.

Çekme deneyinde malzemelere uygulanan kuvvetler ve her bir malzemedeki uzama miktarları Şekil 5.2'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

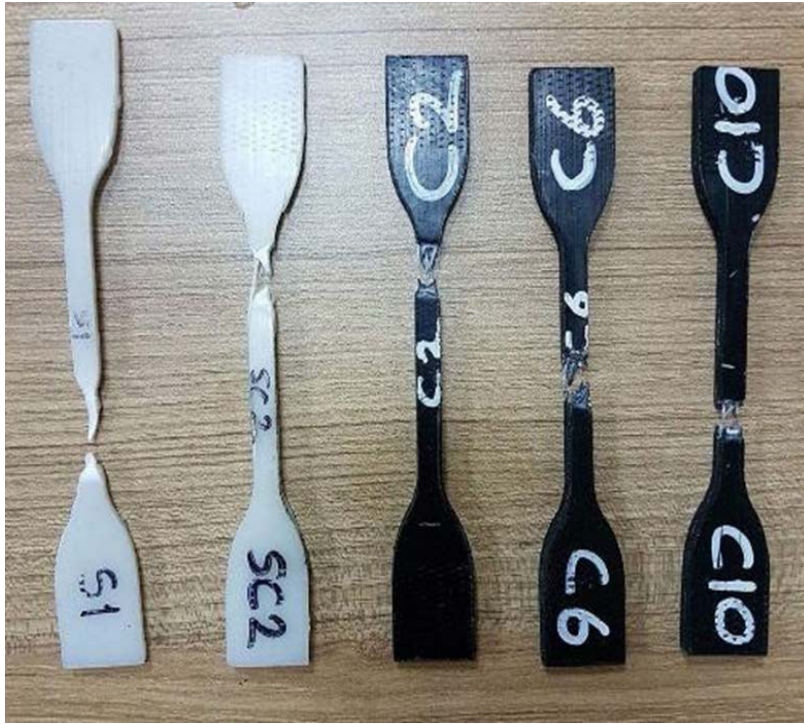


Şekil 5.2. Numunelere ait çekme deneyi kuvvet-uzama grafiği

Şekil 5.2'de verilen karşılaştırmalı kuvvet-uzama grafiğine göre plastik yapısından dolayı yüksek süneklığe sahip saf YYPE'nin akma noktasından sonra en çok uzayan malzeme olduğu görülmüştür. Bu durumda en çok sünek davranış saf YYPE'de görülmüştür. Ancak, YYPE'ye cam elyaf takviye edildiğinde uzama miktarı neredeyse %50 civarlarında azalmıştır ve gevrekleşerek akma noktası artmıştır. Bu durumda kuvvet artarak öncelikle cam elyaf kopmuş ve YYPE az da olsa uzamaya devam etmiştir. Sebebi, cam elyafın çekmeye karşı dayanımı ve rijit yapıda olmasından dolayıdır. Saf YYPE, cam elyaf ve KNT'den oluşan hibrit kompozit malzemelerde de KNT oranı %0,5'ten %1,5'e çıktıkça cam

elyaf koştuktan sonra süneklığın saf YYPE ve cam elyaflı kompozite göre arttığı ve %1,5 KNT'li malzemenin neredeyse saf YYPE'nin uzama miktarına yaklaştığı görülmektedir. Aynı zamanda akma noktaları da KNT oranı arttıkça azalmaktadır. Burada cam elyaf takviyesiyle süneklığı azalan YYPE'nin, KNT takviyesiyle tekrar çekme kuvveti karşısında yine cam elyaf koştuktan sonra belli oranda sünek yapıya geçtiği görülmektedir.

Resim 5.1'de deney sonunda kopan numuneler gösterilmiş olup numune kodları Çizelge 5.1'de belirtilmiştir. S1 kodlu numune saf YYPE olup bu malzemenin süneklığı kopma noktasındaki uzama miktarından daha detaylı bir şekilde gözle görülmektedir.



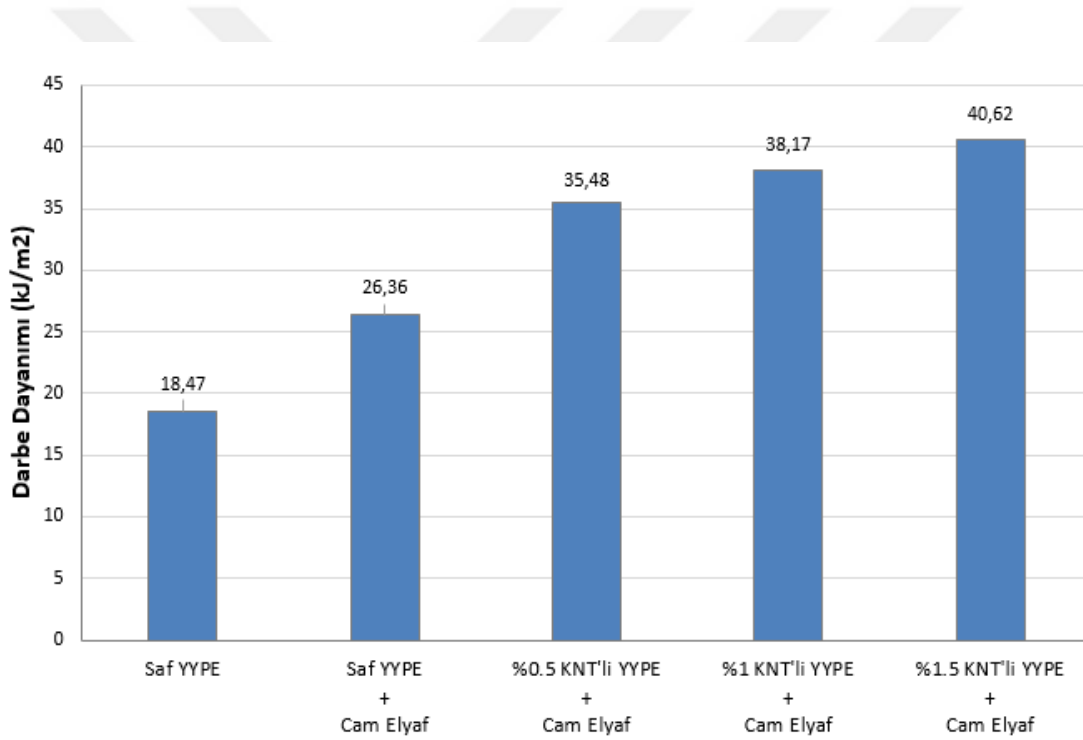
Resim 5.1. Deney sonu kopmuş çekme numuneleri

Çizelge 5.1. Çekme numuneleri kodlarının tanımı

Numune Kodu	Malzeme Tanımı
S1	Saf YYPE
SC2	Saf YYPE + Cam elyaf
C2	%0,5 KNT katkı YYPE + Cam elyaf
C6	%1 KNT katkı YYPE + Cam elyaf
C10	%1,5 KNT katkı YYPE + Cam elyaf

## 5.2. Izod Darbe Deneyi Sonuçları

Numunelerin izod deney sonuçlarına göre darbe dayanımları, yapılan testler neticesinde Şekil 5.3'te verilmiştir. Testler saf YYPE, saf YYPE ve cam elyaf, %0,5 KNT'li YYPE ve cam elyaf, %1 KNT'li YYPE ve cam elyaf ve %1,5 KNT'li YYPE ve cam elyaf olmak üzere tüm malzeme türlerinde yapılmıştır. Darbe dayanımları, izod test cihazında uygulanan ve belli bir yükseklikten serbest bırakılan çekicin malzemeyi kırarak, kırdıktan sonra çıktığı ters taraftaki ikinci yükseklikte potansiyel enerjilerinin farkına göre, malzemeyi kırmak için gerekli olan enerji miktarları olarak elde edilmiştir. Elde edilen darbe dayanımları  $\text{kJ/m}^2$  cinsinden incelenmiştir.



Şekil 5.3. Izod darbe deneyi sonuçları

Deneyden elde edilen veriler incelendiğinde saf YYPE'nin darbe dayanımı  $18,47 \text{ kJ/m}^2$  olarak belirlenmiştir. Saf YYPE'ye cam elyaf takviyesiyle darbe dayanımı, %42,71'lik ciddi bir artış oranıyla  $26,36 \text{ kJ/m}^2$ 'ye çıkmıştır. Cam elyaf ile birlikte %0,5 oranında KNT takviyesiyle darbe dayanımı  $35,48 \text{ kJ/m}^2$  değerine çıkmış ve bu durumda da saf YYPE ve cam elyaftan oluşan malzemeye göre %34,59 oranında dayanım artışı sağlanmıştır. Takviye edilen KNT oranı %1'e çıkarıldığında, %0,5 KNT'li malzemeye göre %7,58'lik bir mukavemet artışıyla darbe dayanım değeri  $38,17 \text{ kJ/m}^2$  olmuştur. KNT oranı %1,5'e

çıkarıldığında ise darbe dayanımı  $40,62 \text{ kJ/m}^2$  elde edilmiş ve %1 KNT'li malzemeye göre %6,41 oranında yine bir dayanım artışı sağlanmıştır.

Yapılan izod darbe deneyinden elde edilen verilere göre saf YYPE'ye takviye edilen tüm malzeme türlerinde darbe dayanımında artış sağlanmıştır. Ancak yine çekme deneyinde olduğu gibi KNT takviye oranı %0,5'ten %1,5'e doğru çıktıkça darbe dayanımının artış oranı azalmaktadır.

Karbon nanotüp yüksek mukavemet özellikleri sayesinde YYPE molekülleri arasındaki bağı kuvvetlendirerek kırılma enerjisini arttırmıştır. Aynı şekilde cam elyaf da rijitliği ve darbelere karşı dayanımı özelliğiyle ve KNT ile birlikte takviye edilmesiyle YYPE'nin darbe dayanımını arttırmıştır.

Testleri yapılan ve çentik noktalarından kırılan izod numuneleri Resim 5.2'de verilmiştir.

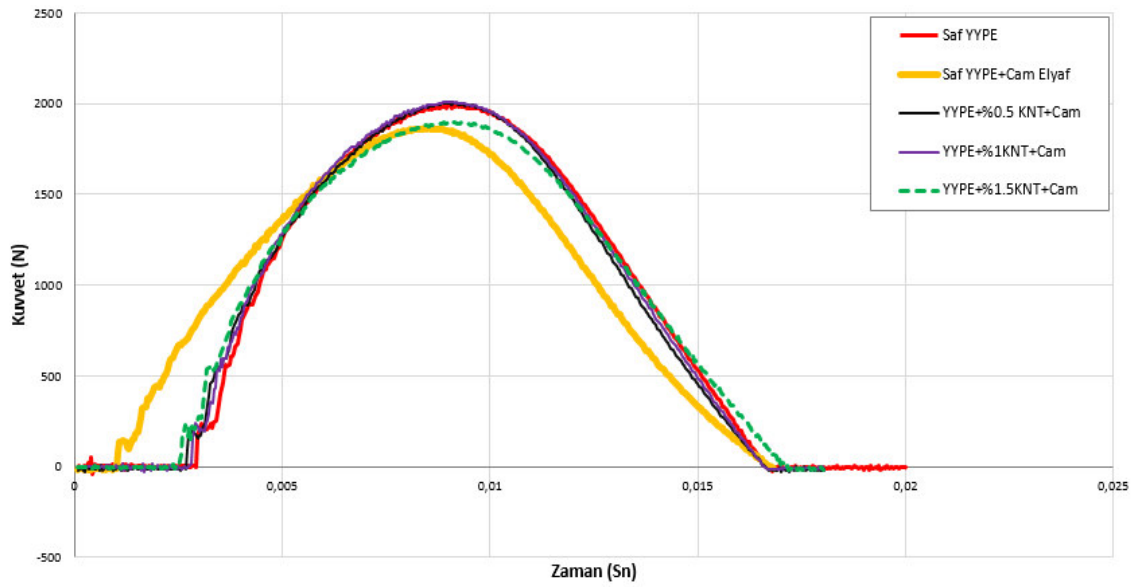


Resim 5.2. Çentik noktalarından kırılmış izod numuneleri

### 5.3. Düşük Hızlı Darbe Deneyi Sonuçları

Düşük hızlı darbe deneyinde saf YYPE, saf YYPE ve cam elyafla birlikte tüm KNT takviye oranlarındaki malzemelerin testi yapılmıştır. Plakalara çarpma hızı 2 m/sn olacak şekilde deney tamamlanmış ve elde edilen verilere göre grafikler oluşturulmuştur.

Tüm malzeme türlerine etki eden temas kuvvetinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.4'te grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Kuvvet-zaman grafiği

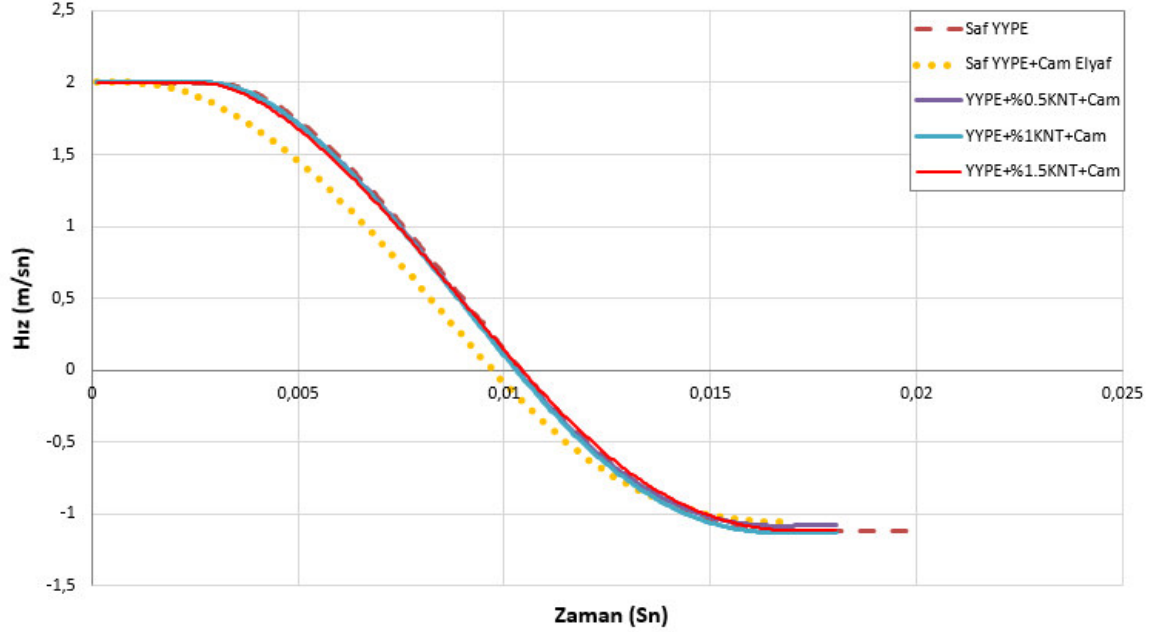
Grafikte belirtilen duruma göre, saf YYPE'nin daha fazla sürede kuvvete maruz kaldığı görülmektedir. Sebebi de yumuşak ve esnek yapıda olmasından dolayı, cihazın vurucu ucu malzeme üzerinde daha fazla etki yaratmış ve geri tepmesi daha uzun zaman almıştır.

Saf YYPE ve cam elyaftan oluşan malzeme ise YYPE'nin tam aksine daha az süre kuvvete maruz kalmıştır. Cam elyafın rijit yapıda olması ve darbeye karşı dayanımı, burada uygulanan kuvvetin bir anda artmasını ve diğer malzemelerden daha düşük kuvvetle, daha kısa zamanda etki-tepki oluşumunu sağlamıştır.

%0,5; %1; %1,5 oranlarında KNT takviyeli YYPE ve cam elyaftan oluşan hibrit kompozitlerde de malzemelere uygulanan temas kuvvetleri, saf YYPE'ye yakın değerlerde

olduğu görülmüştür. Ancak yine Saf YYPE'ye göre bu malzemeler de daha kısa süre kuvvete maruz kalmıştır.

Numunelerin zamana bağlı olarak hız değişimleri Şekil 5.5'te verilmiştir.



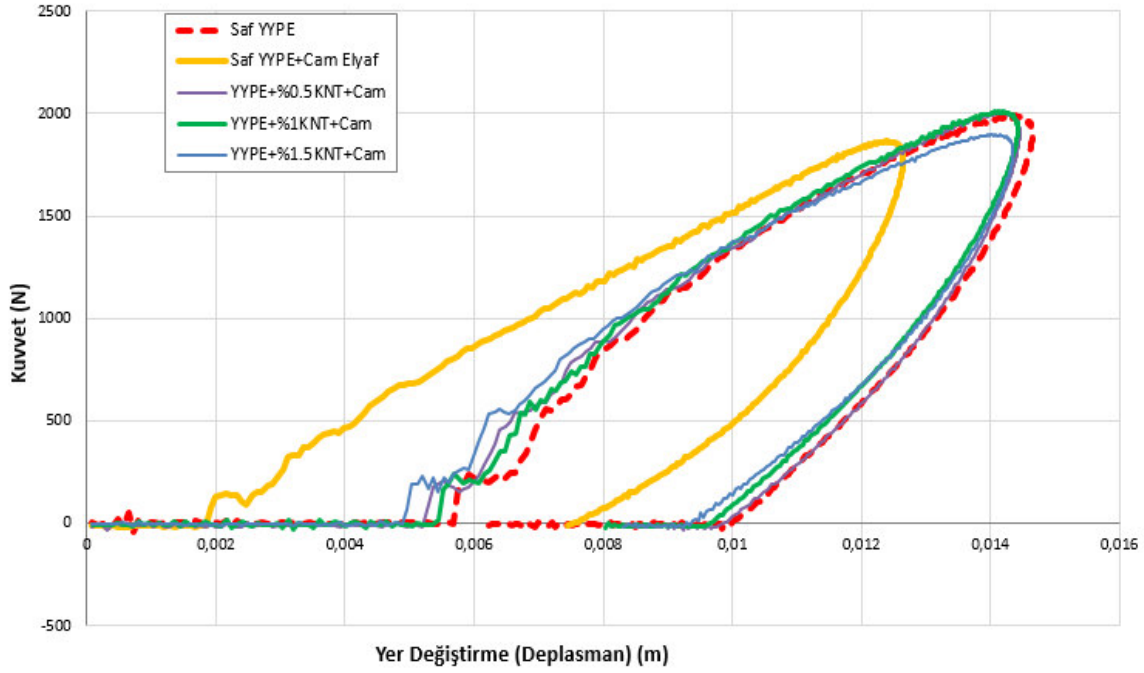
Şekil 5.5. Hız-zaman grafiği

Deney sonucunda uygulanan kuvvet etkisiyle numuneler üzerinde belli oranlarda yer değiştirmeler (deplasman) meydana gelmiştir (Resim 5.3). Kuvvetlere bağlı olarak malzemeler üzerinde oluşan yer değiştirmeler Şekil 5.6'da grafikte verilmiştir.



Resim 5.3. Düşük hızlı darbe deneyinde kuvvet etkisi altında kalan numuneler





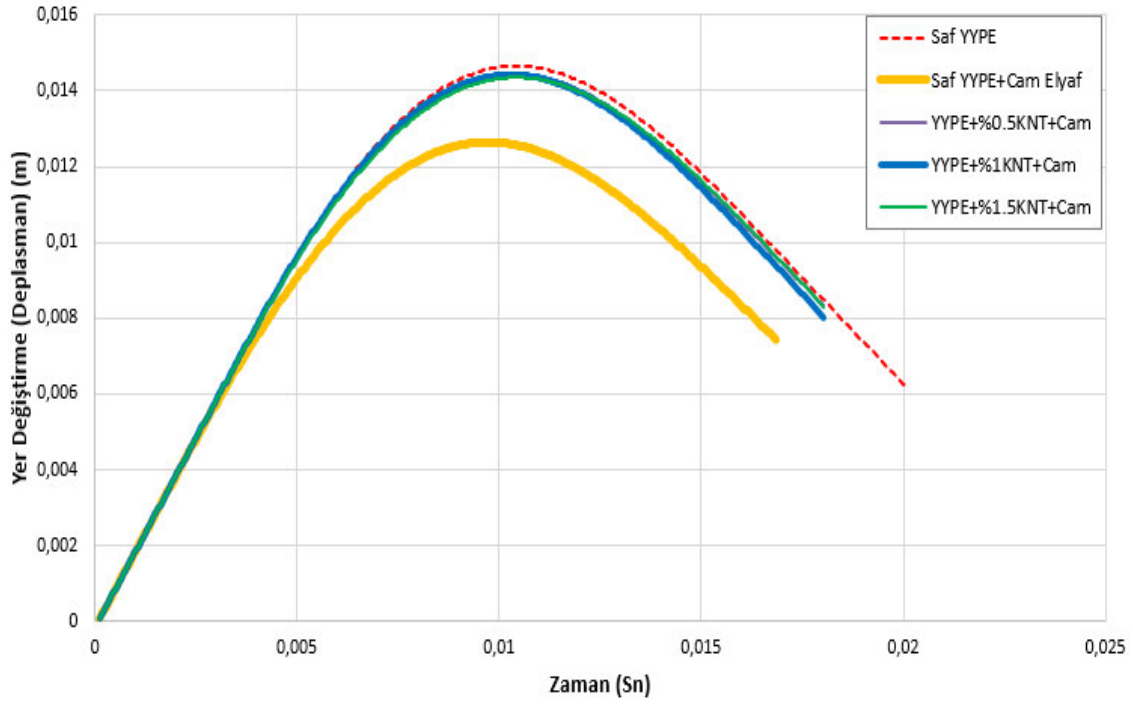
Şekil 5.6. Kuvvet-yer değiştirme grafiği

Uygulanan kuvvetler karşısında en çok yer değiştirme miktarı saf YYPE plakada gerçekleşmiştir. Ancak yapısı gereği sünek bir davranış sergilemiş ve uygulanan kuvvetin etkisi ortadan kalktığında eski şeklini almaya eğilim göstermiştir. Bu durumda esnek bir yapıya da sahip olduğu düşünülmelidir. Saf YYPE'ye cam elyaf takviye edildiğinde ise kuvvet etkisi altında kalan zamanda yer değiştirme miktarı diğer malzeme türlerinden daha az olmuştur, ancak diğer malzemelerden farklı olarak uygulanan kuvvet sıfırlandığında eski halini almaya eğilim göstermemiştir. Bu durumda cam elyafın YYPE'ye rijit bir yapı, tok bir yapı kattığı düşünülmektedir.

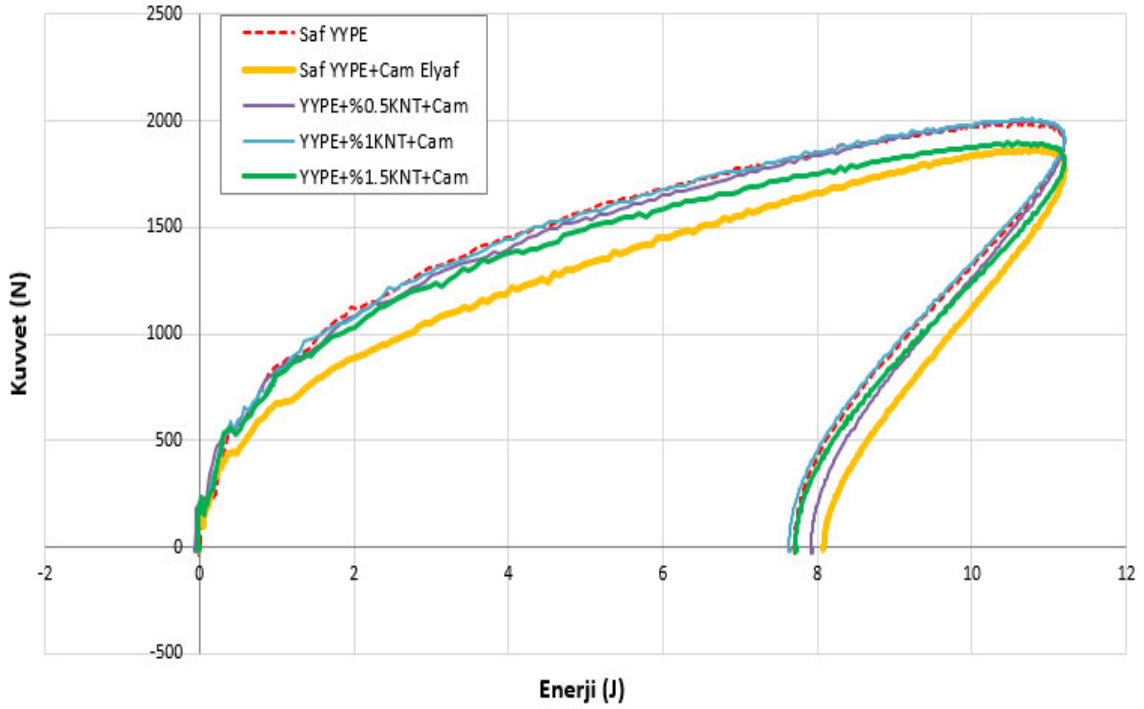
Takviye edilen KNT'ler YYPE ve cam elyafı malzemeye her bir takviye oranında birbirlerine yakın değerlerde esneklik kazandırmıştır. Cam elyaf ile sert ve rijit bir yapıya dönüşen YYPE hem KNT hem de cam elyaf takviyesiyle yeniden esnek özellik kazanmaya başladığı görülmüştür.

Uygulanan kuvvetler altında malzemelerin yer değiştirme miktarlarının zamanla değişim grafiği toplu olarak Şekil 5.7'de verilmiştir. Ayrıca Şekil 5.8'de uygulanan kuvvet altında enerji dağılımı grafiği verilmiştir.





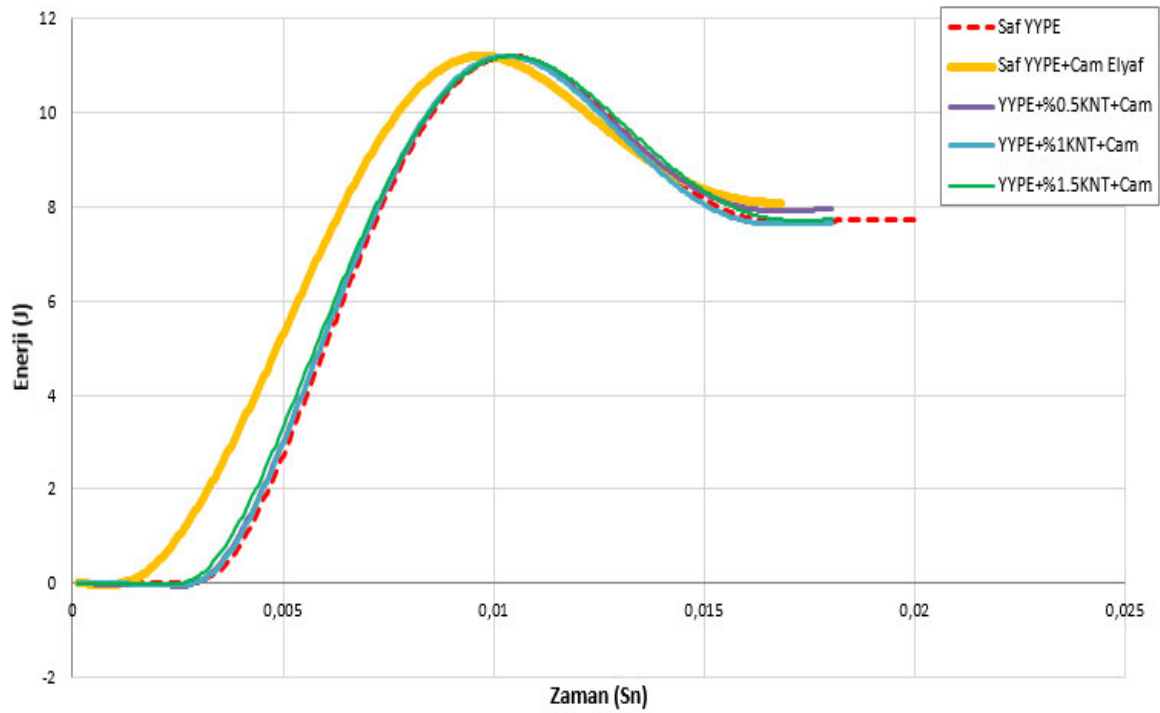
Şekil 5.7. Yer değiştirme-zaman grafiği



Şekil 5.8. Kuvvet-enerji grafiği

Düşük hızlı darbe deneyinde enerji, vurucu kütesinin belirli bir yükseklikten bırakılması nedeniyle elde edilen potansiyel enerjiden sağlanır. Vurucu kütenin serbest bırakılmasıyla birlikte potansiyel enerjiye dönüşür ve kütle daha önce belirlenen hızda numuneye çarpar. Kütlenin serbest bırakıldığı zamandan, darbe sonuçlanıncaya kadar geçen zaman içerisinde enerjide kayıplar ve absorbe edilen miktarlarla değişim meydana gelir.

Darbe sırasında çarpma anından itibaren darbenin tamamlanmasına kadar olan süre zarfında enerjinin dağılımı Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Enerji zaman dağılımı

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) içerisine ağırlıkça %0,5; %1 ve %1,5 oranlarında çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) ayrı ayrı ilave edilip, cam elyaf takviyesiyle sıcak pres makinası kullanılarak 4 mm plakalar halinde hibrit kompozit malzeme üretimi yapılmıştır. Saf YYPE, saf YYPE ve cam elyaf, üç farklı oranda ÇDKNT takviyeli YYPE ve cam elyaf olmak üzere toplam beş malzeme türü için deneyler yapılmış ve birbirleri arasındaki mukavemet değerlerinin değişimi incelenmiştir.

Hazırlanan kompozit plakalar ve YYPE plaka lazer kesim cihazında kesilerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler çekme deneyi, izod darbe deneyi ve düşük hızlı darbe deneyi olarak üç farklı deneye tabi tutulmuştur.

Yapılan deneylerde öncelikli olarak cam elyafın saf YYPE'ye takviye edilmesiyle ciddi bir mukavemet artışı sağlanmıştır. Cam elyafın sahip olduğu darbe dayanımı testler sonucunda elde edilen verilerle doğrulanmıştır. Ayrıca rijit bir yapıya sahip olmasından dolayı da sünek yapıdaki YYPE ile birleşerek tok bir kompozit elde edilmiştir.

YYPE ve cam elyafı malzemeye %0,5 oranında, %1 oranında ve %1,5 oranında takviye edilen ÇDKNT, bütün bu oranlarda malzemenin mukavemet değerlerini arttırmıştır. Ancak %0,5 ÇDKNT takviyesinde dayanım artış oranı çekme testinde %4,36 ve izod darbe testinde %34,59 iken, ÇDKNT takviye oranı %1,5'e çıktığında dayanım artış oranı çekme testinde %2,80, izod darbe testinde ise %6,41 olduğu gözlenmiştir. Bu durumda ÇDKNT takviye oranı arttıkça mukavemet değerleri artmaktadır, fakat mukavemet değerlerinin artış oranı da giderek azalmaktadır.

Yapılan karışım oranları ve üretim yöntemleri malzemenin deney sonuçlarını değiştirebilmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuca göre, YYPE'ye %1,5 oranından daha fazla nanotüp takviye edilerek üretim yapıp mukavemet değerleri incelenebilir. Bunun dışında %0,5'in altında oranlarda KNT takviyesi de yapılabilir. Karbon nanotüp, nano boyutta olması ve çok üstün özelliklere sahip olması sebebiyle bu takviye oranında da çalışmalar yapılabilir. Ayrıca, farklı üretim yöntemleri araştırılarak daha yüksek mukavemet değerleri elde edilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Shishevan, F. A., Acar, V., Akbulut H. ve Seydibeyođlu M.Ö. (2015). Reçinesine grafen ve karbon nanotüp eklenmesinin karbon elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri ve darbe davranışları üzerindeki etkileri. Mühendislikte Yeni Teknolojiler Konferansı, Bayburt.
2. Kara, Y. ve Akbulut, H. (2017). Karbon elyaf takviyeli karbon nanotüp katkılı epoksi kompozit helisel yayların mekanik davranışları. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(2), 417-427.
3. Korkmaz, N., Çakmak, E. ve Dayık, M. (2016). Dokuma karbon elyaf takviyeli karbon nano tüp-epoksi kompozit malzemelerin mekanik ve termal karakterizasyonu. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(2), 338-353.
4. Erem, A. D. ve Özcan G. (2013). Polimer esaslı nanokompozitler ve tekstil uygulamaları, *Tekstil ve Mühendis*, 20(89), 36-47.
5. Taşyürek, M. ve Tarakçıoğlu, N. (2015). Karbon nanotüp ile modifiye edilmiş filaman sarım boruların iç basınç altındaki hasar davranışı. *Politeknik Dergisi*, 18 (4), 211-217.
6. Küçükyıldırım, B. O. ve Eker, A. A. (2012). Karbon nanotüpler, sentezleme yöntemleri ve kullanım alanları. *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, 53(630), 34-44.
7. Tang, W., Santare, M.H., Advani, S. G. (2003). M elt processing and mechanical property characterization of multi-walled carbon nanotube/high density polyethylene (MWNT/HDPE) composite films. *Carbon*, 41, 2779-2785.
8. Johnson, B. B., Santare, M. H., Novotny, J. E., ve Advani, S. G. (2009). Wear behavior of carbon nanotube/high density polyethylene composites. *Mechanics of Materials*, 41, 1108-1115.
9. Mirik, M. (2010). Karbon nanotüp takviyeli yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) nanokompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin araştırılması. Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
10. Yakovleva, G., Pervushin, G., Maeva, I., Kerieneb, J., Pudov, I., Shaybadullina, A., Buryanov, C., Korzhenko, A. ve Senkov, S. (2013). Modification of construction materials with multi-walled carbon nanotubes. *Procedia Engineering*, 57, 407-413.
11. Yıldızhan, İ. (2013). Hibrit kompozit malzemelerde darbe davranışı. Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
12. Sevkate, E., Tumer, H., Kelestemur, M. H. ve Dogan, S. (2014). Effect of torsional strain-rate and lay-up sequences on the performance of hybrid composite shafts. *Materials and Design*, 60, 310-319.
13. Anggoro, B. M. (2015). Mechanical and gas permeability properties of nanocomposite films made from low density polyethylene and carbon nanotubes. Yüksek lisans tezi, İzmir Teknoloji Enstitüsü, İzmir.

14. Tekin, F. (2015). Nano-karbon ile güçlendirilmiş cam elyaf takviyeli kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin tespiti. Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
15. Gürkan, İ. (2015). Mechanical enhancement of woven composite with vertical aligned carbon nanotubes: investigation of interlaminar shear strength property of nano-stitched laminated composites. Yüksek lisan tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
16. Ağma, O. (2015). Karbon nanotüp takviyeli kompozit malzemelerin termal, elektriksel ve mekanik özelliklerinin tespiti. Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
17. Shahbaz, S. (2016). Investigation of the effect of carbon nanotubes on hybrid glass/carbon fiber reinforced composites. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
18. Tanın, M. (2016). Karbon nanotüp ve cam elyaf takviyeli yüksek yoğunluklu polietilen hibrit kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi. Yüksek lisans tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay.
19. Öner, G., Ünal, H. Y. ve Pekbey, Y. (2016). Experimental investigation of low-velocity impact response of plain-weave glass/epoxy composites reinforced with carbon nanotubes. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 87-97.
20. Demir, O., Karabulut, S. E., Ekrem, M. ve Eskizeybek, V. (2013). Glass-carbon fiber woven multiwall carbon nanotube doped epoxy hybrid nanocomposites. 6th International Conference on Carbon Nano Particle Based Composites, Leibniz Institute of Polymer Research, Dresden, Germany.
21. Gör, A. (2018). Elyaf takviyeli hibrit kompozit malzemelerin darbe davranışlarının incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Uşak Üniversitesi, Uşak.
22. Sönmez, M. (2009). Polimer matrisli kompozitlerin endüstri ürünleri tasarımında önemi ve geleceği: Türkiye'den dört firma üzerine bir inceleme. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
23. Kaya, A. İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech & Composites*, 38-45.
24. Yüce, İ. (2007). Dairesel kompozit tabakalarda düşük hızlı darbe hasarının incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
25. Asmatulu, R., Khan, W. S. Ve Ghaddar, M. H. (2015). Investigating the surface free energy changes of uv-exposed nanocomposite coatings on carbon fiber and glass fiber-reinforced composites. *Journal of Research in Applied Sciences*, 2(4), 119-130.
26. İnkaya, S. (2011). Dünyada ve Türkiye'de kompozit sektörü. *Mühendis ve Makina*, 52(613), 30-34.
27. Kalemtaş, A. (2014). Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış. *Putech & Composites*, 18-30.

28. İnternet: Eker, A. A. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri. URL: <https://tr.scribd.com/document/329677429/METAL-MATR%C4%B0SL%C4%B0-KOMPOZ%C4%B0T-MALZEMELER-pdf>, Son Erişim Tarihi: 17.03.2018.
29. Şenel, M. C., Gürbüz, M. ve Koç, E. (2015). Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler. *Mühendis ve Makina*, 56(669), 36-47.
30. Kalemtaş, A. (2015). Seramik matrisli kompozitler. *Putech & Composites*, 20-26.
31. Fidan, S. (2011). Polimer matrisli kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi ve oluşan hasarların mikro tomografi yöntemiyle incelenmesi. Doktora tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
32. İnternet: Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması. URL: [http://www.teknolojikarastirmalar.com/egitim/yapi\\_malzemesi/icerik/kompozit.htm#KOMPOZ%C4%B0T%20MALZEMELER%C4%B0N%20SINIFLANDIRILMASI](http://www.teknolojikarastirmalar.com/egitim/yapi_malzemesi/icerik/kompozit.htm#KOMPOZ%C4%B0T%20MALZEMELER%C4%B0N%20SINIFLANDIRILMASI), Son Erişim Tarihi: 26.03.2018.
33. Yenigün, E. Ö. (2017). Karbon nanotüp-polimer nanokompozitlerde çok boyutlu modelleme ile arayüz özelliklerinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 20(3), 503-511.
34. Özer, M., Yazman, S., Gemi, L. ve Akdemir, A. (2016). Investigation on mechanical and physical properties of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CNT reinforced epoxy/hybrid nanocomposites. 16 th International Materials Symposium IMSP2016 Bildiri Kitabı, S: 767-774.
35. Mirik, M., Taşyürek, M. ve Ekinci Ş. (2015). Charpy impact resistances of carbon nanotubes reinforced high density polyethylene nanocomposite materials. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 4(4), 247-250.
36. Hu, K., Kulkarni, D. D., Choi, I. ve Tsukruk, V. V. (2014). Graphene-polymer nanocomposites for structural and functional applications. *Progress in Polymer Science*, 39 (2014), 1934-1972.
37. Kaştan, A. (2016). Polimerik malzemelerin darbe dayanımına nano katkıların etkisi. *Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 4(2), 78-84.
38. Zeren, F. (2013). Değişik oranlarda nano ve mikro boyutlardaki CaCO<sub>3</sub>'ün yüksek yoğunluklu polietilenin özelliklerine etkilerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
39. Ajayan, P. M., Schadler, L. S. Ve Braun, P. V. (2003). Nanocomposite science and technology. ISBN: 3-527-30359-6.
40. Araujo, J.R., Waldman, W. R. ve De Paoli M. A. (2008). Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibers: Coupling agent effect. *Polymer Degradation and Stability*, 93(2008), 1770-1775.
41. İnternet: Petkim Ürün Özellikleri Kataloğu, Termoplastikler. URL: [http://www.petkim.com.tr/UserFiles/file/uretim/urun\\_katalogu.pdf](http://www.petkim.com.tr/UserFiles/file/uretim/urun_katalogu.pdf), Son Erişim Tarihi: 04.04.2018.

42. İnternet: Termoplastikler Genel Ticari Plastikler. URL: [http://www.bayar.edu.tr/besergil/5\\_polietilen.pdf](http://www.bayar.edu.tr/besergil/5_polietilen.pdf), Son Erişim Tarihi: 07.04.2018.
43. Düşünceli, N. ve Çolak, Ö. Ü. (2007). İmalat yöntemlerinin yüksek yoğunluklu polietilenin (YYPE) tek eksenli çekme davranışı üzerindeki etkisi. 8. Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, İstanbul, S: 290-301.
44. Bensason, S., Minick, J., Moet, A., Chum, S., Hiltner, A. ve Baer, E. (1996). Classification of homogeneous ethylene-octene copolymers based on comonomer content. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, 34, 1301-1315.
45. İnternet: Mutlay, İ. Karbon Nanotüpler: Özellikler ve Uygulamalar. URL: <http://grafen.com.tr/pdf/1459186118.pdf>, Son Erişim Tarihi: 12.01.2018.
46. Lee, J. Y., Kang, T.-H., Choi, J. H., Choi, I.-S. ve Yu, W. R. (2018). Improved electrical conductivity of poly (ethylene oxide) nanofibers using multiwalled carbon nanotubes. *AIP Advances*, 8, 035024.
47. Wang, L., Hou, F., Wang, X., Liu, J. ve Guo, A. (2015). Preparation and mechanical properties of continuous carbon nanotube networks modified Cf/SiC composite. *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2015, Article ID 465358.
48. Garg, M., Sharma, S. ve Mehta, R. (2016). Carbon nanotube-reinforced glass fiber epoxy composite laminates exposed to hygrothermal conditioning. *J Mater Sci*, 51, 8562-8578.
49. De Volder, M. F. L., Tawfick, S. H., Baughman, R. H. ve Hart, A. J. (2013). Carbon nanotubes: present and future commercial applications. *Science*, 339, 535-539.
50. Ren, Z. F., Huang, Z. P., Xu, J. W., Wang, J. H., Bush, P., Siegal, M. P. Ve Provencio, P. N. (1998). *Science*, 282, 1105-1107.
51. Yağlıkçı, S. (2012). Karbon nanotüp üretiminde katalizörün gaz fazı derişim profiline etkisinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara.
52. Doğan, N. (2013). Karbon nanotüplerin ısı analizi. Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
53. İnternet: Balls from Fury: Buckminsterfullerene (C60). URL: <https://bcachemistry.wordpress.com/tag/buckyballs/>, Son Erişim Tarihi: 19.04.2018.
54. Çınar, N. (2012) Karbon nanotüp üretiminde hidrojen redüksiyon etkisinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
55. Lijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Natura*, 354, 56-58.
56. Yuca, N. (2012). Karbon nanotüplerin çeşitli yöntemlerle saflaştırılması. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
57. Terrones, M. (2003). Science and technology of the twenty-first century: Synthesis, properties and applications of carbon nanotubes. *Annual Review of Materials Research*, 33, 419-501.

58. Charlier, J. C., Blase, X. Ve Roche, S. (2007). Electronic and transport properties of nanotubes. *Reviews of Modern Physics*, 0034-6861, 79(2), 677-732.
59. Latorre, C. H., Méndez, J. A., García, J. B., Martín, S. G. ve Crecente, R. M. P. (2014). Characterization of carbon nanotubes and analytical methods for their determination in environmental and biological samples: A review. *Analytica Chimica Acta*. ACA 233517.
60. Zeng, S., Shen, M., Duan, P., Lu, F., Cheng, S. ve Li, Z. (2017). Properties of MWCNT-glass fiber fabric multiscale composites: mechanical properties, interlaminar adhesion, and thermal conductivity. *Textile Research Journal*, 0(00), 1-15.
61. Devaraj, S. J., Suresh, B. A., (2015). Influence of functionalized multi-walled carbon nanotubes on mechanical properties of glass fiber reinforced polyester composites. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 22, 167-174.
62. Lehman, J. H., Terrones, M., Mansfield, E., Hurst, K. E. Ve Meunier, V. (2011). Evaluating the characteristics of multiwall carbon nanotubes. *Carbon*, 49, 2581-2602.
63. İnternet: Nanotubes and Carbon Fibers. URL: <https://worldofnanoscience.weebly.com/nanotube--carbon-fiber-overview.html>, Son Erişim Tarihi: 10.02.2018.
64. Adnan, A., Ferdous, S. F. And Khan, M. R. (2015). Computational design and mechanical behavior of carbon nanotube reinforced LDPE/Nylon 6 hybrid polymer nanocomposites. Conference: American Society for Composites.
65. Gülcan, İ. (2011). Karbon nanotüplerde hidrojen depolanması. Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
66. Mutlay, İ. (2007). Sürekli karbon nanotüp üretimi. Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara.
67. Eatemadi, A. ve diğerleri (2014). Carbon nanotubes: properties, synthesis, purification, and medical applications. *Nanoscale Research Letters*, 2014, 9:393.
68. Altay, M. C. Ve Eroğlu, Ş. (2014). Karbon nanotüp sentezi için metan gazının kullanımı. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14 (2014), OZ5739, 249-253.
69. Szabó, A. ve diğerleri (2010). Synthesis methods of carbon nanotubes and related materials. *Materials*, 3, 3092-3140.
70. Liu, W. W., Chai, S. P., Mohamed, A. R. ve 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(2014), 1171-1185.
71. Shah. K. A. (2016). Synthesis of carbon nanotubes by catalytic chemical vapour deposition: A review on carbon sources, catalyst and substrates. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 41(2016), 67-82.



72. Kazakov, I. A. ve Krasnovskii, A. N. (2016). Effect of functionalized multiwalled carbon nanotubes on the feasibility of fabrication of composite glass fiber reinforced plastic rebars. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 89(8), 1309-1316.
73. Ulus, H., Üstün, T., Şahin, Ö. S., Karabulut, S. E., Eskizeybek, V., Avcı, A. (2016). Low-velocity impact behavior of carbon fiber/epoxy multiscale hybrid nanocomposites reinforced with multiwalled carbon nanotubes and boron nitride nanoplates. *Journal of Composite Materials*, 0(0) 1-10.
74. He, H., Ai, L., Huy, P., Dramou, P., Xiao, D., Zuo, P., and Huy, C. P. (2013). Carbon nanotubes: applications in pharmacy and medicine. *BioMed Research International*, Volume 2013, Article ID 578290.
75. Karami, A., Bahabadi, M. A. A., Delfani, S. ve Ghozatloo, A. (2014). A new application of carbon nanotubes nanofluid as working fluid of low-temperature direct absorption solar collector. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 121, 114-118.
76. Roh, E., Hwang, B. U., Kim, D., Kim, B. Y. ve Leei N. E. (2015). Stretchable, transparent, ultrasensitive, and patchable strain sensor for human-machine interfaces comprising a nanohybrid of carbon nanotubes and conductive elastomers. *American Chemical Society (ACS NANO)*, 9(6), 6252-6261.
77. Marega, R. ve Bonifazi, D. (2013). Filling carbon nanotubes for nanobiotechnological applications. *New Journal of Chemistry*, 38, 22-27.
78. İnternet: Cam Elyaf. Akcihan Cam Geri Dönüşüm. URL: <https://www.camkumu.com/pdf/akcihan-cam-elyaf.pdf>, Son Erişim Tarihi: 28.04.2018.
79. İnternet: Cam Lifleri. URL: <http://www.tekniktekilller.com/articles/cam-lifleri/>, Son Erişim Tarihi: 28.04.2018.
80. Özdemir, D., Mecit, H. D., Seventekin, N. ve Öktem, T. (2006). Cam lifleri. *Tekstil ve konfeksiyon*, 1, 281-287.
81. İnternet: Cam Elyafı (Fiberglass). URL: <http://www.fibercamelyaf.com/cam%20elyaf%20urunler.html>, Son Erişim Tarihi: 25.04. 2018.
82. Yılmaz, İ. N. ve Taşdelen M. A. (2018). Cam elyaf katkılı poliamid 66/poliftalamid karışımlarının hazırlanması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(1), 285-293.
83. Slobodian, P., Pertegás, S. L., Riha, P., Matyas, J., Olejnik, R., Schledjewski, R. ve Kovar, M. (2017). Glass fiber/epoxy composites with integrated layer of carbon nanotubes for deformation detection. *Composites Science and Technology*, Vol 113, S0266-3538(17)31519-1.

84. Bayraktar, Ş. ve Turgut, Y. (2013). Elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin talaşlı şekillendirilebilirliği. 1. Uluslararası Plastik ve Kauçuk Teknolojileri Sempozyumu ve Sergisi Bildirileri, S: 9-18.
85. Türkmen, İ. ve Köksal, N. S. (2013). Cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozit malzemelerde (CTP) elyaf tabaka sayısına bağlı mekanik özelliklerin ve darbe dayanımının incelenmesi. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 17-30.
86. Sezgin, H. ve Berkalp, Ö. B. (2016). The effect of hybridization on significant characteristics of jute/glass and jute/carbon-reinforced composites. *Journal of Industrial Textiles*, 0(00), 1-14.
87. Takmaz, A., Erkan, Ö. ve Yücel, E. (2016). Cam elyaf takviyeli plastik kompozit malzemenin kenar frezelenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin istatistiksel olarak incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2016), 567-573.
88. Bozkurt, Ö. Y., Özbek, Ö. ve Bulut, M. (2016). Damping and vibration behavior of adhesively bonded glass fiber reinforced composite laminates. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(1), 61-67.
89. Çelik, Y. H. ve Kılıçkap, E. (2016). Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit çubukların aşınma davranışlarının araştırılması. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 13(3), 69-75.
90. Ramesh, M., Palanikumar, K. ve Reddy, K. H. (2013). Comparative evaluation on properties of hybrid glass fiber- sisal/jute reinforced epoxy composites. *Procedia Engineering*, 51, 745-750.
91. Zhang, Y., Li, Y., Ma, H. ve Yu, T. (2013). Tensile and interfacial properties of unidirectional flax/glass fiber reinforced hybrid composites. *Composites Science and Technology*, 88, 172-177.
92. Al Maadeed, M.A., Ouederni, M. ve Khanam, P. N. (2013). Effect of chain structure on the properties of glass fibre/polyethylene Composites. *Materials and Design*, 47, 725-730.
93. Ma, P. C., ve Zhang, Y. (2014). Perspectives of carbon nanotubes/polymer nanocomposites for wind blade materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 651-66.
94. Chunzheng, P. (2014). The effect of surface coating of CNTs on the mechanical properties of CF-filled HDPE composites. *Surface and Interface Analysis*, 47(3).
95. Karaca, F. (2016). Cam elyaf takviyeli plastik kompozitlerde delme parametrelerinin deformasyon faktörüne etkisinin araştırılması. *Firat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 23-27.

96. Hao, B., Ma, Q., Yang, S., Mäder, E. ve Ma, P.C. (2016). Comparative study on monitoring structural damage in fiber-reinforced polymers using glass fibers with carbon nanotubes and graphene coating, *Composites Science and Technology*, 129, 38-45.
97. Esendemir, Ü. ve Varol, R. (2017). Cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin eğilme yorulma davranışının belirlenmesi. *MCBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 23(1), 27-39.
98. Öner, G., Ünal, H. Y. ve Pekbey, Y. (2017). Karbon nanotüp katkılı camlıfi-epoksi Kompozitlerin termal ve eğilme özelliklerinin araştırılması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(4), 805-816.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GÜĞÜL, Hakan  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 08.09.1989, Anamur  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon :  
 Faks :  
 E-mail : [hgugul@hotmail.com](mailto:hgugul@hotmail.com)



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2018
Lisans	Mustafa Kemal Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2012
Lise	Anamur Anadolu Lisesi	2007

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-Halen	TEKNİKA A.Ş.	Mühendis
2013	ZE GRUP MAKİNE LTD. ŞTİ.	Mühendis

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayımlar

-

### Hobiler

Bilgisayar, Futbol, Müzik.

## DİZİN

### A

Abstract · v  
akma dayanımı · 53, 54

### C

Cam elyaf · 1, 35, 36, 46, 60

### Ç

çekme dayanımı · 27, 28  
çekme deneyi · 37, 47, 48, 54  
çekme gerilmesi · 49  
çentik · 50, 57  
çift vidalı ekstruder · 40  
Çizelge · ix, 28, 55  
Çok duvarlı karbon nanotüp · 26

### D

darbe dayanımı · 21, 56  
dayanım · 53, 56  
deney numunesi · 42  
deplasman · 52, 59  
düşük hızlı darbe deneyi · 47

### E

esnek · 58, 60

### G

Giriş · 1  
grafik · 58, 59  
granül · 37

### H

hibrit · 2, 15, 16, 44, 55, 58

### İ

İçindekiler · vii  
izod darbe deneyi · 37, 47

### K

kalıp · 42, 43, 44  
karbon · 22  
Karbon nanotüp · 1, 2, 22, 26, 29, 34, 57  
Kaynaklar · 64  
kompozit · 1, 2, 7, 16, 36, 37, 44, 46, 47, 55  
kuvvet · 49, 53, 54, 59, 60

### L

literatür · 5

### M

maksimum gerilme · 53  
manyetik karıştırıcı · 39  
Materyal · 18  
matris · 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 44  
mekanik özellikler · 21, 27  
mukavemet · 1, 21, 36, 46, 53, 54, 56, 57  
mukavemet değerleri · 21, 36

### N

nanokompozit · 1, 17  
numune · 50, 52, 55

### Ö

özellik · 13, 60  
Özet · iv  
Özgeçmiş · 72

### P

plaka · 42, 44, 46  
polietilen · 15  
Polimer malzeme · 13

### R

Resim · xvi, xvii, 11, 15, 17, 19, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 34, 36, 37, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 55, 57, 59  
rijit · 54, 58, 60

### S

sıcak pres makinası · 42, 46  
Sonuç ve Öneriler · 63  
sünek · 54, 60

### Ş

Şekil · xv, 9, 20, 24, 30, 31, 33, 35, 53, 54, 56, 58, 59, 60, 61, 62

### T

takviye · 6  
Tarihçe · 6  
Teşekkür · vi

### U

ultrasonik karıştırıcı · 38  
uzama · 49, 53, 54, 55

### Ü

üretim · 20, 29, 35, 42, 46

### Y

yer değiştirme · 60  
Yöntem · 37  
Yüksek yoğunluklu polietilen · 18



**TEKNOVERSITE**



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

