



**KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ
TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ
VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**2023
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ**

Muhammed Umut KİBAR

**Tez Danışmanı
Dr. Öğretim Üyesi Musa YILDIRIM**

**KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN
ÜRETİLMESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Muhammed Umut KİBAR

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Musa YILDIRIM

T.C.

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Aralık 2023

Muhammed Umut KİBAR tarafından hazırlanan “KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Musa YILDIRIM

.....

Tez Danışmanı, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 01/12/2023

Unvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Suat ALTUN (KBU)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Bekir YAVUZER (BU)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Musa YILDIRIM (KBU)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Muhammed Umut KİBAR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Muhammed Umut KİBAR

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Musa YILDIRIM

Aralık 2023, 95 sayfa

Bu çalışmada, yüksek yoğunluklu polietilen malzemesine 4 farklı oranda (%0,125, %0,250, %0,5 ve %1) karbon nanotüp ilave edilerek üretilen polimer kompozitlerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında karbon nanotüpün aglomerasyonunu engellemek ve homojen bir karışım elde etmek amacıyla yüksek yoğunluklu polietilen ve karbon nanotüp kübik karıştırma, asetonla karıştırma ve asitle yüzey modifikasyon işlemi olacak şekilde 3 farklı metot ile karıştırılarak arkasından sırası ile tek vidalı ekstrüzyon ardından enjeksiyon kalıplama ile kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin mikroyapı incelemeleri taramalı elektron mikroskobu ile yapılmış, mekanik özellikleri çekme testi ve üç nokta eğme testi ile belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonrasında, ilave edilen KNT ile çekme, eğme dayanımının kübik karıştırma ve asetonla karıştırma yönteminde arttığı, çekme ve eğme testleri sonucunda en yüksek dayanım değerleri aseton ile karıştırılmış %0,5 KNT ilaveli kompozitlerde ölçülmüştür. Asitle yüzey modifikasyonu uygulanarak üretilen KNT/YYPE kompozitlerde ise ana malzemeye göre çekme ve üç

nokta eğme dayanımı değerlerinde düşüş yaşanmıştır. Üretilen kompozitlerin mikro yapısında karbon nanotüp takviyesinin artmasıyla aglomerasyon olduğu gözlemlenmiş, artan karbon nanotüp miktarına bağlı olarak %1 KNT ilaveli kompozitlerde çekme dayanımının aglomerasyona bağlı olarak azaldığı görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Karbon nanotüp, Yüksek yoğunluklu polietilen, Polimer matrisli kompozit, Mekanik özellikler

Bilim Kodu : 91417

ABSTRACT

Master Thesis

THE PRODUCTION AND INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON NANOTUBE REINFORCED THERMOPLASTIC COMPOSITES

Muhammed Umut KİBAR

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Industrial Design Engineering

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Musa YILDIRIM

December 2023, 95 pages

In this study, the microstructural and mechanical properties of polymer composites produced by adding carbon nanotubes to high density polyethylene material at 4 different ratios (0.125%, 0.250%, 0.5% and 1%) were investigated. Within the scope of the study, in order to prevent agglomeration of carbon nanotube and to obtain a homogeneous mixture, high density polyethylene and carbon nanotube were mixed with 3 different methods as cubic mixing, acetone mixing and acid surface modification process and then composites were produced by single screw extrusion and injection moulding, respectively. The microstructure examinations of the produced composite materials were examined by scanning electron microscopy and their mechanical properties were determined by tensile test and three-point bending test. As a result of the study, it was found that the tensile and flexural strength increased with the addition of CNT in cubic mixing and acetone mixing methods, and

the highest strength values in tensile and flexural tests were measured in composites with 0.5% CNT addition mixed with acetone. In the CNT/ HDPE composites produced by surface modification with acid, there was a decrease in tensile and three-point bending strength values compared to the base material. It was observed that agglomeration occurred in the microstructure of the composites produced with increasing carbon nanotube reinforcement, and it was seen that the tensile strength of composites with 1% CNT addition decreased due to agglomeration due to increasing carbon nanotube amount.

Keywords : Carbon nanotube, High density polyethylene, Polymer matrix composite, Mechanical properties

Science Code : 91417

TEŞEKKÜR

Tez alıőmamım s¼recinde ve eğitim planlanmasında, araőtırılmasında, y¼r¼t¼lmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecr¼belerinden yararlandığım, y¼nlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ıőıęında őekillendiren sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Musa YILDIRIM'a sonsuz teőekk¼rlerimi sunarım.

Bu Y¼ksek Lisans Tez çalışmasında yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Suat ALTUN'a, Karab¼k niversitesi Orman Fak¼ltesi laboratuvarlarında çekme ve eğme testlerinde yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. H¼seyin YÖR¼R'e teőekk¼rlerimi sunarım.

Sevgili aileme, maddi ve manevi yardımlarını benden esirgemedен her zaman yanımda oldukları için teőekk¼rlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISATLMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	6
KOMPOZİTLER	6
2.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN TANIMI	7
2.2. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI.....	7
2.2.1. Matris Malzemelerine Göre.....	9
2.2.1.1. Polimer Matrisli Kompozitler	9
2.2.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler	12
2.2.1.3. Metal Matrisli Kompozitler	13
2.2.1.4. Karbon-Karbon Kompozitler	15
2.2.2. Takviye Elemanlarına Göre.....	16
2.2.2.1. Elyaf Takviyeli Kompozitler	16
2.2.2.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler	17
2.2.2.3. Tabakalı Kompozitler	17
2.2.2.4. Karma (Hibrit) Takviyeli Kompozitler	18

	<u>Sayfa</u>
2.2.3. Nanokompozitler	18
2.3. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	20
2.3.1. Elle Yatırma Yöntemi (Hand Lay-Up).....	21
2.3.2. Püskürtme Yöntemi (Spray-Up).....	22
2.3.3. Filament Sarma Yöntemi (Filament Winding).....	22
2.3.4. Reçine Transfer Kalıplama (Resin Transfer Molding).....	23
2.3.5. Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi.....	24
2.3.6. Pultrüzyon (CTP Profil İmalat Yöntemi)	25
2.3.7. Savurma Döküm	25
BÖLÜM 3	27
YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN (YYPE).....	27
BÖLÜM 4	35
KARBON NANOTÜP.....	35
4.1. KARBON NANOTÜP TAKVİYESİ İLE ÜRETİLEN POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	42
BÖLÜM 5	45
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	45
5.1. GİRİŞ.....	45
5.2. MATRİS VE TAKVİYE ELEMANLARININ HAZIRLANMASI	48
5.2.1. Matris ve Takviye Elemanlarının Karıştırılması	49
BÖLÜM 6	57
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	57
6.1. ÇEKME DENEYİ TESTİ SONUÇLARININ İNCELENMESİ.....	57
6.2. ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ SONUÇLARININ İNCELENMESİ.....	70
6.3. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Görüntü Analizi Sonuçları.....	75
BÖLÜM 7	82
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	82

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR	84
ÖZGEÇMİŞ	95

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2. 1. Kompozit malzeme bileşenleri	9
Şekil 2. 2. Takviye malzemesinin geometrik yapılarına göre yapıları	14
Şekil 2. 3. Karbon-Karbon kompozit prosesleri	15
Şekil 2. 4. Kompozitlerin şekil-yerleşim durumu a) elyafı , b) parçacıklı, c) tabakalı, d) karma	16
Şekil 2. 5. Nano seviyedeki dolgu malzemelerin şematik görselleri	19
Şekil 2. 6. Elle yatırma yöntemi.....	21
Şekil 2. 7. Püskürtme yöntemi	22
Şekil 2. 8. Filament sarma uygulaması şematik gösterimi.....	23
Şekil 2. 9. Reçine transfe kalıplama şematik gösterimi.	23
Şekil 2. 10. Enjeksiyon kalıplama şematik gösterimi.	24
Şekil 2. 11. Pultrüzyon şematik gösterimi	25
Şekil 2. 12. Savurma döküm yöntemi şematik gösterimi.	26
Şekil 3. 1. Polimerlerin performans piramidi.....	27
Şekil 3. 2. YYPE üretim şeması	30
Şekil 4. 1. Boyut Karşılaştırmaları	36
Şekil 4. 2. Grafit yapısının şematik gösterimi.	37
Şekil 4. 3. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüplerin 3 boyutlu modeli.	38
Şekil 4. 4. Tek duvarlı karbon nanotüp a) TDNT'lerin TEM görüntüsü, b) TDNT'nin şematik yapısı, c) TDNT demetleri.	40
Şekil 4. 5. Çok duvarlı karbon nanotüp a) yanal TEM görüntüsü, b) yüksek çözünürlüklü yanal TEM görüntüsü, c) Tem ön kesit görüntüsü, d) ÇDNT'nin şematik yapısı.....	41
Şekil 5. 1. KBÜ- Teknoloji fakültesi atolyesi endüstriyel tip öğütücü değirmen	46
Şekil 5. 2. Saf YYPE numunelerinin üretim aşaması	47
Şekil 5. 3. Kübik karıştırıcı yöntemiyle KNT ile YYPE numunelerinin üretim aşaması.....	47
Şekil 5. 4. Aseton ile karıştırma yöntemiyle KNT ile YYPE numunelerinin üretimi	47
Şekil 5. 5. Asit ile yüzey modifikasyonu uygulanmış KNT ile YYP numunelerinin üretimi.....	47
Şekil 5. 6. Toz YYPE malzemesinin fırınlanarak neminin alınması	48

Şekil 5. 7. Karbon nanotüplerin hassas ölçülerde tartılması	48
Şekil 5. 8. Kübik karıştırıcı	51
Şekil 5. 9. Kudos SK3300H ultrasonik banyo	51
Şekil 5. 10. Tek vidalı ekstrüder görüntüsü	52
Şekil 5. 11. Kırıcı yardımıyla filament öğütme işlemi ve elde edilen granül KNT ve YYPE hammaddesi.....	53
Şekil 5. 12. Plastik enjeksiyon çekme testi numunelerinin alınması	53
Şekil 5. 13. ASTM D638 TYPE I standartlarına göre çekme numunesi	54
Şekil 5. 14. Zwick/Roell çekme test cihazı	54
Şekil 5. 15. Üç nokta eğme testi için hazırlanan numune ölçüleri.....	55
Şekil 5. 16. Karabük Demir Çelik Enstitüsü SEM laboratuvarı	56
Şekil 6. 1. Saf YYPE çekme numunelerinin gerilim-gerinim grafiği.....	57
Şekil 6. 2. %0,125 KB-KNT/YYPE çekme numunelerinin gerilim-gerinim grafiği. 58	
Şekil 6. 3. %0.250 KB-KNT/YYPE çekme numunelerinin gerilim-gerinim grafiği. 58	
Şekil 6. 4. %0,5 KB-KNT/YYPE çekme numunelerinin gerilim-gerinim grafiği.....	59
Şekil 6. 5. %1 KB-KNT/YYPE çekme numunelerinin gerilim-gerinim grafiği.....	59
Şekil 6. 6. Saf YYPE ve KB/KNT-YYPE kompozitlerin çekme testi sonuçlarının ortalama grafiği.....	60
Şekil 6. 7. Aseton ile yıkanmış %0.125 KNT / YYPE numunelerinin gerilim-gerinim grafiği.....	61
Şekil 6. 8. Aseton ile yıkanmış %0.250 KNT / YYPE numunelerinin gerilim-gerinim grafiği.....	61
Şekil 6. 9. Aseton ile yıkanmış %0.500 KNT / YYPE numunelerinin gerilim-gerinim grafiği.....	62
Şekil 6. 10. Aseton ile yıkanmış %1 KNT / YYPE numunelerinin gerilim-gerinim grafiği.....	62
Şekil 6. 11. Aseton ile yıkanmış KNT Katkılı YYPE numune çekme deneyi testi sonuçlarının ortalama grafiği.....	63
Şekil 6. 12. Sülfirik Asit/Nitrik Asit Yüzey modifikasyonlu %0.125 KNT / YYPE numunelerinin gerilim-gerinim grafiği	64
Şekil 6. 13. Sülfirik Asit/Nitrik Asit Yüzey modifikasyonlu %0.250 KNT / YYPE numunelerinin gerilim-gerinim grafiği	64
Şekil 6. 14. Sülfirik Asit/Nitrik Asit Yüzey modifikasyonlu %0,5 KNT / YYPE numunelerinin gerilim-gerinim grafiği	65
Şekil 6. 15. Sülfirik Asit/Nitrik Asit Yüzey modifikasyonlu %1 KNT / YYPE numunelerinin gerilim-gerinim grafiği	65

Şekil 6. 16. Nitrik Asit ve Sülfirik Asit yüzey modifikasyonlu KNT Katkılı YYPE numune çekme deneyi testi sonuçlarının ortalama grafiği	66
Şekil 6. 17. %0,125 KNT ilave edilmiş kompozit numunelerin çekme testi sonuçları.....	67
Şekil 6. 18. %0,250 KNT ilave edilmiş kompozit malzemelerin çekme testi sonuçları.....	67
Şekil 6. 19. %0,5 KNT ilave edilmiş kompozit numunelerinin çekme testi sonuçları.....	68
Şekil 6. 20. %1 KNT ilave edilmiş kompozit numunelerin çekme testi sonucu.....	68
Şekil 6. 21. Toz haldeki Saf YYPE ve KB-KNT/YYPE numunelerinden elde edilen eğilme testi sonuçları	70
Şekil 6. 22. Asetonla yıkanmış KNT katkılı YYPE numunelerinden elde edilen eğilme testi sonuçları	71
Şekil 6. 23. Asit Yüzey Modifikasyonlu KNT katkılı YYPE numunelerinden elde edilen eğilme testi sonuçları	72
Şekil 6. 24. %0,125 KNT numune grubu eğilme elastisite modülü değerleri	72
Şekil 6. 25. %0,125 KNT numune grubu eğilme direnci değerleri.....	73
Şekil 6. 26. %0,250 KNT numune grubu eğilme elastisite modülü değerleri	73
Şekil 6. 27. %0,250 KNT numune grubu eğilme direnci değerleri.....	73
Şekil 6. 28. %0,5 KNT numune grubu eğilme elastisite modülü değerleri	74
Şekil 6. 29. %0,5 KNT numune grubu eğilme direnci değerleri.....	74
Şekil 6. 30. %1 KNT numune grubu eğilme elastisite modülü değerleri	74
Şekil 6. 31. %1 KNT numune grubu eğilme direnci değerleri.....	75
Şekil 6. 32. Üç farklı karıştırma tekniğiyle %0.125 KNT ilave edilen kompozitlerin SEM görüntüleri; a) %0.125 KB-KNT/YYPE(5kx), b) %0.125 KB-KNT/YYPE(20kx), c) %0.125 AS-KNT/YYPE(5kx), d) %0.125 AS-KNT/YYPE(20kx), e) %0.125 Asit-KNT/YYPE(5kx), f) %0.125 Asit-KNT/YYPE(20kx).....	76
Şekil 6. 33. %0,125 KB-KNT/YYPE EDX Nokta Analizi.....	77
Şekil 6. 34. %0,125 AS-KNT/YYPE Mapping Analizi.....	77
Şekil 6. 35. %0,125 Asit-KNT/YYPE Mapping Analizi	78
Şekil 6. 36. Üç farklı karıştırma tekniğiyle %1 KNT ilave edilen kompozitlerin SEM görüntüleri; a) %1 KB-KNT/YYPE(5kx), b) %1 KB-KNT/YYPE(20kx), c) %1 AS-KNT/YYPE(5kx), d) %1 AS-KNT/YYPE(20kx), e) %1 Asit-KNT/YYPE(5kx), f) %1 Asit-KNT/YYPE(20kx)	79
Şekil 6. 37. %1 AS-KNT/YYPE EDX Line Analizi.....	80

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2. 1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	8
Çizelge 3. 1. Bazı termoplastiklerin kimyasal gösterimi ve erime sıcaklıkları.....	28
Çizelge 3. 2. Polietilen (YYPE)'in fiziksel özellikleri.....	29
Çizelge 5. 1. Petilen YY 1668 YYPE özellikleri	45
Çizelge 5. 2. KNT ve YYPE karışım ağırlık oranları	49
Çizelge 5. 3. KNT ve YYPE karıştırma yöntemleri	50

SİMGELER VE KISATLMALAR DİZİNİ

SİMGELER

°C	: Santigrat derece (sıcaklık)
nm	: Nanometre
dk	: Dakika
Dev/dk	: Devir/dakika
T _c	: Kristalleşme sıcaklığı
N	: Polimerleşme derecesi

KISALTMALAR

PE	: Polietilen
KNT	: Karbon Nanotüp
YYPE	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen
AYPE	: Alçak Yoğunluklu Polietilen
LAYPE	: Lineer Alçak Yoğunluklu Polietilen
PP	: Polipropilen
TDNT	: Tek Duvarlı Karbon Nanotüp
ÇDNT	: Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
ASTM	: American Society For Testing And Materials (Amerika Test ve Malzeme Topluluğu)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Teknolojinin hızla ilerlemesi ve insanların her geçen gün artan ihtiyaçları, yeni ve yenilikçi malzemelerin araştırılmasına yol açmaktadır. Bu yeni nesil malzemeler, genellikle kompozitler olarak adlandırılır ve farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulurlar. Kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip malzemelerin avantajlarını bir araya getirerek çeşitli endüstrilerde geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Geleneksel malzemelerin sınırlamalarını aşmayı amaçlayan bu malzemeler, çeşitli mühendislik problemlerinin üstesinden gelmede büyük bir potansiyele sahiptirler (Golewski, 2022).

Kompozit malzemeler, makroskobik düzeyde bir araya getirilen ve birbiri içerisinde çözünmeyen iki veya daha fazla bileşenden oluşan yapısal bir malzemedir. Bileşenlerden biri takviye fazı, içerisine gömüldüğü bileşen ise matris olarak adlandırılır. Bu tür kompozit malzemelerin temel bileşenleri de takviye ve matrislerdir. Takviyeler ise kompozitin esas yapısını oluşturan unsurlar olarak öne çıkmaktadır (Kaw, 2006).

İlave edilen takviye elemanları kompozitin dayanıklılığını artırır, termal gerilmelere karşı direnç sağlar, mekanik ve termomekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirir. Matris ise kompozit yapıdaki takviyeleri dış etkenlerden koruyan bir koruyucu tabaka gibi görev yapar. Matris bileşenler takviyelerin sabitlenmesini ve düzenlenmesini sağlar, böylece kompozitin istenen özelliklere sahip olmasına yardımcı olmaktadır (Gur vd, 2017). Takviye fazı, fiberler veya parçacıklar formunda olabilir ve matris fazındaki malzemeler de genellikle sıralı malzemeler olarak tanımlanır. Kompozit malzemelerin sistem örnekleri arasında çelikle güçlendirilmiş beton ve grafit liflerle güçlendirilmiş plastik malzemeler gösterilebilir (Kaw, 2006).

Kompozit malzemeler, malzemelerin mekanik dayanımı görevini ortaya çıkartan farklı geometrik boyutlardan (örneğin lifler) ve bu malzemeyi bir arada tutan metalik, polimer veya seramik materyallerden oluşan özel yapısal malzemelerdir. Bu malzemelerin sınıflandırılması, genellikle içerdikleri matris ve takviye malzemesine göre yapılır. Matris malzemeler, kompozit malzemenin kullanım amacına ve üretim tekniğine göre metal, seramik veya polimer malzemelerden oluşabilir (Kaya, 2016).

Polimer malzemeler, çeşitli endüstrilerde geniş bir kullanım alanına sahip olan mühendislik malzemelerinden birisidir. Bu malzemelerden olan plastik malzemeler, birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Ancak bu malzemelerin birtakım sınırlılıkları vardır. Bu sınırlılıkları geliştirmek ve bu malzemelerin kullanım alanlarını arttırmak amacıyla çeşitli araştırma ve geliştirme çalışmaları yürütülmektedir. Plastik malzemelerin özelliklerini geliştirmek ve daha dayanıklı hale getirmek için geliştirilen çözümlerden biri, polimerlere partiküller veya elyaf takviyesi eklemektir. Bunun yanı sıra günümüzde nanoteknoloji alanındaki ilerlemeler sayesinde, polimerler nano boyutlu takviyelerle de güçlendirilmeye başlanmıştır. Bu yaklaşım, nanoteknoloji alanındaki ilerlemelerle birlikte son yıllarda daha da önem kazanmıştır. Bu ilerlemeler sayesinde nano boyutlu malzemelerin üretimi daha da artmıştır (Bhushan, 2010; Şen vd, 2010).

Nano boyutlara sahip takviyeler, polimer matris içinde homojen bir dağılım sağlanabildiği takdirde mekanik, termal, morfolojik ve diğer özelliklerin geliştirilmesine olanak tanır. Bu nano boyutlu takviyeler, polimer malzemelerin mukavemetini, daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilme kabiliyetini ve malzemenin yapısal özelliklerini iyileştirebilir (Manias, 2007).

Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan matris malzemeler genellikle termoset plastiklerdir. Ancak son yıllarda termoplastik kompozitlerde matris malzemesi olarak kullanılması yaygınlaşmıştır. Bu matrisler arasında en yaygın kullanılan malzemelerden birisi de yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) malzemesidir. Termoplastik sınıfı içerisinde yer alan YYPE ile farklı nanopartikül takviyeli kompozit malzemeler ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır (Alghamdi, 2022; Fávvaro vd, 2010).

Bu malzeme, polimer zincirinin tekrar kullanılabilmesi ve dönüştürülebilmesi gibi avantajları nedeniyle bu çalışmalarda öne çıkmaktadır. YYPE'nin sertliği yüksek, kimyasal maddelere ve suya karşı direnci oldukça iyidir. Ayrıca mekanik özelliklerinden olan çekme ve darbe dayanımı yüksektir. Bu özellikler, YYPE'nin birçok endüstriyel uygulamada tercih edilmesine olanak sağlar (Tannuri vd, 2006).

YYPE'ye karbon nanotüp, grafen, nano kil ve nano kalsiyum karbonat gibi nanopartiküllerin eklenmesiyle oluşturulan polimer matrisli nanokompozitler hem akademik çalışmalar hem de endüstriyel uygulamalar açısından büyük ilgi çekmektedir (Aş vd, 2023; Mouecoucou, 2023). Böylelikle YYPE'nin mükemmel mühendislik özellikleri ile nanopartiküllerin özelliklerini birleştirerek daha dayanıklı, hafif ve çok yönlü malzemelerin geliştirilmesine imkân tanır (Tannuri vd, 2006).

Karbon nanotüpler (KNT'ler), silindirik yapıları grafen tabakalardan oluşan ve 1990'ların başında keşfedilen benzersiz nanomalzemelerdir. Bu olağanüstü yapıları, araştırmacıların büyük ilgisini çekmiştir. KNT'ler, diğer malzemelere kıyasla daha yüksek uzunluk-çap oranına sahiptir ve bu özellikleri de onlara benzersiz elektronik, mekanik ve termal özellikler kazandırır. Karbon nanotüpler, yüksek elastikiyet modülü, düşük yoğunluk, üstün termal ve elektriksel iletim özellikleri gibi avantajlara sahiptirler. Bu özellikler, onları polimer kompozit malzemeler için mükemmel katkı maddeleri yapar. Karbon nanotüplerin bir polimer matrisi içinde homojen olarak dağıtılması ve matris ile takviye elemanı arasında arayüzey etkileşimi kompozit malzemenin performansını büyük ölçüde etkiler (Jin, 2011; Park, 2011).

Az miktarda karbon nanotüp eklenmesi, kompozit malzemelerin elektriksel, termal ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirebilir. Bu nedenle, karbon nanotüp takviyeli polimer kompozitler, hafif ve güçlü malzemelerin üretilmesinde, elektronik cihazlar için iletkenlik sağlanmasında ve uzay endüstrisi gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanılmak üzere tasarlanmaktadır (Cui vd, 2023). Bu kompozit malzemelerin özelliklerini iyileştirme potansiyeli, malzeme mühendisliği ve nanoteknoloji alanında gelecekte daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmalarına yol açmaktadır (Makar vd, 2005).

Nano boyutlu takviyeler, polimer matris içinde homojen bir şekilde dağıtılması durumunda, polimer matrisin özelliklerini daha fazla geliştirecektir. Özellikle karbon nanotüp gibi çok rijit nanopartiküller, bu geliştirmeleri belirgin bir şekilde sağlayabilirler. Nanopartiküllerin homojen bir dağılımı, polimer matris ile nanopartiküller arasındaki etkileşimlerini arttırırken beraberinde de bu malzemenin mekanik dayanıklılığını ve sertliğini arttırmaktadır. Aynı zamanda termal ve elektriksel iletkenlik gibi özelliklerde de iyileşme sağlanabilir (Mai, 2006; Pinnavaia vd, 2001).

Nano boyutundaki takviyeler, verilen bir hacim oranı içinde büyük bir yüzey alanına sahiptirler ve bu durum da nanomalzemelerin matris ile arayüzeyindeki fiziksel ve kimyasal özelliklere etki ettiğini göstermektedir. Özellikle nano takviyelerin yüzey özellikleri, nanokompozitin son özelliklerini belirleyen kritik faktörlerden birisidir. Karbon nanotüpler de Wan der Waals bağlarının kuvvetli olmasından dolayı polimerle olan yüzey etkileşimi için homojen bir karışım elde edilmesi zor bir işlemdir. Bununla alakalı olarak nano malzemelerin homojen dağılımını sağlayabilmek adına çeşitli yüzey modifikasyon işleme çalışmaları halen günümüzde sürdürülmeye devam etmektedir (Ghafoor vd, 2016; Ferreira vd, 2017; Kumara vd, 2019).

Yüzey özellikleri, takviye-matris arayüzeyinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkilemektedir ve bu etkileşimler, nanokompozitin dayanıklılığını arttırmakta, termal ve elektriksel iletim özelliklerini iyileştirmekte veya diğer özelliklerde istenen değişiklikleri de mümkün kılabilir (Hussain vd, 2006).

Bu çalışmanın amacı, YYPE matrisine farklı oranlarda (%0,125, %0,250, %0,5 ve %1) eklenen KNT'lerin nanokompozitlerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemektir.

Yapılan bu çalışmada, Petkim'den granül halde temin edilerek toz haline getirilmiş YYPE malzemesine dört farklı oranda KNT ilave edilerek üç farklı karışım yöntemiyle kompozitler üretilmiş ve üretilen bu kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan bu tez çalışması yedi bölümden oluşmaktadır. Tezin birinci bölümünde giriş, ikinci bölümünde kompozit malzemeler hakkında genel bilgiler, üçüncü bölümünde

YYPE hakkında genel bilgiler, dördüncü bölümde karbon nanotüp hakkında genel bilgiler, beşinci bölümde deneysel çalışmalar, altınca bölümde deneysel sonuçlar ve tartışma ve son bölümde çalışma sonucunda elde edilen genel sonuçlar ve daha sonraki yapılacak çalışmalar için öneriler vurgulanmıştır.

BÖLÜM 2

KOMPOZİTLER

Kompozit malzemeler, görece yeni bir malzeme alanı olarak ortaya çıkmıştır. 1930'lara kadar dayanan tarihsel kayıtlara göre sınırlı kompozit malzemelerin kullanımı, kerpiç, asfalt ve beton gibi malzemelerin erken dönemlerine kadar gitmektedir. Ancak kompozit malzemelerin gelişimi ve ticari anlamda kullanımı, 1930'lar ve 1940'lar döneminden itibaren hız kazanmıştır. İkinci Dünya Savaşı sırasındaki teknolojik ihtiyaçlar, mevcut malzemelerin yetersiz kaldığı bir dönemi başlatmış ve bu da kompozit malzemelere olan ilgiyi artırmıştır. 1946 yılından günümüze kadar kompozitler üzerindeki araştırma ve geliştirme çalışmaları sürekli olarak artış göstermektedir. Bu dönemde kompozit malzemeler, birçok endüstriyel ve teknolojik uygulamada önemli bir rol oynamış ve sürekli olarak yenilikçi çözümler sunmuştur (Kaya vd, 2016).

Kompozit malzemelerin ilklerinden birisi olarak kerpiç hemen hemen ilk zaman dönemlerinden beridir kullanılmaktadır. Kerpiç, tarih boyunca kullanılan kompozit malzemelerin önde gelen örneklerinden biridir. İlk çağlardan bu yana varlığını sürdüren bu malzeme, kil çamuruna saman veya benzeri bitkisel liflerin eklenmesiyle üretilir. Bu bitkisel katkıları, çamurun dayanıklılığını artırarak kerpiç malzemesini daha sağlam hale getirir. Bu malzeme, tarihi yapıların dayanıklılığını ve estetik değerini artırmak için önemli bir rol oynamıştır (Sönmez, 2009).

Eskiden ihtiyaçları karşılamak için kullanılan kompozit malzemelerin ardından, inşaat sektöründe önemli bir devrim gerçekleşti ve bugün beton, cam, metal alaşımları, ahşap, plastikler gibi malzemeler üzerindeki çalışmalar büyük bir ilerleme kaydetmeyi başardı. Bu malzemeler artık birbirleriyle kombinasyonlar oluşturarak, yüksek

mukavemet değerlerine sahip yapılar ve araçlar gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Gügöl, 2018).

2.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN TANIMI

Kompozit malzemeler temel de iki ya da üzeri malzemelerin belirli düzen içerisinde makro boyutta bir araya getirilmesi ile oluşturulan bir malzeme sınıfıdır. Kompozit malzemelerin karakteristik yapıları malzemenin yapısını oluşturan farklı katkıların belirli oranlarda yapıya dahil olması ile sağlanır. Kompozit malzemelerin üretiminde doğal veya sentetik katkı malzemelerinin kullanılması, inşaat, otomobil, havacılık, sağlık ve deniz gibi endüstri alanlarında önemli katkılar göstermiştir (Callister vd, 2011; Rethwisch, 2011).

Kompozitler malzeme performansı artırılması istenilen bir temel matris ve bu temel matrisin performansını arttırmak amacıyla yapıya belirli oranlarda takviye malzemeleri ilavesi ile elde edilmektedir (Advani vd, 2012).

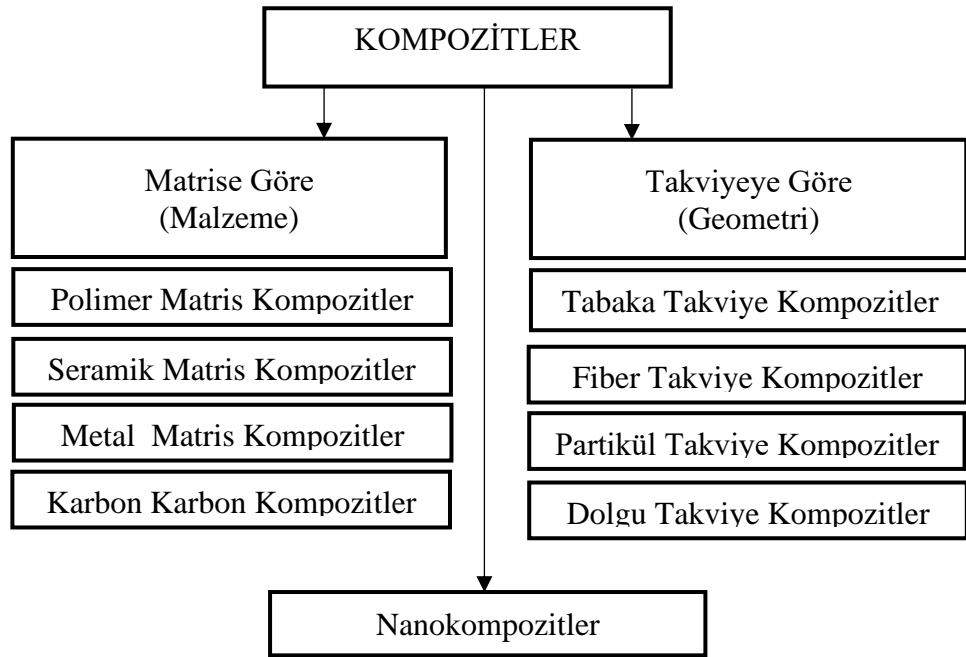
Kompozit malzemeler, temelde matris takviye malzemesinin türü, boyutu ve şekli gibi çeşitli sınıflandırma ölçütlerine sahiptir. Malzeme türü açısından kompozitler, genellikle metal matrisli, seramik matrisli ve polimer matrisli olmak üzere üç ana kategoriye ayrılır. Ayrıca, kompozitler takviye malzemesinin boyutu, şekli ve oranı gibi faktörlere bağlı olarak daha spesifik alt kategorilere ayrılabilirler. Bu sınıflandırma ölçütleri, kompozit malzemelerin özelliklerini ve uygulama alanlarını belirlemede önemlidir (Graeme vd, 2003).

2.2. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

Kompozit malzemeler, çeşitli alanlarda kullanılan çok yönlü malzemelerdir ve genellikle temel bileşenleri ve yüksek mukavemet değerine sahip takviyeleri içerirler.

Bu malzemeler, genellikle iki temel başlık altında sınıflandırılır. En yaygın sınıflandırma yöntemi, kompozitin temel yapısındaki matris malzemesi ve takviye malzemesine dayalıdır. Matris malzemesi, kompozit yapının ana yapısını oluştururken, takviye malzemeleri ise kompozitin dayanıklılığını ve özelliklerini artıran elemanları temsil eder. Bu iki bileşenin kombinasyonları, farklı uygulama alanlarına uygun çeşitli kompozit malzemelerin oluşturulmasına olanak tanır. Bu nedenle kompozitlerin sınıflandırılması, malzemenin özelliklerine, kullanım amaçlarına ve endüstriye bağlı olarak büyük ölçüde değişebilmektedir (Kaya, 2016). Çizelge 2.1 de kompozit malzemelerin sınıflandırılmasına ve Şekil 2.1’de kompozit malzeme bileşenleri şematik olarak verilmektedir.

Çizelge 2. 1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması



Matris Fazı

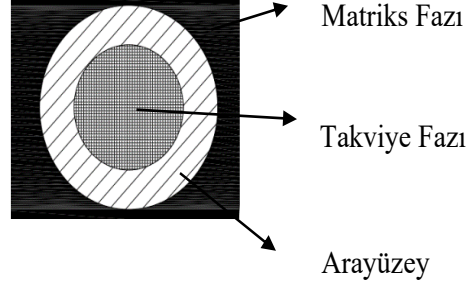
- a. Sürekli ve ana faz
- b. Takviye fazını bir arada tutar ve yükü paylaşır

Takviye Fazı

- a. Matris içindeki ikincil fazdır, dayanımı ve rijitliği sağlar.

Arayüzey

- b. Matris ile takviye fazı arasındaki fazdır
- c. Yapışmayı belirler



Şekil 2. 1. Kompozit malzeme bileşenleri

2.2.1. Matris Malzemelerine Göre

Kompozit malzemelerde, matrisin önemli fonksiyonları arasında takviye elemanını bir arada tutma, yükü takviye elemanlarına dağıtma ve dış etkenlere karşı koruma sağlama gibi işlevler bulunmaktadır. Özellikle polimer matrisli kompozitlerde, ideal matrisler, düşük viskozite seviyelerine sahip olmalı ve takviye elyafı ile birleştiğinde hızla katı bir forma geçebilmelidir. Bu, takviye elyafının sağlamlığını tam olarak sürdürebilmesi açısından önemlidir. Ayrıca, kompozit malzemenin sıcaklık, kimyasal maddeler ve nem gibi dış etkilere karşı dayanıklılığı, matris malzemesinin kalitesi tarafından belirlenir. Matrisin mekanik özellikleri, istenilen fonksiyonları elde etmek için büyük öneme sahiptir (Sönmez, 2009).

2.2.1.1. Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer malzemeler, birçok endüstri alanında yaygın olarak kullanılan çok yönlü malzemelerdir. Özellikle polimer matrisli kompozit malzemeler, genellikle petrokimya kaynaklı malzemeler olarak tanımlanır. Bu tür malzemeler, polimer matrisinin içine yerleştirilen güçlendirici lifler veya partiküller ile oluşturulan karmaşık yapılarıyla dikkat çekerler. Polimer matrisli kompozitler mukavemet ve sertlik açısından polimer malzemelere göre daha çok öne çıkmaktadır (Akhil vd, 2023).

Birçok mühendislik uygulamasında karşımıza çıkan Polimer Matrisli Kompozitler, termoset veya termoplastik sınıflarından oluşurlar. Polimer matristeki takviyeler malzemeye sertlik ve yüksek mukavemet sağlar. Polimer matrisli kompozitlerin hafifliği bu malzemelerin en önemli avantajlarından birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca bu malzemelerin korozyon direnci ve yorulma direnci metallere üstündür. Polimer matrisli kompozitlerin uygulama faaliyetlerine havacılık yapı malzemeleri, tekne gövde malzemeleri, fren ve debriyaj gibi otomotiv sektörü ürünleri, spor malzemeleri, savunma sanayinde zırhlı yelekler ve parçalar örnek olarak verilebilir (Graeme, 2003).

Polimer matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak başta epoksi reçineler olmak üzere polyester reçineler, fenolik reçine gibi termoset esaslı malzemeler kullanılmaktadır. Bu matrislere cam elyaf, karbon elyaf, aramid gibi elyafların ilave edilmesiyle mukavemeti yüksek polimer kompozitler üretilmektedir. Ticari uygulamalar için elyaf takviyelerinin kullanımı, malzemenin şekline göre küçük boyutlu takviye parçalarının fazla miktarda kullanılmasını ve elyafların örgü sistemleri ile belirli bir yüzey büyüklüğüne getirilerek lamine kumaşlar ile birleştirilerek son ürün elde edilmesini içerir (Singh vd, 2013).

Bu üretim süreçleri sonucunda elde edilen kompozit malzemelerin ömürleri ve kullanımı mekanik performans göstergelerinin başarısı ile doğru olarak orantılı ilerlemektedir. İlk olarak yorulma ömrü ve darbe dayanıklılığı olmak üzere performansları ön planda olan elyaf takviyeli polimer kompozitler havacılık ve uzay endüstrisindeki üstün özellikleri sayesinde de hava araçlarının gövde yapılarında tercih edilmektedir (Wang vd, 2011).

Takviye olarak kompozit malzemelerde kullanılan karbon elyaflara ilave olarak karbon esaslı partiküller de katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Nanometre ölçeğinde karbon esaslı ve karbon allotropu olarak 2-boyutlu grafen ve 3-boyutlu karbon nanotüp malzemeler de çoğunlukla tercih edilmektedirler. Her ikisi de üstün özellikler sergilemektedirler ve hem laboratuvar hem de ticari kompozit takviyeleri olarak da kullanılmaktadırlar (Lijima vd, 2014).

Ülkemizde ve dünya genelindeki çalışmalarda karbon allotroplarının kompozitlerde takviye olarak kullanılması mevcuttur. Polimer matrisli hibrit kompozit malzemelerin üretim ve karakterizasyon yapısı ise literatürlerde sınırlı olarak kalmıştır. Ülkemiz araştırmalarında genellikle ticari olarak kullanılan özellikle cam elyaf ve karbon elyaf malzemelerinin takviye olarak tercih edildikleri polimer matrisli kompozitlerin performans değerleri incelenmiştir. Cam ve Karbon elyaf lamine kumaşlar ile farklı kombineler ile vakum infüzyon yöntemi ile üretilen polimer matrisli kompozitlerin performansları incelenmiştir. Cam ve karbon elyaf malzemelerle takviye edilen karbon esaslı, özellikle de Karbon nanotüp katkıları ile yapılan çalışmaların ise az olduğu incelenmiştir (Tanın, 2016).

Polimer matrisli kompozitlerde termoset matristen farklı olmak üzere son yıllarda termoplastik malzemelerde matris olarak tercih edilmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde termoplastik matris malzemesi olarak başta Polietilen (Yüksek Yoğunluklu, Düşük Yoğunluklu) olmak üzere Polipropilen, ABS gibi termoplastik malzemeler de tercih edilmektedir. Bu matrislere ilave edilen takviyelerle bu termoplastiklerin mukavemet değerleri artırılmaktadır (Rajak vd, 2022).

Salahuddin vd. (2022), yaptıkları bir çalışmada grafen, grafit, karbon siyahı ve karbon nanotüp malzemelerle polimer matris kaplama işlemi yaparak kompozitin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışma metodu içerisinde kullanılan kaplama teknikleri arasında; Kimyasal buhar birikimi, sprej kaplama, elektroforetik biriktirme ve daldırma kaplama yöntemlerini kullanmışlardır. Bu çalışmaların sonucunda, KNT, grafen, karbon siyahı ve grafit gibi kaplama malzemelerindeki değişiklikler tartışılmış ve KNT'lerin olağanüstü mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olması nedeniyle, tüm kaplama malzemeleri arasında bu kompozitlerin yetersiz özelliklerini artırmak için en ideal kaplama malzemesi olduğu belirtilmiştir.

Merneedi vd. (2021), polimer matrisli kompozitler üzerine yaptıkları bir çalışmada karbon nanotüplerin mekanik ve kimyasal özellikler açısından diğer liflere göre üstün bir karbon formu olarak kabul edildiğini vurgulamışlardır. Çalışma içerisinde dolgu malzemesi olarak kullanılan CNT miktarı %1 ila %4 arasında değişmektedir ve en iyi

mukavemet özellikleri için optimal yüzde araştırılmıştır. KNT ağırlık oranı bilgileri, %1, %2, %3 ve %4 değişkenliğine sahip olarak karıştırılmıştır. Bu çalışmada, KNT kompozitlerinin içindeki KNT dispersiyonunu belirlemek için FE-SEM cihazı kullanılarak analiz yapılmıştır. Matris, kompozit boyunca homojen bir şekilde dağılmış olup içinde hava kabarcıkları veya çatlaklar tespit edilmemiş ve KNT'nin homojen bir şekilde dağıtıldığı belirtilmiştir. Bunun sonucunda artan KNT miktarına bağlı olarak kompozit malzemelerin mukavemet değerlerinde artış olduğunu rapor etmişlerdir.

2.2.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik matrisli kompozit malzemeler nispeten yeni bir malzeme sınıfı olarak görülmektedir ve teknik seramikler olarak isimlendirilmektedir. İşlem süreçlerine ve ara fazlarına bağlı olarak, arayüz, geniş mekanik özellik ve termofiziksel özellik değişkenliği elde edilebilmektedirler. Bütün seramik matrisli kompozitler, gözenek veya mikro çatlaklı bir matris, yüksek anizotropi ve yüksek kırılma tokluğu ile karakterizasyon edilir (Krenkel vd, 2018).

Seramik matrisler içerisindeki seramik elyaflardan oluşmaktadır. İçerisindeki bileşen katkılar kırılman olsa da buna rağmen, seramik matrisli kompozitler matris içerisindeki engelleyen elyaf matris arayüzeylerinin etkili olması sayesinde sağlamdır ve lifli takviyelerin bozulmasına engel olur (Zhang, 2014).

Bağ yapıları incelendiğinde seramik malzemelerin çok kararlı bir yapısı olduğu görülmüştür. Buna göre seramikler sert ve gevrek malzemelerdir. Kırılman özellikleri olduğu için düşük derecede kopma göstermektedirler, tokluk değeri çok düşük ve termal şok maruziyetine dayanıksızdırlar. Ancak basma dayanımları çok yüksektir ve yüksek sıcaklıklara olan direnci de düşük olduğundan dolayı daha fazla kullanışlı duruma gelmişlerdir. Seramik matrisli kompozitlerin kullanım alanı genellikle yüksek sıcaklığa maruz kalan ekipmanlarda tercih edilmektedir (Yüce, 2007).

Seramik matrisli kompozitler kendi altında 3 farklı gruba ayrılır; sürekli fiber, süreksiz fiber ve partikül kompozitler. Sürekli fiber takviyesi olan seramik matris yapılar

zayıflama durumunda kalırsalar fiberler, üzerinde bulunan yüke karşı olan taşıma görevini sürdürürler. Fakat bu durum çatlaklar ve çentik oluşumu karşısında özelliğini kaybetmektedirler. Sürekli fiberlerin daha çok tercih edildiği görülmektedir. Bunun sebebi ise diğer iki kategoriye göre tokluk değerlerinin daha yüksek olmasıdır. Yine aynı zamanda sürekli fiberler ileri derece gelişmiş teknolojik kompozit malzemelerdir. Yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek korozyon direnci ile havacılık endüstrisinde çeşitli kullanımı mevcuttur. Bunun yanı sıra, türbin motorlarının komponent parçaları, gaz filtreleri, zırhlı koruyucular, petrol ve gaz hatları, ısıtım tesisleri ve yalıtım sistemleri gibi yaygın kullanım alanları mevcuttur (Eker, 2008).

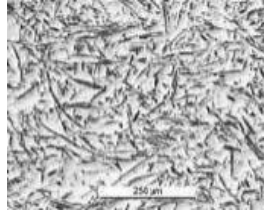
2.2.1.3. Metal Matrisli Kompozitler

Metaller bilinen en temel mühendislik malzemelerindendir. Uygun alaşımlar tercihleri ve çeşitli işleme yöntemleriyle kolayca kontrol edilebilir durumdadırlar. Metal alaşımların mühendislik alanlarındaki yoğun kullanımı, sadece tokluklarını ve dayanımlarını değil, geniş üretim süreçleri ile mühendislik faaliyetlerinin olan kolaylığını ve düşük maliyetlerini de yansıtır (Njuguna, 2016).

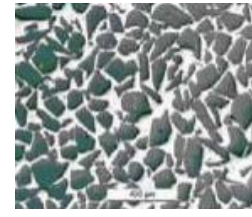
Metal matrisli kompozitler (MMK'ler), metalin ve takviye elemanının üstün özelliklerinin bir araya getirilmesiyle düşük yoğunluk, yüksek dayanım ve elastikiyet modülü gibi avantajlar elde edilir. Bu tür malzemeler özellikle otomotiv, uzay, havacılık ve elektronik uygulamalarında kullanılmaktadır. MMK'ler, matris metalin ve takviye elemanı olarak seramik kullanılmasıyla, monolitik alaşımlara kıyasla daha yüksek dayanım ve aşınma dayanımı gösterir. MMK'lerde matris malzemesi olarak, düşük yoğunluğa sahip metaller tercih edilir. En çok kullanılan takviye malzemeleri silisyum karbür, bor karbür, oksitler ve nitrürlerdir (Yıldırım, 2016). Takviye malzemeleri geometrik yapılarına göre üç farklı gruba ayrılır. Sürekli fiber takviyeli, kısa fiber takviyeli ve partikül takviyeli kompozitlerdir Şekil 2.2'de verilmiştir.



Sürekli fiber takviyeli



Kısa fiber takviyeli



Partikül takviyeli

Şekil 2. 2 .Takviye malzemesinin geometrik yapılarına göre yapıları (Occhionero vd, 1998).

Metal matris yapıli kompozitler, seramik matris veya polimer matris kompozitlere göre farklı özellik kompozisyonları ve işleme süreçleri içermektedirler. Bu durum, matris malzemelerinde metaller, seramik ve polimerler arasındaki geleneksel farklılıklar ve kullanılacak olan takviyelerin doğasından gelmektedir. Saf haldeki metaller opak ve parlak elementler olup, genellikle iyi ısı ve elektrik iletkenliklerine sahiptirler. Parlatıldıkları durumlarda da ışığı iyi yansıtma özelliği elde etmektedirler. Ayrıca, metallerin çoğu aslında sünektir fakat yoğunlukları yüksektir (Lakshmikanthan vd, 2022). Seramik ve polimer malzemeler, elementlerin kimyasal bileşikleri olup, bunlar arasındaki bağ, ya atom-atom arası elektron trafiği ya da elektronların birinden birine transferi ile karakterize edilir. Polimer ve seramiklerde serbest elektron olmaması, ısı ve elektrik iletkenliğinin zayıflığını ve metal malzemelere göre daha düşük tokluk ve deformasyona sebep olur (Njuguna, 2016).

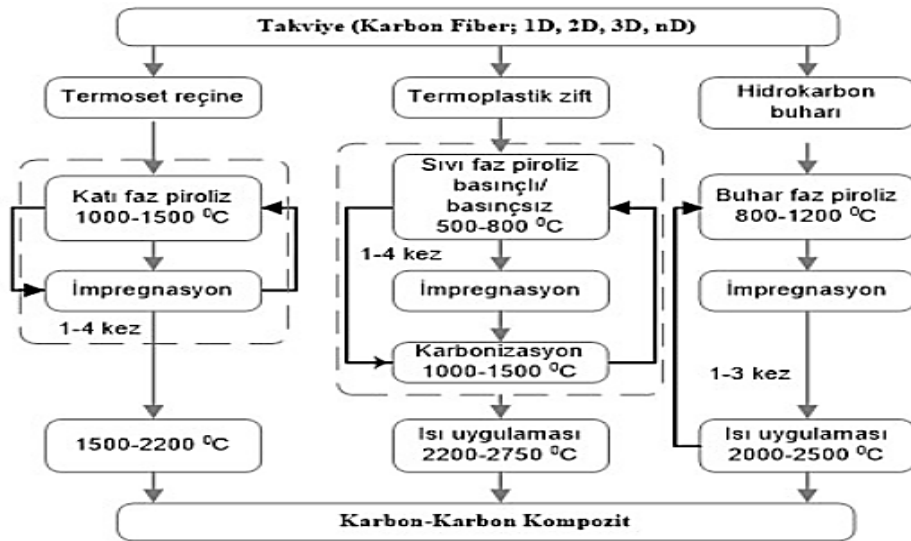
Metal matrisli kompozitlerin diğerlerine kıyasla bazı farklılıkları mevcuttur:

- Metal matrislerin matris fazı, bir seramik ya da polimerden farklı olup, alaşımlı ya da saf halde bir metaldir.
- Seramik ya da seramik kompozitlere göre daha fazla tokluk ve süneklilik yeteneğine sahip olup, kendine ait takviyesiz matris alaşımlardan daha az tokluk ve süneklilik yetenekleri vardır.
- Bu kompozitlerde takviyenin rolü, polimer matrisli kompozitlerdeki gibi mukavemeti iyileştirmektedir. Seramiklerdeki takviye genellikle hasar dayanımını iyileştirmek içindir (Njuguna, 2016).

2.2.1.4. Karbon-Karbon Kompozitler

İçerik olarak karbonlu matris içerisindeki karbon elyaflardan oluşabilen diğer türlerine göre benzersiz bir kompozit malzemedir. Düşük yoğunluk özelliği, yüksek termal iletkenliği ve yüksek sıcaklık seviyelerinde ileri seviye mekanik özellikleri, bu kompozitlerin havacılık uygulamaları için ideal bir malzeme haline getirmektedir. 2000°C sıcaklıklarına dahi yüksek deformasyona uğramaksızın dayanır. Genel üretim teknolojilerinin biliniyor olsa dahi, özel olarak işlemlerin kombinasyonları, belirli üretici tarafların uzmanlığında olmayı sürdürmektedir. Gelişmiş oksidasyon direnci ve sürekli azalan üretim maliyetleri, bu malzemelerin uygulama alanlarının mühendislik tasarımı için giderek daha çekici hale getirmektedir (Windhorst vd, 1997).

Karbon-karbon kompozit sınıfı, çok geniş sıcaklık seviyelerinde son derece karalı yapıya sahiptirler. Aşırı ortamlardaki zorluklara karşı direnç, bir karbon matrisini güçlendirmek için karbon elyafların gücünü ve modülünü kullanmaktadır. Yoğunluk değerinin onda birinde karbon-karbon kompozitler, refrakter metallere kıyasla yüksek iyi performanslı, uygun bütçeli bir seçenek sunmaktadır. Genel olarak bu kompozitlerden üretilen havacılık bileşenleri arasında roket motoru bileşenleri bulunur. Güvenilir bir performans, bu kompozitlerin en kritik özelliğidir. Özellikle bir sistemdeki birden fazla parçalar karbon kompozit ile tasarım değişikliğinde, güvenilirlik ve düşük maliyetler göstermiştir (Rand, 2005).

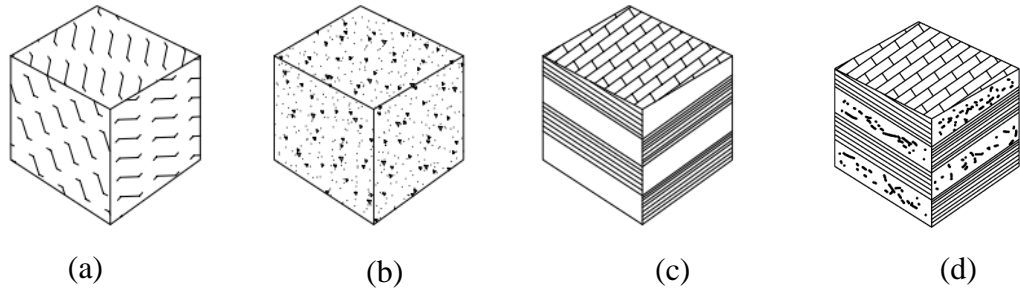


Şekil 2. 3. Karbon-Karbon kompozit prosesleri (Beşergil, 2016).

Karbon-karbon kompozitler günümüzde deneysel çalışmalardaki füzyon reaktörlerde kullanılmaktadır ve özel gaz soğutmalı fizyon reaktörler için de düşünülmektedir. Bu nükleer faaliyetlerde malzeme, yapısal olarak hasara ve fiziksel bozunumlara neden olabilecek nötronlara maruz kalacaktır. Nötron hasarlarının karbon-karbon kompozitler üzerindeki tepkilerini aydınlatmak amacıyla nispeten az çalışmalar olmasına rağmen, grafitte olan nötron hasarları için yaygın bir literatür mevcuttur (Burchell, 2001).

2.2.2. Takviye Elemanlarına Göre

Kompozit malzemeler, takviye elemanlarının şekil ve yerleşim durumuna göre dört ana gruba ayrılmaktadır. Bu gruplar elyafli kompozitler, tabakalı kompozitler, parçacıklı kompozitler ve karma (hibrit) kompozitlerdir. Hangi tür kompozit malzemenin kullanılacağı, belirli bir uygulamanın gereksinimlerine ve performans beklentilerine bağlı olarak değişebilir. Şekil 2.2’de kompozitlerde kullanılan şekil-yerleşim durumları gösterilmiştir.



Şekil 2. 4. Kompozitlerin şekil-yerleşim durumu a) elyafli , b) parçacıklı, c) tabakalı, d) karma

2.2.2.1. Elyaf Takviyeli Kompozitler

Elyaf takviye elemanlı kompozit malzemeler elyaf malzemenin matris içinde bulunması ile oluşmaktadır. Bu kompozit sınıfında elyafların sahip olduğu mukavemet değeri oldukça önem göstermektedir. Kompozit yapısının mukavemet değerini direk

olarak elyaflar belirlemektedir. Elyafların aynı zamanda kusursuz olması ve matris içerisindeki dağılımı da oldukça önemlidir. Boyut olarak oldukça uzun elyafların yerleşimi matris içerisinde paralel ise mukavemet değeri yüksek, birbirine dik olur ise mukavemet değeri de bir o kadar düşük olmaktadır. Başlıca kullanılan takviye elyaf malzemeler; karbon elyaf, aramid elyaf, cam elyaf, organik ve boron elyaflardır (Yüce, 2007).

2.2.2.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler

Parçacıklı takviyeli kompozitler, matris içerisine dağıtılmış minik parçacıklar sayesinde özelliklerini kazanır. Bu yapılar homojen bir dağılım gösterdiklerinde her yönde benzer özelliklere sahip olurlar, bu da onların izotropik karakterde olduklarını belirtir. Malzemenin genel dayanımı, kullanılan takviye parçacıklarının sertlik seviyesine göre değişiklik gösterebilir. Plastik bir matrisin içerisinde yer alan metalik takviyeler, parçacıklı kompozitlerin en yaygın örneklerindedir. Metal matrisler içerisine eklenen seramik takviyeler, bu kompozitleri sıcaklık değişimlerine ve yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklı kılar. Bu özellikleri sayesinde, bu tür kompozitler özellikle uçak motoru parçalarının üretiminde tercih edilmektedir (Yüce, 2007).

2.2.2.3. Tabakalı Kompozitler

Matrisler, genellikle yüksek dayanımlı çubuk ya da örgü fiberlerle kombine edilerek kompozit yapılarda kullanılırlar. Bu birleşim hem matrisin hem de fiberlerin özelliklerinin bir arada sunulduğu kompozit tabakaların oluşmasını sağlar. En az iki kompozit tabakanın birleştirilmesiyle elde edilen yapıya tabakalı kompozit denir. Bu kompozitler, kompozit malzemeler arasında oldukça popülerdir ve özellikle havacılık endüstrisinde yüzey kaplama malzemesi olarak sıkça tercih edilirler, çünkü hem hafiflikleri hem de yüksek dayanım özellikleri ile dikkat çekmeyi başarmıştır (Tekin, 2015).

2.2.2.4. Karma (Hibrit) Takviyeli Kompozitler

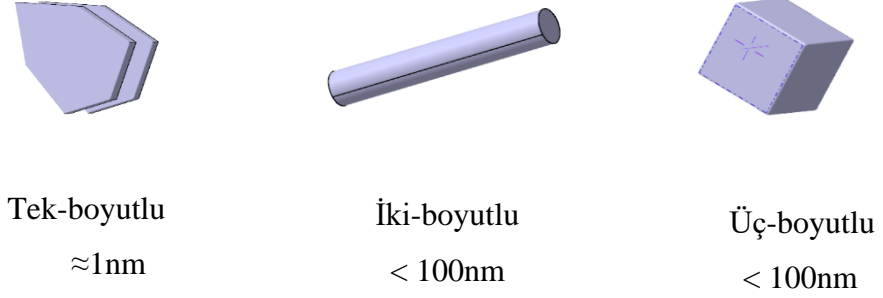
Kompozitin özelliklerini iyileştirmek ve geliştirmek için temelde en az iki takviye elamanının bir matris içinde entegre edildiği birkaç fazın kompozisyonu sonucu oluşmaktadır (Jamir vd, 2018).

Hibrit kompozitlerin birçok farklı alandaki araştırmacılar tarafından belirlenmiş tanımı vardır; farklı matrislerin içerisine ilave edilen takviye malzemesi olarak veya bu kompozit sınıfının tek bir matris içerisinde olan iki ya da daha fazla dolgu malzemesine katkı edilen bir takviye malzemesi olarak tanımlanmışlardır. Hibrit kompozitlerin performans özellikleri, avantaj ve dezavantajlar açısından kompozitler içerisinde daha uygun bir dengeye sahip oldukları düşünülmektedir. Örneğin bir takviye lifin faydası, hibrit kompozitlerdeki diğer bileşen türlerinde görülmeyen yani eksik olan özellikleri tamamlayabilmektedir. Hava endüstrisi, deniz sanayi ve endüstriyel yapılarda birincil yapı sınıfları için hibrit kompozitler kullanılabilir. Havacılık endüstrisinde karşılaşılan çevresel veya çevresel olmayan etkilerde yani yorulma, korozyon veya darbe direnci gibi katkıları oldukça faydalıdır (Clyne vd, 2019).

2.2.3. Nanokompozitler

Nanoteknoloji, malzemelerin nano boyutlarda özelliklerini inceleme ve manipüle etme bilimidir. Bu teknolojinin uygulandığı alanlardan biri de kompozit malzemelerdir. Nanokompozitler, içeriğinde nanometre seviyesinde bir veya daha fazla faz bulduran modern kompozit malzemelerdir. Bu malzemelerin özelliği, atomik, moleküler ve makroskobik seviyelerde özelliklerinin incelenebilmesidir. Endüstri ve akademi dünyasında nanokompozitlere olan ilgi hızla artmaktadır. Bunun nedeni, bu malzemelerin sunduğu üstün özellikler ve geniş uygulama potansiyelidir. Farklı araştırmalar, nanokompozitlerin performansının ve uygulama alanlarının sürekli olarak genişlediğini göstermektedir (Kaştan, 2016). Nanokompozitlerin sınıflandırılması, içerdikleri nano boyutlu partiküllerin şekline göre yapılabilir. Örneğin, üç boyutlu nanokompozitler, eş boyutlu veya küresel nanopartiküller içerirken; iki boyutlu olanlar tüp veya lif şeklindeki partiküller içerir. Tek boyutlu

nanokompozitler ise genellikle silikat tabakaları gibi yapılarla tanımlanır (Zeren, 2013). Şekil 2.5'te Nano seviyedeki dolgu malzemelerinin şematik gösterimleri verilmiştir.



Şekil 2. 5. Nano seviyedeki dolgu malzemelerin şematik görselleri

Nanopartikül maddeler, metal, metal olmayan seramikler ve yarı iletken nanopartiküller olarak sınıflandırılabilirler ve genel olarak bilinen bir çeşidi de karbon nanopartiküllerdir. Nanopartikül maddeler, küçük boyutlarda ve yüksek yüzey-hacim oranları sebebiyle çok farklı ve kimyasal özelliklere sahiptirler. Elektrik, optik, manyetik, kataliz ve seramik gibi pek çok sınıfta oldukça büyük ilgi görmektedir (Sen, 2020).

Nanokompozit malzemeler, bir fazın nanopartikül, nanotüp veya katmanlı nanoyapılar gibi nano boyutta biçim dizimine sahiptirler. Çok fazlı malzemeler olarak bilinmektedirler ve fazların boyutları da 10-100nm aralığında olmaktadır. Günümüzde birçok mühendislik malzemelerini iyileştirmek ve üstün özelliklerinden faydalanmak amacıyla nanokompozitler ortaya çıkmıştır. Bu malzemeleri dağılmış matris ve dağılmış faz malzemeler olarak sınıflandırabilmek mümkündür. Günümüzde hız kazanmış olan bu alanın faydalarıyla, yenilikçi yaklaşımlarla çeşitli özellikleri olan birçok malzeme elde etmek mümkündür. Çevre dostu sayılan bu malzeme özellikleri bakımından, otomotiv, inşaat, elektrik, gıda ambalaj ve teknolojik iletişim gibi çeşitli endüstri alanlarında gelişmiş imkanlar sunar (Sen, 2020).

Nanokompozitler, nanoskala takviyelerin polimer matris içinde homojen olarak dağıldığı ve genellikle mekanik, termal, elektriksel ve optik özelliklerini artırmak için

kullanılan malzemelerdir. Karbon nanotüpler, grafen, nanokil, nanopartiküller, nanofiberler nanokompozitlerde en yaygın kullanılan malzemelerdir (Siwal vd, 2020).

Nanokompozitler malzemelerin üretiminde nano boyuttaki malzemelerin matrisle entegrasyonu bazı zorluklar ve problemlerle karşılaşılabilir. Örneğin nano boyuttaki malzemelerin homojen bir şekilde matrisle dağılması zordur. Aglomerasyon (toplanma) ve aglomere (kümeleşme) gibi durumlar homojen dağılımı engelleyebilir. Bu problemin üstesinden gelmek için yüzey modifikasyonları ve dispersiyon teknikleri kullanılarak nano malzemelerin homojen bir şekilde dağılımını sağlamak için çalışmalar yürütülmektedir (Vural vd, 2018; Demircan, 2018). Aynı zamanda nano boyuttaki malzemelerin farklı mekanik özelliklere sahip olması, nanokompozitlerde mekanik uyumsuzluklara yol açabilmektedir. Bu durumu çözmek için mekanik uyumu artırmak adına nano malzemelerin boyutlarının, şeklinin ve yapılarının dikkatlice kontrol edilmesi, uygun seçilmiş ara yüzey materyalleri ve uygun matris malzemelerinin kullanılması üzerine de yürütülen birçok çalışmalar yapılmıştır (Ünal vd, 2020; İskender, 2021).

2.3. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Son yıllarda kompozit üretim yöntemleri oldukça artmıştır; temaslı ve sıkıştırma kalıplama, vakumlu torba/otoklav kalıplama, rotasyonel kalıplama, reçine transfer kalıplama (RTM), bant sarma ve filament sarma gibi tüm bu yöntemlerin ortak bir yönü vardır. Takviyeler yardımcı bir alet veya kalıp içerisinde uygun şekle getirilir, reçine ve lif katkıları reçineyi sertleştirmek için yüksek sıcaklık ve basınç ile bir araya getirilerek reçine sertleştirildikten sonra kalıp parçadan ayrılır. Üretim sürecinin seçimi, doğal süreçte, bileşenin kalitesi, mekanik performansları ve üretim maliyeti üzerinde büyük bir etkiye sahip olacaktır (Potter, 1996).

Kompozit üretim süreçleri şu şekilde açıklanabilir:

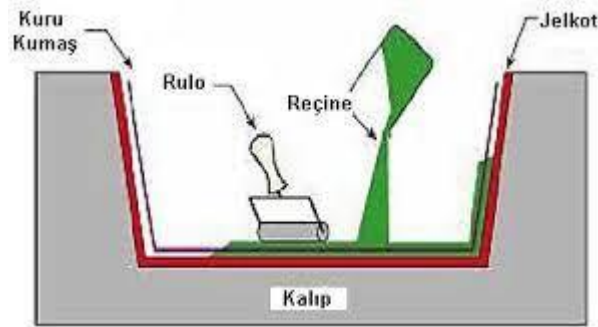
- Yüksek verim, kısa döngü süresi, düşük işçilik,
- Minimum malzeme maliyeti,
- Malzeme depolama ve işleme maliyeti,

- Geometrik esneklik, şekil karmaşıklığı ve boyutu,
- Matris ve takviye aralığı
- Mekanik özellikleri kontrol etme,
- Güvenilir ve yüksek kaliteli üretim,

Bütün bu gereksinimleri aynı süreç içerisinde karşılayacak hiçbir üretim süreci yoktur; en önemlisi, bu süreçlerden bazıları bir diğerini dışlayabilir (Potter, 1996).

2.3.1. Elle Yatırma Yöntemi (Hand Lay-Up)

Bu üretim yönteminde, elyaflar katman hale getirilir ve tek taraflı bir kalıba geçirilir. Reçine daha sonra elyaf-kumaş üzerine aktarılır ve bir el rulosu ile açılır. Şekil 2.6'da elle yatırma yönteminin şematik resmi verilmektedir.

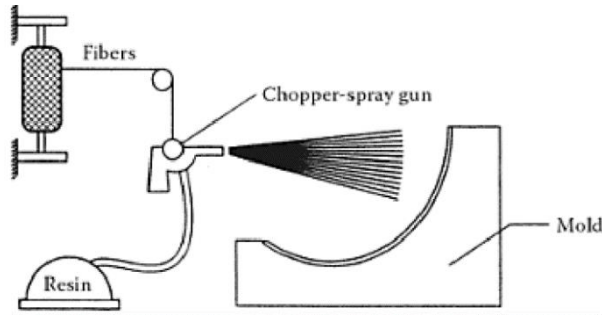


Şekil 2. 6. Elle yatırma yöntemi (Durgun, 2014).

Bu manuel yuvarlama hareketi hapsolmuş havayı ortadan kaldırır, kumaşın tamamen ıslak olmasını sağlar ve kompoziti yoğun bir kıvama getirir. Reçine sisteminin sertleşme sürecini başlatmak için bir katalizör kullanılabilir ve böylelikle ürün harici ısı olmadan sertleşme sağlanabilir. Bu en basit ve bilinen en kolay yöntemdir. Elle yatırma işlemi tipik bir rüzgâr türbini bileşenleri gibi genellikle daya büyük yapıların düşük hacimli üretiminde kullanılır (Bunsell vd, 2005).

2.3.2. Püskürtme Yöntemi (Spray-Up)

El yatırma yöntemine benzer olan püskürtme yönteminde doğranmış lifleri ve oda sıcaklığı seviyesinde kür reçinelerini ucuz maliyetli açık kalıp üzerine biriktirmek için püskürtme tabancası kullanılmaktadır. Bu işlem ardından, elle yatırma yöntemindeki gibi, sıkışan havayı çıkartmak için manuel rulo işlemi uygulanır. Bu uygulama tipik olarak, elle yatırma metoduna göre daha kompleks kalıplar için kullanılmakta olup daha hızlı üretim imkânı sağlar. Duş üniteleri ve havalandırma sistemleri gibi büyük ebatlı projelerde parçaların imalatı için kullanılmaktadır. Elyaflar kısa olmaktadır, bu da mukavemet performansını indirgediği için düşük viskozite, mukavemet ve termal performansları tehlikeye girmektedir (Bunsell vd, 2005). Şekil 2.7’de püskürtme yönteminin şematik resmi verilmektedir.

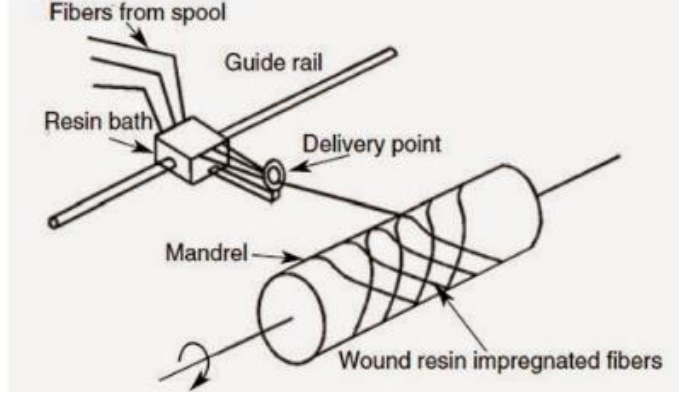


Şekil 2. 7. Püskürtme yöntemi (Abdalslam, 2013).

2.3.3. Filament Sarma Yöntemi (Filament Winding)

Bu uygulama yüksek derecede yapı bütünlüğü olan yapıların (tanklar, borular vb.) üretiminde kullanılmaktadır. Kalıp tercihi olarak dönen bir mandrel yapı kullanılır ve otomatik hale getirilir. Reçine emdirilen lifler, mandrel kalıp etrafında önceden planlanan geometrik bir desen ile mandrelle sarılır. Bu işlemde birden fazla reçine-elyaf sistemi kullanılabilir. Avantajları çok hızlı bir uygulama olması, reçine içerik ve seviyesinin kontrol edilmesi, mukavemetli bölgelere yüksek ağırlık katması ve yönlü mukavemet yeteneği veren kontrollü elyaf oryantasyonu sağlayabilmesidir. Dezavantajları, şeklin dairesel ve oval ürünlerde sınırlı kalması, mandrel kalıbın yüksek maliyetli olması ve bazı uygulamalar içerisinde aerodinamik etkiye zayıflık

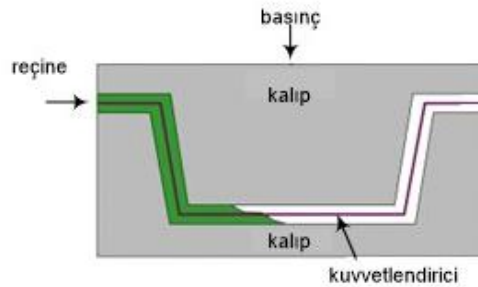
sağlayacak yüzeyler bırakmasıdır (Potter, 1996). Şekil 2.8’de filament sarma yönteminin şematik resmi verilmektedir.



Şekil 2. 8. Filament sarma uygulaması şematik gösterimi (Borazjani, 2016).

2.3.4. Reçine Transfer Kalıplama (Resin Transfer Molding)

Bu kalıplama uygulamasında kompozit malzemede her iki tarafından da üstün yüzey pürüzlülüğü kalitesi istenildiğinde kullanılmaktadır. Takviye tabakaları kalıp boşluğuna kuru halde serilirler. Buradaki boşluk, parça kalınlığının değerini belirler. Büyük veya küçük ölçülerdeki ürünler için kullanılmaktadır. Bu yöntem ile seçici takviye ve kusursuz elyaf yöntemi sağlanır. Avantajlarına bakıldığında yüksek boyut toleransı ve stabilizasyon, yüksek yüzey kalitesi, yüksek üretim oranı, yüksek tekrarlanabilirlik ve parçaya göre en düşük değişkenlik bulunmaktadır. Dezavantajlarına bakıldığında, yöntem için boyutsal anlamda hassa işleme takımlarına ihtiyaç duyulduğu için yüksek maliyet ve fazla zaman gerektirir (Bunsell vd, 2005). Şekil 2.9’da reçine transfer yönteminin şematik resmi verilmektedir.



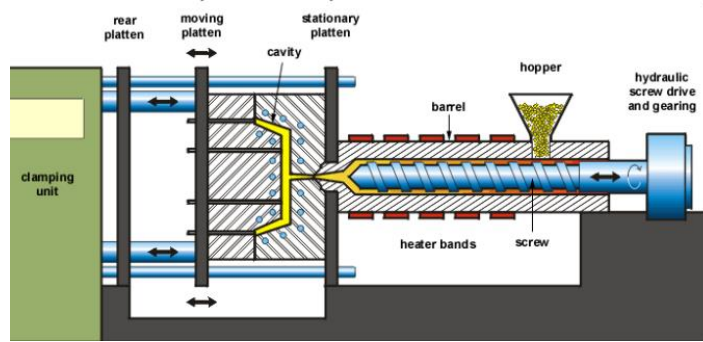
Şekil 2. 9. Reçine transfe kalıplama şematik gösterimi (Beşergil., 2016).

2.3.5. Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi

Birçok uygulamalarda plastiğin kalıplara enjeksiyon edilmesi gibi reçinede karıştırılan kısa elyafların kalıplara enjekte edilmesi mümkündür. 30 mm'ye uzunluk ölçülerine sahip elyaf bileşikler kullanılır ve malzemenin rulo ya da yığın şeklinde el ile ya da otomatik olarak beslenir. Çelik olan kalıplar 140-160°C sıcaklık değer aralığında ısıtılırlar. Bu uygulama, küçük boyutlu kalın numuneler oluşturmak için uygundur.

Bileşenler, bir piston aracılığı ile ana enjeksiyon bölümüne aktarılır ve daha sonra ikinci bir piston ile kalıp içerisine itilir. Bu sayede lifler boylarından ekşi kaybı olmaz, bu durumda kompozit üretiminde mekanik yeteneklerin korunması adına büyük önem taşır (Bunsell vd, 2005).

Ekstrüzyon, malzeme şekillendirme işlemlerinden biridir ve özellikle plastik, metal ve gıda endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan bir üretim yöntemidir. Ekstrüzyon yöntemi ve enjeksiyon yöntemi ile üretilen yaygın ürünler arasında, Plastik borular ve boru profilleri, alüminyum profiller, plastik şişeler, otomotiv parçaları, elektronik gövde ve bileşenlerine yer verilebilir. Ayrıca enjeksiyon ve ekstrüzyon yöntemleriyle ilgili birçok çalışma halen günümüzde yürütülmektedir (Sanes vd, 2020; Anuar vd, 2020; Frone vd, 2019).



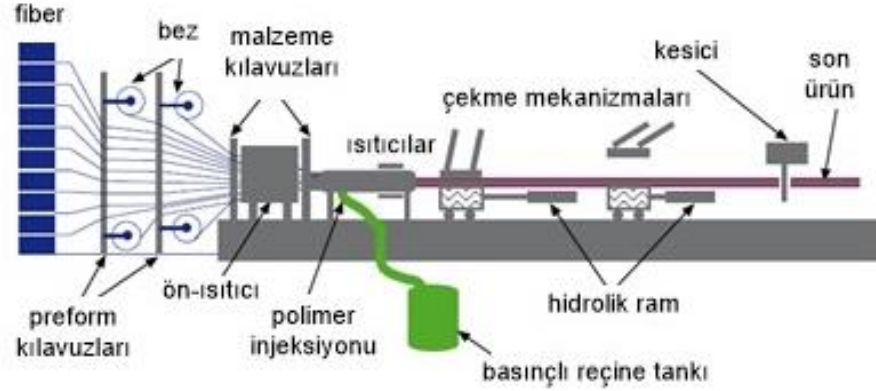
Şekil 2. 10. Enjeksiyon kalıplama şematik gösterimi (Banerjee, 2006).

Nitekim bu çalışmalar arasında kullanılan plastik malzemeler Şekil 2.10'da gösterilen bir vida dişli enjeksiyon kalıplamasında numune basımı gerçekleştirilmektedir. Malzemeler, bir piston yardımıyla enjeksiyon odasına aktarılır ve bir dişli vida sistemi

yardımla da kalıba enjekte edilebilmektedir. Bu uygulama esnasında herhangi bir basınç verilmez ve besleme hızı sabittir (Potter, 1996).

2.3.6. Pultrüzyon (CTP Profil İmalat Yöntemi)

Bu uygulama biçiminde, elyaf ve reçine karıştırılarak kompozit şekillendirme ve sert bir malzeme elde etme işlemi gerçekleştirilir. Genel olarak cam elyaf katkılarda bu yöntem tercih edilir. Kesintisiz tipte olan cam elyaf, bir sürekli makara sisteminde ya da bobin sistemde bir araya getirilerek polyester benzeri ısı ile sertleşen bir reçine emdirilir. Emdirilmiş elyaflar sonraki adımda, kalıptan yeterli seviyede güçlü bir kompozit malzeme çekilmesi için reçine katkıyı çapraz bağlayan, 90-150°C ısıtılmış bir kalıp içerisinde geçer. Bu uygulama, son derece kompleks kesitli profillerin 0,6-1,2 m/dk aralıklarında çekilmesine izin verir. Üretilmiş olan bu profiller katı ya da içi boş olabilirler. Bütün tek tip takviyelerle veya elyaf ve cam elyaf kombinasyonlarından yapılır (Potter, 1996). Şekil 2.11'de pultrüzyon yönteminin şematik resmi verilmektedir.

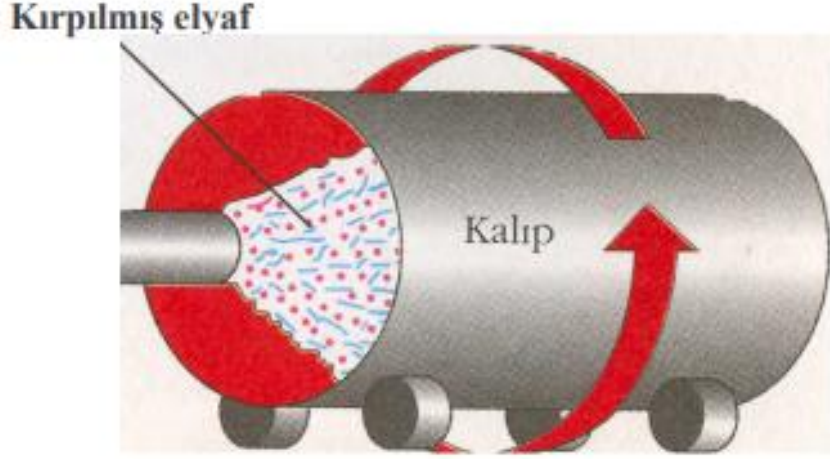


Şekil 2. 11. Pultrüzyon şematik gösterimi (Beşergil., 2016).

2.3.7. Savurma Döküm

Bu üretim yöntemi, boru, depo veya tank benzeri silindirik yapıların imalatında kullanılır. İçi boş kalıp içerisine reçine püskürtülür. Yüksek bir hızla döndürülen kalıbın oluşturduğu merkezkaç kuvveti, reçineyle etkileşime geçen takviye

malzemelerinin ıslanmasını ve kalıp yüzeyine tutunmasını sağlamaktadır. Bu üretim yöntemiyle üretilen parça kalıp içerisinde iç yüzeye temas eden dış kısmı malzemenin düzgün yüzeyini temsil eder, genel olarak her iki yüzeyde düzgün olarak elde edilir. Şekil 2.12’de savurma döküm yönteminin şematik resmi verilmektedir.



Şekil 2. 12. Savurma döküm yöntemi şematik gösterimi (Gülmez, 2018).

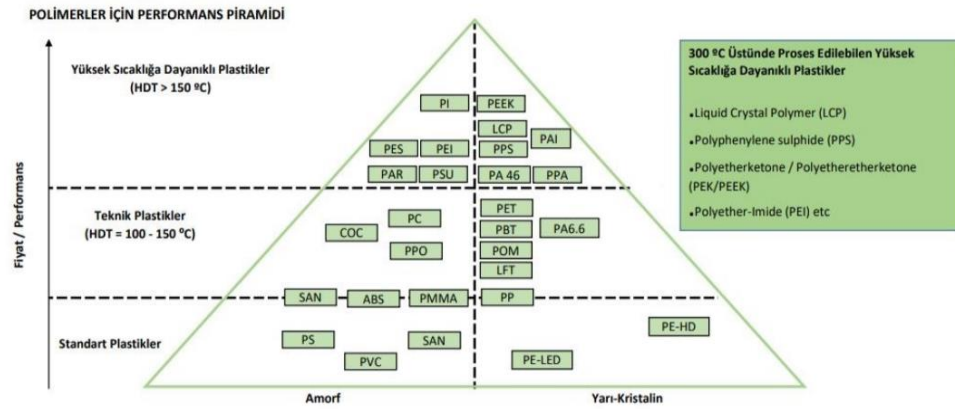
Kompozit malzemenin kimyasal dayanıklılığını artırmak amacıyla, üretilen malzemenin iç yüzeyine ince bir tabaka saf reçine püskürtme yöntemi kullanılmaktadır. Bu prosedür, iç yüzeyin daha da düzgün hale getirilmesini sağlamak amacıyla özenle uygulanmaktadır. Savurma döküm yöntemiyle, kalıp içerisindeki malzeme istenen şekli aldığı anda, su veya soğutma sıvısı püskürtülerek kalıp içindeki hava etkili bir biçimde soğutulmaktadır. Bazı durumlarda, soğutma kanalları içinde dolaşan sıvılar kullanılarak kalıp içindeki sıcaklık kontrolü daha hassas bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler, kompozit malzemenin üretiminde hem kimyasal dayanıklılığı artırmak hem de istenen fiziksel özellikleri elde etmek amacıyla başarıyla kullanılan karmaşık bir teknolojik süreci ifade etmektedir (Savaş, 2022).

BÖLÜM 3

YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN (YYPE)

Plastikler, sanayide özellikle son yıllarda hızlı bir ilerleme göstermiş ve üretim endüstrisinde vazgeçilmez bir malzeme olarak kendisini göstermiştir. Birçok sanayi alanında görülen uygulamalarda alternatif malzeme olarak tercih edilen plastikler, demir ve çelik gibi metallerin yerini doldurmaya başlamıştır. Plastik üzerine yoğunlaşan bu gelişmeler sonrası, plastik konusunda yetkinlik sahibi ve tecrübeli kişilerin varlığına olan ihtiyaçta artmaya başlamıştır. Yalnızca malzeme bilgisine karşı sınırlı kalmayan bu ihtiyaç, aynı zamanda da malzemelerin şekillendirme metotlarıyla da ilgilidir (Awad, 2019).

Her alanda plastik malzeme seçiminin başlıca sebepleri bulunur. Bu sebepler kullanım alanına göre malzemenin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre belirlenmektedir. Örnek olarak YYPE ile üretilen boru ve eklenti parçaları esneklik oranı, uzun kullanım süresi ve korozyon direnci, yorgunluk, servis süresi, kullanımın basitliği gibi özelliklerinden dolayı sıvı ve gazların taşınmasında metal boruların yerine tercih edilmektedir (Dağlı, 2021). Polimer malzemelerin performans piramidi ile ilgili veri Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3. 1. Polimerlerin Performans Piramidi (Dağlı, 2021).

Isıya maruz kaldığında yumuşayıp, soğudukça sertleşen polimer türüne termoplastik polimer denir. Ticarete yaygın olarak kullanılan termoplastik örneklerine Çizelge 3.1'de belirtildiği üzere; Polipropilen (PP), Polivinil klorür (PVC), Düşük Yoğunluklu Polietilen (DYPE) ve polibutilen tereftalat (PBT) gösterilebilir. Termoplastiklerin karakteristik yapısal özelliği, moleküler zincirlerinin doğrusal veya hafif dallanmış olmasıdır. Bu yüzden onlarda çapraz bağlantıya rastlanmaz. Moleküller arası etkileşim kuvveti, dallanmanın yoğunluğuna ve polimerin yan zincirlerine bağlı olarak varyasyon gösterebilir. Bu tür polimerler, belirli çözücülerde kolaylıkla çözülebilir, ısı altında yumuşayabilir ve birçok kez yeniden şekillendirilebilirler. Ancak bu yeniden şekillendirme işlemi sınırlıdır, zira her dönüşüm sonrasında malzemenin bazı mekanik ve fiziksel nitelikleri zayıflar (Saçak, 2005). Bazı termoplastiklerin tipik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3. 1. Bazı termoplastiklerin kimyasal gösterimi ve erime sıcaklıkları (Akpanekong, 2012)

Adı	Kimyasal Formülü	Erime Sıcaklığı °C
Alçak Yoğunluklu Polietilen	$[-CH_2 - CH_2 -]_n$	110
Yüksek Yoğunluklu Polietilen	$[-CH_2 - CH_2 -]_n$	126 - 132
Polipropilen	$[-CH_2 - CHCH_3 -]_n$	160 - 170
Polistiren	$[-CH_2 - CHC_6H_5 -]_n$	70 - 115
Polivinilklorür	$[-CH_2 - CHCL -]_n$	75 - 95
Akrilonitril Bütadien Stiren	$[-CH_2 - CH=CH - CH_2 -]_n$	105
Polietilen Tereftalat	$[-CO - C_6H_4 - COO(CH_2)_2O -]_n$	250 - 260

Polietilen, genel termoplastik kullanımında %35 oranında bir paya sahip olan, etilen gazının polimerizasyon sürecinden geçirilerek üretilen önemli bir polimerdir. Kustavson'un 1886 yılında başlattığı bu sentez çalışmaları, termoplastikler arasında polietilenin özel bir yere sahip olmasını sağlamıştır. Sanayi açısından bakıldığında, bu malzemenin üretimi 1938 yılında İngiltere'de yüksek basınçta (yaklaşık 520 atm) ve 185 - 205 °C sıcaklıklar arasında başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir (Sezer, 2007).

Polietilen oda sıcaklığında herhangi bir çözücünün etkisiyle çözülmez. Ancak uzun süre aromatik ve alifatik ortamlarda bulunduğu genişleyebilir. Suya karşı oldukça dayanıklı bir yapıya sahiptir ve 70 °C sıcaklıkta ksilen, tolüen ve petrol eterinde

çözünebilir özelliktedir. Ultraviyole (UV) ışınlarına maruz kaldığında hızla etkilenir, bu da kırılgenlığının artmasına ve yüzeyinde çatlakların oluşmasına neden olur. Polietilen, yüksek elektrik direncine sahip apolar bir polimerdir. Bu özelliği sayesinde polar sıvı buharlarını çok az miktarda geçirirken, apolar sıvı buharlarını daha yüksek oranda geçirebilir. Su buharına karşı geçirgenliği düşük olduğundan çeşitli malzemelerin kaplanması sıkça kullanılır (Yaşar, 2001).

Polietilen moleküllerinin oluşumunda farklı dallanma özellikleri taşıyan zincir şeklindeki makro moleküller, bu maddenin çeşitlilik kazanmasına sebep olur. Düz zincirli bir polietilen türünün üretimi özel koşullar gerektirir ve bu tür, YYPE olarak tanımlanır. Özel katalizörlerin kullanıldığı YYPE üretimi, maliyet açısından yüksektir. Diğer yandan, dallanmış zincirli yapıya sahip olan alçak yoğunluklu polietilen (AYPE), daha basit üretim süreçleri sayesinde ekonomik bir seçenek sunar. Büyük polimer moleküllerinin belirli bir düzende toplanması zor olabilir. Ancak, düz zincirli YYPE molekülleri, dallanmış yapıdaki AYPE moleküllerine kıyasla daha kolay bir şekilde kristal yapı oluşturabilir. (Basan, 2001). Ayrıca, yeni geliştirilen düşük basınçlı yöntemlerle, orta yoğunluklu polietilen (OYPE) ve borsal reaktörler ile alçak basınç otoklavlarında üretilen lineer alçak yoğunluklu polietilen (LAYPE) gibi ürünler de elde edilmektedir (DPT, 2001). Çizelge 3.2’de YYPE’ye ait fiziksel özelliklere yer verilmiştir.

Çizelge 3. 2. Polietilen (YYPE)’in fiziksel özellikleri (MATWEB)

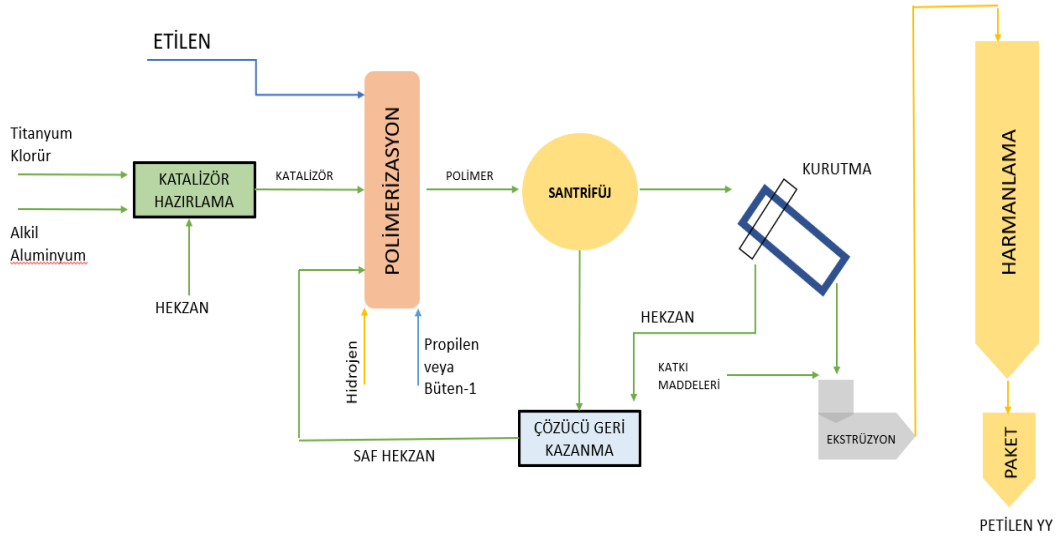
Yoğunluk	0,924 - 0,995 gr/cc
Parçacık Boyutu	5,00 - 1200 µm
Sertlik, Rockwell R	33,0 - 66,0
Elastikiyet Modülü	0,565 - 1,50 GPa
Gerilme direnci	7,60 - 43,0 MPa

YYPE, etilen gazının, Ziegler-Natta tipi koordinasyon katalisti yardımıyla, heksan ortamında düşük sıcaklık ve basınç koşullarında polimerizasyonu sonucu üretilir. YYPE'nin üretim şeması Şekil 3.2’de sunulmuştur. YYPE teknolojisi üzerindeki gelişmeler son yıllara dek devam etmiş ve bu alanda birçok patent kaydedilmiştir.

Teknolojik araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) faaliyetlerinin özellikle şu alanlarda yoğunlaştığı belirlenmiştir:

- Polimer matrisinde minimum kalıntı bırakan, yüksek aktiviteli katalizörlerin geliştirilmesi, bu sayede reaksiyon sonrası katalizör kalıntısı ayrıştırma işlemlerinin ortadan kaldırılması,
- Katalizör bileşeninin ve reaktör koşullarının modifikasyonu ile ürün kontrolünün sağlanması,
- Üretim hattının kapasitesinin optimize edilerek artırılması.

YYPE üretim teknolojisinde katalizörlerle ilgili birçok patent bulunmasına karşın, ticari uygulamalarda genellikle krom temelli ya da titanyum-alkil alüminyum temelli katalizörler tercih edilmektedir (MEB 2012).



Şekil 3. 2. YYPE üretim şeması (PETKİM, 2009).

YYPE, yapısal özellikler bakımından AYPE'ye benzerlik göstermesine rağmen, molekül kütlesi 150.000-400.000 g/mol aralığında olan daha sert bir polimerdir. Bu polimer, yüksek su direncine sahip olup kimyasal maddelere karşı da oldukça dirençlidir. Ancak ışık ve atmosfer koşullarına AYPE kadar dayanıklı değildir. YYPE'nin termoplastik doğası, yüksek kristalleşme potansiyeline sahip olmasından kaynaklanmaktadır, bu da -80°C ile 80°C arasındaki sıcaklık değerlerinde kullanımına imkân tanır. YYPE'nin mikroyapısında, amorf ve kristal olmak üzere iki ayrı faz

bulunur. Bu iki fazın varlığı, malzemenin makroskobik tepkisini belirlemede kritik bir rol oynamaktadır. Amorf faz, oda sıcaklığında kauçuk benzeri bir yapıya sahip olup, kristal fazın belirli değerlerde hareketine ve morfolojik değişikliklerine izin verir. Bu tür bir deformasyon, plastik deformasyon olarak adlandırılır ve büyük deformasyon seviyelerinde malzemenin moleküler yapısında herhangi bir bozulma olmaksızın geri kazanılabilir bir davranış gösterir (Shepherd vd, 2006).

YYPE'nin yavaş soğutulduğunda gözlemlenen kristalleşme oranı, hızlı soğutma yöntemine göre anlamlı bir şekilde daha yüksektir. Bu durum, malzemenin başlangıç özelliklerinde belirgin değişimlere yol açar. Ekstrüzyon veya enjeksiyon kalıplama süreçleri sırasında polimer eriyiğinin akışkanlığının yönlendirilmesi, malzemenin anizotropik bir yapı kazanmasına sebep olmaktadır. Bu, mekanik özellikler üzerinde çeşitli değişikliklere neden olur. Moleküler oryantasyon olarak adlandırılan bu durum, tokluk ve mukavemet direncinin artmasını sağlar (Düşünceli, 2007).

Yarı kristal yapıya sahip polimerlerin mikro yapısal özellikleri oldukça komplekstir. YYPE'nin fiziksel karakteristikleri, üç temel parametreyle doğrudan ilişkilidir: yoğunluk, moleküler ağırlık dağılımı ve mutlak moleküler ağırlık. Çekme mukavemeti, yumuşama sıcaklığı, rijitlik ve kimyasal direnç, yoğunluk artışıyla doğru orantılı olarak artmaktadır. Buna karşılık, düşük sıcaklıkta darbe mukavemeti, uzama ve geçirgenlik direnci yoğunluk arttıkça azalmaktadır. Piyasada bulunan birçok YYPE granülünün moleküler ağırlığı 50.000 ile 250.000 g/mol arasında değişmektedir. Moleküler ağırlığın arttırılması, çekme mukavemeti, tokluk, uzama, sünme direnci, gerilme çatlak direnci ve kimyasal direnci de arttırır. YYPE'nin farklı moleküler ağırlık dağılımları mevcuttur. Dar moleküler ağırlıklı materyallerde düşük sıcaklık performansı, tokluk, gerilme çatlak direnci ve yumuşama sıcaklığı iyileşirken; geniş moleküler ağırlıklı materyallerde düşük erime viskozitesi, daha iyi sünme direnci ve üstün enjeksiyon kabiliyeti gözlemlenir. Ancak çekme mukavemeti ve uzama özellikleri moleküler ağırlık dağılımının etkisine maruz kalmaz (Bartczak, 2005).

YYPE üretim süreçlerinde Ziegler-Natta ve Philips tipi katalizörler tercih edilmektedir. Bu katalizörlerin kullanılması, polimer yapısında minimal dallanma ile

yüksek polimerizasyon verimi sağlar. YYPE'de her 500 monomer ünitesi için ortalama 0,5 – 3 arasında metil grubu bulunmaktadır. Bu değer AYPE için 15 ile 30 arasında değişkenlik gösterir. Azalan dallanma, polimer zincirlerinin daha düzenli bir yapıda kristalleşmesine olanak tanır. YYPE'nin kristallik oranı %70-90 arasında değişir ve bu malzemenin kristal ergime sıcaklığı yaklaşık olarak 135°C'dır. Yüksek molekül ağırlığı, yoğunluk ve kristallik özellikleri nedeniyle yüksek yoğunluklu polietilen, düşük yoğunluklu polietilene göre daha dayanıklı, sert, tok ve kimyasal dirence sahiptir (Ergenç, 2019).

YYPE'nin dayanıklılığı ve kimyasal direnci nedeniyle çeşitli endüstrilerde geniş bir kullanım yelpazesi bulunmaktadır. Bazı yaygın kullanım alanları şunlardır; gıda ambalajları, şişeler, torbalar ve ambalaj malzemeleri, sulama boruları, sera filmleri, otomotiv sektöründe iç kısımların ve kaplama malzemelerinin üretiminde ve ayrıca havacılık sektöründe birçok kaplama malzemelerinde YYPE kullanılmaktadır (Ferreira vd, 2019). Ancak, YYPE'nin bazı zayıf noktaları vardır, özellikle yüksek sıcaklık, düşük tokluk, elektrik ve eğilme direnci gibi özelliklerde iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. Bu zayıf noktaları gidermek pek çok çalışmalar yapılmış ve mekanik özellikleri artırmak için YYPE matrisli kompozitler geliştirilmiştir (İlkay vd, 2021; Hejna, 2021).

Bu çalışmalar arasında Akdoğan vd. (2019), yaptıkları bir çalışmada YYPE matrislerine nanokil, alev geciktirici olarak amonyum polifosfat ve melaminin eklemesi yapmışlardır. Bu çalışma içerisinde Nanokil %2, Amonyum polifosfat ve melamin takviyeleri ise ağırlıkça %0-20 aralığında değiştirilerek eklenmiştir. Karıştırma işlemi, mekanik bir karıştırıcı ve iki vidalı ekstrüzyon tekniğiyle gerçekleştirilmiştir. Örnekler enjeksiyon kalıplama üretilerek mekanik ve termal testler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda nanokil takviyenin polimer malzemedeki çekme dayanımının ve termal genleşme katsayısının değerlerinin azaldığı gözlemlenmiş, eğilme dayanımlarının ise hafif arttığını incelemişlerdir. Bununla birlikte diğer katkı maddelerinin de çekme dayanımını azalttığı ancak polimer kompozitlerdeki eğilme modülünü ve yoğunluğunu artırdığı gözlemlenmiştir.

Khalaf (2011), yaptığı bir çalışmada YYPE malzemesi içerisinde kalsiyum karbonat, fiber cam ve lignoselüloz matrislerinden %5-25 oran aralıklarında karıştırarak üç farklı türde ürettiği kompozit numunelerin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Her bir dolgu malzemesini 60 gr'lık YYPE ile karıştırarak enjeksiyon kalıbından numunelerini hazırlamıştır. Hazırlanmış olduğu bu numuneler arasında yaptığı mekanik testler sonucunda gerilme testi sonuçları %5 oranda en yüksek kalsiyum karbonat matrisinde gözlemlenmiştir. Elastikiyet değerleri her üç malzeme için de %5'den %25 katkı oranına kadar her oranda artış sağlamıştır. Dolgu maddelerinin uzama yüzdesine etkisini incelediğinde katkı maddelerin uzama değerini düşürdüğünü incelemiştir. Darbe dayanımı testine geldiğinde kalsiyum karbonat ve fiber cam matrislerinin darbe dayanımını düşürdüğünü, lignoselüloz doğal lif katkısının ise darbe dayanımını oranca da arttırdığını gözlemiştir.

Xanthopoulou vd. (2023), yaptıkları bir çalışmada geri dönüştürülmüş YYPE matrisine kenevir takviye ederek çevre dostu ve özellikleri iyileştirilmiş kompozit malzemeler çalışması yürütmüşlerdir. Eritme karıştırma prosedürüyle PE-g-MA (Polietilen-g-Maleik Anhidrit) yüzey modifikasyonu uygulanmış YYPE matris ve %75 orana kadar ağırlıkça kenevir takviyesini karışımı sağlanarak sıkıştırma kalıplama ile kompozit numune üretimini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan mekanik testler incelendiğinde kenevir katkılı YYPE matrisinin %50 oran kenevir katkısına kadar elastikiyet modülünde bir artış sağlandığı gözlemlenmiştir. Ancak kenevir takviyeli YYPE'nin, düz YYPE'ye kıyasla daha düşük darbe dayanımı sağladığı gözlemlenmiştir. Bir sonraki test çalışmasında kenevir doğal lif takviyesinin antioksidan davranışı incelenmiştir. Bu özelliğini test etmek için numuneler etanol çözeltisinde bekletilmiş ve antioksidan tepki süreleri incelenmiştir. Oranca arttırılan kenevirin takviyesinin YYPE kompozitinin antioksidan özelliğini iyileştirdiği görülmüş ve bu kompozit malzemenin geri dönüştürülebilir ve çevre dostu bir malzeme olarak kullanımının yaygınlaşabileceğini vurgulanmıştır.

Okolo vd. (2020), yaptıkları bir çalışmada açık deniz mantolama uygulamaları için kaplama malzemesi olarak KNT katkılı YYPE kompozit malzemeleri üretmek çevresel koşullara ilişkin davranışlarını incelemişlerdir. Granül halde temin ettikleri YYPE içerisinde oranca %2, %4 ve %6 KNT eklemiştir. Çalışma sırasında ilk

olarak çift vidalı ekstrüder kullanılmış ve daha sonra elde edilen malzemeler 24 saat boyunca 70 °C vakumlu kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Bir sonraki aşamada tek vidalı ekstrüzyon kullanarak YYPE/KNT kompozit numuneler üretmişlerdir. Numuneler üzerinde çevresel faktörlere göre testler yapılmıştır. Yaptıkları bu çalışmada %2 ve %4 katkılı numuneler hava koşullarında teste bırakılmış ve KNT takviyesinin bu koşullar göre YYPE'nin mekanik özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Ancak %4 oranı üzerinde kullanılan KNT katkısının herhangi bir iyileştirme yaratmadığını bildirmişlerdir.

Mamunya vd. (2023), yaptıkları bir çalışmada YYPE içerisine %8 oranında karbon siyahı (CB), %8 oranında da karbon fiber (CF) ve üçüncü olarak da %4 karbon fiber artı %4 karbon siyahını birlikte ekleyerek ürettiği kompozit malzemeler üzerindeki elektriksel özelliklerini incelemiştir. Numune üretimi aşamasında YYPE'nin homojen bir şekilde karışması adına ilk önce YYPE'yi toz hale getirmiş ardından malzemelerin etkili bir şekilde dağılması için mekanik karıştırıcıyla her bir oranı karıştırmıştır. Daha sonra yapmış olduğu bu karışımları sıcak presleme kullanarak numuneler üretmiştir. İşlenmiş kompozitleri, dolgu türüne bağlı olarak YYPE-CB, YYPE-CF ve YYPE-CB/CF olarak adlandırmıştır. Bu numunelerin test aşamasında elektrik yükleyerek kompozit malzemelerin ulaşabileceği maksimum sıcaklık değerleri bulunmuştur. Elektrik yüklemeleri sonucunda YYPE-CB kompozitinde, 15 V'de 101 °C denge sıcaklığı, YYPE-CF kompozitinde, 10.5 V'de denge sıcaklığı 70 °C olduğunu ve YYPE-CB/CF kompozitinde, 12.4-17.0 V'de denge sıcaklığının 60 °C olduğunu hesaplamıştır. Bu çalışmalar arasında karbon siyahı takviyeli kompozitin elektrik dirençli plastiklerde etkili bir kullanım olabileceğini vurgulamıştır.

Gelecekteki araştırmalar, daha etkin takviye malzemeleri, üretim yöntemleri ve kompozit malzeme üretim stratejileri üzerine odaklanmaya devam etmektedir. Bu gelişmeler, YYPE matrisli kompozitlerin mekanik dayanıklılığı, termal stabiliteleri, çevresel faktörlere uyumluluğu ve diğer özellikleri üzerindeki etkilerini daha da artıracak ve endüstriyel uygulamalar için YYPE kompozit malzemelerin araştırma ve geliştirme çalışmalarını rekabetçi hale getirecektir.

BÖLÜM 4

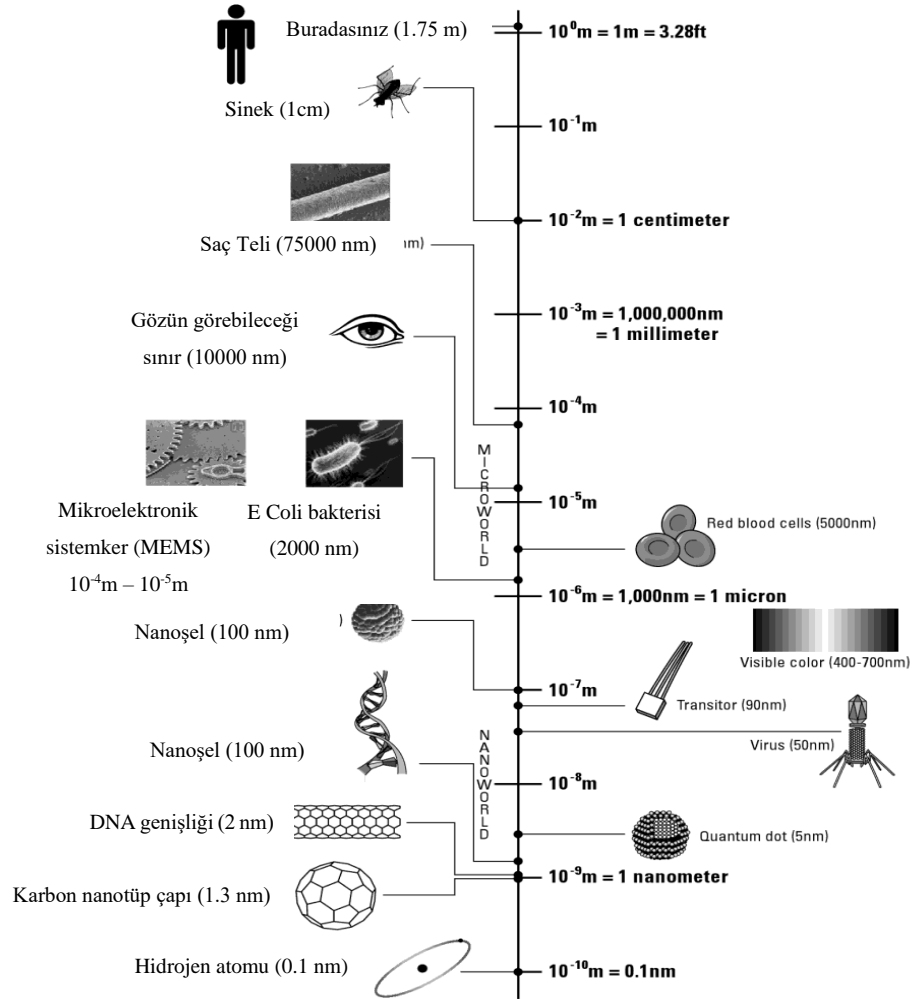
KARBON NANOTÜP

Nano terimi, herhangi bir fiziksel büyüklüğün milyarda biri olarak tanımlanır. Nanobilim ve nanoteknoloji isimleriyle anılan bu alanlar, son yıllarda global olarak hem sivil hem de askeri bilim ve teknoloji stratejilerini şekillendirme kapasitesine sahip olmuştur (Tübitak, 2004).

Karbondan türetilmiş materyaller, karbon atomlarının kendi aralarındaki bağlanma geometrisine bağlı olarak çeşitli fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmalarının yanı sıra, sınırsız sayıda farklı yapılanmaları sergilerler. Örneğin, elmas, karbon fiberler, karbin, karbolitler ve grafit gibi çeşitli karbon esaslı malzemeler bu kategoriye dahildir. Grafen, grafitin tek katmanlı yapısı olarak adlandırılan bir formudur ve karbon atomlarının altıgen yapıların bir bal peteği şeklinde düzenlenmiş halini temsil eder. Karbon nanotüpler, grafenin atom düzleminin bal peteğini anımsatan yapısının nanometrik çapa ve mikro metrik yüksekliğe sahip silindir şeklinde sarılmış bir formu olarak düşünülebilir (Yıldırım, 2016). Boyut karşılaştırmalarına ilişkin sıralama Şekil 4.1'de verilmiştir.

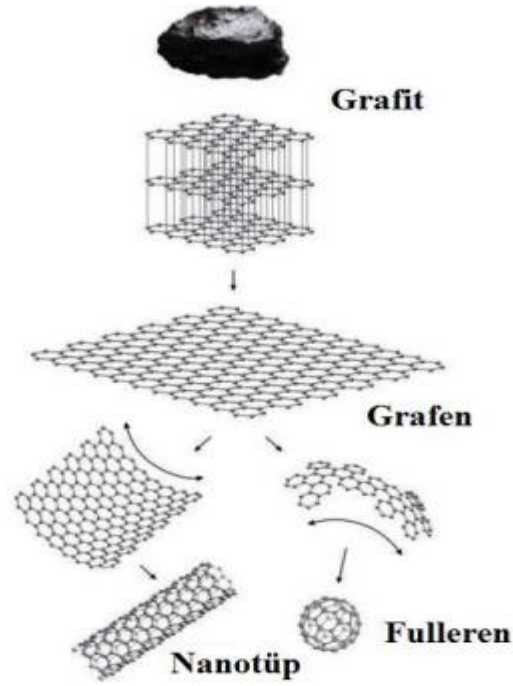
Çok duvarlı yapıdaki karbon nanotüpler, ilk olarak 1991 yılında, Japonya'da bulunan NEC Temel Araştırma Laboratuvarı'nda Dr. Sumio Iijima tarafından tanımlanmıştır. Takiben, 1993 yılında tek duvarlı nanotüpler hem NEC'de hem de Kaliforniya'daki IBM Araştırma Merkezi'ndeki bağımsız çalışmalarla keşfedilmiştir (J. Chen ve ark., 2021). Iijima tarafından ark buharlaştırma yöntemi kullanılarak keşfedilen karbon nanotüplerin (KNT'lerin) teorik ve deneysel araştırmalar sonucunda, elastikiyet modülü 600-1100 GPa aralığında değişmekte ve çekme dayanımı 35-110 GPa aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Bu materyaller, aynı ağırlıktaki çelikten 10-100 kat daha yüksek dayanıklılığa sahiptirler. Bununla birlikte, mekanik özelliklerinin ötesinde, termal iletkenliği elmasın iki katına, elektrik akım taşıma kapasitesi ise bakır

kablolarına göre 1000 kat daha fazla olması dikkat çekmektedir (Bhaskar, 2017; Soni, 2020; Muqaddas vd, 2023).



Şekil 4. 1. Boyut Karşılaştırmaları (Booker vd, 2005).

Günümüzde nanoteknoloji, çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılan önemli bir alan haline gelmiştir. Özellikle nanoteknolojik malzemeler arasında yaygın olarak kullanılan karbon nanotüp çok farklı özelliklere sahip olduğundan dolayı üzerinde oldukça fazla çalışmalar yapılmaya devam etmektedir (Yıldırım, 2016). Şekil 4.2’de Karbon bazlı malzemelerin yapısının şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4. 2. Grafit yapısının şematik gösterimi (Yıldırım, 2016)

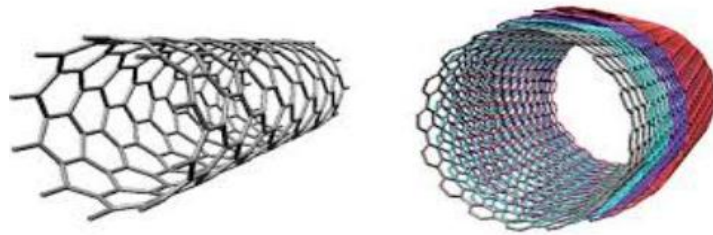
Karbon nanotüpler, son yıllarda bilim ve mühendislik alanında büyük bir ilgi görmüştür. Bu eşsiz yapıları, doğada bulunmayan ve insan tarafından üretilen en dayanıklı ve mukavemetli malzemeler arasında yer almaktadır. Buna ek olarak, yüksek iletkenlik performansı, elektrikli cihaz ve haberleşme teknolojisinde oldukça ilgi uyandırmıştır. Çok küçük boyutlara sahip olmasından dolayı, bu yapıların mükemmel özellikleri mühendislik malzemelerinde homojen bir halde gömülmeleri ya da dağılımı halinde yararlanılabilmektedir (Soni vd, 2020; Abubakre vd, 2023)

Karbon nanotüplerin elastikiyet modülü oldukça yüksektir. Elastikiyet modülü, malzemenin ne kadar sağlam ve dayanıklı olduğunu gösteren bir ölçüdür. Yüksek elastikiyet modülü, KNT'lerin çekme ve bükülme stresine karşı dirençli olduğu anlamına gelir. Bu özellik, malzemenin mukavemetini artırır ve onu dayanıklı kılar (Abubakre vd, 2023). Ayrıca karbon nanotüplerin ısı iletkenliği de oldukça yüksektir. İnce yapı ve kristal düzenli olan KNT'ler, ısıyı çok iyi iletirler. Bu özellik, ısı yönetimi gerektiren uygulamalarda, özellikle elektronik cihazlarda, ısı dağılımını artırmak için kullanılabilir (Muqaddas vd, 2023). KNT'ye ait bazı özellikler şu şekilde listelenmektedir (Sangoi, 2003):

- KNT'ler değer olarak $1000 \text{ m}^2 / \text{g}$ geniş bir yüzey alan oranına sahiptir.
- KNT'ler (havada $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar) ok yüksek sıcaklık kararlılığına sahip malzemelerdir.
- KNT'lerin elastikiyet modülleri için; TDKNT modülü $\sim 1 \text{ TPa}$ iken, ÇDKNT'nin değeri $\sim 1.28 \text{ TPa}$ 'dır. KNT'ler için $\sim 30 \text{ GPa}$ 'lık bir maximumu gerilme mukavemetinden bahsedilmektedir.
- Ayrıca KNT'ler mükemmel elektriksel iletkenliğe sahip olup özdirenç değeri $10^{-4} \Omega \text{ cm}$ 'dir.

Karbon nanotüpler, atomik yapılarındaki sp^2 bağları sayesinde benzersiz özelliklere sahiptir. Bu sp^2 bağları, atomların altıgen bir yapı oluşturarak yerleşmelerini sağlar; bu durum her atomun etrafında  komşu atomun var olmasına yol açar. Karbon nanotüpler, çaplarına, uzunluklarına ve yapılarına göre farklı tiplere ayrılırlar. Bir grafit tabakasının silindirik bir yapıya bükülmesiyle tek duvarlı bir karbon nanotüp meydana gelir. Grafenin bükülmesi ve nanotüp formasyonu Şekil 4.5'de sunulmuştur. Farklı tek duvarlı karbon nanotüplerin kümelenmesiyle, çok katmanlı karbon nanotüpler meydana gelir (Ben vd, 1998). Mühendislik polimerlerindeki matrislerinde kimyasal bağ kuvvetini arttırmak için, grafen yan duvarların ve uçların kimyasal modifiyesi gerekli olmaktadır (Spitalksy vd, 2010).

KNT'ler nanoteknolojinin temel bileşenlerindedir. Bu yapılar nanometre ölçeğinde saf karbon moleküllerinden oluşup, birkaç telin veya bir tel kümesinin levha Őeklini alacak Şekilde birbirine bağlanmış birçok mikro uzunlukta segmentlere sahiptir. Karbon nanotüpler tek duvarlı ve çok duvarlı olarak ikiye ayrılmaktadır. Şekil 4.3'te tek duvarlı karbon nanotüp için üç boyutlu modele yer verilmiştir (Sharifzadeh, 2006).



Şekil 4. 3. Tek duvarlı ve çok durvarlı karbon nanotüplerin 3 boyutlu modeli (Deng vd. 2022).

Son yıllarda, nanotüp üretimi için bir dizi metodoloji geliştirilmiştir. Standart bir üretim sürecinde, nanotüplerin elde edilmesi için bir karbon kaynağı, uygun katalizörler ve enerji gereksinimi bulunmaktadır. Güncel araştırmalara göre, yüksek verimle nanotüp üretimini gerçekleştiren en etkin yöntem, demir veya demir-molibden bazlı ince katalizör maddeleri ve CH₄, C₂H₄ gibi karbonca zengin gazların yer aldığı kimyasal buhar biriktirme (CVD) prosedürüdür. Metal katalizör, karbon içeren gazların dekompozisyonunu katalize ederken, elde edilen karbon molekülleri katalizör matrisinde çözülmemektedir. Katalizörün karbonla aşırı doygun bir hale gelmesi durumunda, fazla karbon atomları tübüler yapılar oluşturarak bir araya gelmektedir (Momohjimoh vd, 2018). Özgül özellikleri nedeniyle, nanotüpler, nanoteknoloji sahasında büyük bir ilgi görmekte ve bu alandaki en önemli buluşlardan biri olarak kabul edilmektedir. Karbon nanotüplerinin morfolojik yapısına ve boyutlarına bağlı olarak, elektronik özellikleri metalik veya yarı iletken olabilir. Metalik karakterleri sayesinde, karbon nanotüpler (KNT), bakırdan daha yüksek bir elektrik iletkenliğine sahip olabilir veya elmasan daha üstün bir termal iletim kapasitesine ulaşabilir (Cesano vd, 2021).

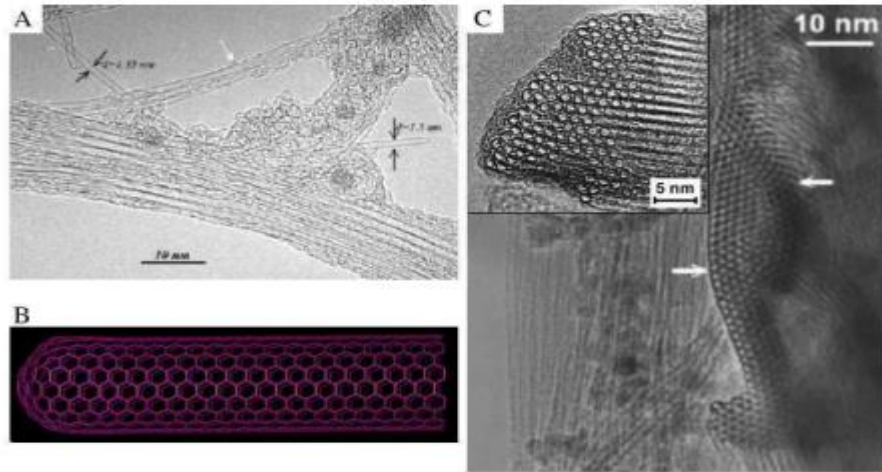
2001 yılında IBM'deki araştırmacılar, karbon nanotüp üretimine ilişkin yenilikçi bir yöntem bulmuşlardır. Bu yöntem, metalik nanotüpleri elektriksel bir şok dalgası maruz bırakarak modifiye eder ve bu işlem sonucunda sadece yarı iletken özellik gösteren karbon nanotüpler üretmeyi mümkün kılmaktadır. Bu nanotüpler, transistör yapımında kritik bir öneme sahiptir (Abazari vd, 2020).

Endüstride kullanılan tek duvarlı karbon nanotüpler (TDNT'ler), verimli ve çok amaçlı sensörlerin üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. TDNT'ler, tek molekül katman kalınlığına sahip oldukları için her bir atom yüzeyde bulunur. Bu nedenle nanotüp tabanlı sensörler, sıvı ve gaz ortamlarında çeşitli kimyasallara karşı olağanüstü hassasiyet gösterirler. Şu anda mevcut olan ve gelecekte tasarlanan birçok TDNT uygulaması, veri depolama cihazları, düz panel ekranlar, kondansatörler, ısı değiştiricileri, filtre membranları, uzay ekipmanları, biyosensör cihazları, piller ve teknolojik çipler gibi bir dizi alanda görülmektedir (Menceloğlu, 2008).

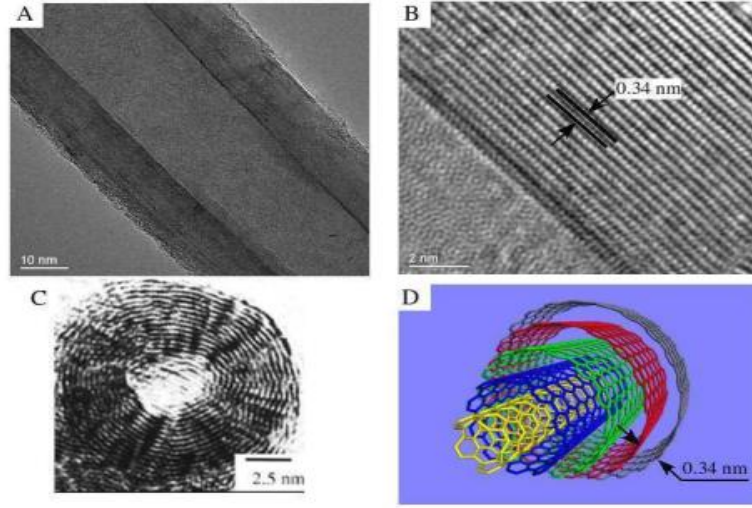
KNT'ler yapısal olarak tek veya çoklu grafen levha yapılarından oluşan, içi boş silindirik bir hacim olarak düşünülebilir. Bu silindirik hacmin çapı 0.4 nm'den 100 nm'a veya daha fazlasına kadar değişebilir (Kuchibhatla vd, 2007). Bununla birlikte Dresselhaus vd. (2004), 15 nm'nin üzerindeki çap değerlerine sahip borusal yapıları "karbon nanolifler" olarak sınıflandırmanın uygun olduğunu önermişlerdir.

Karbon nanotüpler, genellikle grafen duvar sayısına göre sınıflandırılabilirler. Genel olarak, nanotüp yapısı grafen tüp biçimindedir (Şekil 4.5). Grafen tüp duvarları arasındaki sayı, genellikle 1-2 nanometre arasında değişen ve Gauss dağılımı gösteren çap değerlerine sahiptir. Grafen tüpleri, kendilerini oluşturan grafen silindirin tüp eksenine göre yönelimlerine bağlı olarak üç farklı çeşitte bulunabilirler: koltuk, zigzag ve kiral nanotüpler (Chen vd, 2000).

TDNT'ler, genellikle altıgen bir kristal demet yapısında bulunurlar. Bu demetler, birbirlerine Van der Waals kuvvetleri ile bağlanır ve genellikle 100 ila 500 TDNT içerebilirler (Gao vd, 1998). Çok Duvarlı Nanotüpler (ÇDNT'ler), iki veya daha fazla grafen katmanına sahip olan nanotüp türleridir (Şekil 4.6). ÇDNT'lerin iç çapı 0.4 nm'ye kadar daralabilirken, dış çapları, daha önce belirtildiği gibi genellikle 15 nm civarındadır (Sun vd, 1996).



Şekil 4. 4. Tek duvarlı karbon nanotüp a) TDNT'lerin TEM görüntüsü, b) TDNT'nin şematik yapısı, c) TDNT demetleri (Yuca, 2010).



Şekil 4. 5. Çok duvarlı karbon nanotüp a) yanal TEM görüntüsü, b) yüksek çözünürlüklü yanal TEM görüntüsü, c) Tem ön kesit görüntüsü, d) ÇDNT'nin şematik yapısı (Kisele, 2001).

Son yıllarda KNT'ler takviye malzeme olarak malzeme biliminde büyük bir ilgi görmeye başlamış ve potansiyel uygulama alanlarında büyük umutlar vadetmektedir. Özellikle plastik malzemelerle birleştirildiğinde, yeni ve gelişmiş malzeme özellikleri ortaya çıkarabilmektedir. KNT'lerin plastik malzemelerle entegrasyonu, mevcut plastik malzemelerin özelliklerini geliştirmeyi amaçlayan birçok çalışmanın odak noktası olmuştur. Özellikle YYPE, dayanıklılığı ve kimyasal direnci nedeniyle KNT takviyeli matrisli çalışmaların çok olmasıyla dikkat çekmektedir. KNT'lerin YYPE ile birleştirilmesi, daha güçlü ve hafif malzemelerin elde edilmesi, iletkenlik özelliklerinin iyileştirilmesi ve termal iletkenliğin artırılması gibi avantajların sağlanabileceği yönünde çalışmalar yürütülmektedir.

4.1. KARBON NANOTÜP TAKVİYESİ İLE ÜRETİLEN POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Son yıllarda, nanoteknoloji alanındaki yapılan çalışmalar polimer kompozit malzemelerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır. Karbon nanotüpler, nanoteknolojinin önemli bir bileşeni olarak, benzersiz fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmaları nedeniyle geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir. Bu özellikler arasında yüksek mukavemet, yüksek elektriksel iletkenlik, yüksek termal iletkenlik ve hafiflik yer almaktadır (Frone vd, 2019). Tezin bu bölümünde KNT ile üretilen polimer kompozitlerle ilgili yapılan çalışmalara ve bu çalışmalar sonucunda elde edilen sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

Tang vd. (2003), yaptıkları bir çalışmada ağırlıkça %0, %1, %3 ve %5 oranlarında ÇDKNT takviyeli YYPE matrislerinin mekanik özelliklerini incelemiştir. KNT katkılı YYPE numunelerinin hazırlanması için çift vidalı ekstrüzyon kullanılarak kompozit film numuneler hazırlanmıştır. Elde edilen numunelerin mekanik özellikleri arasında SEM görüntüleri incelendiğinde ÇDKNT'nin YYPE içerisinde küçük kümelenmeler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda sadece ekstrüzyon karışımının homojen bir dağılıma yeterli olmadığını belirtmiştir. Daha sonra gerçekleştirilen küçük darbe deneyinde 0'dan 75 N'ya kuvvet uygulamaları gerçekleştirmişlerdir. Darbe deneyi sonuçları oranca arttırılan ÇDKNT katkısının darbe dayanımını arttırdığını göstermiştir.

Brian vd. (2009), tarafından gerçekleştirilen araştırmada, Karbon Nanotüp takviyeli Yüksek Yoğunluklu Polietilen kompozitlerin aşınma davranışı incelenmiştir. Bu çalışmada, ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranında Karbon Nanotüpleri ekstrüzyon yöntemiyle karıştırılarak aşınma testi için kalıplanmış numunelerin aşınma dirençleri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Karbon nanotüp içeriğinin arttıkça aşınma direncinde belirgin bir artış olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, KNT takviyeli YYPE kompozitlerin aşınma direncini artırma potansiyeline işaret etmektedir. Bu tür nanomalzemelerin kompozit materyallerde kullanımının aşınma direncini artırma açısından önemli bir strateji olabileceği vurgulanmıştır.

Yeşil (2010), yaptığı bir çalışmada YYPE kompozitlerin özelliklerini geliştirmek için KNT katkılı kompozitleri; işlem görmemiş, saf ve yüzey modifikasyonla çift vidalı ekstrüderde hazırlamıştır. KNT'nin yüzey modifikasyonu işleminde nitrik asit (HNO_3), sülfürik asit (H_2SO_4), amonyum hidroksit (NH_4OH) ve hidrojen peroksit karışımları kullanılmıştır. Daha sonra kompozit malzeme, YYPE ve KNT iki aşamalı ekstrüzyonda %0,25, %0,5, %0,75, %1 ve %1,5 oranlarında karıştırılarak üretilmiştir. Yapılan mekanik testler sonucunda YYPE kompozit malzemelerin arasında sınırlı mikrofiber oluşumundan dolayı, %0,75 ve %1 ağırlıkça karbon nanotüp konsantrasyonundan sonra kompozitlerin elektriksel iletkenlik, çekme modülü ve darbe dayanımı değerlerinde keskin düşüşler gözlenmiştir.

Ferriera vd. (2016), yaptıkları bir çalışmada yüzey modifikasyonu uygulanmış KNT takviyeli YYPE matrisinin mekanik özelliklerini incelemiştir. Kullanılacak olan KNT'leri başlangıçta HCl ve $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$ ile yüzey modifikasyonuna tabi tutmuşlardır. Daha sonra bu numuneleri selüloz nitrat membran filteyle saf su etkisiyle pH dengesi sağlanana kadar filtrelemiştir. Daha sonra işlenmiş ve işlenmemiş KNT'ler YYPE granülle mekanik karıştırıcıda karıştırılarak alimünyum kalıplarda vakumlanarak numuneler hazırlanmıştır. Daha sonra SEM ve TGA analizleri sonucunda asitle karıştırılan KNT'nin grafit yapısının bozulduğu gözlemlenmiş ancak matris içerisinde iyi bir dağılım oluşturduğunu gözlemlemiştir. Bununla beraber numunelerin saf YYPE'ye kıyasla oranca %1 KNT katkılı asitli YYPE numunesinin kırılma tokluğunu %5,4, rijitlik oranının ise %3,62 değerinde arttığını rapor etmişlerdir.

Salehi vd. (2019), yaptıkları bir çalışmada karbon nanotübünün yüzey modifikasyonunun farklı KNT içeriklerine sahip nanokompozitin mekanik, termal ve morfolojik özelliklerine etkisini incelemiştir. KNT/YYPE nanokompozitler, vidalı ekstrüder ile hazırlanmıştır. YYPE içindeki ÇDKNT'lerin dispersiyonunu değiştirmek için KNT'lerin yüzeyi HNO_3 ve stearik asit (SA) ile yüzey modifikasyon işlemi uygulamamışlardır. Gerilme testi sonuçları, YYPE'ye asit ile işlenmiş %5 KNT ilavesinin, modifiye edilmemiş KNT/YYPE nanokompozite kıyasla sırasıyla %4 ve %6 oranlı KNT katkılarına kıyasla Young modülünde ve akma dayanımında artışa neden olduğunu göstermektedir.

Jagannathan vd. (2023), 3D baskı kullanarak KNT katkılı YYPE kompozit malzemeleri üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışma da farklı oranlarda KNT'ler (0.5, 1, 1.5 ve 2%) takviye olarak kullanılmıştır. Çalışmanın başında KNT'ler homojen dağılımı sağlanması için 1000 ml diklorometan (CH_2Cl_2) çözücüsü kullanılmış ardından manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Daha sonra fırına bırakılan numuneler çözücüden uzaklaştırıldıktan sonra ekstrüzyon da karıştırılarak granül hale getirilmiş ve ekstrüder de bu granülleri 3D baskıya uygun filamente çevirmişlerdir. 3D baskıda hazırlanan numuneler daha sonra mekanik testlere tabi tutulmuştur. Yapılan testler sonucunda oranca arttırılan KNT katkılı YYPE kompozit numunelerinin mekanik özelliklerinin iyileştirildiği gözlemlenmiş ve elastikiyet modülü en yüksek değerler %2 KNT katkılı numunelerde gözlemlenmiştir.

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. GİRİŞ

Bu çalışmada matris malzemesi olarak PETKİM A.Ş’den ticari olarak temin edilen ve teknik Özellikleri Çizelge 5.1’de verilen Petilen YY I668 kodlu yüksek yoğunluklu polietilen malzemesi kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak Nanografi firmasından ticari olarak temin edilen %90 saflıkta 9,5 nm çapında 1,5 µm uzunluğunda çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) kullanılmıştır.

Çizelge 5. 1. Petilen YY 1668 YYPE özellikleri (PETKİM).

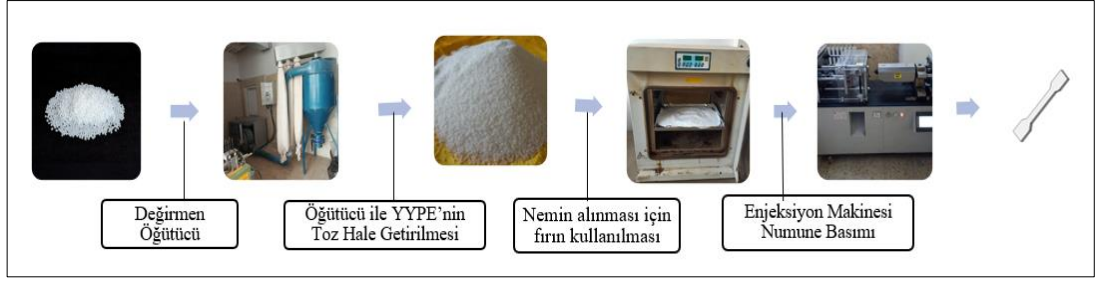
Özellikler	Tipik değer (*)	Birim	Test Metodu
Reçine Özellikleri			
Eriye Akış Hızı (190°C/2.16 kg)	5.5	g/10 min	ASTM D1238
Yoğunluk, 23°C ⁽¹⁾	0.965	g/cm ³	ASTM D1505
Eriye Noktası, (DSC, 2.ısıtma)	134	°C	ASTM D3418
Mekanik Özellikler (**)			
Akımda Gerilme Dayanımı	30	MPa	ASTM D638
Kopmada Gerilme Dayanımı	17	MPa	ASTM D638
Kopmada Uzama	1250	%	ASTM D638
Bükülme Modülü, 23°C	1200	MPa	TS EN ISO 178
Izod Darbe Dayanımı, 23°C (çentikli)	50	J/m	ASTM D256
Sertlik (Shore D)	66	-	ASTM D2240
Çevresel Baskıyla Kırılma Dayanımı (%10 Igepal, F50)	4	saat	ASTM D1693
Termal Özellikler			
Vicat Yumuşama Noktası, 10 N	124	°C	ASTM D1525

Granül halde temin edilen yüksek yoğunluklu polietilen malzemesi ilave edilecek takviye elemanının daha homojen karıştırılması amacıyla Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliğinde bulunan ve görüntüsü Şekil 5.1’de verilen değirmen ile öğütülerek toz haline getirilmiştir.



Şekil 5. 1. KBÜ- Teknoloji Fakültesi atolyesi endüstriyel tip öğütücü değirmen

Çalışma kapsamında yüksek yoğunluklu polietilen malzemesi içerisine %0,125, %0,250, %0,5 ve %1 olmak üzere 4 farklı oranda karbon nanotüp ve bu karbon nanotüpün matris içinde homojen dağılmasını sağlamak amacıyla 3 farklı karıştırma tekniği kullanılmıştır. Yapılan bu çalışma aşamalarının şematik görüntüleri Şekil 5.2., 5.3., 5.4. ve 5.5’te verilmektedir.



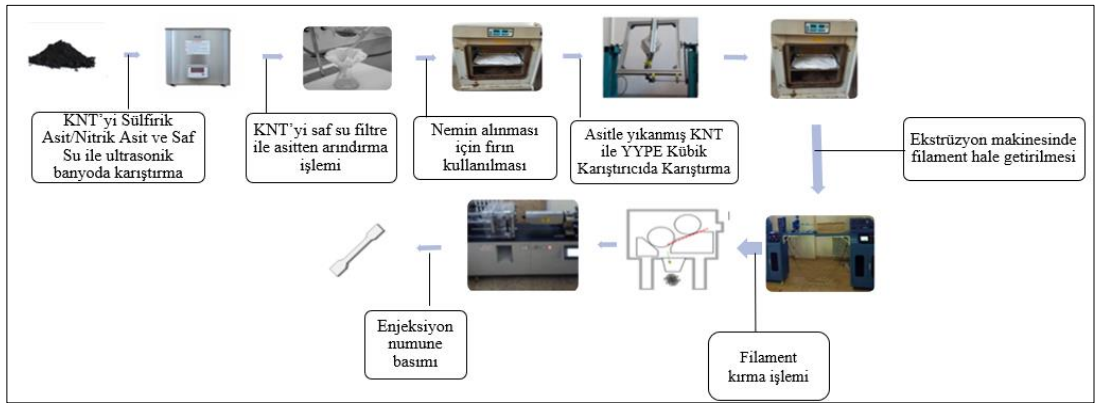
Şekil 5. 2. Saf YYPE numunelerinin üretim aşaması



Şekil 5. 3. Kübik karıştırıcı yöntemiyle KNT ile YYPE numunelerinin üretim aşaması



Şekil 5. 4. Aseton ile karıştırma yöntemiyle KNT ile YYPE numunelerinin üretimi



Şekil 5. 5. Asit ile yüzey modifikasyonu uygulanmış KNT ile YYP numunelerinin üretimi

5.2. MATRİS VE TAKVİYE ELEMANLARININ HAZIRLANMASI

Granül halden toz haline öğütülen matrisin yüzeyinde bulunabilecek nemin giderilmesi amacıyla bölüm laboratuvarında bulunan ve görüntüsü Şekil 5.6'da verilen Nüve Dry Air FN 050 marka fırınında 55 °C'de 4 gün boyunca bekletilmiştir.



Şekil 5. 6. Toz YYPE malzemesinin fırınlanarak neminin alınması

Çalışmada, nemi giderilen matris ve takviye elemanlarının ağırlık tartımları görüntüsü Şekil 5.7'de verilen Desis Cap marka model 0.001 g hassasiyetine sahip terazide tartılmıştır. Karışım oranları ve ağırlıkları Çizelge 5. 2'de verildiği gibi tartım sırasında her bir parametre için matris ve takviye elemanı toplamı 150 g olacak şekilde malzemeler tartılmıştır.



Şekil 5. 7. Karbon nanotüplerin hassas ölçülerde tartılması

Çizelge 5. 2. KNT ve YYPE karışım ağırlık oranları

Karışım Oranları ve Ağırlıkları		
KNT'lerin Yüzde Ağırlık Oranı	KNT Ağırlık Değeri	YYPE Ağırlık Değeri
% 0	0	150 g
%0,125	0,185 gr	149,81 gr
%0,250	0,375 gr	149,62 gr
%0,5	0,750 gr	149,25 gr
% 1	1,50 gr	148,50 gr

5.2.1. Matris ve Takviye Elemanlarının Karıştırılması

Karbon nanotüp takviyeli kompozitlerin üretilmesi ve matrise ilave edilecek karbon nanotübün aglomerasyonunun azaltılması, matris ile daha homojen bir karışım sağlaması amacıyla Çizelge 5.3'te verilen üç farklı karıştırma yöntemi ve kodlamaları verilmiştir.

Çizelge 5. 3. KNT ve YYPE karıştırma yöntemleri

Numune Kodu	Karıştırma tekniği	Karıştırma işlemi	Karıştırma Süresi	Karıştırma sonrası yapılan işlem
KB-KNT/YYPE	Kübik karıştırıcı	YYPE + dört farklı oranda KNT	30 dk	-
AS-KNT/YYPE	Asetonla karıştırma	KNT + aseton ultrasonik banyoda karıştırma	30 dk	55°C'de 4 gün bekletilmiştir
		KNT + aseton+ YYPE manuel karıştırma	30 dk	
Asit-KNT/YYPE	Asitle karıştırma	KNT + asit çözeltisi ultrasonik banyoda karıştırma	30 dk	55°C'de 4 gün bekletilmiştir
		KNT'nin asitten arındırılması		
		KNT ve YYPE nin manuel karıştırılması	30 dk	

Hassas terazide tartılan ve Çizelge 5.2'de karışım oranları ve ağırlıkları verilen matris ve takviye malzemelerin daha homojen karışması için bölüm laboratuvarında bulunan ve görüntüsü Şekil 5.8'de verilen kübik karıştırıcı ile her bir parametre için 30 dk karıştırma işlemi yapılmıştır.



Şekil 5. 8. Kübik karıştırıcı

Hassas terazide tartılan ve Çizelge 5.2’de karışım oranları ve ağırlıkları verilen matris ve takviye malzemelerin daha homojen karışması amacıyla her bir parametre için öncelikle 150 ml aseton içerisinde öncesinde tartılan dört farklı oranda karbon nanotüp konularak görüntüsü Şekil 5.9’de verilen Kudos SK3300H ultrasonik banyoda 30 dk boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra geniş bir kaba alınan aseton KNT karışımı içerisinde matris malzemesi ilave edilerek manuel olarak 30 dk boyunca karıştırılmıştır. Matris takviye elemanı aseton karışımından asetonun uzaklaştırılması amacıyla Çizelge 5.6’da görüntüsü verilen nüve fırında 55°C’de 4 gün boyunca bekletilmiştir.



Şekil 5. 9. Kudos SK3300H Ultrasonik Banyo

Takviye malzemesi olan karbon nanotüp aglomerasyonunu engellemek amacıyla beher içerisinde 3:1 oranında 90 ml, %95-98 derişim sülfürik asit (H_2SO_4), 30 ml, %65 derişim nitrik asit (HNO_3) karıştırılmıştır ve ardından asit derişimini kontrol altına almak için 120 ml saf su karışımı konularak çeker ocak içerisinde çözelti hazırlanmıştır.

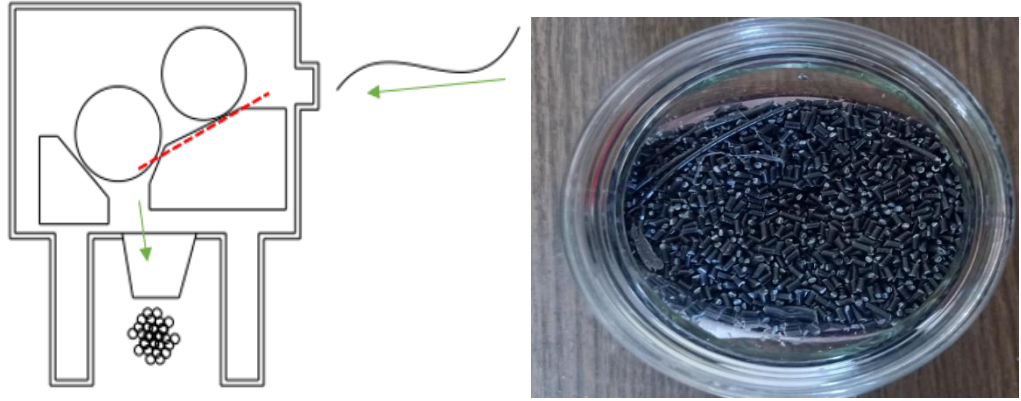
Hazırlanan çözelti içerisinde hassas terazide tartılan ve Çizelge 5.2’de karışım oranları ve ağırlıkları verilen KNT ilave edilerek görüntüsü Şekil 5.6’da verilen ultrasonik banyoda 30 dk boyunca bekletilmiştir. Bekletme süresi sonunda 0.45µm gözenek çapına sahip selüloz nitrat membran filtre ile süzülmüştür ve ardından asitten arındırılıp Ph metre ile kontrol edilerek 7 Ph seviyesine gelecek şekilde saf su ile yıkanmıştır. Saf su ile yıkanan KNT yüzeyinde bulunan nemin giderilmesi amacıyla Şekil 5.6’da görüntüsü verilen nüve fırında 4 gün boyunca 55°C’de bekletilmiştir. Ardından nemi alınan KNT matris ile kübik karıştırıcı da karıştırılmıştır.

Üç farklı karıştırma işlemi ve dört farklı oranda KNT ilave edilerek hazırlanan karışımlar Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği laboratuvarında bulunan ve görüntüsü Şekil 5.10’da verilen tek vidalı ekstrüder ile giriş sıcaklığı 200 °C, eritme sıcaklığı 240 °C ve çıkış sıcaklığı 220 °C değerlerinde olacak şekilde filament haline getirilmiştir.



Şekil 5. 10. Tek vidalı ekstrüder görüntüsü

Üç Farklı karıştırma yöntemi ve dört farklı oranda KNT içeren ve filament haline getirilen kompozitler yine bölüm laboratuvarında bulunan ve şematik görüntüsü Şekil 5.11’de verilen kırıcı yardımıyla küçük parçalara ayrılmıştır.



Şekil 5. 11. Kırıcı yardımıyla filament öğütme işlemi ve elde edilen granül KNT ve YYPE hammaddesi

Üç farklı karıştırma tekniği ve dört farklı oranda KNT karıştırılarak elde edilen ve filament işlemi sonrası kırıcı ile granül hale getirilen kompozit karışımlar Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği laboratuvarında bulunan ve görüntüsü Şekil 5.12’de verilen enjeksiyon makinesinde giriş sıcaklığı 200 °C, eritme sıcaklığı 240 °C ve çıkış sıcaklığı 220 °C olarak ayarlanarak her bir parametreden şematik resmi ve gerçek görüntüsü Şekil 5.13’de verilen ASTM D638 TYPE I standartlarında 5’er adet çekme numuneleri basılmıştır.



Şekil 5. 12. Plastik enjeksiyon çekme testi numunelerinin alınması



Şekil 5. 13. ASTM D638 TYPE I standartlarına göre çekme numunesi

5.3. ÇEKME TESTİ

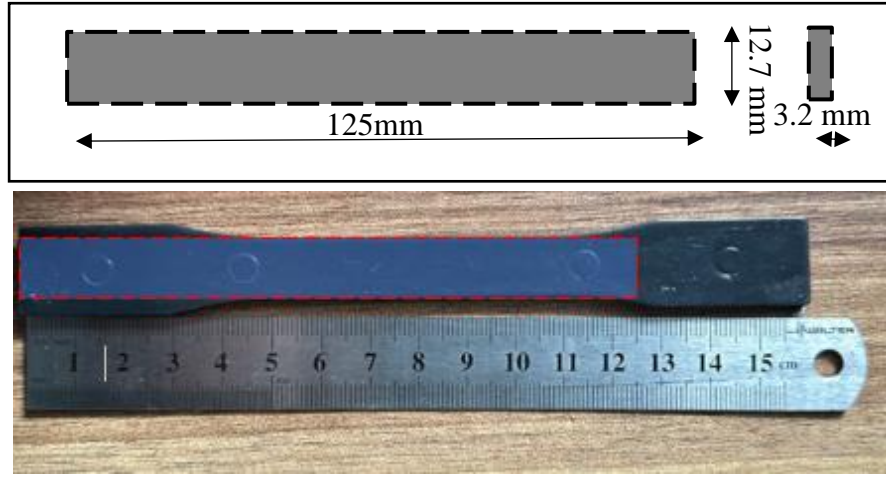
Üç farklı karıştırma tekniği ve dört farklı oranda KNT ilave edilerek üretilen kompozitlerin çekme testleri Şekil 5.14'te verilen Zwick/Roell Z050 Universal test cihazında 20 mm/dk çekme hızında yapılmıştır.



Şekil 5. 14. Zwick/Roell çekme test cihazı

5.4. ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ

Üç farklı karıştırma tekniği ve dört farklı oranda KNT ilave edilerek üretilen kompozit malzemelerin üç nokta eğme test numuneleri çekme testi için hazırlanan numunelerden ASTM D790 standartlarına göre kesilerek hazırlanmış ve görüntüsü Şekil 5.15'te verilmiştir. Şekil 5.14'te bulunan Zwick/Roell Z050 Universal test cihazında 2 mm/dk hızında yapılmıştır.



Şekil 5. 15. Üç nokta eğme testi için hazırlanan numune ölçüleri

5.5. MİKROYAPI İNCELEMELERİ

Dört farklı oranda KNT ilavesi sonrası elde edilen kompozitlerde KNT'nin yapıda dağılımını gözlemlemek amacıyla kübik karıştırıcıda karıştırılan numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsünde bulunan ve görüntüsü Şekil 5.16'da verilen CARL ZEISS marka SEM cihazında yapılmıştır.



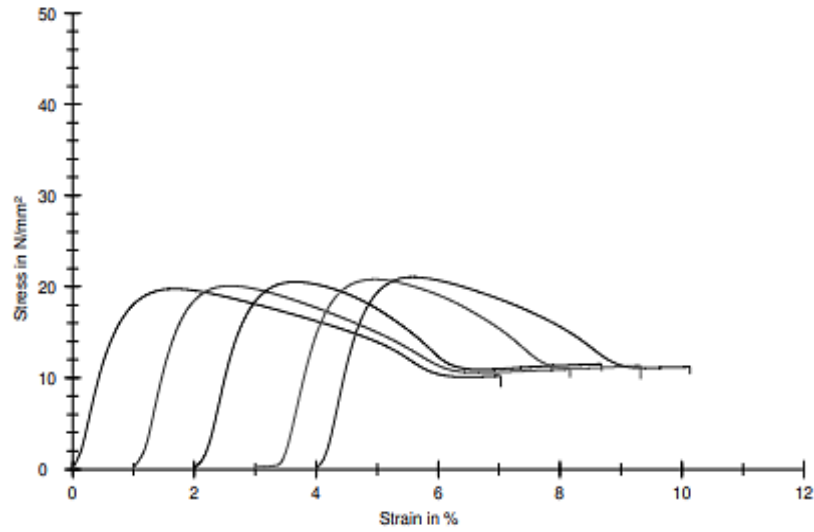
Şekil 5. 16. Karabük Demir Çelik Enstitüsü SEM Laboratuvarı

BÖLÜM 6

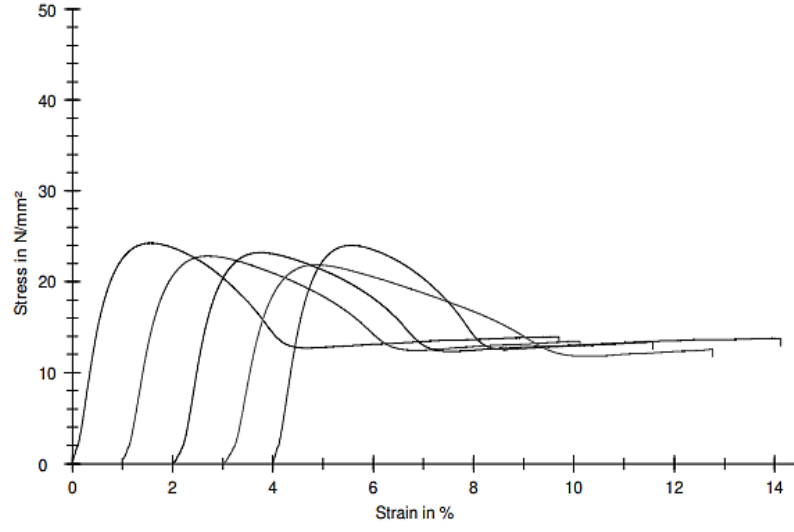
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

6.1. ÇEKME DENEYİ TESTİ SONUÇLARININ İNCELENMESİ

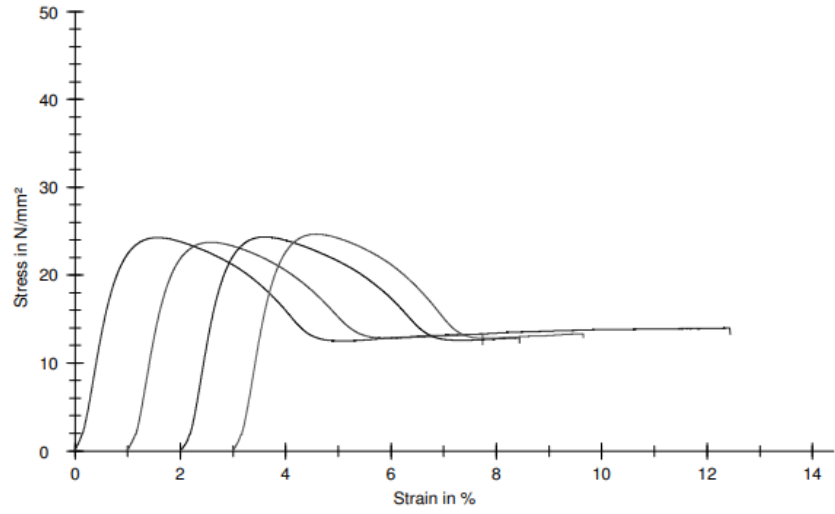
Öğütülerek toz hale getirilen saf YYPE ve dört farklı oranda KNT ilave edilerek kübik karıştırma sonrasında üretilen kompozit numunelerin çekme testi sonrası elde edilen gerilim-gerinim grafikleri sırasıyla Şekil 6.1., 6.2., 6.3., 6.4. ve 6.5'te ve bu grafiklerden elde edilen değerlerle hesaplanan ortalama Max. Gerilme (çekme dayanımı) grafiği Şekil 6.6'da verilmektedir.



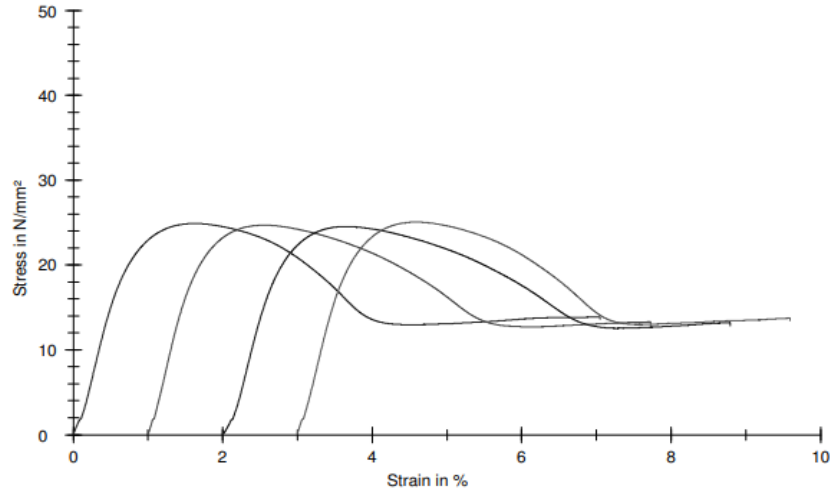
Şekil 6. 1. Saf YYPE çekme numunelerinin gerilim-gerinim grafiği



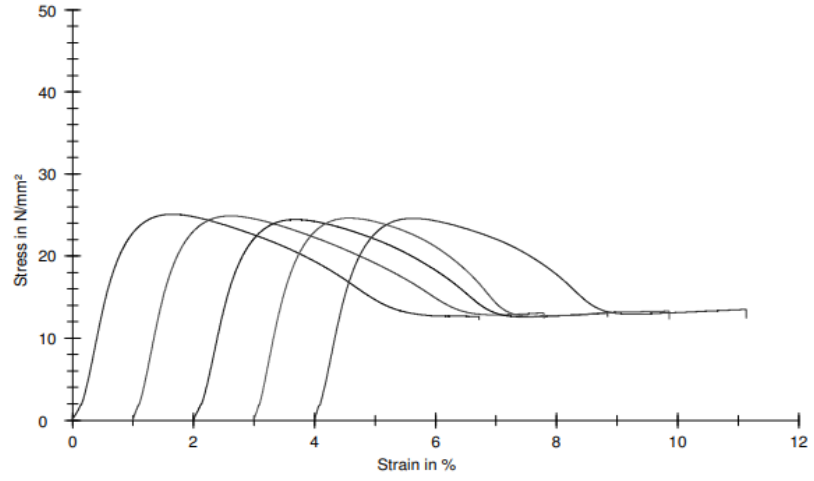
Şekil 6. 2. %0,125 KB-KNT/YYPE çekme numunelerinin gerilim-gerinim grafiği



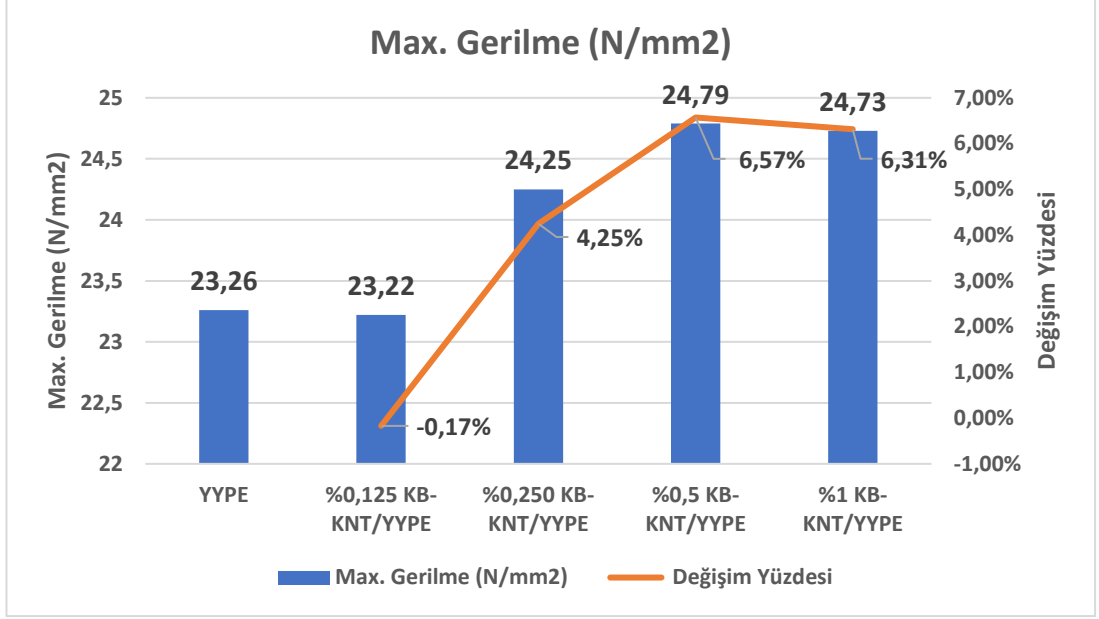
Şekil 6. 3. %0.250 KB-KNT/YYPE çekme numunelerinin gerilim-gerinim grafiği



Şekil 6. 4. %0,5 KB-KNT/YYPE çekme numunelerinin gerilim-gerinim grafiği



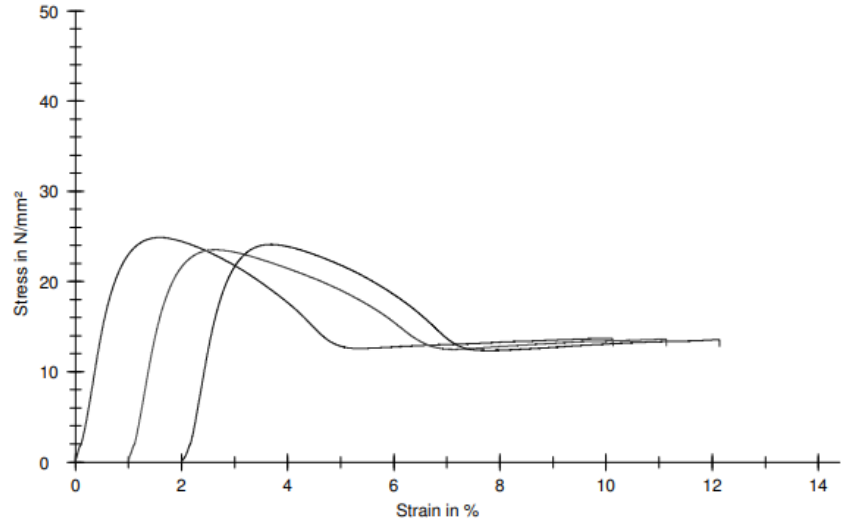
Şekil 6. 5. %1 KB-KNT/YYPE çekme numunelerinin gerilim-gerinim grafiği



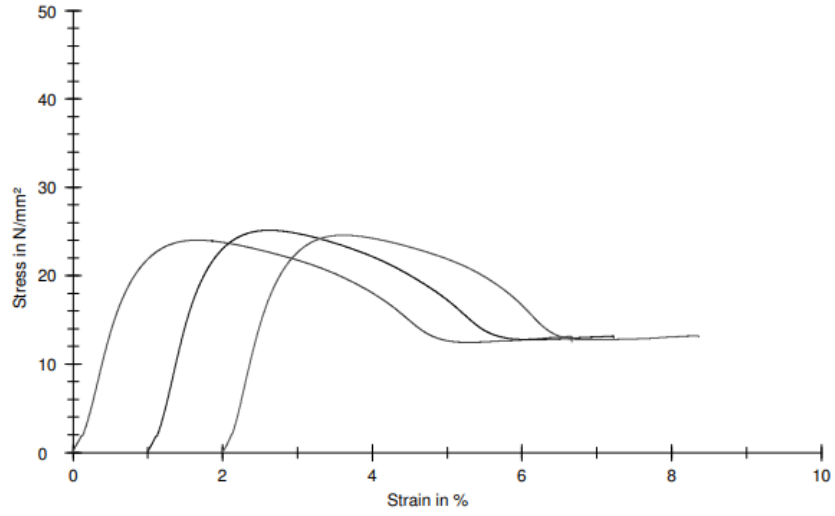
Şekil 6. 6. Saf YYPE ve KB/KNT-YYPE kompozitlerin çekme testi sonuçlarının ortalama grafiği

Yapılan çekme testleri sonrasında ilave edilen KNT oranı arttıkça çekme dayanımının arttığı en yüksek çekme dayanımı, saf malzemeye göre %6,57 artış ile %0,5 KNT ilave edilerek üretilen kompozitlerde tespit edilmiştir. Ancak %1 KNT ilave edilerek üretilen kompozitin çekme dayanımı %0,24 oranında azalmıştır.

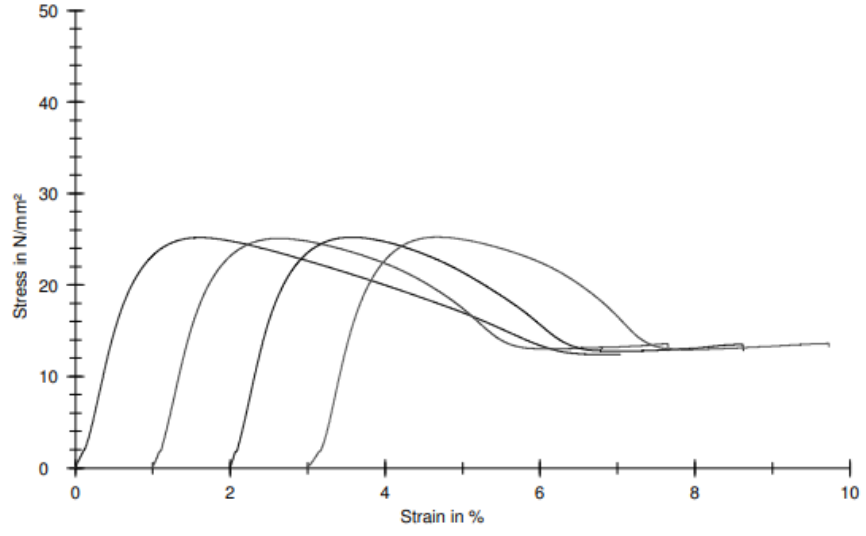
Aseton ile KNT yıkama işlemi sonrasında üretilen kompozit numunelerin çekme testi sonrası elde edilen gerilim-gerinim grafikleri Şekil 6.7., 6.8., 6.9., 6.10'da ve bu grafiklerden elde edilen değerlerle hesaplanan ortalama Max. Gerilme (çekme dayanımı) grafiği Şekil 6.11'de verilmektedir.



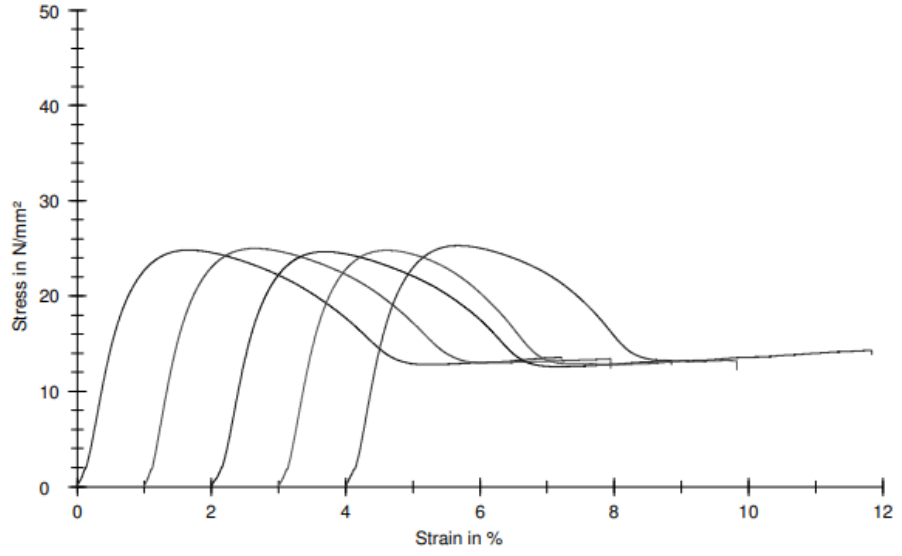
Şekil 6. 7. Aseton ile yıkanmış %0.125 KNT / YYPE numunelerinin gerilim-gerinim grafiği



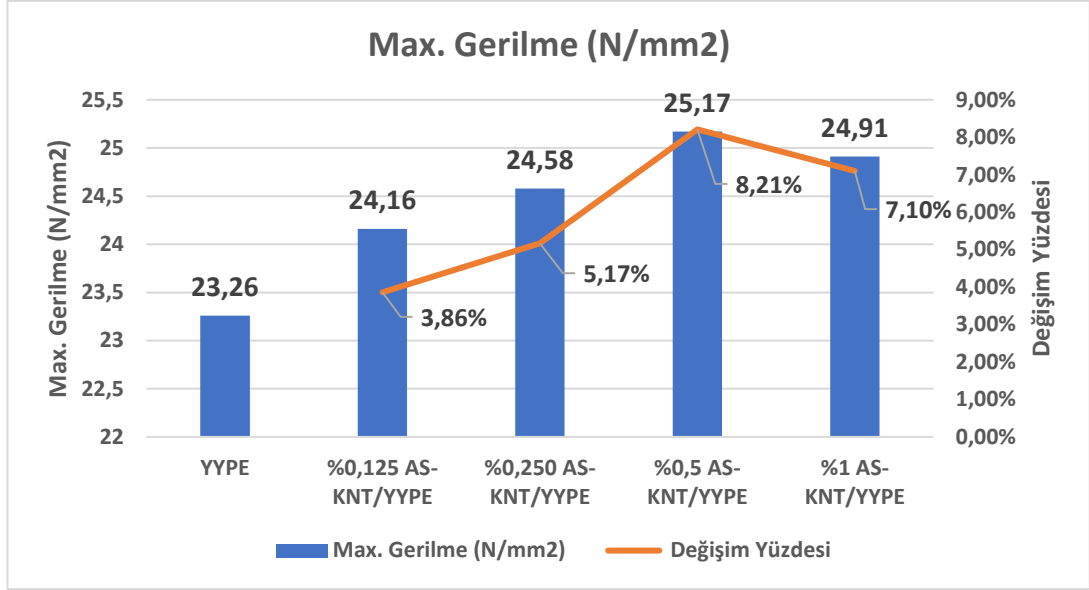
Şekil 6. 8. Aseton ile yıkanmış %0.250 KNT / YYPE numunelerinin gerilim-gerinim grafiği



Şekil 6. 9. Aseton ile yıkanmış %0.500 KNT / YYPE numunelerinin gerilim-gerinim grafiği



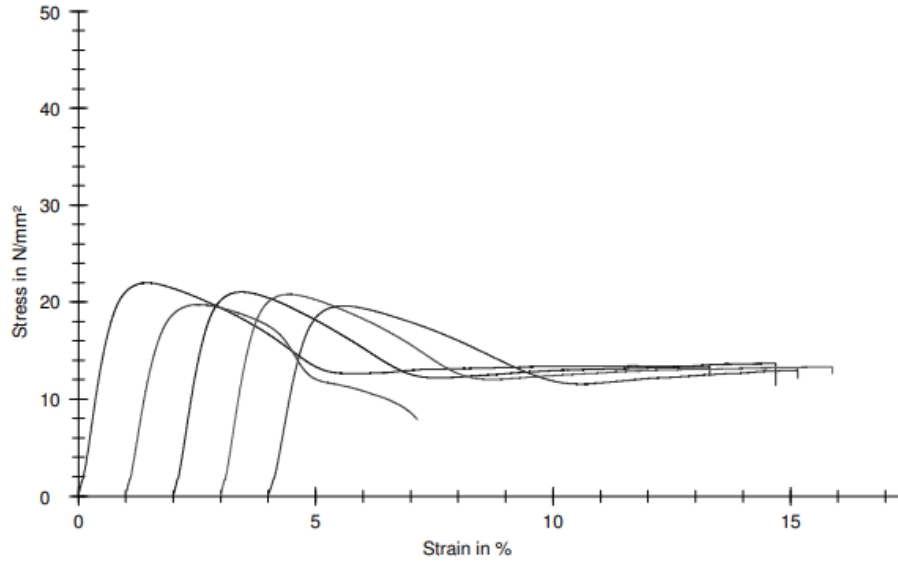
Şekil 6. 10. Aseton ile yıkanmış %1 KNT / YYPE numunelerinin gerilim-gerinim grafiği



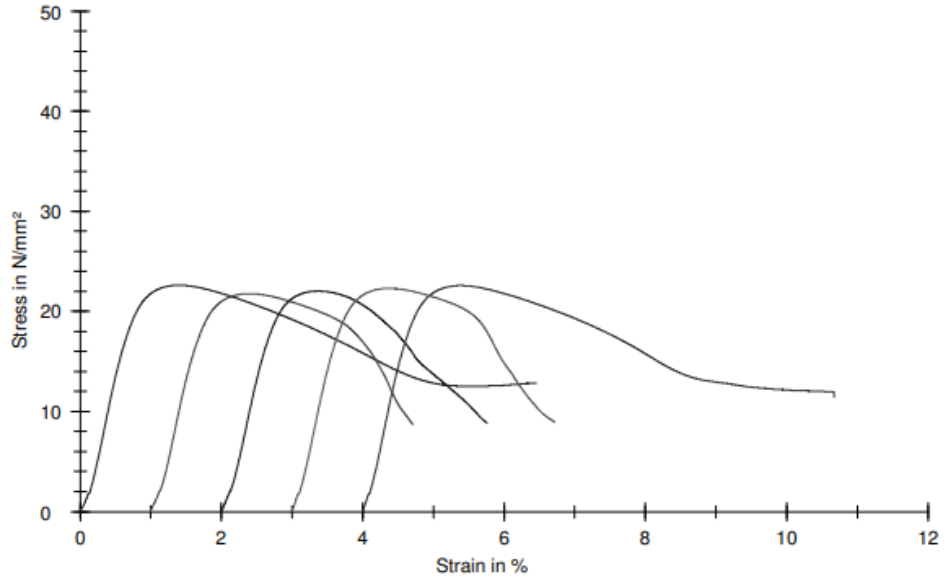
Şekil 6. 11. Aseton ile yıkanmış KNT Katkılı YYPE numune çekme deneyi testi sonuçlarının ortalama grafiği

Yapılan çekme testleri sonrasında ilave edilen aseton ile yıkanmış KNT oranı arttıkça çekme dayanımının arttığı en yüksek çekme dayanımı, saf malzemeye göre %8,21 artış ile %0,5 KNT ilave edilerek üretilen kompozitlerde tespit edilmiştir. Ancak %1 KNT ilave edilerek üretilen kompozitin çekme dayanımı %1,03 oranında azalmıştır.

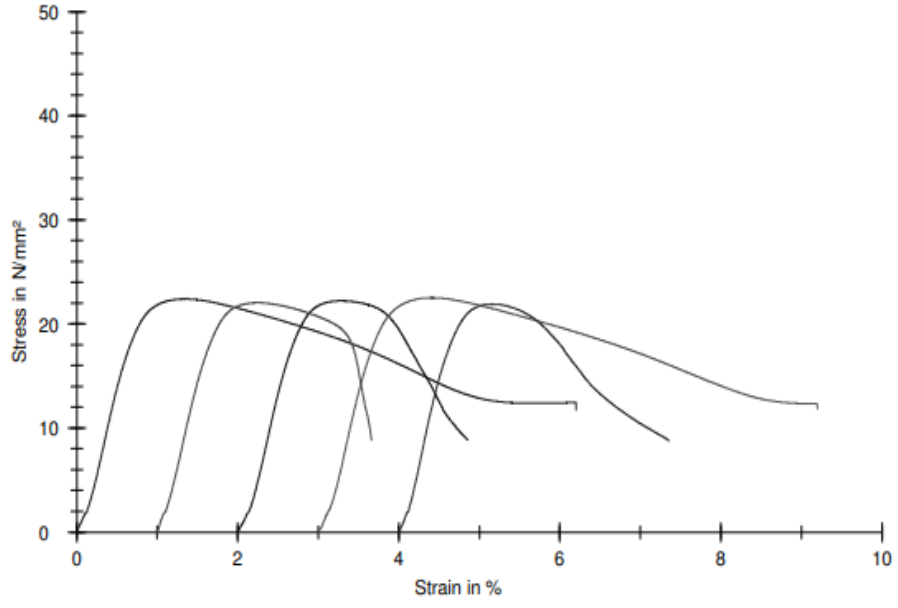
Sülfirik Asit/Nitrik Asit yüzey modifikasyonlu KNT katkıli üretilen YYPE kompozit numunelerin çekme testi sonrası elde edilen gerilim-gerinim grafikleri Şekil 6.12., 6.13., 6.14., 6.15'te verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen değerlerle hesaplanan ortalama max. gerilme (çekme dayanımı) grafiği Şekil 6.16'da verilmektedir.



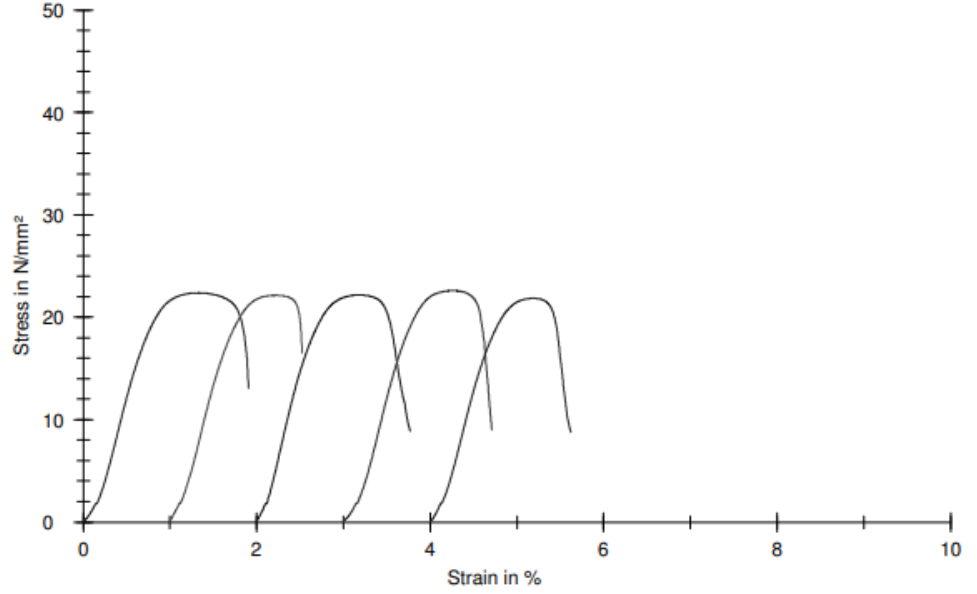
Şekil 6. 12. Sülfirik asit/nitrik asit yüzey modifikasyonlu %0,125 KNT / YYPE numunelerinin gerilim-gerinim grafiği



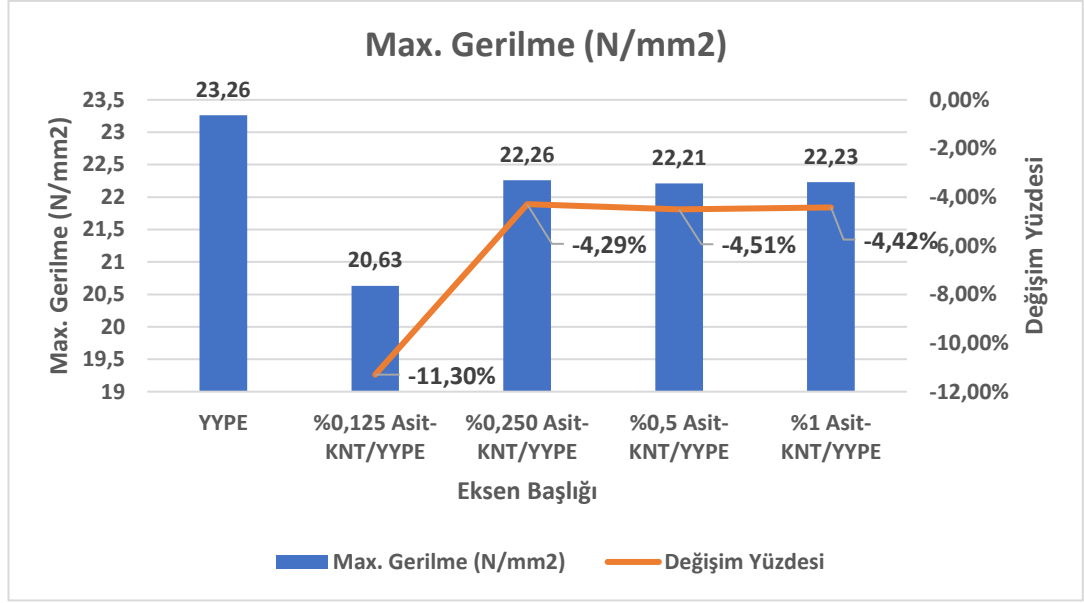
Şekil 6. 13. Sülfirik asit/nitrik asit yüzey modifikasyonlu %0,250 KNT / YYPE numunelerinin gerilim-gerinim grafiği



Şekil 6. 14. Sülfirik asit/nitrik asit yüzey modifikasyonlu %0,5 KNT / YYPE numunelerinin gerilim-gerinim grafiği



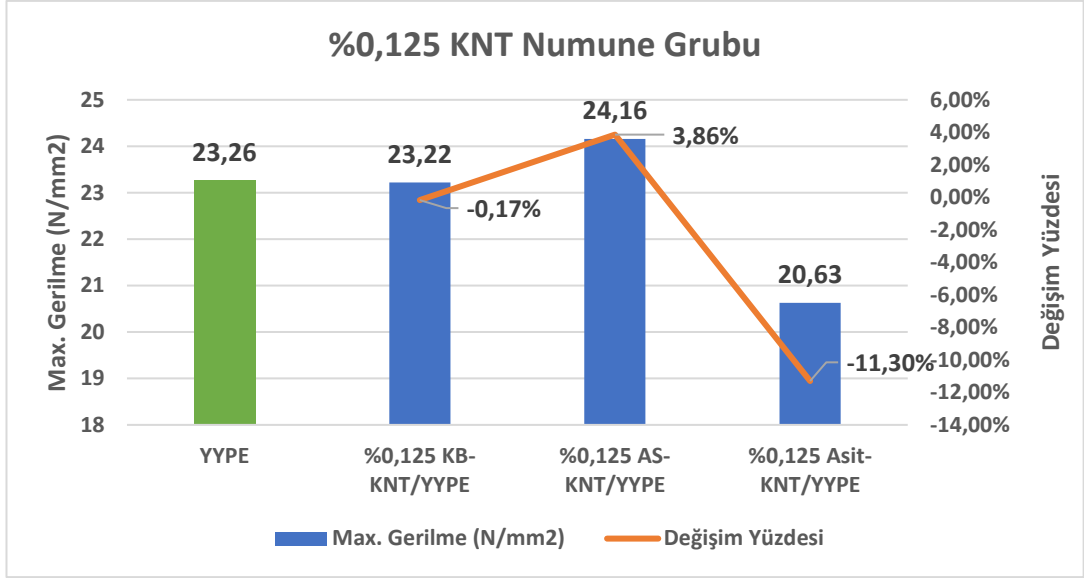
Şekil 6. 15. Sülfirik asit/nitrik asit yüzey modifikasyonlu %1 KNT / YYPE numunelerinin gerilim-gerinim grafiği



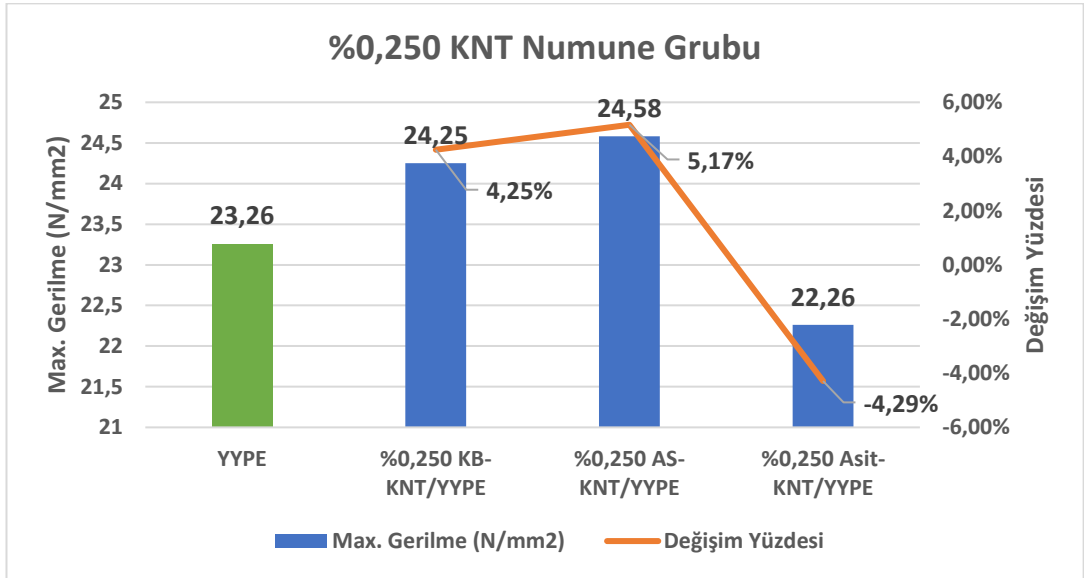
Şekil 6. 16. Nitrik Asit ve Sülfirik Asit yüzey modifikasyonlu KNT Katkılı YYPE numune çekme deneyi testi sonuçlarının ortalama grafiği

Yapılan çekme testleri sonrasında sülfirik asit, nitrik asit ve saf su karışımı ile yüzey modifikasyonlu numunelerde KNT oranı arttıkça çekme dayanımı değerlerinin saf YYPE çekme dayanımı değerine göre azaldığı hesaplanmıştır. Bununla beraber sülfirik asit, nitrik asit ve saf su karışımı ile yüzey modifikasyonlu numunelerde %1 KNT oranındaki YYPE kompozit numunelerin çekme testlerinde kopmalar gerçekleşmiştir.

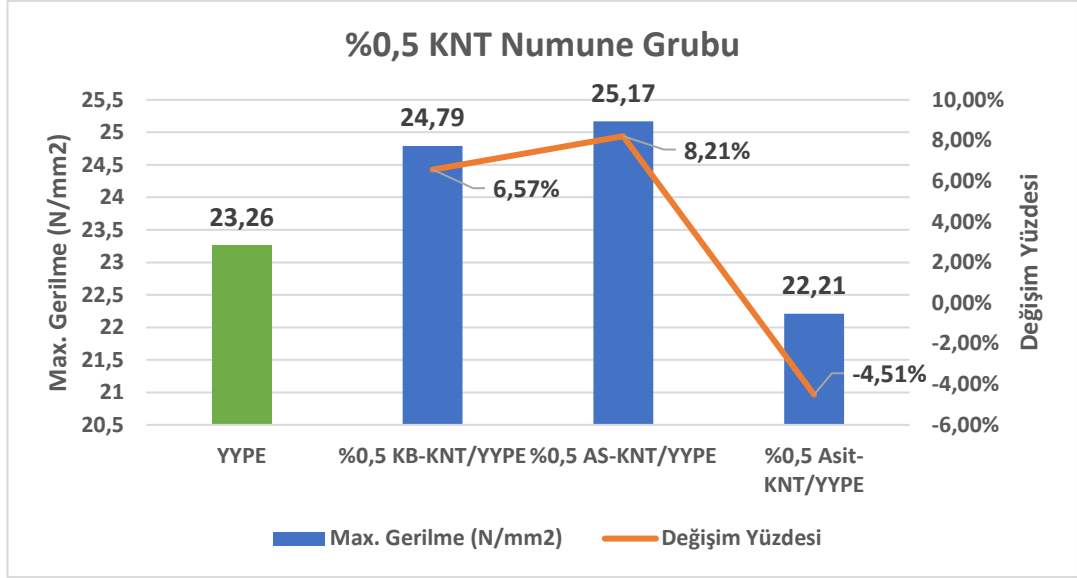
Karıştırma yöntemlerine göre verilen çekme değerleri sonuçlarını daha iyi anlayabilmek için KNT katkı oranları aynı olan ve farklı karıştırma yöntemleriyle karıştırılan kompozit numunelerin çekme değerleri ve yüzdelik değişimleri sırasıyla Şekil 6.17., 6.18., 6.19. ve 6.20'de verilmiştir.



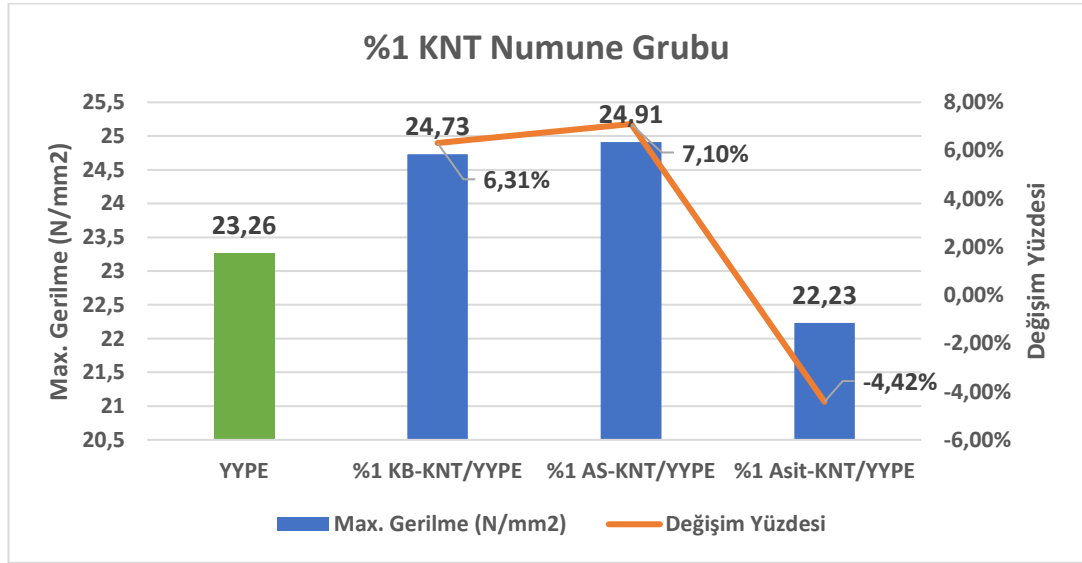
Şekil 6. 17. %0,125 KNT ilave edilmiş kompozit numunelerin çekme testi sonuçları



Şekil 6. 18. %0,250 KNT ilave edilmiş kompozit malzemelerin çekme testi sonuçları



Şekil 6. 19. %0,5 KNT ilave edilmiş kompozit numunelerinin çekme testi sonuçları



Şekil 6. 20. %1 KNT ilave edilmiş kompozit numunelerin çekme testi sonucu

Yapılan çekme testleri sonrasında saf haldeki YYPE'nin maksimum gerilmesi 23,26 N/mm² olarak belirlenmiştir. KNT ilave edilerek üretilen KB-KNT/YYPE ve AS-KNT/YYPE kompozit numunelerin saf YYPE numunelerine göre çekme dayanımlarının arttığı net bir şekilde görülmektedir. En yüksek çekme dayanımı %0,5 KNT ilave edilen KB-KNT/YYPE ve AS-KNT/YYPE numunelerinde ölçülürken %1 KNT ilave edilen numunelerin çekme dayanım değerlerinde %0,5'e göre bir miktar düşüş yaşanmıştır.

Kompozit malzemelerde mukavemet artışı matrisin cinsi, ilave edilen takviyenin cinsi, takviye boyutu, yapı içerisinde homojen dağıtılması ve matris ile takviye arasında oluşacak ara yüzey bağlantısı gibi parametrelere bağlıdır. İlave edilen takviye elemanı ile matris arasında kurulan güçlü arayüzey bağı sayesinde matrise binen yük takviye elemanına aktararak mukavemet artışı gerçekleşir. Ayrıca ilave edilen takviye elemanının boyutu küçüldükçe takviye elemanı toplam yüzey alanının artmasından dolayı matristen takviye elemanına daha fazla yük aktarımı olmaktadır. Böylelikle nanokompozitlerde az miktarda ilave edilen takviye elemanının mekanik özelliklere etkisi artmaktadır (Crosby vd, 2007; Jesson vd, 2012; Vegas vd, 2022).

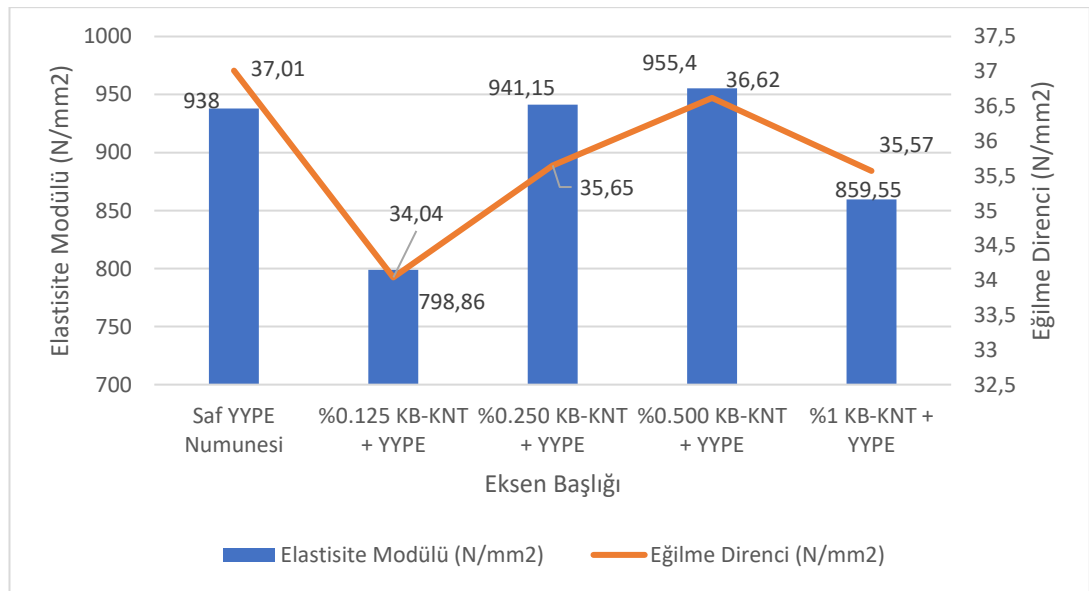
Yapılan deneyler sonucunda saf malzemeye göre %0,5 KNT ilave edilen kompozitlerde maksimum çekme dayanımı elde edilmesinin nedenlerinden birisi ilave edilen KNT ile matrisin iyi bir arayüzey bağı kurduğu ve bu ara yüzey bağı sayesinde yük transfer etkisiyle dayanım artmıştır. Ancak %1 KNT ilave edilen kompozitlerde %0,5 KNT'ye göre çekme dayanımı değerlerinin azalması homojen dağılımın yeteri derecede sağlanamaması KNT'lerin kendi arasında aglomerasyon oluşumundan kaynaklanmaktadır. KNT'lerin yüksek yüzey enerjisi, en-boy oranı, güçlü Van der Waals kuvvetleri ve p-p etkileşimlerinden kaynaklanan aglomerasyon ise polimer kompozitinde potansiyel olarak homojen bir dağılım olmaması gibi zorluklar birçok çalışmada da benzer şekilde rapor edilmiştir (Yeşil, 2010; Ahmad vd, 2013; Salehi vd, 2019). Bu durum Güğül (2015), tarafından yapılan bir çalışmada YYPE ve KNT içeren kompozitlerde %0,5'ten %1,5 KNT takviye oranına doğru mukavemet değerlerinde azalmalar olduğu rapor edilmiştir. Yine Yeşil (2010), tarafından yapılan bir çalışma da %0,75 ve %1 ağırlıkça karbon nanotüp ilave edilmesinin ardından kompozitlerin elektriksel iletkenlik, çekme modülü ve darbe dayanımı değerlerinde keskin düşüşler olduğu belirtilmiştir. Çekme değerlerindeki bu azalma, ilave edilen takviye elemanın oranca heterojen bir dağılım sergilemesi ve yapı içerisindeki aglomerasyon oluşumundan kaynaklandığı bildirilmektedir.

Aglomerasyonun engellenmesi adına ve homojen bir dağılım elde etmek amacıyla farklı karıştırma teknikleri ve farklı kimyasallarla yüzey modifikasyon işlemleri yapılmaktadır. Yapılan yüzey modifikasyon çalışmalarında genellikle yüzey modifikasyon işleminin mekanik özellikleri arttırdığı rapor edilmiştir (Ferriera 2016;

Jagannathn vd, (2023). Ancak yapılan bu tez çalışmasında kullanılan nitrik asit, sülfirik asit ve saf su ile yüzey modifikasyonu uygulanmış KNT ilave edilen numunelerin çekme testi değerlerinde önceki yapılan çalışmaların aksine keskin düşüşler olduğu gözlemlenmiştir. Bu düşüşler uygulanan yüzey modifikasyonunun başarılı olmadığını, matris ve takyive elemanı arasındaki etkili arayüzey bağının kurulamadığını, yük transfer etkisinin yeteri derecede gerçekleşmediğini göstermektedir. Bu durumun nedeni KNT'nin asit ile yüzey modifikasyonu sonrasında takviyenin asitten arındırılması için saf suyla yıkanması sonrasında oluşan nemin atılamadığı ve etkili bir kurutma işleminin sağlanamadığı ve KNT'de kalan nemden kaynaklandığı düşünülmektedir.

6.2. ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ SONUÇLARININ İNCELENMESİ

Öğütülerek toz hale getirilerek saf YYPE ve kübik karıştırma sonrasında üretilen KNT katkıli kompozit numunelerin üç nokta eğme testi sonrası elde edilen eğilme direnci ve elastisite modül değerleri Şekil 6.21'de verilmiştir.

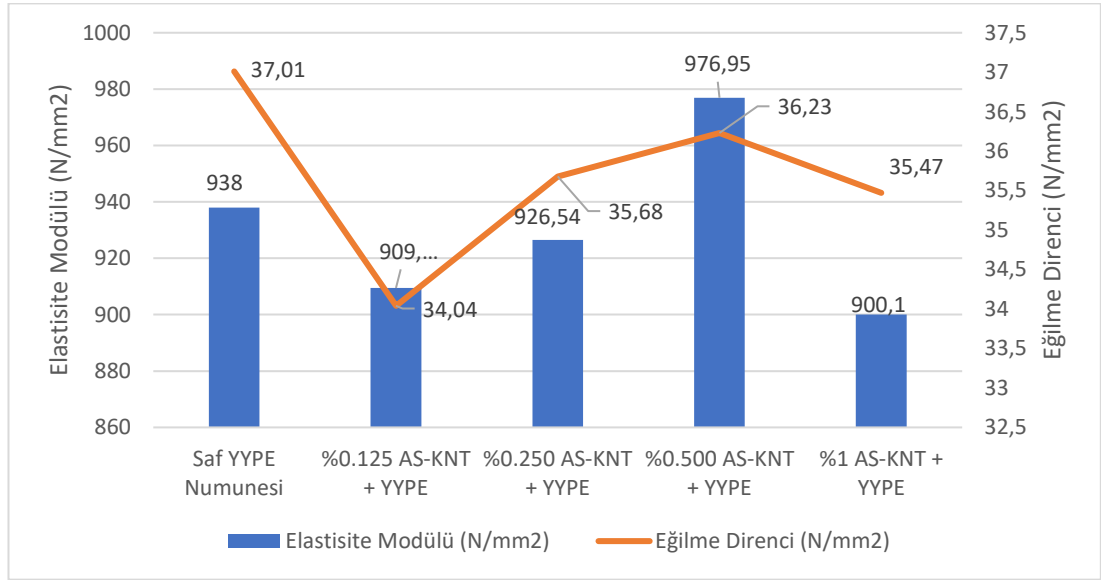


Şekil 6. 21. Toz haldeki Saf YYPE ve KB-KNT/YYPE numunelerinden elde edilen eğilme testi sonuçları

Yapılan eğme testleri sonucunda ilave edilen KB-KNT oranı arttıkça elastisite modülü değeri % 1,85 artış ile %0,5 KNT ilave edilerek üretilen kompozitlerde tespit edilmiştir.

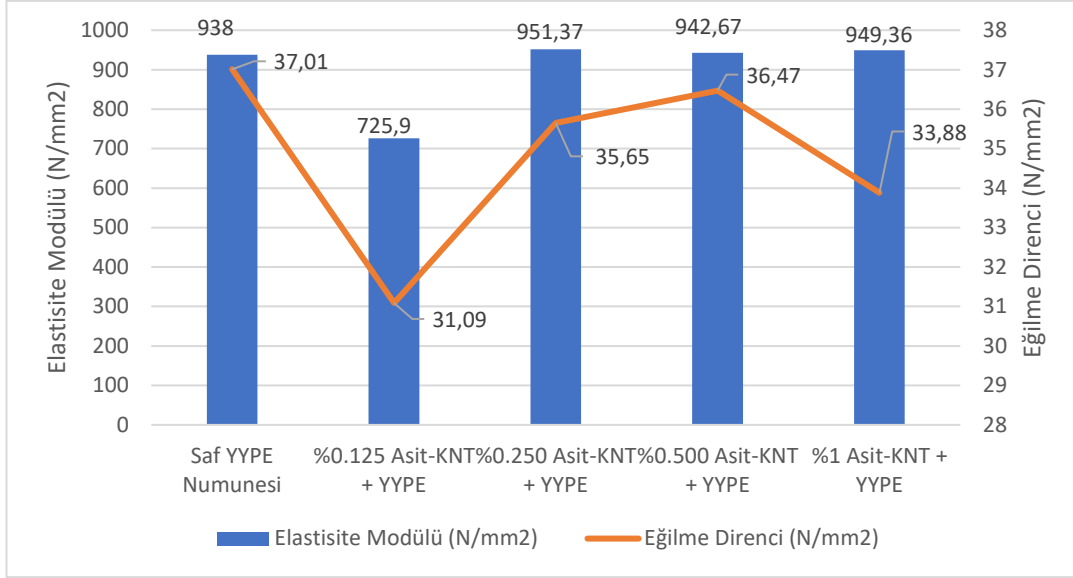
Ancak %0,5 KB-KNT/YYPE numunelerinin eğilme direnci saf YYPE numunesine göre %1,05 oranla azalmıştır.

Asetonla karıştırılmış olan KNT katkıli kompozit numunelerin üç nokta eğme testi sonrası elde edilen eğilme direnci ve elastikiyet modül değerleri Şekil 6.22'de verilmiştir.



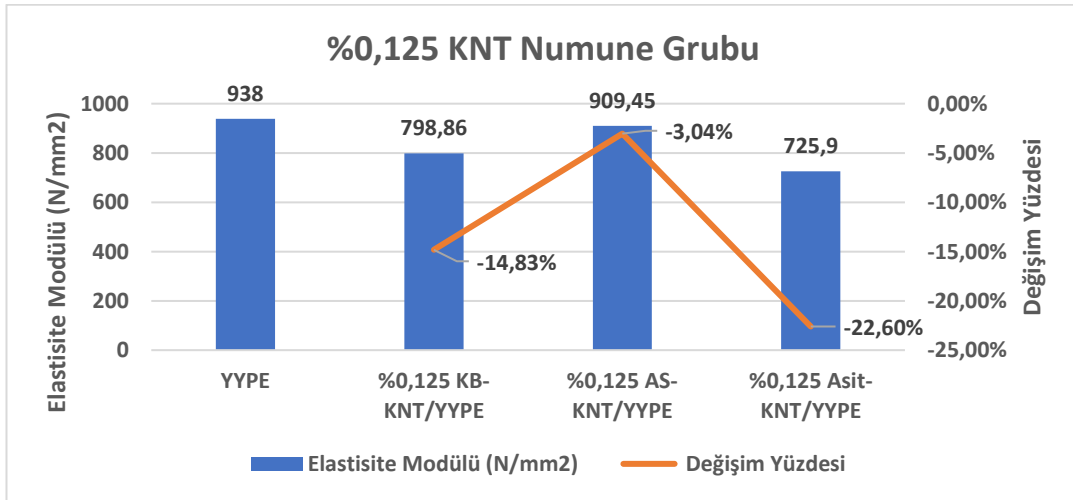
Şekil 6. 22. Asetonla yıkanmış KNT katkıli YYPE numunelerinden elde edilen eğilme testi sonuçları

Yapılan eğme testleri sonucunda ilave edilen AS-KNT oranı arttıkça elastikiyet değeri %4,15 artış ile %0,500 KNT ilave edilerek üretilen kompozitlerde tespit edilmiştir. Ancak %0,5 AS-KNT/YYPE numunelerinin eğilme direnci saf YYPE numunesine göre %2,1 oranla azalmıştır. Asit ile yüzey modifikasyonu uygulanmış olan KNT katkıli kompozit numunelerin üç nokta eğme testi sonrası elde edilen eğilme direnci ve elastikiyet modül değerleri Şekil 6.23'te verilmiştir.

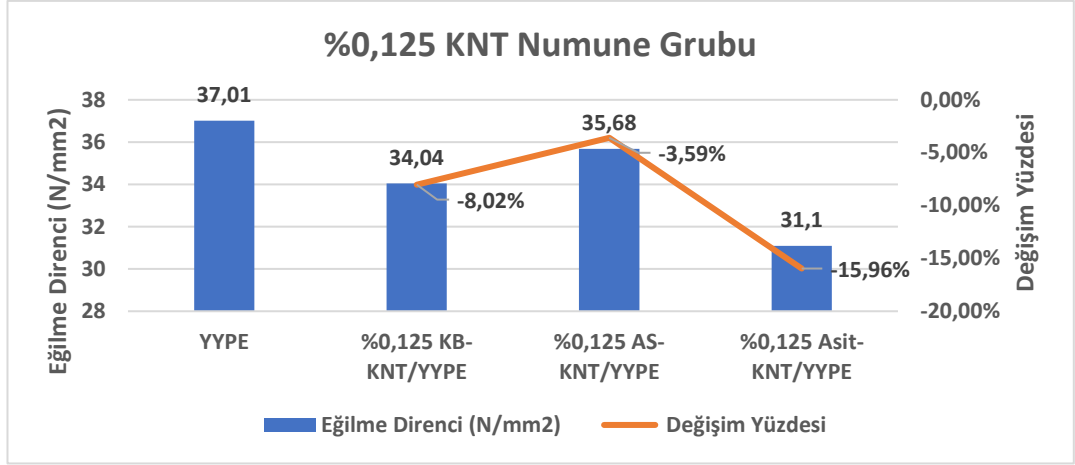


Şekil 6. 23. Asit Yüzey Modifikasyonlu KNT katkılı YYPE numunelerinden elde edilen eğilme testi sonuçları

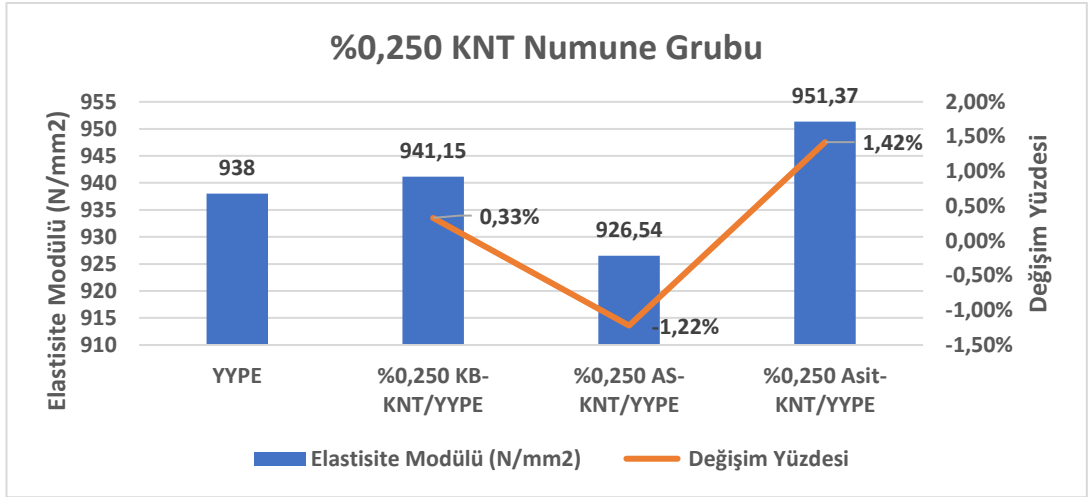
Yapılan eğme testleri sonucunda ilave edilen Asit-KNT oranı arttıkça elastisite modülü değeri %1.21 artış ile %1 KNT ilave edilerek üretilen kompozitlerde tespit edilmiştir. Ancak %1 Asit-KNT/YYPE numunelerinin eğilme direnci saf YYPE numunesine göre %8,45 oranla azalmıştır. Karıştırma yöntemlerine göre verilen eğme testi sonuçlarını daha iyi anlayabilmek için KNT katkı oranları aynı olan ve farklı karıştırma yöntemleriyle karıştırılan kompozit numunelerin elastisite modülü ve eğilme direnci yüzdelik değişimleri sırasıyla Şekil 6.24., 6.25., 6.26., 6.27., 6.28., 6.29., 6.30. ve 6.31’de verilmiştir.



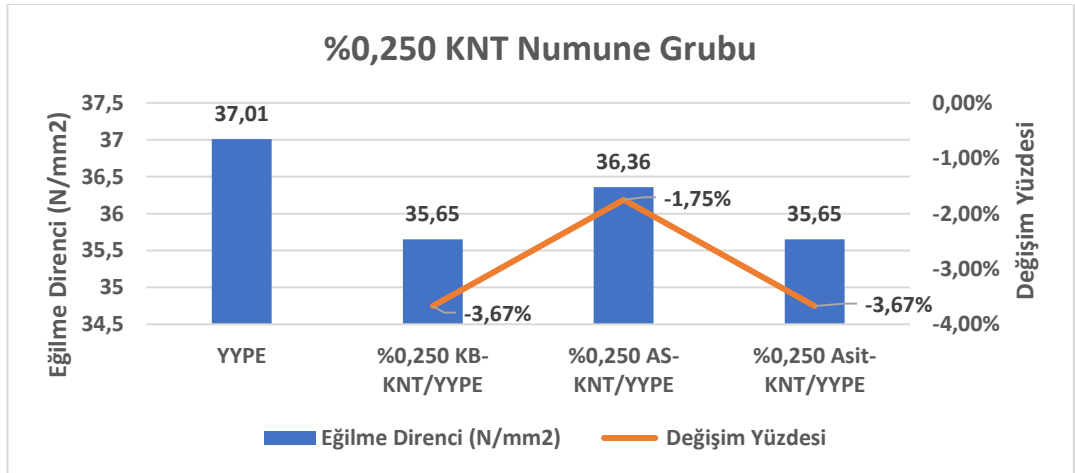
Şekil 6. 24. %0,125 KNT numune grubu eğilme elastisite modülü değerleri



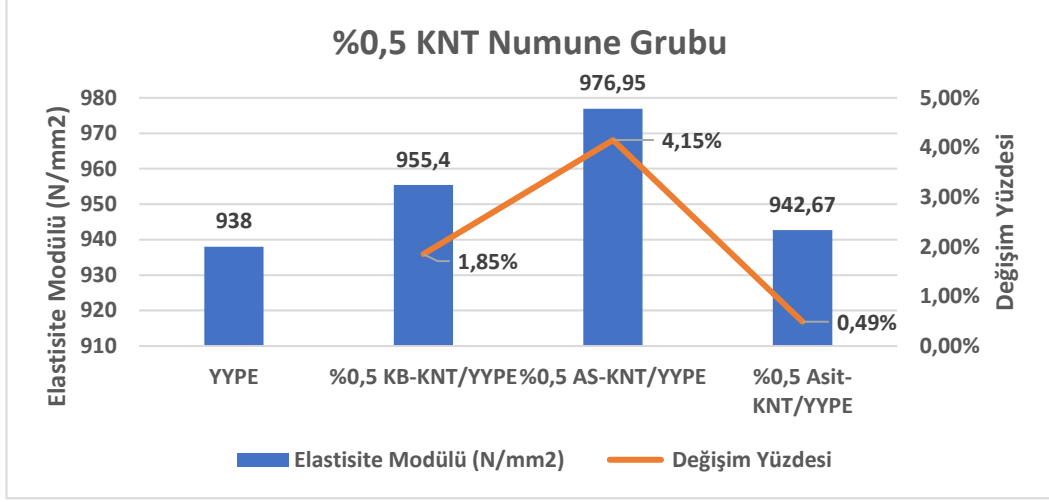
Şekil 6. 25. %0,125 KNT numune grubu eğilme direnci değerleri



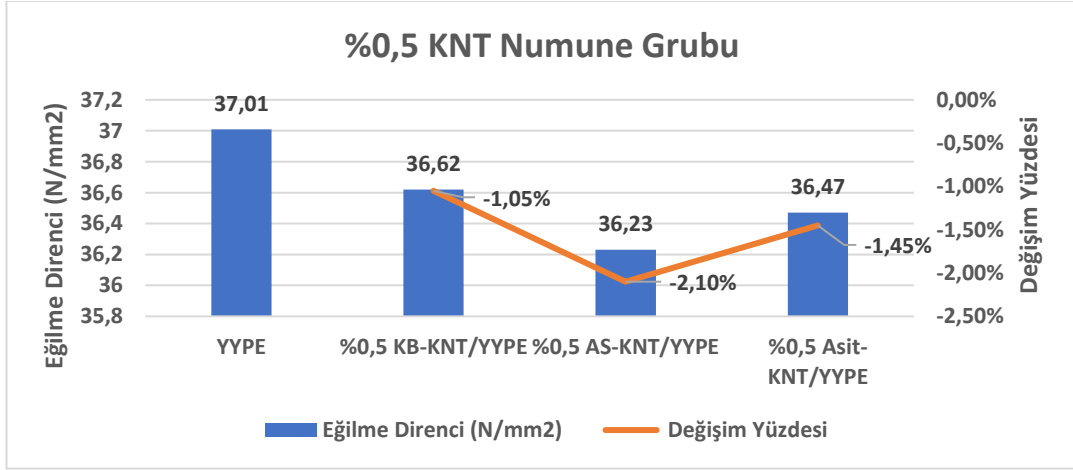
Şekil 6. 26. %0,250 KNT numune grubu eğilme elastisite modülü değerleri



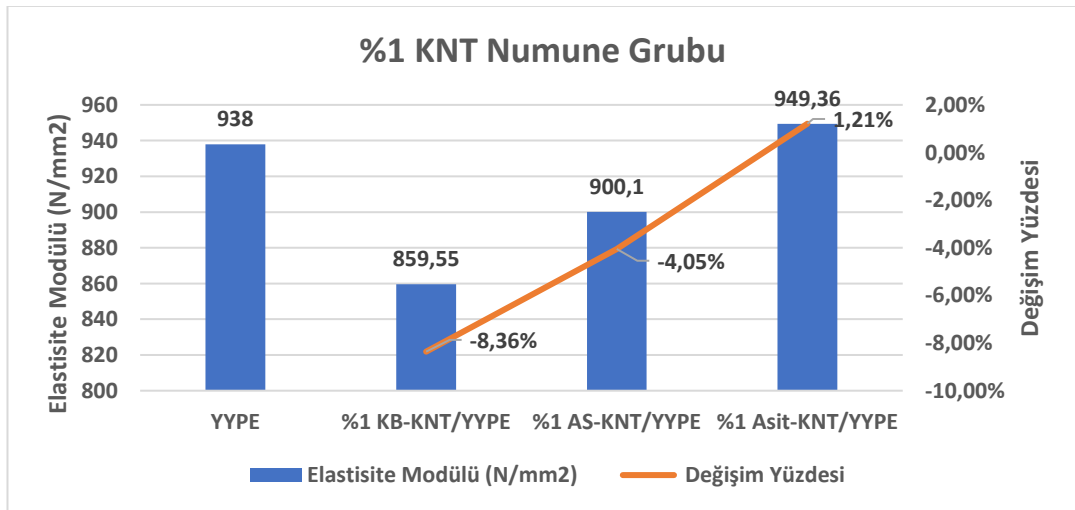
Şekil 6. 27. %0,250 KNT numune grubu eğilme direnci değerleri



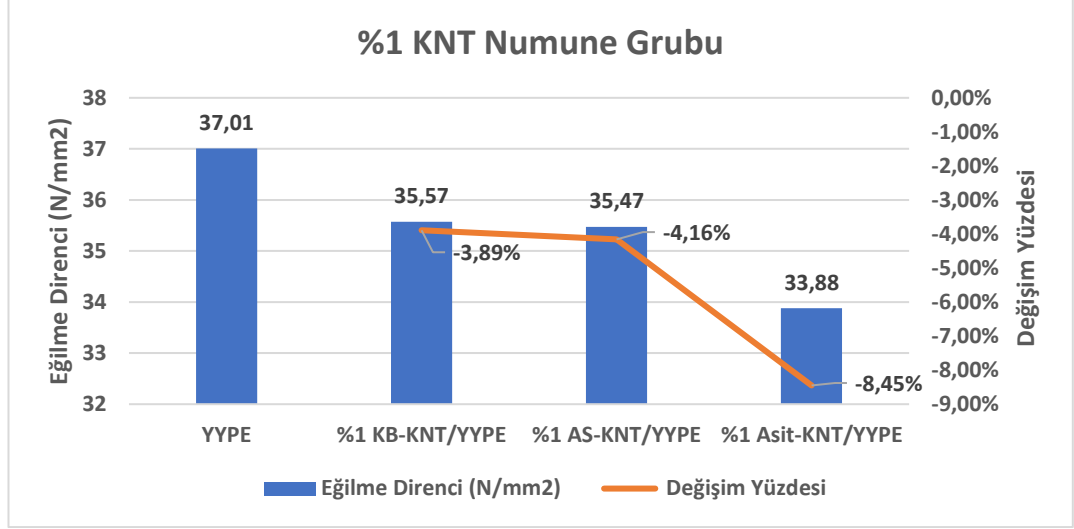
Şekil 6. 28. %0,5 KNT numune grubu eğilme elastisite modülü değerleri



Şekil 6. 29. %0,5 KNT numune grubu eğilme direnci değerleri



Şekil 6. 30. %1 KNT numune grubu eğilme elastisite modülü değerleri

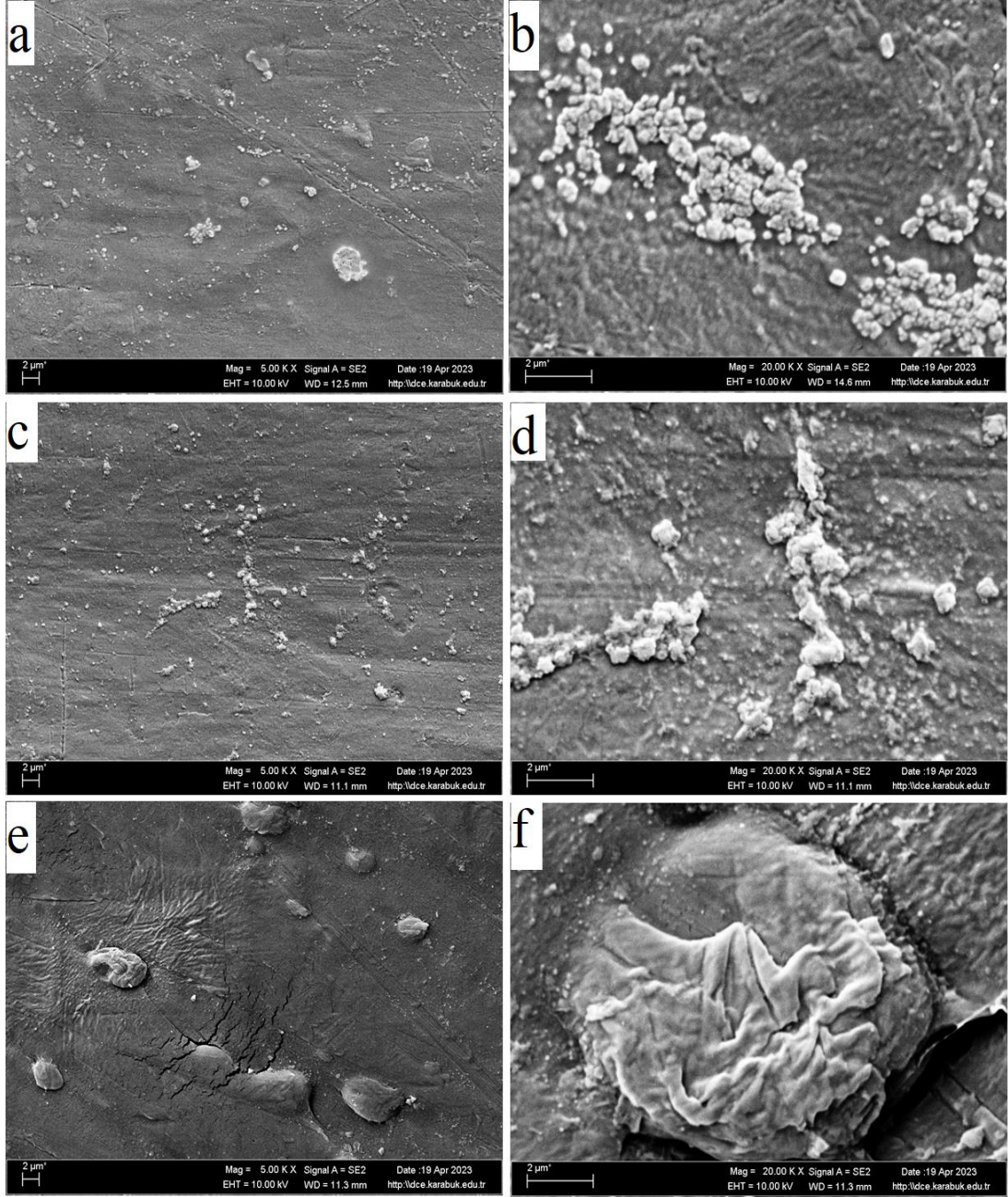


Şekil 6. 31. %1 KNT numune grubu eğilme direnci değerleri

Eğme testi sonuçlarına göre eğilmeye en yüksek elastisite modülü %4,15 oranında %0,5 AS-KNT/YYPE kompozitlerde hesaplanmıştır. Ancak %1 KNT ilave edilen kompozitlerdeki eğilmeye elastisite modülü azalmıştır. Bu durum çekme testi sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. Nitekim eğilme direncinde kısmen bir düşüş yaşanmaktadır.

6.3. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Görüntü Analizi Sonuçları

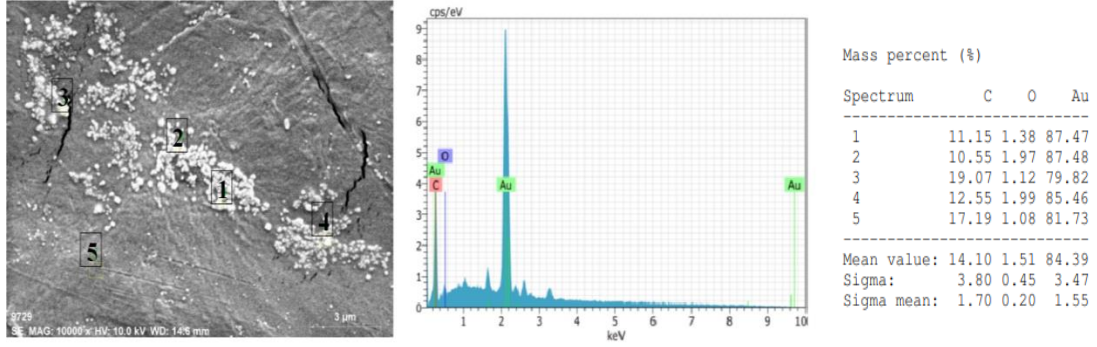
Üretilen kompozit malzemelerde karıştırma tekniğinin ve ilave edilen takviye yapıların mikro yapıdaki dağılımını gözlemlemek amacıyla en düşük %0,125 ve en yüksek %1 oranlarda karbon nanotüp KNT ilavesi yapılarak elde edilen kompozitlerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımı X-ışını spektroskopisi (EDX) görüntüleri, Şekil 6.32'de sırasıyla sunulmaktadır.



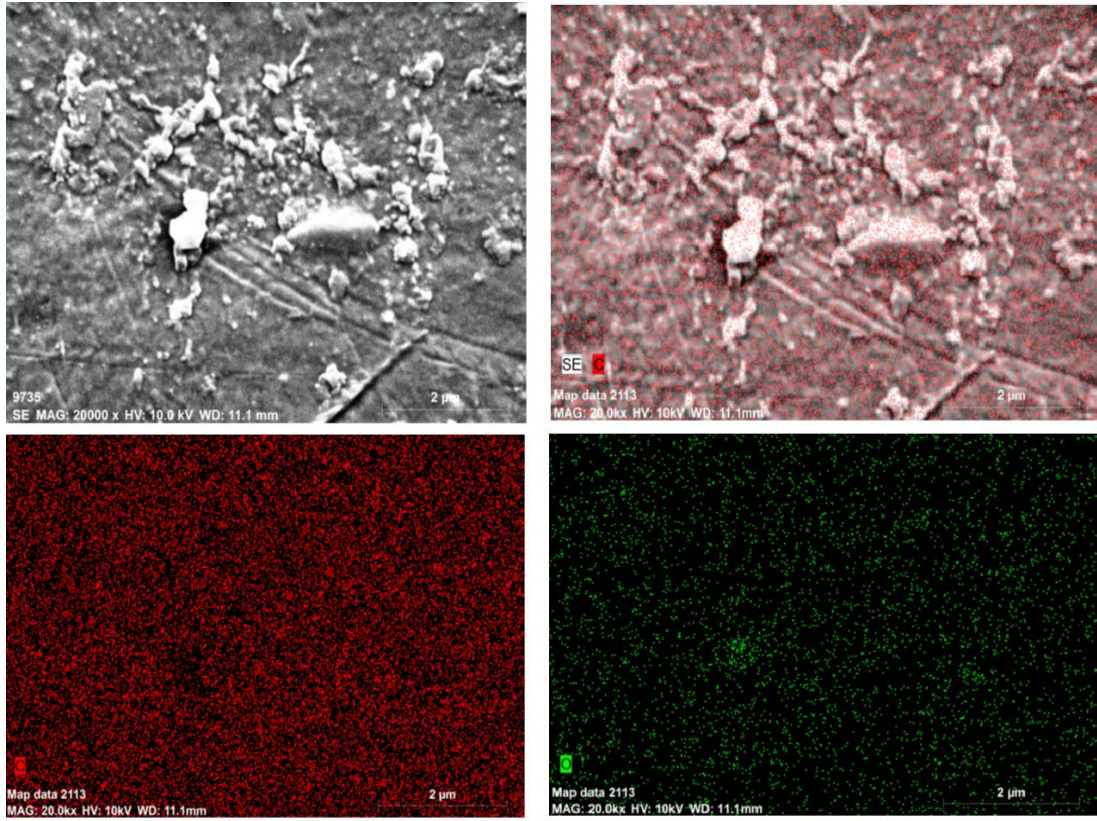
Şekil 6. 32. Üç farklı karıştırma tekniğiyle %0.125 KNT ilave edilen kompozitlerin SEM görüntüleri; a) %0.125 KB-KNT/YYPE(5kx), b) %0.125 KB-KNT/YYPE(20kx), c) %0.125 AS-KNT/YYPE(5kx), d) %0.125 AS-KNT/YYPE(20kx), e) %0.125 Asit-KNT/YYPE(5kx), f) %0.125 Asit-KNT/YYPE(20kx)

%0,125 KNT ilave edilerek üç farklı karıştırma yöntemiyle üretilen kompozitlerin SEM görüntüleri incelendiğinde matrisin yanı sıra ilave edilen takviye elemanın belirli bölgelerde topaklandığı görülmektedir. Topaklanan bu yapıların daha net tespit edilebilmesi için EDX nokta analizi (%0,125 KB-KNT/YYPE), Mapping analizi

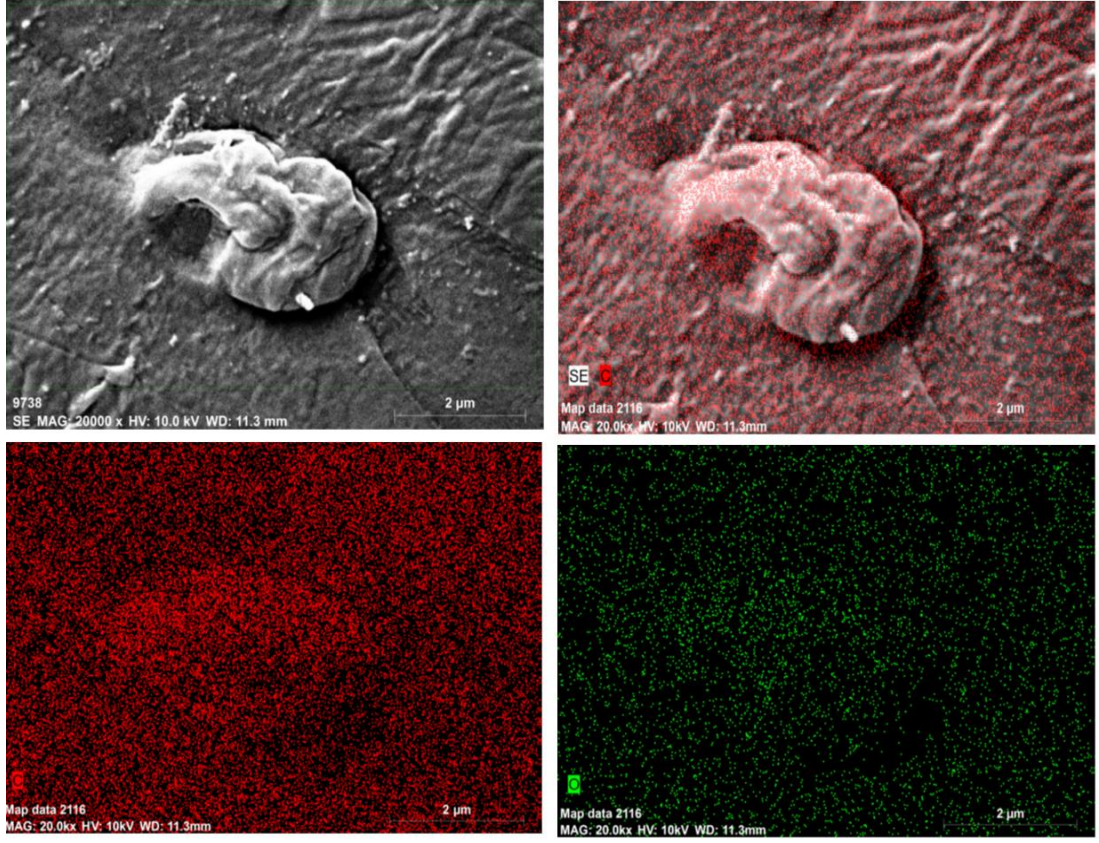
(%0,125 AS-KNT/YYPE - %0,125 Asit-KNT/YYPE) Şekil 6.33., 6.34. ve Şekil 6.35'te sırasıyla verilmektedir.



Şekil 6. 33. %0,125 KB-KNT/YYPE EDX nokta analizi

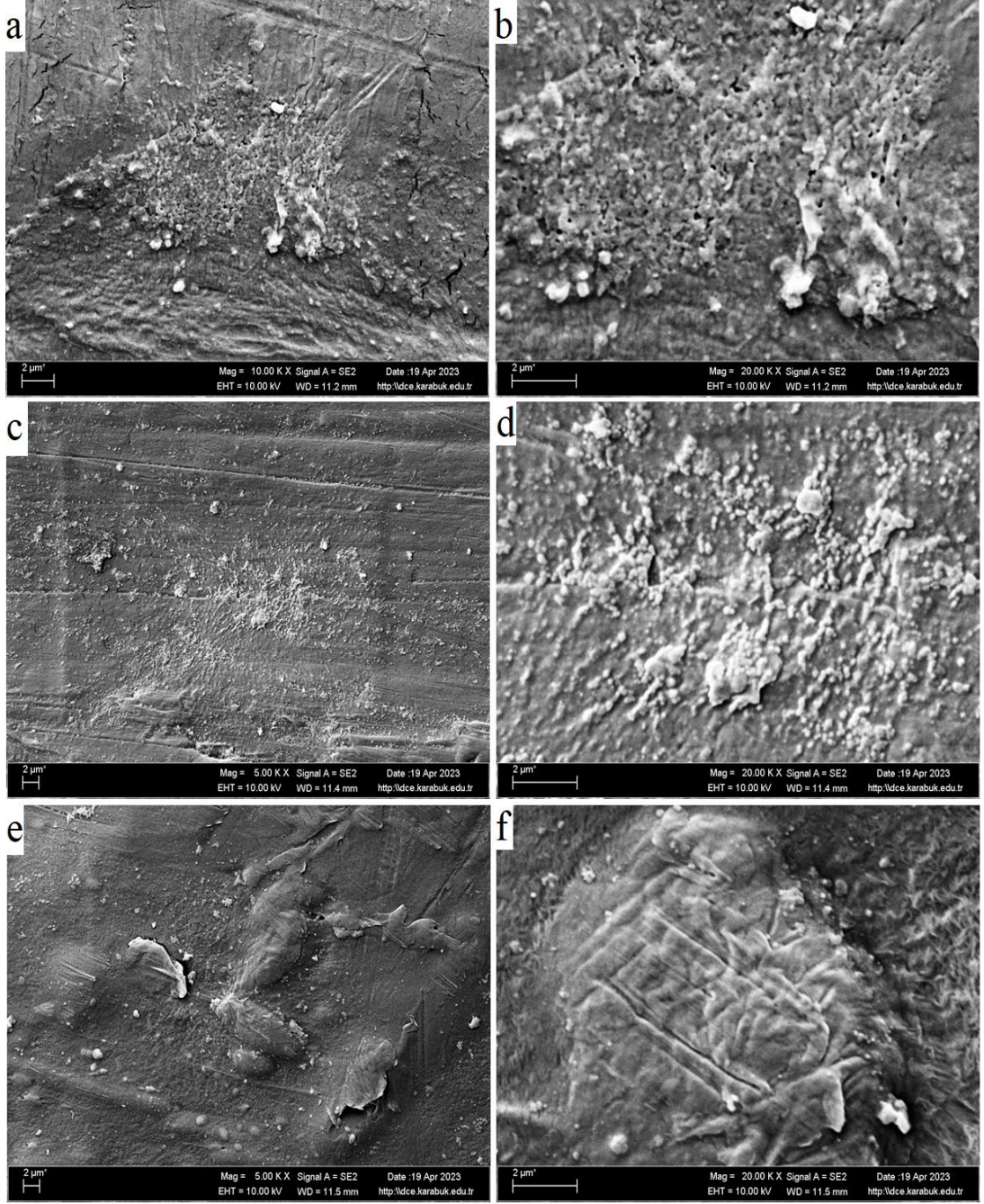


Şekil 6. 34. %0,125 AS-KNT/YYPE mapping analizi



Şekil 6. 35. %0,125 Asit-KNT/YYPE mapping analizi

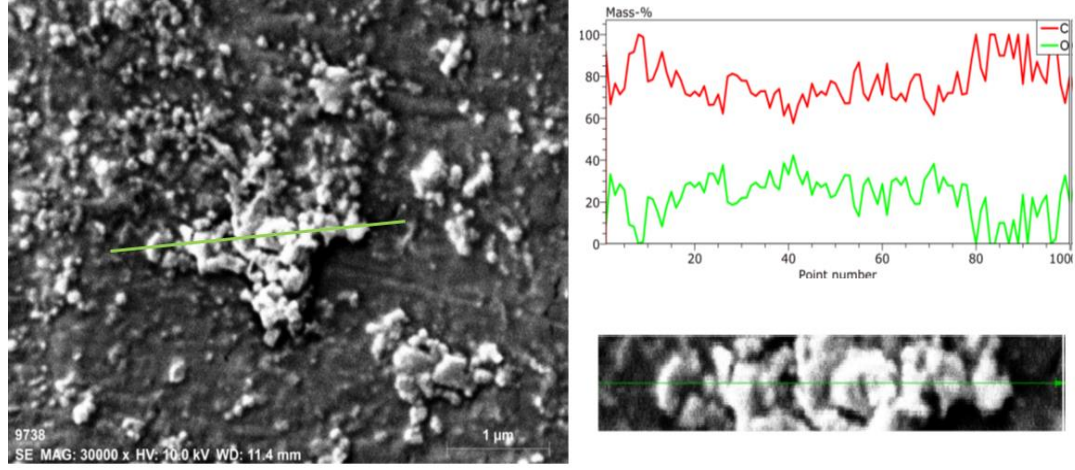
%0,125 KNT ilave edilerek üç farklı karıştırma tekniğiyle üretilen numunelerin yapılan EDX incelemelerinde (Nokta ve Mapping analizi) C, O, Au elementel analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonrasında (Nokta Analizi) karbon miktarı belirli bölgelerde kısmen artış gösterse de genel itibariyle KNT'nin homojene yakın bir dağılım gösterdiği söylenebilir. Karbon dışında aglomere olan bölgelerde oksijenin varlığı hem nokta analizinde hem de mapping analizinde görülmüştür. Ancak EDX mapping analizinde karbonun belirli bölgelerde topaklandığı net görülemedi. Bunun nedeni kompozitteki KNT miktarının çok az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. %1 KNT ilave edilerek üç farklı karıştırma yöntemiyle üretilen kompozitlerin SEM görüntüleri Şekil 6.36'da verilmektedir.



Şekil 6. 36. Üç farklı karıştırma tekniğiyle %1 KNT ilave edilen kompozitlerin SEM görüntüleri; a) %1 KB-KNT/YYPE(5kx), b) %1 KB-KNT/YYPE(20kx), c) %1 AS-KNT/YYPE(5kx), d) %1 AS-KNT/YYPE(20kx), e) %1 Asit-KNT/YYPE(5kx), f) %1 Asit-KNT/YYPE(20kx)

% 1 KNT ilave edilerek üç farklı karıştırma yöntemiyle üretilen kompozitlerin SEM görüntüleri incelendiğinde matrisin yanı sıra ilave edilen takviye elemanın belirli bölgelerde yoğun bir şekilde topaklandığı görülmektedir. Topaklanan bu yapıların

daha net tespit edilebilmesi için bu kısımda EDX line analizi (%1 AS-KNT/YYPE) Şekil 6.37’de verilmektedir.



Şekil 6. 37. %1 AS-KNT/YYPE EDX line analizi

Şekil 6.36’de verilen mikroyapı SEM görüntüsü incelendiğinde, %1 oranca arttırılmış KNT takviyesinin belirli bölgelerde topaklandığı rahatlıkla görülebilmektedir. Topaklanan bu yapıların daha net tespit edilebilmesi için alınan Şekil 6.37’da ki EDX çizgi analizi (%1 AS-KNT/YYPE) incelendiğinde EDX spektrumu, enerji seviyelerine göre KNT takviyesinin varlığını belirtmektedir. Elde edilen spektrumu değerlendirdiğimizde yeşil bir çizgi oluşturulan bölgede en yoğun KNT takviyesinin topaklanmış olduğu tespit edilmiştir. Burada oranca artırılan %1 KNT takviyesinin belirli bir kısmı homojen bir dağılım gerçekleştirmiş olsa da oranca arttırılmış olan ilavenin bölgesel olarak daha net bir şekilde aglomerasyon tespit edilmiştir. Nitekim yapılan çekme ve eğme testleri sonucunda mekanik özelliklerinin en çok iyileşme gösterdiği numune %0,5 AS-KNT/YYPE kompozitinde olması ve %1 KNT ilave edilen numunelerin mekanik özelliklerinde düşüş gözlemlenmesi buradaki SEM ve EDX analiz verileriyle desteklenmektedir. Benzer sonuçlar Zou vd. (2003) ve Ferriera vd. (2016) tarafından yapılan çalışmalarda da rapor edilmiştir. Zou ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada %1 ve %3 oranındaki KNT ilaveli YYPE kompozit numunelerinin SEM görüntü analizlerini incelediklerinde matris içerisinde aglomerasyonunun daha yüksek olduğunu ve numunelerdeki mekanik değerlerin bundan dolayı azaldığını belirtmişlerdir. Ferriera ve arkadaşları yaptıkları çalışmada

işlem görmemiş ve asitle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış şekilde üç farklı KNT ilave edilen YYPE kompozitlerini incelediklerinde de işlem görmemiş numunelerde aglomerasyon düzeyinin daha yüksek olduğunu, nispeten asitle işlenmiş KNT ilavelerinin homojen bir dağılım sergilediğini belirtmişlerdir. Ancak yapılan bu tez çalışmasında nitrik asit, sülfirik asit ve saf su ile yüzey modifikasyonu uygulanan KNT ilave edilmiş kompozit numunelerin SEM görüntülerinde topaklanmanın daha fazla olduğu modifikasyon ve homojen dağılımın sağlanamadığı net bir şekilde görülmektedir. Şekil 6.37’de asitle yüzey modifikasyonu uygulanan numunelerin çekme test sonuçlarındaki düşüşün nedeni yapıda oluşan aglomerasyon ve yeteri ara yüzey bağının oluşmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

“Karbon Nanotüp Takviyeli Termoplastik Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

- KB-KNT/YYPE, AS-KNT/YYPE ve Asit-KNT/YYPE kodlarıyla gruplandırılan matris malzemeleri %0,125, %0,250, %0,5 ve %1 KNT oranlarıyla birlikte kompozit numuneler ekstrüzyon yardımıyla başarılı bir şekilde üretilmiştir.
- Gerçekleştirilen mikro yapı görüntü incelemelerinde ilave edilen KNT katkının oranının artırılmasıyla birlikte matris içerisinde belirli bölgelerde aglomere olduğu tespit edilmiştir.
- Her bir numunenin çekme testi sonuçları incelendiğinde elde edilen değerler oranca arttırılan KNT miktarına bağlı olarak yükselirken %8,21 artışla en yüksek %0,5 AS-KNT/YYPE kompozit numunelerinde hesaplanmıştır. Daha sonra ilave edilen KNT oranı arttırıldığında numunelerin çekme dayanımının azaldığı görülmüştür.
- Gerçekleştirilen eğilme testi sonuçları incelendiğinde elde edilen değerler oranca arttırılan KNT miktarına bağlı olarak yükselirken %4,15 artışla en yüksek elastisite modülü %0,5 AS-KNT/YYPE kompozitte olduğu hesaplanmıştır.

Daha sonra yapılacak çalışmalar için öneriler;

- Karbon nanotüpün matris içerisinde daha homojen dağıtılabilmesi ve aglomerasyonun engellenmesi için farklı karıştırıcılar kullanılarak karışım yapılabilir.
- Karbon nanotüp ve matris ara yüzey bağınyı güçlendirmek ve yük transferini daha etkili kılmak için çeşitli kimyasallarla yüzey modifikasyonu uygulanabilir.
- Yüzey modifikasyonu işleminde farklı kimyasallar kullanılarak matristeki aglomerasyon incelenebilir.
- Aseton ile karıştırılarak üretilen kompozitlerin KNT takviye oranı değiştirilerek mekanik özelliklerdeki gelişmeler hesaplanabilir.

KAYNAKLAR

Abazari, S., Shamsipur A., Bakhsheshi, H.B., İsmail, F. A., Sharif, S., Razzaghi, M., Ramakrishna, S. and Berto, F., “Carbon Nanotubes (CNTs)-Reinforced Magnesium-Based Matrix Composites: A Comprehensive Review”, *Materials*, 13(19), 4421 (2020).

Abdalslam, S., “Impact Damage Analysis Of Balsa Wood Sandwich Composite Materials”, Engineering, *Dissertations*, 20-33 (2013).

Abubakre, O. K., Medupin, R. O., Akutinde, I. B., Jimoh, O. T., Abdulkareem, A. S., Murina, R. A., and Yoro, K. O., "Carbon nanotube-reinforced polymer nanocomposites for sustainable biomedical applications: A review", *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 555-557 (2023).

Advani, S. G. and Hsiao K.T., “Manufacturing techniques for polymer matrix composites”, *Woodhead Publishing*, Philadelphia, 182-205, 245-278 (2012).

Ahmad, A. A., Al-Juhani, A. A., Thomas, S., De, S. T. and Atieh, M. A., “Effect of Modified and Nonmodified Carbon Nanotubes on the Rheological Behavior of High Density Polyethylene Nanocomposit” *Journal of Nanomaterials*, Vol.13, Article ID 731860, 12 (2013).

Ajayan, P. M., Linda S. S. and Paul V. B., “Nanocomposite science and technology”, *John Wiley & Sons*, Weinheim, 24-31, 59-61, 100-107 (2006).

Alghamdi, M. N., “Effect of Filler Particle Size on the Recyclability of Fly Ash Filled HDPE Composites”, *Polymers*, 13.16: 2836 (2021).

Ando, Y., Zhao, X., Hirahara, K., Suenaga, K., Bandow, S., and Iijima, S., “Mass production of single-wall carbon nanotubes by the arc plasma jet method”, *Chemical Physics Letters*, 323(5-6), 580-585 (2000).

Anggoro, B. M., “Mechanical and gas permeability properties of nanocomposite films made from low density polyethylene and carbon nanotubes”, *Yüksek lisans tezi, İzmir Teknoloji Enstitüsü*, İzmir, 67-74 (2014).

Awad, A.H., El-Gamasy R., El-Wahab A. and Abdellatif, H. M., “Mechanical and Physical Properties of PP and HDPE”, *Engineering SciencePG*, 4(2): 34-42 (2019).

Baddour, C. E., and Briens, C., “Carbon Nanotube Synthesis: A Review”, *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, Vol.3, Review R3, 2-4, 7-8 (2005).

- Banerjee, A. G., “Computer Aided Design of Side Actions in Injection Molding of Complex Parts”, *University of Maryland, Master of Science*, Maryland, 81-107 (2006).
- Bartczak, Z., “Effect of Chain Entanglements on Plastic Deformation Behavior of Linear Polyethylene”, *Macromolecules* 38, 7702-7713 (2005).
- Basan, S., “Polimer Kimyası”, *Cumhuriyet Üniversitesi Yayını*, Sivas, 170-205, 218-223 (2001).
- Beşergil, B., “Kompozitler: Doğadan Teknolojiye Temel İlkeler”, *Gazi Kitabevi, 1. Basım*, Ankara, 19-40 (2016).
- Bhushan, B., “Springer Handbook of Nanotechnology”, *Springer-Verlag*, Berlin, Heidelberg, 01-12 (2010).
- Booker, R. and Boysen, E., “Nanotechnology For Dummies”, *Wiley Publishing Inc.*, Indianapolis. 7-39, 281-305 (2005).
- Borazjani, S., "Light-weight design of vehicle roof panel for stiffness and crash analyses", Ph. D. Degree, *Graduate School of Politecnico di Torino*, 64-74 (2016).
- Borisenko D.N., Kolesnikov N.N., Kulanov M.P. and Kveder V.V., “Growth of Carbon Nanotubes (CNTs) In Electric-Arc Discharge In Argon”, *International Journal of Nanoscience*, Vol. 1, Nos. 3 & 4 235-246 (2002).
- Brian B., Santare M.H., Novotny J.E. and Advani G.S, “Wear behavior of Carbon Nanotube/High Density Polyethylene composites”, *Mechanics of Materials* 41(10):1108-1115 (2009).
- Bunsell, A. R. and Renard, J., “Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials”, *Taylor Francis Group*, Boca Raton, 97-123 (2005).
- Burchell, T. D., “Radiation Effects in Carbon–Carbon Composites”, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 7972-7975 (2001).
- Callister, W. D. and Rethwisch, D. G., “Materials science and engineering”, *John wiley & sons*, 512-535 (2011).
- Cesano, F., Uddin, J. M., Damin, A. and Scarano, D., “Multifunctional Conductive Paths Obtained by Laser Processing of Non-Conductive Carbon Nanotube/Polypropylene Composites”, *Materials*, 3-16 (2021).
- Chen, J., Shiqin, W., and Haoyan, X., “A Brief Introduction of Carbon Nanotubes: History, Synthesis, and Properties”, *Journal of Physics: Conference Series*, 1-4 (2021).
- Chen, P., Lin, J., and Tan, K.L., “Carbon Nanotubes: A Future Material of Life”, *IUBMB Life*, 105-108 (2000).

Clyne, T. W. and Hull, D., “An Introduction to Composite Materials (Third Edition)”, *niversity of Liverpool Published*, Cambridge, 70-77, 113-142, 218-223 (2019).

Coleman, J. N., Khan, U., Blau, W. J. nad Gun’ko Y. K., “Small but strong: a review of the mechanical properties of carbon nanotube polymer composites”, *Carbon*, 44:1624–1652 (2006).

Colomer, J.-F., Henrard, L., Lambin, P. and Van, T. G., “Electron diffraction and microscopy of single-wall carbon nanotube bundles produced by different methods”, *Eur. Phys. J. B*, 27:111-118 (2002).

Crosby, A.J. and Lee, J.L., “Polymer Nanocomposites: The “Nano” Effect on Mechanical Properties”, *Taylor an Francis Publishing*, London, 219-232 (2007).

Cui, K., Chang, J., Feo L., Chow, C. L., and Lau, D., “Developments and Applications of Carbon Nanotube Reinforced Cement-Based Composites as Functional Building Materials”, *Frontiers in materials*, 1-14 (2023).

Çalış, T., “Poliüretan-kil nanokompozit sentezi ve karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-58 (2007).

Dai, H., “Carbon nanotubes: opportunities and challenges”, *Surface Science*, 218-241 (2002).

Demircan, G., “Al₂O₃ Nanopartikül Katkili Aramid Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozitlerin Mekanik Özellikleri”, Doktora Tezi, *Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Şanlıurfa, 4-6, 11-14 (2018).

Demirer, A., “Enjeksiyon Kalıplarında Sıcak Yolluk Sistemlerinin Kalıplama Prosesine Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, Doktora Tezi., *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 10-15 (2002).

Demirer, A., “Polimerik Malzemeler Ders Notu”, *Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi*, Sakarya (2020).

Deng, Y., Liu, L., Li, J. and Gao, L., “Sensors Based on the Carbon Nanotube Field-Effect Transistors for Chemical and Biological Analyses”, *Biosensors*, 12.10: 776 (2022).

Denizci, Ö. M., “Bilişim Çağında Nanoteknoloji Olgusu ve İletişim Sürecine Yansımaları”, Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 10-14 (2008).

DPT, “Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Plastik Ürünleri Sanayii Özel İhtisas Komisyonu Raporu”, *Devlet Planlama Teşkilatı Raporu*, Ankara, 563 (2001).

Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G. and Jorio, A., “Unusual Properties And Structure of Carbon Nanotubes”, *Annual Reviews*, 34:247-78 (2004).

Düşünceli, N. ve Çolak, Ö. Ü., "İmalat Yöntemlerinin Yüksek Yoğunluklu Polietilen'in (YYPE) Tek Eksenli Çekme Davranışı Üzerindeki Etkisi", **8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı**, İstanbul, 290-300 (2007).

Eker, A. A., "Metal matrisli kompozitler ve üretim yöntemleri sunusu", **Yıldız Teknik Üniversitesi Makine malzemesi ve imalat teknolojisi**, İstanbul (2008).

Ergenç, G., "Yüksek Yoğunluklu Polietilen ile Çekirdek Kabağı (Cucurbita Pepo L.) Atıklarının Kopiolizi", Yüksek Lisans Tezi, **Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Afyonkarahisar, 17-22 (2019).

Fávaro, S. L., "Chemical, morphological and mechanical analysis of sisal fiber-reinforced recycled high-density polyethylene composites", **eXPRESS Polymer Letters**, Vol.4, No.8 465–473 (2010).

Ferreira, F. V., Francisco, W., Menezes B. R., Brito, F.S., Coutinho A.S., Cividanes, L. S. and Thim, G. P., "Correlation of surface treatment, dispersion and mechanical properties of HDPE/CNT nanocomposites", **Applied Surface Science**, 389: 921-929 (2016).

Ferreira, F. V., Franceschi, W., Menezes, B. R. C., Brito, F. S., Lozano, K., Coutinho, A. R., and Thim, G. P., "Dodecylamine functionalization of carbon nanotubes to improve dispersion, thermal and mechanical properties of polyethylene based nanocomposites", **Applied Surface Science**, 410: 267-277 (2017).

Frone, A. N., Batalu, D., Chiulan, I., Oprea, M., Gabor, A. R., Nicolae, C. A., and Panaitescu, D. M., "Morpho-structural, thermal and mechanical properties of PLA/PHB/cellulose biodegradable nanocomposites obtained by compression molding, extrusion, and 3D printing", **Nanomaterials**, 50-51 (2019).

Gao, G., Çağın, T. and Goddard, W. A., "Energetics, structure, mechanical and vibrational properties of single-walled carbon nanotubes", **IOP Publishing Ltd.**, 184-191 (1998).

Ghafoor, B., Mehmood, M. S., Shahid, U., Baluch, M. A., and Yasin, T., "Influence of γ -ray modified MWCNTs on the structural and thermal properties of high-density polyethylene", **Radiation Physics and Chemistry**, 125: 145-150 (2016).

Golewski G.L., "Fracture Performance of Cementitious Composites Based on Quaternary Blended Cements", **Materials**, 15-17 (2022).

Graeme, M. W., "Theory of composites. Cambridge monographs on applied and computational mathematics", **SIAM**, 21-30 (2003).

Guldi, D. M., Rahman, G. M. A., Zerbetto, F. and Prato, M., "Carbon nanotubes in electron donor-acceptor nanocomposites", **Accounts of Chemical Research**, 38:871-878 (2005).

Gülmez, S., “Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler”, Tezsiz Yüksek Lisans Projesi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, 10-24, 26-40 (2018).

Gür, A. K., Taşkaya S. ve Yıldız T., “Katı Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Sıcaklığın Etkisiyle Sürünme ve Elastik Özelliklerin Ansys Yöntemiyle İncelenmesi”, Araştırma makalesi, *Munzur Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü*, Tunceli, 11-13 (2017).

Hakan, G., “Karbon Nanotüp takviyeli yüksek yoğunluklu polietilen hibrit kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi*, Hatay. (2018).

Hejna, A., Barczewski M., Kosmela, P., Mysiukiewicz, O. and Kuzmin, A., “Coffee Silverskin as a Multifunctional Waste Filler for High-Density Polyethylene Green Composites”, *Journal of Composites Sciences*. 44-57 (2021).

Hussain, F., Hojjati, M., Okamoto, M. and Gorga, R.E., “Polymer-matrix nanocomposites, processing, manufacturing, and application: An Overview”, *Journal of Composite Materials*, 1511-1549 (2006).

İlkay, A., Başboğa, İ. H., Karakus, K., ve Mengeloğlu, F., “Effect Of Waste Tea (Camellia Sinensis) Wood Fibers And Mape On Some Properties Of High Density Polyethylene (Hdpe) Based Polymer Composites”, *Turkish Journal of Forest Science*, 606-619 (2021).

İnternet: Fiber Reinforced Resins, “Pultrüzyon Yöntemi”, <https://www.fiberr.com.tr/pultruzyon> (2022).

İnternet: Lewtems, “Reçine Transfer Yöntemi” https://levtems.com/kompozit-malzemelerin-uretim-yontemleri/#Recine_Transfer_Kaliplama_RTM_Resin_Transfer_Molding (2020).

İnternet: Teknik Tekstil Blog, “Tekstil Takviyeli Kompozitler ve Kompozit Üretim Yöntemleri”, <http://tekiteltekstil.blogspot.com/p/kompozit-uretim-yontemleri.html> (2019).

İnternet: The World of Nanoscience, “Nanotubes and Carbon Fibers”, <https://worldofnanoscience.weebly.com/nanotube--carbon-fiber-overview.html> (2012).

İnternet: Prof. Dr. Bilsen Beşergil Blog, “Kompozit Üretim Yöntemleri”, http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_90.html (2019).

İnternet: MATWEB, “Overview of materials for High Density Polyethylene (HDPE), Injection Molded”, <https://www.matweb.com/Search/MaterialGroupSearch.aspx?GroupID=898> (2023).

İskender, E., “Nanokil/Polimer/Bitüm Nanokompozit Hazırlama Yönteminin Asfalt Karışım Performansı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması”, *Teknik Dergi*, 885-906 (2021).

Jagannathan, D., Adarsha, H., Ramaiah, K., and Prabhud R. “A Systematic Study on Mechanical Properties of CNT Reinforced HDPE Composites Developed Using 3D Printing”, *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, 1-20 (2023).

Jamir, M. R. M., Majid, M. S. A. and Khasri, A., “Natural lightweight hybrid composites for aircraft structural applications, Sustainable Composites for Aerospace Applications”, *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, 155-170 (2018).

Jesson, A. D. and Watts, F.J., “The Interface and Interphase in Polymer Matrix Composites: Effect on Mechanical Properties and Methods for Identification”, *Polymer Reviews*, 52:3, 321-354 (2012).

Jin, F., and Park, S., “A review of the preparation and properties of carbon nanotubes-reinforced polymer composites”, *Carbon Letters*, 57-69 (2011).

Journet, C., Maser, W.K., Bernier, P., Loiseau, A., Lamy, C, M., Lefrant, S., Deniard, P., Lee, R. and Fischer J.E., “Large-scale production of single-walled carbon nanotubes by the electric-arc technique”, *Letters Nature*, 756-758 (1997).

Kalemtaş, A., “Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış”, *Putech & Composites*, 18-30 (2014).

Kaştan, A., “Polimerik malzemelerin darbe dayanımına nano katkıların etkisi”, *Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 78-84 (2016).

Kaw, A. K., “Mechanics of Composite Materials”, *Taylor & Francis Group* 16-51 (2006).

Kaya, A. İ., “Kompozit malzemeler ve özellikleri”, *Putech & Composites*, 38-45 (2016).

Khalaf, M. N., “Mechanical properties of filled high density polyethylene”, *Journal of Saudi Chemical Society*, 88-91 (2011).

Kingston, C. T. and Simard, B., “Fabrication of Carbon Nanotubes, Analytical Letters”, *Steacie Institute for Molecular Sciences*, 3119-3145 (2003).

Krenkel, W. and Reichert, F., “Design Objectives and Design Philosophies, Interphases and Interfaces in Fiber-Reinforced CMCs”, *Comprehensive Composite Materials*, 1-18 (2018).

Kuchibhatla, S.V.N.T., Karakoti, A.S., Bera, D. and Seal, S., “One dimensional nanostructured materials”, *Progress in Materials Science*, 699-750, 800-913 (2007).

- Kumar, R.M., Rajesh, K. and Haldar, S., “Surface modification of CNT reinforced UHMWPE composite for sustained drug delivery”, *Elsevier*, 1773-2247 (2019).
- Lackey, W.J., Vaidyaraman, G.B., Freeman, G.B., Agrawal, M. D. and Langman, M. D., “Carbon–Carbon Composites, Encyclopedia of Materials: Science and Technology”, *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 952-966 (2001).
- Lakshmikanthan, A., Angadi, S., Malik, V., Saxena, K. K., Prakash, C., Dixit, S. and Mohammed, K. A. “Mechanical and Tribological Properties of Aluminum-Based Metal-Matrix Composites”, *Materials*, 6111: 20-30 (2022).
- Mai, Y. and Yu, Z., “Polymer nanocomposites”, *Woodhead Publication*, 600-608 (2006).
- Makar, J., Margeson, J. and Luh, J., “Carbon nanotube/cement composites – early results and potential applications”, *NRC Publications Record*, 1-10 (2005).
- Mamunya, Y., Maruzhenko, O., Kolisnyk, R., Iurzhenko, M., Pylypenko, A., Masiuchok, O., and Pruvost, S. “Pyroresistive Properties of Composites Based on HDPE and Carbon Fillers.” *Polymers*, 1-14 (2105).
- Manias, E., “Nanocomposites: Stiffer by design”, *Nature Materials*, 9–11 (2007).
- MEB, Kimya Teknolojisi, “Etilen Türevleri ve Prosesleri”, *MEGEP*, Ankara (2012).
- Melike, B., “Karbon Nanotüp Üretiminde Metal Katalizörün Taban Malzemeye Tutunma Etkileri” Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı*, Ankara (2017).
- Menceloğlu, Y. Z. ve Kırca, M. B., “Uluslararası Rekabet Stratejileri: Nanoteknoloji ve Türkiye”, *TÜSiAD Rekabet Stratejileri Dizisi-II*, İstanbul (2008).
- Mohammed, N. A., “Performance for Fly Ash Reinforced HDPE Composites over the Ageing of Material Components”, *Polymers*, 14.14: 2913 (2022).
- Momohjimoh, I., Hussein M. A. and Al-Aqeeli, N., “Recent Advances in the Processing and Properties of Alumina–CNT/SiC Nanocomposites”, *Nanomaterials* **9.1**, 85-86 (2019).
- Mouecoucou, R., Bonnaud, L. and Dubois, P., “Negative Capacitance in Nanocomposite Based on High-Density Polyethylene (HDPE) with Multiwalled Carbon Nanotubes (CNTs)”, *Materials*, 1-10 (2023).
- Muqaddas, S., Javed M., Nadeem. S., Asghar M.A., Haide, A., and Ali, A., “Carbon nanotube fiber-based flexible microelectrode for electrochemical glucose sensors”, *ACS omega*, 8.2: 2272-2280 (2023).
- Njuguna, J., “Lightweight Composite Structures in Transport, Design, Manufacturing”, *Woodhead Publishing*, 3- 34 (2016).

Okolo, C., Rafique, R., Iqbal, S. S., Saharudin, M. S. and Inam, F., “Carbon Nanotube Reinforced High Density Polyethylene Materials for Offshore Sheathing Applications”, *Materials*, 1-13 (2020).

Ömer, S., “Savurma Döküm Yöntemi ile Üretilmiş AlB₂/Al Kompozit Malzemelerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Araştırma Makalesi, *Yıldız Teknik Üniversitesi*, İstanbul, 41-48 (2022).

PETKİM, YYPE Üretim Şeması, “Petrokimya Holding AŞ. Müşteri Eğitim sunuları”, *KKTSM YYPE*, İzmir (2009).

Pinnavaia, T.J. and Beall, G.W., “Polymer-clay nanocomposites”, *Wiley*, New-York, 01-370 (2001).

Potter, K., “An Introduction to Composite Products: Design, Development and Manufacture”, *Springer*, London, 211-251 (1997).

Pundhir, N., Pathak H. and Zafar S., “Crashworthiness of automobile made of HDPE/kenaf and HDPE/MWCNT polymer composites”, *NFEST*, 1-10 (2019).

Rand, B., “Composites: Carbon matrix. In: Encyclopedia of Condensed Matter Physics”, *Elsevier*, 178-192 (2005).

Ren, Z. F., Huang, Z. P., Xu, J. W., Wang, J. H., Bush, P., Siegal, M. P. and Provencio, P. N., “Synthesis of large arrays of well-aligned carbon nanotubes on glass”, *Science PubMed*, 1105-1107 (1998).

Rong M.Z., Zang M.Q. and Ruan W.H., “Surface modification of nanoscale fillers for improving properties of polymer nanocomposites: a review.” *Materials*, 787-796 (2006).

Saçak, M., “Polimer kimyası”, *Gazi Kitabevi*, Ankara, 178 (2005).

Sanes, J., Rodriguez, C. S. and Pamies, R., “Extrusion of Polymer Nanocomposites with Graphene and Graphene Derivative Nanofillers: An Overview of Recent Developments”, *Materials*, 13(3):549 (2020).

Sen, M., “Nanocomposite Materials”, *Intech Open Science*, London, 112-117 (2020).

Sezer, M. K., “Asfaltiti ile Polietilenin Eşpirolizi ve Piroliz Ürünlerinin Değerlendirilmesi”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 307-313 (2007).

Sharifzadeh, M., “Nanotechnology Sector Report”, *Cronus Capital Markets.*, 1st Quarter, United State (2006).

Singh, I., Singh, S. and Singh, A., “Conventional and Unconventional Hole Making in Metal Matrix Composites”, *Woodhead Publishing Reviews: Mechanical Engineering Series*, 69-193 (2013).

Sinnot, S. B. and Andrews, R., “Carbon Nanotubes: Synthesis, Properties, and Applications”, *Materials Science*, 26(3): 145-249 (2001).

Siwal, S. S., Zhang Q., Dev, N. and Thakur V.K., “Carbon-Based Polymer Nanocomposite for High-Performance Energy Storage Applications”, *Polymers*, 504-505 (2020).

Soni, S. K., Thomas, B. and Kar, R. V., “A comprehensive review on CNTs and CNT-reinforced composites: syntheses, characteristics and applications”, *Materials Today Communications*, 2-11 (2020).

Sönmez, M., “Polimer matrisli kompozitlerin endüstri ürünleri tasarımında önemi ve geleceği: Türkiye’den dört firma üzerine bir inceleme.” Yüksek lisans tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 63-89 (2009).

Spitalksy, Z., Tasis, D., Papagelis, K. and Galiotis, C., “Carbon nanotubepolymer composites: Chemistry, processing, mechanical and electrical properties”, *Progress in Polymer Sciences*, 357-401. (2010).

Sun, X., Kiang, C. H., Endo, M., Takeuchi, K., Furuta, T. and Dresselhaus, M. S., “Stacking characteristics of graphene shells in Carbon Nanotubes”, *Physical Review B*, 54-58 (1996).

Şen, F., Palancıoğlu, H. and Aldaş, K., “Polimerik nanokompozitler ve kullanım alanları”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 111-118 (2010).

Tanaka, K. and Iijima, S., “Carbon nanotubes and graphene”, *Elsevier*, 99-151, 165-200 (2012).

Tang, W., Santare, M.H. and Advani, S. G., “Melt processing and mechanical property characterization of multi-walled carbon nanotube/high density polyethylene (MWNT/HDPE) composite films”, *Carbon*, 2779-2785 (2003).

Tanniru, M., Yuan, Q. and Misra, R.D.K., “On significant retention of impact strength in clay-reinforced high-density polyethylene (HDPE) nanocomposites”, *Polymer*, 2133–2146 (2006).

Tanın, M., “Karbon Nanotüp Ve Cam Elyaf Takviyeli Yüksek Yoğunluklu Polietilen Hibrit kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay, 2-8 (2016).

Tekin, F., “Nano-karbon ile güçlendirilmiş cam elyaf takviyeli kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin tespiti”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 46-59 (2015).

TÜBİTAK, “Nanobilim ve Nanoteknoloji Stratejileri”, *Vizyon 2023 Projesi*, Ankara, 4-9 (2004).

Ulutaş, E., Gümüş B. E., ve Taşdemir M., “The Effect of Graphene on the Mechanical Properties of High Density Polyethylene (HDPE)/Zinc Borate Polymer Composite”, *Journal of Science*, 133-142 (2023).

Ünal, E., “Elektro depolanmış Nanokompozit Kaplamalarda Elektrolit Bileşenlerinin Etkisi”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 159-171 (2020).

Vegas, T.S., Muhsan, A., Liu, C., Tarfaoui, M. and Lafdi, K., “The Effect of Agglomeration on the Electrical and Mechanical Properties of Polymer Matrix Nanocomposites Reinforced with Carbon Nanotubes”, *Materials*, 1-5 (2022)

Vijayabhaskar, A., “Usage of Carbon nanotubes and nano fibers in cement and concrete: A review.” *International Journal of Engineering and Technology*, 564-569 (2017).

Vural S., Alphan A., Köytepe S. and Seçkin T., “Pvp-Aşılanmış Nife₂o₄ Nano Parçacıklarının Yüzey Polimerizasyonu Tekniği ile Sentezi”, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi 6.2*, 188-197 (2018).

Wang, C., Guo, Z.-X., Fu, S., Wu, W. and Zhu, D., “Polymers containing fullerene or carbon nanotube structures”, *Polymer Science*, 1079– 1141 (2004).

Wang, R. M., Zheng, S. R. and Zheng, Y. G., “Polymer matrix composites and technology”, *Science Press Beijing*, 29-85 (2011).

Windhorst, T. and Blount, G., “Carbon-carbon composites: a summary of recent developments and applications”, *Materials & Design, Volume 18*, 11-15 (1997).

Xanthopoulou E., Chrysafi I., Polychronidis P., Zamboulis A., and Dimitrios N. B., “Evaluation of Eco-Friendly Hemp-Fiber-Reinforced Recycled HDPE Composites”, *Laboratory of Polymer Chemistry and Technology*, 138 (2023).

Yağlıkçı, S., “Karbon nanotüp üretiminde katalizörün gaz fazı derişim profiline etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 63-70 (2012).

Yakovleva, G., Pervushin, G., Maeva, I., Kerieneb, J., Pudov, I., Shaybadullina, A., Buryanov, C., Korzhenko, A. and Senkov S., “Modification of construction materials with multi-walled carbon nanotubes”, *Procedia Engineering*, 407-413 (2013).

Yasim-Anuar, T. A., Ariffin H., Norrahim M. F., Hassan, M. A., Andou Y., Tsukegi, T. and Nishida H., “Well-Dispersed Cellulose Nanofiber in Low Density Polyethylene Nanocomposite by Liquid-Assisted Extrusion”, *Faculty of Biotechnology and Biomolecular Sciences*, 1-17 (2020).

Yaşar, H., “Plastikler Dünyası”, *TMMOB Başkanlığı Makine Mühendisleri Odası*, Ankara, 141-142 (2001).

Yeşil, S., “Processing And Characterization Of Carbon Nanotube Based Conductive Polymer Composites”, Doktora Tezi, *The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University*, 182-201 (2010).

Yuca, N., “Karbon Nanotüplerin Çeşitli Yöntemlerle Saflaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü*, 3-28 (2010).

Yüce, İ., “Dairesel kompozit tabakalarda düşük hızlı darbe hasarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 6-22 (2007).

Zeren, F., “Değişik oranlarda nano ve mikro boyutlardaki CaCO₃ ’ün yüksek yoğunluklu polietilenin özelliklerine etkilerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 64-72 (2013).

Zhang, C., “Understanding the wear and tribological properties of ceramic matrix composites, Advances in Ceramic Matrix Composites”, *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*. 401-428 (2014).

Zou, Y., “Processing and properties of MWNT/HDPE composites”, *Carbon*, 271-277 (2003).

ÖZGEÇMİŞ

Muhammed Umut KİBAR ilkokulu ve ortaokul öğrenimini sırasıyla Yunus Emre İlköğretim Okulunda ve Bahçelievler Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2015 yılında Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği bölümünde öğrenime başlayarak 2019 yılında iyi derece ile mezun oldu. Mezun olduktan sonra savunma sanayinde çalıştı ve ardından otomotiv sektörüne geçiş yaparak Uzman Tasarım Mühendisi olarak çalışmaya başladı. 2020 yılında Karabük Üniversitesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programına devam etmektedir.