

**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TUFAL KATKILI PE MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN  
TRİBOLOJİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**Hazırlayan  
Gamze BAYRAKTAR**

**Danışman  
Doç. Dr. Bilal DEMİREL**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Ocak 2020  
KAYSERİ**



**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TUFAL KATKILI PE MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN  
TRİBOLOJİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan  
Gamze BAYRAKTAR**

**Danışman  
Doç. Dr. Bilal DEMİREL**

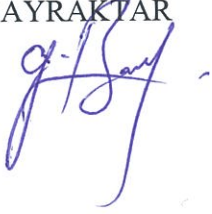
**Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi  
tarafından FYL-2019- 8835 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Ocak 2020  
KAYSERİ**

## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Gamze BAYRAKTAR



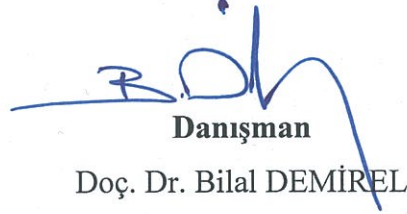
## YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI

“Tufal Katkılı PE Matrisli Kompozitlerin Tribolojik Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.



**Hazırlayan**

Gamze BAYRAKTAR



**Danışman**

Doç. Dr. Bilal DEMİREL

**Malzeme Bilimi ve Mühendisliği A.B.D. Başkanı**

Doç. Dr. Serdar ÖNSES



Doç. Dr. Bilal DEMİREL danışmanlığında Gamze BAYRAKTAR tarafından hazırlanan “Tufal Katkılı PE Matrisli Kompozitlerin Tribolojik Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

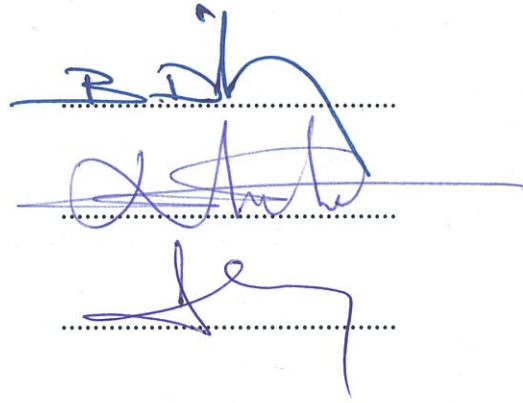
27 / 01 /2020

**JÜRİ:**

Danışman : Doç. Dr. Bilal DEMİREL

Üye : Doç. Dr. Cemal CARBOĞA

Üye : Doç. Dr. Soner SAVAŞ

**ONAY:**

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 04/02/2020. tarih ve 2020/10-12...sayılı kararı ile onaylanmıştır.



04/02/2020  
Mehmet Akkurt  
Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

## TEŞEKKÜR

“Tufal Katkılı PE Matrisli Kompozitlerin Tribolojik Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” isimli tez çalışmamın konu seçiminde, çalışmalarım da her daim bana yol gösteren ilgi ve alakasını esirgemeyen, çalışmalarımın tamamlanması için bana her anlamda destekçi olan çok değerli hocam Doç. Dr. Bilal DEMİREL’ e, bu yoğun çalışmalarım süresince ve yaşamımın her döneminde bana inanan, destekleyen, teşvik edip, sonsuz sevgileri ile fedakârlık sağlayan değerli aileme ve ailem kabul gördüğüm insanlara, tribolojik çalışmalarımızın bir kısmında bize laboratuvarlarının kapısını açan Bartın Üniversitesine, üstün bilgi birikimi ile testlerimizin gerçekleştirilmesi, çalışmalarımızın yorumlanması kısmında yol gösterici hocam sayın Prof. Dr. M. Sabri GÖK’e ve Erciyes Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölüm hocalarımızdan Doç. Dr. Soner SAVAŞ’a, çalışmalarımızda kullandığımız Tufal ( $Fe_2O_3$ ) takviye elemanımızın tane boyu analizlerimizin gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen Antalya Adoçim Çimento ve Beton San. ve Tic. A.Ş.’ye firmasına ve çalışmalarım boyunca küçük veya büyük yardımlarını esirgemen herkese sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Gamze BAYRAKTAR

Ocak 2020, KAYSERİ

# TUFAL KATKILI PE MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN TRIBOLOJİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Gamze BAYRAKTAR

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi, Ocak 2020  
Danışman: Doç. Dr. Bilal DEMİREL

## ÖZET

Polimer matrisli kompozit (PMK) malzemeler yüksek mekanik dayanım, sertlik, hafiflik gibi üstün özelliklerinden dolayı havacılık ve uzay sanayisinden günlük yaşamımıza kadar uzanan çok geniş bir alanda kullanım alanına sahiptir. Ancak PMK'nın mekanik ve tribolojik özellikleri takviye malzemesinin özellikleri ile sıkı bir şekilde ilişkilidir. Bugüne kadar da polimerler matris içerisine çok çeşitli dolgu maddesi katkılanmıştır. Bu çalışmada Tufal'in ( $Fe_2O_3$ )Polietilenin (PE) potansiyel mekanik ve aşınma dayanımı performansına etkisinin incelenmesi tezin ana fikrini oluşturmaktadır. Tez çalışmasında PE/Tufal kompozit peletleri polimer matris içerisine farklı ağırlık oranlarında (%10, 20, 30, 40) ve tane boyutlarında (30, 60, 90, 120, 200  $\mu$ ) Tufal eklenerek çift vidalı ekstrüder kullanılarak üretilmiştir. Ardından tribolojik ve mekanik testlerin gerçekleştirilebilmesi için üretilen peletler enjeksiyon kalıplama yöntemi ile kalıplanmıştır. PE/ $Fe_2O_3$ kompozitlerine başlıca çekme, Shore D sertlik ölçümü, dinamik mekanik analiz, termal analiz, yapısal analizler (XRF, XRD, SEM vb.) ve kuru ortamda pin-on-disk aşınma testleri, gerçekleştirilmiştir. Tüm bu testlerde süre, yük, aşınma hızı gibi faktörlerin yanı sıra temel olarak kompozitlerin takviye fazı tane boyutu ve takviye fazı % bileşimi parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Ayrıca kompozitlerde aşınma sonrası yüzey optik mikroskop görüntüleri incelenerek aşınma mekanizmaları yorumlanmıştır. Kompozitlerin sertlik değerleri ve elektriksel direnci üzerine  $Fe_2O_3$ 'in tane boyutunun etkisi gözlenmezken artan  $Fe_2O_3$  konsantrasyonu ile artış elde edilmiştir.  $Fe_2O_3$ 'in yapıya ilavesinin artışı çekme dayanımı üzerinde belirgin bir etkiye neden olmazken, kopma uzamasının takviye oranının artışı ile arttığı tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Polimer kompozitler, polietilen, tufal, mekanik özellikler, tribolojik özellikler.



**INVESTIGATION OF THE TRIBOLOGICAL AND MECHANICAL  
PROPERTIES OF THE OXIDE LAYER (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ADDITIVE PE MATRIX  
COMPOSITES**

**Gamze BAYRAKTAR**

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Master Thesis, January 2020**

**Supervisor: Assoc Prof. Bilal DEMİREL**

**ABSTRACT**

Polymer matrix composite (PMK) materials have a wide range of applications ranging from aerospace industry to daily life due to their high mechanical strength, hardness and light weight. However, the mechanical and tribological properties of PMK are closely related to the properties of the reinforcing material. To date, a wide variety of fillers have been incorporated into the polymers matrix. The main idea of this thesis is to investigate the effect of Tufal (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) on the potential mechanical and abrasion resistance performance of polyethylene (PE). In the thesis, PE / Tufal composite pellets were produced by using twin screw extruder in different weight ratios (10, 20, 30, 40) and grain sizes (30, 60, 90, 120, 200 μ) into the polymer matrix. The pellets were then molded by injection molding to perform tribological and mechanical tests. Tensile, Shore D hardness measurement, dynamic mechanical analysis, thermal analysis, structural analysis (XRF, XRD, SEM, etc.) and pin-on-disk abrasion tests were performed on PE / Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites. In all these tests, the effects of the parameters such as duration, load, abrasion rate as well as reinforcement phase particle size and reinforcement phase % composition of the composites were investigated. The optical microscope images of the composites surfaces were also investigated and their wear mechanisms were interpreted. No effect of grain size of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the hardness values and electrical resistance of the composites was observed, but increasing Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> concentration has improved them. While the addition of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> to the structure does not cause any significant effect on the tensile strength, it is seen that the elongation at brake increases with increasing Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> concentration.

**Key Words:** Polymer composites, polyethylene, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, mechanical properties, tribological properties.

## İÇİNDEKİLER

### TUFAL KATKILI PE MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN TRİBOLOJİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK .....	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	ii
KABUL VE ONAY .....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
KISALTMALAR .....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xiv

## 1. BÖLÜM

### GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Giriş .....	1
1.2. Tezin Konusu .....	3
1.3. Tezin Önemi .....	3
1.3. Tezin Amacı .....	4
1.4. Literatür Araştırması.....	5

## 2. BÖLÜM

### KONU KAPSAMI VE YÖNTEM

2.1. Polimer Malzemeler .....	10
2.2. Polimerlerin Sınıflandırılması.....	13
2.2.1. Bileşenlerin Kaynağına Göre Sınıflandırılması .....	13
2.2.1.1. Doğal Polimerler.....	13
2.2.1.2. Kauçuk .....	14
2.2.2. Kimyasal Yapılarına Göre Sınıflandırılması.....	15
2.2.2.1. Organik Polimerler .....	15
2.2.2.2. İnorganik Polimerler .....	15
2.2.3. Zincir Yapılarına Göre Sınıflandırılması .....	16

2.2.3.1. Düz Zincirli Polimer .....	16
2.2.3.2. Dallanmış Polimerler .....	17
2.2.3.3. Çapraz Bağlı Polimerler .....	17
2.2.4. Monomer Çeşitlerine Göre Sınıflandırılması .....	18
2.2.4.1. Homopolimer .....	19
2.2.4.2. Kopolimer .....	19
2.2.5. İşleme Şekilleri Ve/Veya Çözücülere Karşı Gösterdikleri Davranışa Göre Polimerlerin Sınıflandırılması.....	19
2.2.5.1. Termoplastikler .....	19
2.2.5.2. Elastomerler.....	21
2.2.5.3. Termosetler .....	21
2.3. Plastiklerin Tanıtılması.....	22
2.3.1. Polietilen (PE) .....	22
2.3.2. Polietilenin Yapı ve Genel Özellikleri .....	23
2.3.3. Polietilen İşleme Teknikleri.....	25
2.3.4. Polietilen Üretimi .....	26
2.3.5. Yüksek Yoğunluklu Polietilen.....	27
2.3.6. Alçak Yoğunluklu Polietilen .....	28
2.3.7. PE Kullanım Alanları .....	29
2.4. Kompozit Malzemeler .....	29
2.4.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları.....	32
2.4.2. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları .....	32
2.4.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	33
2.4.3.1. Metal Matrisli Kompozitler .....	33
2.4.3.2. Seramik Matrisli Kompozitler .....	35
2.4.3.3. Polimer Matrisli Kompozitler .....	36
2.5. Triboloji.....	37
2.5.1. Sürtünme.....	38
2.5.2. Aşınma.....	42
2.5.2.1. Aşınma Türleri .....	43
2.5.2.1.1. Adhezif Aşınma.....	43
2.5.2.1.2. Abrasif Aşınma .....	44
2.5.2.1.3. Eroziv Aşınma .....	45

2.5.2.1.4. Yorulma Aşınması.....	46
2.5.2.1.5. Korozi Aşınma.....	47
2.6. Tufal ve Tufal Atıklarının Değerlendirilmesi.....	48
2.6.1. Tufal Oluşumu.....	48
2.6.2. Tufallerin Sınıflandırılması.....	50
2.6.2.1. Ağır Başlangıç Tufali.....	50
2.6.2.2. Fırın Tufali.....	50
2.6.2.1. Birincil Tufal.....	50
2.6.2.2. İkincil Tufal.....	50
2.6.2.3. Refrakter Tufali.....	51
2.6.2.4. Kırmızı Oksit Tufali.....	51
2.6.2. Tufalleşmenin Tavlama ve Haddeme Üzerindeki Etkileri.....	51
2.6.3. Tufallerin Değerlendirilmesi.....	52
2.7. Yanma.....	53
2.7.1. Yanma Mekanizması.....	56
2.7.2. Polimerlerin Yanması.....	57
2.7.2.1. Isınma.....	57
2.7.2.2. Bozunma.....	58
2.7.2.3. Tutuşma (Gaz Ortamı).....	58
2.7.2.4. Alevlenme.....	59
2.7.2. Polimer Yanma Önleme Mekanizması.....	60
2.7.3. Yanma Önleyici Test Metodları.....	61

### 3. BÖLÜM

#### DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Giriş.....	63
3.2. Malzemeler ve Yöntemler.....	63
3.2.1. Kullanılan Malzemeler.....	63
3.2.2. Tufal Tane Boyu Analizi.....	63
3.2.3. PE Matrisli Tufal Katkılı Kompozitlerin Sentezi.....	65
3.2.4. Yapısal Karakterizasyon.....	69
3.2.5. Mekanik Özellikler.....	70
3.2.6. Sürtünme ve Aşınma Testleri.....	70
3.2.7. Fiziksel Özellikler.....	72

3.2.8. Termal Özellikler .....	73
3.2.9. LOİ Yanma Testi .....	73
3.3. Test Sonuçları ve Tartışma.....	75
3.3.1. Yapısal Özellikler .....	75
3.3.2. Mekanik Özellikler .....	79
3.3.2.1. Çekme Özellikleri.....	79
3.3.2.2. Sertlik Ölçümü .....	84
3.3.3. Fiziksel Özellikler .....	86
3.3.3.1. Elektriksel İletkenlik.....	86
3.3.4. Termal Özellikler .....	87
3.3.4.1. Dinamik Mekanik Analiz (DMA) Sonuçları.....	87
3.3.4.2. DSC-TG Analiz Sonuçları.....	92
3.3.5. LOİ Yanma Deney Sonuçları.....	94
3.3.6. Aşınma Testi Sonuçları.....	95
<b>4. BÖLÜM</b>	
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER</b>	
4.1. Sonuçlar.....	107
4.2. Öneriler .....	110
KAYNAKÇA .....	111
ÖZGEÇMİŞ.....	122

## KISALTMALAR

<b><u>Sembol</u></b>	<b><u>Anlamı</u></b>
<b>PE</b>	: Polietilen
<b>AYPE</b>	: Alçak Yoğunluklu Polietilen
<b>YYPE</b>	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen
<b>OYPE</b>	: Orta Yoğunluklu Polietilen
<b>UYYPE</b>	: Ultra Yüksek Yoğunluklu Polietilen
<b>LAYPE</b>	: Lineer Alçak Yoğunluklu Polietilen
<b>FeO</b>	: Vüsvit
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Hematit (Tufal)
<b>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>	: Manyetit
<b>PET</b>	: Polietilen teraftalat
<b>PP</b>	: Polipropilen
<b>PEEK</b>	: Polietereterketon
<b>CNT</b>	: Karbon Nanotüp
<b>PTFE</b>	: Politetrafloretillen
<b>ETFE</b>	: Etilentetrafloroetilen
<b>PMMA</b>	: Polimetilmetakrilat
<b>Tg</b>	: Camsı Geçiş Sıcaklığı
<b>MFI</b>	: Erime Akış İndeksi
<b>DMA</b>	: Dinamik Mekanik Analiz
<b>XRF</b>	: X - Işını Floresan Spektrometresi
<b>XRD</b>	: X-ışını Kırınımı
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>FT-IR</b>	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
<b>DSC</b>	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre,
<b>TG</b>	: Termo-Gravimetri
<b>MPa</b>	: Mega Pascal

<b>LOI</b>	: Oksijen Kısıtlama Endeksi
<b>IUPAC</b>	: Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği
<b>ASTM</b>	: American Society for Testing and Materials
<b>N</b>	: Newton
<b>P</b>	: Basınç
<b>V</b>	: Aşınma Hızı
<b>L</b>	: Boy
<b>D</b>	: Vida Çapı
<b>F<sub>s</sub></b>	: Sürtünme Katsayısı
<b>F<sub>n</sub></b>	: Normal Kuvvet
<b>μ</b>	: Mikron
<b>μm</b>	: Mikrometre
<b>E'</b>	: Elastik Modül
<b>E''</b>	: Kayıp Modülü

## TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1.	Dünya’da Malzeme Türlerinin Yıllara Göre Tüketim Durumu.....	2
Tablo 2.1.	YYPE’nin özellikleri [43].....	27
Tablo 2.2.	Bazı plastik ve doğal ürünlerin tutuşma ve yanma sıcaklıkları [84].....	55
Tablo 2.3.	Bazı polimerlerin bozunma sıcaklıkları [84]. ....	58
Tablo 3.1.	Tufal tane boyu analizi. ....	64
Tablo 3.2.	Çalışmada kullanılan numunelerin bileşimi .....	66
Tablo 3.3.	Farklı tane boyutlarındaki tufal takviye elemanının XRF analiz sonuçları.....	75
Tablo 3.4.	Saf PE ve kompozitlerin konsantrasyonabağlı çekme özellikleri.....	80
Tablo 3.5.	Saf PE ve kompozitlerin tane boyuna çekme özellikleri .....	81
Tablo 3.6.	Saf PE ve kompozitlerin kompozisyona bağı Shore D sertlik ölçümleri .	84
Tablo 3.7.	Tufal takviye elemanının beş farklı tane boyutu için her bir konsantrasyon değerinde standart sapma hesaplaması .....	85
Tablo 3.8.	Saf PE ve kompozitlerin tane boyuna bağı Shore D sertlik ölçümleri ....	85
Tablo 3.9.	Saf PE ve kompozitlerin elektriksel iletkenlik deney sonuçları .....	86
Tablo 3.10.	Saf PE ve kompozitlerin LOI düşey yanma test sonuçları .....	94
Tablo 3.11.	Saf PE ve PE1 serisi kompozitlerin aşım test sonuçları.....	100
Tablo 3.12.	Saf PE ve farklı tane boyutlarında kompozitlerin aşım test sonuçları .	102



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Etilen monomerinin polimerizasyonu.....	10
Şekil 2.2.	Polimerlerin kristal yapısı [34] .....	11
Şekil 2.3.	Polimer zincirlerinin (moleküllerinin) basit gösterimleri [37] .....	12
Şekil 2.4.	Polimer zincirlerinin şekil ve ilişkilerinin şematik gösterimi [37] .....	12
Şekil 2.5.	Kauçuk ağacının özsuyundan elde edilen doğal kauçuk .....	14
Şekil 2.6.	Zeolitin yapısı .....	16
Şekil 2.7.	Doğrusal molekül yapılarının şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.8.	Dallanmış molekül yapılarının şematik gösterimi .....	17
Şekil 2.9.	Çapraz bağlı molekül yapılarının şematik gösterimi .....	18
Şekil 2.10.	Ağ yapılı molekül yapılarının şematik gösterimi .....	18
Şekil 2.11.	Homopolimer .....	19
Şekil 2.12.	Kopolimer .....	19
Şekil 2.13.	(a., b.) Polimerlerin yapı modelleri.....	20
Şekil 2.14.	Çapraz bağ yapısı.....	21
Şekil 2.15.	Termoset bağ yapısı [42] .....	21
Şekil 2.16.	Polietilen polimerizasyonu .....	23
Şekil 2.17.	Polietilen polimer zincir örneği .....	24
Şekil 2.18.	Polimerlerin kristal ve amorf yapısı [43].....	24
Şekil 2.19.	Polietilen uygulama örnekleri .....	27
Şekil 2.20.	AYPE'nin özellikleri [43].....	28
Şekil 2.21.	AYPE'nin uygulama örnekleri .....	28
Şekil 2.22.	Kompozit yapısı .....	31
Şekil 2.23.	(a., b., c.) Kompozit malzemede matris-takviye şekilleri [48] .....	31
Şekil 2.24.	(a., b., c.,) Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matrisli kompozitler .....	35
Şekil 2.25.	Fiber takviyeli seramik malzemenin kesitinden alınan büyütülmüş bir görüntü [56] .....	36
Şekil 2.26.	Sürtünme çeşitleri (a) Kuru, (b) Sınır, (c) Sıvı sürtünme halleri .....	38
Şekil 2.27.	Sürtünme düzlemde serbest cisim diyagramı .....	39
Şekil 2.28.	Sınır sürtünmesi .....	40
Şekil 2.29.	Madensel yüzeylere bağlanan polar moleküller [62].....	40

Şekil 2.30.	(a., b., c.) Yuvarlanma sürtünmesi mekanizması.....	41
Şekil 2.31.	Adhezif aşınma örneği (Yapışma aşınması) .....	44
Şekil 2.32.	İki elemanlı abrasif aşınma .....	45
Şekil 2.33.	Üç elemanlı abrasif aşınma.....	45
Şekil 2.34.	Yorulma aşınmasının şematik gösterimi.....	47
Şekil 2.35.	Korozif aşınmanın şematik gösterimi .....	48
Şekil 2.36.	Tufal tabakası ve yapısı [75].....	48
Şekil 2.37.	Düşük karbonlu çeliklerde farklı sıcaklıklarda oksit tabakası kalınlığının sıcaklık ve zamana göre değişimi [76] .....	49
Şekil 2.38.	Yangın üçgeninin şematik gösterimi .....	54
Şekil 3.1.	1 numaralı tane boyuna sahip $Fe_2O_3$ 'ün Hacim yoğunluğu/Kümülatif hacim dağılımı grafiği.....	64
Şekil 3.2.	2 numaralı tane boyuna sahip $Fe_2O_3$ 'ün Hacim yoğunluğu/Kümülatif hacim dağılımı grafiği.....	64
Şekil 3.3.	3 numaralı tane boyuna sahip $Fe_2O_3$ 'ün Hacim yoğunluğu/Kümülatif hacim dağılımı .....	64
Şekil 3.4.	4 numaralı tane boyuna sahip $Fe_2O_3$ 'ün Hacim yoğunluğu/Kümülatif hacim grafiği .....	65
Şekil 3.5.	5 numaralı tane boyuna sahip $Fe_2O_3$ 'ün Hacim yoğunluğu/Kümülatif hacim grafiği .....	65
Şekil 3.6.	Toz tufal (a.) ve saf PE peletler (b.).....	66
Şekil 3.7.	Gülner Makine 16 mm çift vidalı ekstrüder cihazı.....	67
Şekil 3.8.	Çift vidalı ekstrüderin şematik gösterimi.....	67
Şekil 3.9.	PE Matrisli kompozit peletler .....	68
Şekil 3.10.	YH-15V (Yuhdak) Dikey enjeksiyon kalıplama cihazı.....	68
Şekil 3.11.	Üretilen PE matrisli kompozit aşınma numunesi ve numune ebatları.....	69
Şekil 3.12.	Xplore IM 12 Enjeksiyon kalıplama cihazı .....	69
Şekil 3.13.	Pin On Disk aşındırma test cihazı (Turkyus Podwt) .....	71
Şekil 3.14.	Aşınma test anı.....	71
Şekil 3.15.	Optik profilometre (Huvitz 5800).....	72
Şekil 3.16.	Taber aşınma cihazı ve aşınma anı .....	72
Şekil 3.17.	LOI Test cihazı .....	74
Şekil 3.18.	LOI Test düzeneği .....	74

Şekil 3.19.	Takviye elemanı XRD pikleri.....	77
Şekil 3.20.	PE1 serisi kompozitlerin takviye elemanı konsantrasyonuna bağlı XRD pikleri.....	77
Şekil 3.21.	Kompozitlerin takviye Elemanı Tane Boyuna Bağlı XRD Pikleri.....	78
Şekil 3.22.	AYPE'nin FT-IR spektrumu .....	78
Şekil 3.23.	Saf PE ve PE5 serisi kompozitlerin FT-IR analiz sonuçları.....	79
Şekil 3.24.	Takviye elemanı % bileşiminin PE/Tufal kompozitlerinin mekanik özellikleri üzerine etkisi.....	80
Şekil 3.25.	Takviye elemanı tane boyunun PE/Tufal kompozitlerinin mekanik özellikleri üzerine etkisi.....	81
Şekil 3.26.	Saf PE'nin çekme testi sonrası kopma bölgesinden alınan SEM görüntüsü .....	82
Şekil 3.27.	PE12,5'in çekme testi sonrası kopma bölgesinden alınan SEM görüntüsü .....	82
Şekil 3.28.	PE120'nin çekme testi sonrası kopma bölgesi SEM görüntüsü.....	83
Şekil 3.29.	PE520'nin çekme testi sonrası kopma bölgesi SEM görüntüsü.....	83
Şekil 3.30.	% Ağırlık takviye Bileşiminin Farklı Tane Boyunda Takviye Bileşimine Sahip PE/Tufal Kompozitlerin Shore D Sertliğine Etkileri.....	85
Şekil 3.31.	Tane boyunun PE/Tufal kompozitlerinin Shore D sertliğine etkileri .....	86
Şekil 3.32.	Saf polimer ve farklı tufal yüzdesine sahip kompozitlerin sıcaklık karşısındaki elastik modülü grafikleri.....	88
Şekil 3.33.	Saf polimer ve farklı tufal yüzdesine sahip kompozitlerin sıcaklık karşısındaki kayıp modül grafikleri .....	89
Şekil 3.34.	Saf polimer ve Tufal yüzdesine sahip kompozitlerin sıcaklık karşısındaki tan $\delta$ grafikleri.....	89
Şekil 3.35.	Saf polimer ve farklı tufal tane boyuna sahip kompozitlerin sıcaklık karşısındaki elastik modülü grafikleri.....	90
Şekil 3.36.	Saf polimer ve farklı Tufal tane boyuna sahip kompozitlerin sıcaklık karşısındaki kayıp modül grafikleri. ....	91
Şekil 3.37.	Saf polimer ve farklı tufal tane boyuna sahip kompozitlerin sıcaklık karşısındaki tan $\delta$ grafikleri .....	91
Şekil 3.38.	Saf polimer ve kompozitlerin takviye elemanı konsantrasyonuna bağlı DSC-TG grafiği .....	93

Şekil 3.39.	Saf polimer kompozitlerin tane boyuna bağlı DSC-TG grafiği.....	94
Şekil 3. 40.	(a., b.)10N (7ml'de) yük ile gerçekleştirilen testte sırasıyla konstrasyon ve tane boyunun sürtünme katsayısı üzerindeki etkisinin değişim grafikleri.....	96
Şekil 3.41.	(a., b.) 15N (7ml'de) yük ile gerçekleştirilen testte sırasıyla konstrasyon ve tane boyunun sürtünme katsayısı üzerindeki etkisinin değişim grafikleri.....	97
Şekil 3.42.	(a., b.) 15N Yüke tabi tutulmuş saf PE (a.) ve PE12,5 (b.) numunesinden alınan aşınma izlerinin kesitsel optik profilometre ölçümleri .....	98
Şekil 3.43.	(a., b.) 15N Yüke tabi tutulmuş PE120 (a.) ve PE520 (b.) numunesinden alınan aşınma izlerinin kesitsel optik profilometre ölçümleri .....	99
Şekil 3.44.	(a., b.) 3,75N (a.) ve 7,5N (b.) yükte PE1 serisi kompozitlerin aşınma sonucu meydana gelen ağırlık kaybının hız ve konsantrasyonuna göre değişim grafikleri.....	101
Şekil 3.45.	(a., b.) PE1 Serisi kompozitlerin, (a) hızın 60d/dak'da, (b) 72d/dak'da değişen yük ile aşınma sonucu meydana gelen ağırlık kaybının konsantrasyonuna göre değişim grafikleri.....	101
Şekil 3.46.	(a., b.)3,75N yükte (a.) ve 7,5N yükte PE/Tufal (ağ.%20) kompozitlerin (b.) aşınma sonucu meydana gelen ağırlık kaybının hız ve takviye elemanı tane boyuna göre değişim grafiği.....	103
Şekil 3.47.	(a., b.) PE/Tufal kompozitlerinin, hızın 60d/dak'da (a.), 72d/dak'da (b) değişen yük ile aşınma sonucu meydana gelen ağırlık kaybının takviye elemanı tane boyuna göre değişim grafiği .....	103
Şekil 3.48.	Saf PE'nin 7,5N Yük, 72d/dak hızda aşınma iz görüntüsü .....	104
Şekil 3.49.	PE12,5 Numunesinin 7,5N yük, 72d/dak hızda aşınma iz görüntüsü.....	104
Şekil 3.50.	PE120 numunesinin 7,5N Yük 72d/dak hızda aşınma iz görüntüsü.....	105
Şekil 3.51.	PE120 Numunesinin 3,75 N Yük, 60d/dak hızda aşınma iz görüntüsü...	105
Şekil 3.52.	PE520 Numunesinin 7,5N yük, 72d/dak hızda aşınma iz görüntüsü.....	106

# 1. BÖLÜM

## GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

### 1.1. Giriş

21. yüzyılda endüstri ve teknolojinin gelişimi ile birlikte hafif, kolay şekillendirilebilir, ekonomik, çevre şartlarına en üst seviyede dayanabilen, yüksek aşınma direncine sahip malzemeler talep edilmektedir. Fakat yeryüzünde ana malzemelerin sınırlı olmasından dolayı, malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri teknolojinin gelişimine ayak uyduramamaktadır [1]. Ayrıca gerçekte geleneksel bir malzeme istenilen tüm özellikleri aynı anda sağlayamaz [2]. Dolayısıyla malzemelerin büyüyen teknolojik gelişmeler, yenilikler ve buluşlar alanında geniş bir yere sahip olduğu böyle bir dönemde ileri malzemelerin gelişimi ve bu malzemelerin üretim teknikleri önemli bir yere sahiptir.

İleri malzemeler, 20. yüzyılın ikinci yarısında dünya ekonomisine önemli ölçekte pazar payıyla giren ileri seramik, polimer, metal ve kompozitler olarak yüksek safiyette, yüksek teknik ve performans ve yüksek bilgi içeriğine sahip, çok yönlü işlev ve çeşitliliğe sahip malzemeler olarak tanımlanabilir [3]. Ancak aslında kompozit malzemeler yıllardan beri kullanılmakta ve ilk örnekleri ise antik çağlara kadar uzanmaktadır. Antik çağlardan beri insanlar kırılgen malzemelerin içerisine hayvansal veya bitkisel kaynaklı lifler ekleyerek bu kırılgen malzemeleri güçlendirmeye çalışmışlardır. Bunun bilinen en yaygın, en eski örneği kerpiçtir. Bugün ise kompozit malzemeler otomotivden, denizcilik, petrol ve spor endüstrileri, tüketim malları gibi farklı amaçlara yönelik kullanılmaktadır. Bu modern kompozitler olarak adlandırılan kompozitlerin yaygın kullanımının başlangıcıysa Owens Corning firmasında çalışan bir mühendisin 1930 yılında tesadüf eseri keşfettiği fiberglasın, 1937'de Amerika Birleşik Devletleri'nde satışına başlanması gösterilebilir [3].

Dünyada ileri malzemeler alanında yapılan çalışmalarda bugün kompozit malzemelerin gerek bilimsel çalışmalarda gerekse ürün tasarımında geniş yer tuttuğu görülmektedir. Özellikle son zamanlarda polimer esaslı kompozit malzemeler geleneksel malzemeler olan çelik, cam ve seramik malzemelerle karşılaştırıldığında daha yüksek dayanım/ağırlık oranı sebebiyle havacılık, otomotiv, elektrik/elektronik, makine ve kimya endüstrisi gibi değişik alanlarda artarak kullanılmaktadır [4]. Örneğin;daha düne kadar tahta, sac gibi malzemelerden yapılan tekneler artık yerini polyester - cam elyaftan yapılan benzer ürünlerine bırakıyorlar. Çünkü kompozit malzemedan yapılan tekneler aynı zamanda daha hafif, uzun ömürlü ve süratli olmaktadır [5]. Ayrıca elyaf sarma makineleri yardımı ile silindirik tanklar, borular ve aydınlatma elemanları üretilmiş [3]. Son zamanlarda ise yüksek Mukavemet/Ağırlık, Rijitlik (katılık)/Ağırlık oranlarına sahip olan fiber takviyeli reçine kompozitleri, uçak ve uzay taşıtları gibi ağırlığa hassas uygulamalarda önemli kullanım sahaları bulmuşlardır. Ayrıca otomotiv sanayinde yakıt maliyetlerinin düşürülmesi ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması gibi konularda her geçen gün artan çevresel baskılar ile birlikte kompozit malzemenin var olan çelik ve alüminyum gibi malzemelerin yerine kullanılmasını ön plana çıkartmaktadır [6].

Bu bilgiler ışığında ileri malzemeler sınıfına giren polimer matrisli kompozitlerin son yarım yüzyıla damgasını vurduğu ve önemli bir alt başlık oluşturduğu böylelikle de tüketim değerlerinin hızla artış gösterdiği görülmektedir [7].Çizelgede de görüleceği üzere polimerik kompozitler zaman içerisinde %100 oranında bir büyüme kaydederken Alüminyum, çelik gibi geleneksel malzemeler aynı dönemde sırasıyla %65 ve %30'larda tüketim oranlarına sahiptir [8].

Tablo 1.1. Dünya'da Malzeme Türlerinin Yıllara Göre Tüketim Durumu

Yıl	Plastik	Polimer Kompozitler	Alüminyum	Çelik
1985	100	100	100	100
1990	135	150	112	107
1995	179	160	118	104
2000	216	190	141	115
2005	265	200	165	130

Yukarıdaki tabloda verilen değerler, dünyadaki farklı malzemelerin tüketim durumunu ve malzemelere olan yönelimleri açıkça ifade etmektedir. Dolayısıyla buradan yola

çıkacak olursak polimer matrisli kompozit malzemelerin kullanım sahalarının genişletilmesi ve kullanıldığı yerde istenilen özelliklere sahip olabilmesi için gerek tasarımının gerekse tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi hususları göz önüne alındığında fuar ve sempozyum gibi organizasyonlarda daha fazla yer verilmesi özellikle içinde bulunduğumuz bu yıllarda ciddi önem taşımaktadır [8,9]

## 1.2. Tezin Konusu

Polimer malzemeler diğer malzemelere kıyasla düşük üretim maliyetleri, yüksek dayanım/yoğunluk oranları, kolay şekil alabilmeleri ve amaca uygun üretilmeleri gibi özellikleri ile günümüzde pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. Polimer karışımları ise düşük maliyetle çözüm olanakları sunması ve en önemlisi istenen özelliklere sahip yepyeni yeni malzemelerin gelişiminde uygun olması ile hem bilimsel hem de endüstriyel sektörlerde giderek artan bir ilgi görmektedir [11, 12].

Bu çalışmanın konusu Polietilen (PE) matris içerisine tufal takviyesi yapılacak ve elde edilen kompozitin yapısal ve mekanik özellikleri incelenecektir. Polietilene yapılan tufal ( $Fe_2O_3$ ) takviyesi ile elde edilen kompozit örneklerinin darbe dayanımında, tokluğunda, sertliğinde, aşınma davranışlarında ne gibi değişimler olacağı incelenecektir. Bu sayede tufal takviye elemanının polimer kompozite ne gibi üstünlükler kazandırdığı tespit edilecektir.

## 1.3. Tezin Önemi

Polimerler monomer adı verilen her bir molekül ünitelerin tekrarından oluştuğu uzun zincir moleküllerinden oluşan bir makro bileşiktir. Bu makro bileşiğin en basit örneği ise polietilendir. Polimerler günümüzde hayatımızın hemen hemen her alanında karşımıza çıkmaktadır. Hatta bu malzemelerden üretilen ürünler kullanılmadan günlük hayatı hayal etmek zordur. Çünkü polimerler bugün tekstilden, gıdaya, teknolojiye, ambalaj, tıp ve inşaat sektörüne kadar uzanan geniş bir alanda kullanılmaktadır. Dolayısıyla polimer malzemeler (polimetilmetakrilat (PMMA), polietilen tereftalat (PET), polietereterketon (PEEK), ultra yüksek yoğunluklu polietilen (UYYPE) gibi) endüstri alanında olduğu kadar sosyo-ekonomik alanda da ciddi bir öneme sahiptir[13]. Kompozit malzemeler ise kullanım amacına yönelik istenilen

özelliklere sahip yepyeni malzemelerin üretimi ve gelişimine uygun olması ile geleceğin teknolojisini oluşturmaktadır. Bunlardan biri olan polimer kompozitler de, yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve diğer sahip olduğu üstün fiziksel özellikleri ile metallere alternatif olarak kullanım olanağı sağlaması ve havacılık uygulamalarında alüminyum alaşımlarına oranla daha fazla tercih edilmesi gibi üstün özellikleri ile son yarım yüzyıla damgasını vurmuştur. Buradan da anlaşılacağı üzere polimer matrisli kompozitler de aynı polimerler gibi hayatımızın her alanında karşımıza çıkmaktadır. Kompozit yapısında bulunan diğer tüm malzemeler gibi polimer matrisli kompozitlerin de bileşiminde mevcut takviye elemanının türü, şekli, ebadı kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerine etki etmektedir. Dolayısıyla polimer kompozitlerde doğru bileşim oranlarının tercihi, aşınma direncinin açısından optimal koşullara ulaşılmasına yardımcı olur. Ayrıca uygulanan kimyasal işlemler de kompozitlerin tribolojik özellikleri üzerinde önemli bir etken rol oynamaktadır [15].

Bütün bunlara ek olarak son zamanlarda gelişen üretim endüstrisi ile beraber yapı ürünleri (cüruf gibi) önemli bir yere sahiptir. Ancak ürünlerin oluşum enerjisine bağlı olarak çevreye olan etkisinin yanı sıra, yüksek enerjili yapı ürünlerinin atık miktarları ve buna bağlı olarak çevreye vermiş oldukları zarar da büyük orandadır. Dolayısıyla son yıllarda bu atıkların yarattığı çevresel sorunlar nedeniyle, atık miktarının azaltılması, yeniden değerlendirilebilmesi, böylece kaynakların daha etkin kullanılmasına yönelik çalışmalar hız kazanmaya başlamıştır [16].

Yukarıda açıkça ifade edilen bilgiler ve değerlendirmeler doğrultusunda bu çalışmanın önemi farklı tane boyutuna ve yüzde (% ağı.) bileşimine sahip takviye elemanının polimere katılması ile takviye elemanı farklı parametrelerinin elde edilen yeni kompozitlerin tribolojik ve mekanik özellikleri üzerinde etkisinin araştırmaktır.

### **1.3. Tezin Amacı**

Bu tezin amacı, diğer polimerlere nazaran nispeten ucuz bir malzeme olan PE'ye tufal ekleyerek aşınma özelliklerini ve mekanik özelliklerini incelemektir. Polietilenin bugün tüm dünyada yıllık toplamda yaklaşık 90 milyon metrik tonun üzerinde bir üretim payına sahip olması göz önüne alındığında onu önemli bir mühendislik malzemesi olarak kılmaktadır [17]. PE yüksek darbe ve nem dayanımı ile kanalizasyon ve sulama



dağıtım şebekelerinde, kimyasal ve gaz/sıvılara karşı inert davranışı ile gıda ile temasa uygun uygulamalarda kullanımının yanı sıra mekanik stres altındaki alanlarda ya da birbiri ile temas halinde olan uygulamalarda da kullanılmaktadır. Bu ve benzeri alanlarda kullanılan bu malzemenin özelliklerini daha iyi bir hale getirmek ve bu alandaki literatür eksikliğini doldurmak bu tezin başlıca amaçlarındandır.

Bu doğrultuda üzerine çalışılan malzemede en iyi ürün özelliklerini verecek matris (ana faz) ve takviye elemanlarının karışım oranları belirlenerek yapısal ve mekanik özellikleri elde edilecektir. Mekanik özelliklerinin incelenmesi sırasında ise üretilen numunelerin çekme ve Shore D sertlik ölçümleri yapılacaktır. Ayrıca tribolojik testler, yapısal analizler (XRD, SEM), termal, fiziksel ve yanma özellikleri belirlenecektir.

Elde edilen tüm verilerin göz önüne alınarak takviye elemanının kompozit malzemede ne gibi değişimlere sebep olduğunun değerlendirilmesi ise bu tezin kapsamını oluşturmaktadır. Sonuç olarak, yapılan literatür çalışmaları ile benzer çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle hem bu alandaki çalışmalara zemin hazırlamak hem de literatür boşluğunu doldurmak bu çalışmanın amaçlarındandır.

#### **1.4. Literatür Araştırması**

Yapılan araştırmamıza referans olması için oluşturduğumuz literatür çalışmasında incelenen ve elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, yakın zamanda uygun maliyetle yüksek performansa sahip yeni malzemeler için genişleyen bir talep olduğu görülmüştür. Ayrıca geçtiğimiz on yıl içerisinde de artan çevresel endişeler ve uluslararası anlaşmalarla birlikte atıkların değerlendirilmesi ve kompozit malzeme eldesi üzerine yoğunlaşmıştır [17]. Kompozit malzeme alanında da metal matrisli kompozitlere nazaran daha düşük dayanıma sahip olmasına rağmen özellikle polimer matrisli kompozitlerin büyük ilgi çektiği görülmüştür. Bunun polimer matrisli kompozitlerin düşük yoğunluğa sahip olması, kolay, hızlı, ekonomik olarak üretilibilmeleri, korozyon dayanımı gibi pek çok sebebi mevcut olsa da asıl önemli sebebi polimer matrisli kompozitlerin metallere oranla daha hafif olmasıdır. Ayrıca polimerler tek başlarına sertlik ile beraber yapılarında kuvveti de içermesi ile bir asırdır çok büyük bir ilgi çekmiştir [18, 19, 20]. Fakat polimer malzemeler de her birbiri ile temas halinde bulunan malzemelerin aşınmaya maruz kalabileceği gibi adhesiv ve

abrasif olarak aşınmaya maruz kalırlar. Endüstri için ise iyi sürtünme ve aşınma özelliklerine sahip malzemelerin eşsiz kombinasyonu çok önemlidir. Çünkü aşınma, temas halinde olan yüzeyler arasındaki nispi hareket nedeniyle sürekli malzeme kaybını içeren katı yüzeye zarar olarak tanımlanır [21]. Örneğin; Rehbein ve Wallaschek [22] çalışmalarında birbirine temas eden farklı polimer-çelik ve alümina-alümina malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışını incelerken, Rajesh ve arkadaşları [23], poliamid ve poliamid kompozit çeşitlerinin aşınma davranışlarını, mekanik özelliklerini, kristalinite ve mikro yapı özelliklerini karşılaştırmalı olarak incelemiş olup bu incelemeler ile beraber polimerlerin kendi aralarında meydana gelen bir aşınmanın şiddeti bir metal malzeme ve polimer malzeme arasında meydana gelen aşınmanın şiddetinden çok daha fazla olduğu sonucuna varmışlardır. Dolayısıyla polimerin aşınma direncinin tanımlanmasında sadece aşınma faktörü değil, sürtünme katsayısı, hacimsel aşınma hızı ve basınç-hız (P-V) oranı gibi faktörler de kullanılan ana uzuvlardır. Sürtünme katsayısı, (sürtünme kuvvetinin, uygulanan kuvvete oranı) bir malzemenin diğer bir malzeme üzerinde ne kadar kolay kayma yapacağını göstergesi olup, düşük sürtünme katsayısı aşınma direncini belirlemede çoğunlukla tercih edilen göstergelerden bir tanesidir [24].

PE polimerler bugün en çok kullanılan, en önemli mühendislik termoplastik malzemelerden biri olarak bilinir. Çünkü PE üzerine yapılan son yıllardaki çalışmalar, malzemenin pek çok sektörde aşınmaya karşı dirençli yapı malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir [10, 25]. Polietilen dış ortam koşullarına, kimyasallara ve neme karşı iyi direnç özelliği yanı sıra yüksek darbe dayanımı, hafiflik, kolay kullanımı, esneklik ve eğme direnci gibi üstün özellikleri ile ev uygulamalarından (kase/kapak, kayak botlarının tokaları ve şişe / kapak çiftleri gibi...), gıda ambalajlaması ve tribo-sistemlere kadar yaygın olarak kullanılmaktadır [10, 26]. Hatta PE'ler çelik ve dökme demir gibi malzemelere kıyasla sahip olduğu korozyon direnci ve diğer üstün özellikleri ile şehir içi kanalizasyon sistemlerinde de kullanılan malzemeler arasında dikkat çekmektedir [25]. Literatürde isetriboloji ile ilgili makalelerin çoğunun polimerik malzemelerin aşınma ve sürtünme davranışları üzerinde durulduğu gözlenmiştir. Hatta daha önce Rajesh vd. [23] Rehbein vd. [22] Gao vd. [27] Sapiha vd. [28] Suh vd., Aokie vd. [29] Akıncı vd. [25] gibi isimler polietilen üzerine farklı çalışmalar yapmıştır ve ultra yüksek yoğunluklu polietilen ve politetrafloroetilen

(PTFE) gibi termoplastiklerin benzersiz sürtünme ve aşınma davranışı sergilediğini gözlemlemişlerdir[29].Aokiev d. [30]ultra yüksek yoğunluklu polietilen (UYYPE) disklerin tribolojik özelliklerini incelemişler. Bu inceleme sonucu disklerin termal haritalarını çıkarmışlar ve hız ile sürtünme katsayısının değişimini incelemişlerdir.Akınıcı vd. ise saf alçak yoğunluklu polietilen (AYPE) ve ağırlıkça %10 ile %70 oranlarında bazalt ihtiva edenAYPEmatrisli dört farklı kompozisyona sahip kompozit malzemenin sürtünme ve aşınma davranışı incelenmiştir. Dolgu malzemesi ilavesinin AYPE'nin tribolojik özelliklerine etkisi sabit yük ve değişken hızlar altında karakterize edilmiştir[25].Fakat bu ve benzeri pek çok çalışma gerçekleştirilmiş olup polietilenin gerek tek başına gerekse kompozit malzeme halinde aşınmaya olan direnci mühendislik uygulamaları için tatmin edici noktada olmadığı hem fikrine varılmıştır. Bu nedenle polietilen matrisli kompozit malzemelerin sürtünme, aşınma davranışı, daha düşük bir yapışma ve daha yüksek bir sertlik/mukavemet gibi özellikleri geliştirilmeye ihtiyaç duymaktadır.Geçmişten beri bu yönde çalışmalar devam etmekte olup, günümüze kadar yürütülen pek çok çalışmadan polimerlerin içerisine organik/inorganik katkı maddelerin ilavesi ile polimer kompozitlerin aşınma özelliklerinin geliştirilebildiği görülmüştür.Örneğin, Sapiehav d. [28] selüloz fiber-AYPE sistemlerine az miktarda benzoil peroksit veya dikaril peroksidin ilave edilmesinin, gerilme özelliklerini önemli ölçüde arttırdığını bildirmişlerdir. Fakat aynı zamanda her malzemenin mekanik ve tribolojik davranışı takviye elemanı, uygulanan yük, hız, temas koşulları ve bekleme süresi gibi parametrelere de bağlı olup polimerler ve kompozitlerinin sürtünme/aşınma davranışı ile ilgili çeşitli deneyler birkaç on yıldır gerçekleştirilmiştir [26]. Örneğin; Poliamid 66 esaslı kısa cam, karbon ve aramid elyaf takviyeli kompozit malzemelerin yuvarlanma-kayma temasındaki sürtünme ve aşınma üzerindeki etkileri incelenmiştir. Aramid elyaf takviyesi matris malzemesinin sürtünmesini önemli ölçüde değiştirmedeği sonucuna varılırken, karbon elyaf ve cam elyaf takviyesi sürtünme katsayısını önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Fakat bu üç takviye durumunda da takviyesiz polimere göre aşınma oranında 10 katın üzerinde bir artış gözlenmiştir. Fakat takviye elemanın görülen en önemli yararının ise düşük sürtünme katsayısı ile açığa çıkan sıcaklığın düşüş göstermesi olarak bildirilmiştir [31].

Gao vd. [27] etilentetrafloroetilen (ETFE), poliamid, poliimid ve yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) gibi kendi kendine yağlayıcı özelliği gösteren kompozitler gibi çeşitli polimerlerin çelik yüzeyindeki tribolojik özelliklerini incelemiştir.

Suh vd. [7] ultra yüksek yoğunluklu polietilen (UYYPE) içeren polietilen malzemelerin tribolojik (sürtünme ve aşınma) özelliklerini karakterize konusunda çalışmışlardır.

Sinha vd. [29] ise 0,5–10 N arasındaki nispeten büyük normal yüklerde yüzeyde mikro-çizilme deneyleri gerçekleştirmiştir. PET (Polietilen Teraftalat) ve PEEK (Polieter Eter Keton) gibi sünek ve elastomerik polimerler üzerinde mikro-çizilmenin enkaz oluşumunun çubuk-kayma olaylarıyla ilişkili olduğunu gözlemlemişlerdir.

R. AshokGandhivd. [32] yaptıkları deneyde polipropilen (PP) / karbon nanotüp (CNT) kompozitlerinin sürtünme aşınması, kuru durumda bir çelik karşı yüze karşı uygulanan yük ve bileşimin bir fonksiyonu olarak değerlendirmişlerdir. Karbon nanotüp yüzdesindeki artışın ise aşınma direncini arttırdığını gözlemlemişlerdir

Bu ve buna benzeri birçok çalışmadan da görülebileceği üzere kil, silika kum, doğal elyaflar, kevlar gibi sentetik elyaflar, bakır, nano parçacıklar, cam gibi malzemeler ile kompozit malzeme elde edildiği görülmektedir [12]. Harmanlanacak malzeme seçiminde ise nispeten ucuz, aşındırıcı olmayan, yenilenebilir, biyolojik olarak parçalanabilen ve mükemmel mekanik özelliklere sahip malzemelerin tercih edilmiştir.

Konuya başka bir açıdan yaklaştığımızdaysa ülkemizde ve dünyada sanayileşmenin artması ile birlikte üretim endüstrisinde metalürjik katı atıkların rastgele çevreye bırakılması veya işletme sahalarında bekletilmeleri de artış göstermiştir.

Bu atıklarda mevcut olan toksik etkili ağır metaller, bileşikler yağmur, kar sularıyla birlikte toprağa ve suya geçerek bitki örtüsüne, insan ve hayvan sağlığına olumsuz yönde etkilerini arttırmaktadır. Ayrıca, demir ve çelik tesislerinde oluşan bu katı atıkların bertaraf edilmesi sürecinde üreticilere ağır ekonomik sorunlar da yüklenmektedir. Bu nedenler doğrultusunda atık veya atık kabul gören maddelerin değerlendirilmesi, geri dönüşümü üzerine çalışmalar artmıştır [15]. Örneğin; Dünya genelinde çeşitli ebatlarda sınıflandırılmış çürüfler; karayollarında asfalt kaplama malzemesi olarak (yüzey, temel ve dolgu malzemesi), tarım toprağını iyileştirme

malzemesi olarak; çimento klinkeri için hammadde olarak; betonarme için ince agrega olarak; (cürufun hızlı soğutulması halinde) ve çeşitli amaçlarla dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır [33].

Literatür çalışmasında da görüldüğü üzere tufalin kompozit yapı içerisinde takviye fazı olarak kullanımı yaygın olmaması dolayısıyla benzer çalışmalara rastlanılmamıştır. Yapılacak olan bu çalışmamızın da bu alanda yeni çalışmalara konu olması umulmaktadır. Ayrıca konu ile ilgili literatür eksikliği göz önüne alınarak çalışmamızda literatür eksikliğini dolduracak veriler elde edilmesi amaçlanmıştır.

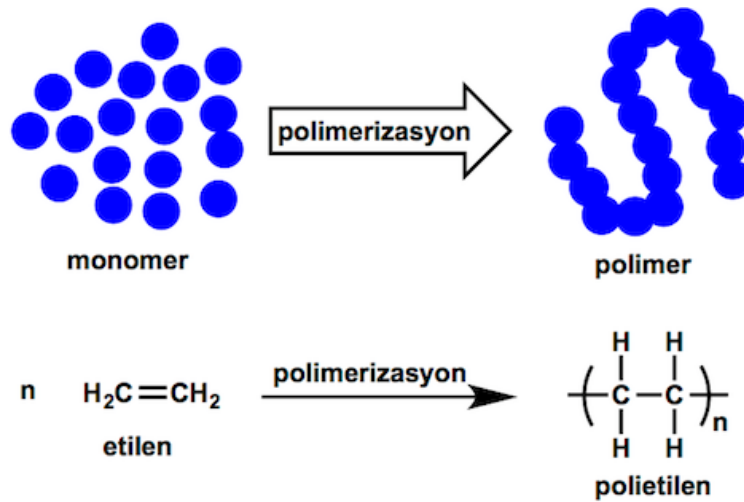
Bu doğrultuda da yapılan çalışmada takviye fazı olarak farklı tane boyutlarında ve yüzdelerde tufal ihtiva eden PE polimer kompozitleri hazırlanmıştır. Bu polimer kompozitlerin yapı, mekanik ve aşınma özellikleri üzerindeki takviye elemanı etkisini incelemek üzere önce ekstrüderde çekilip ardından granül haline getirilip karıştırılan malzeme, deney numuneleri elde etmek için enjeksiyon kalıbında işlenmiştir. Bunun akabinde çekme testi, pin-on-disk aşınma testi, sürtünme katsayısı testi, dinamik mekanik analiz (DMA), yapısal analizler (SEM, Optik Mikroskop) gerçekleştirilmiş ve bu davranışlar arasındaki ilişkilerin bulgular üzerinden çözümlenmeleri yapılmıştır.

## 2. BÖLÜM

### KONU KAPSAMI VE YÖNTEM

#### 2.1. Polimer Malzemeler

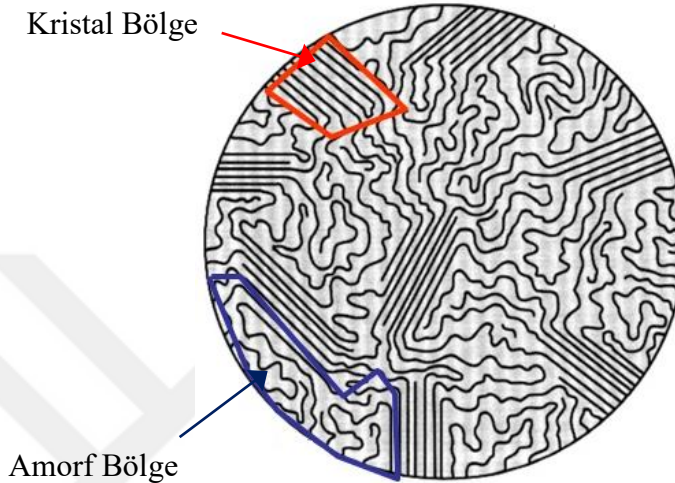
Polimer, bugün hayatımızın her alanında karşımıza çıkan, en basit tanımıyla çok sayıda aynı veya farklı küçük molekülün kovalent bağlarla az veya çok düzenli bir biçimde bağlanarak oluşturduğu makromoleküldür. “Poli-” kelimesi Latince “birden fazla, çok” anlamındadır ve “Mer” adı verilen ünitelerin tekrarlanması sonrasında polimerler meydana gelir. Diğer bir söylem ile “monomer” birbirine kimyasal bağlarla bağlanabilen ve uygun koşullarda polimerizasyon tepkimesi sonucu polimer moleküllerine dönüşebilen bağlardır. Şekil 2.1. de görüldüğü gibi etilen monomerinin polimerizasyonu sonrasında polietilen polimeri meydana gelmiştir.



Şekil 2.1. Etilen monomerinin polimerizasyonu

Bir polimerin ‘mer’ sayısı veya polimerizasyon derecesi arttıkça yoğunluk artarak zincirlerin hareketi zorlaşır ve böylece malzemenin ısı dayanımı ve rijitliği artar.

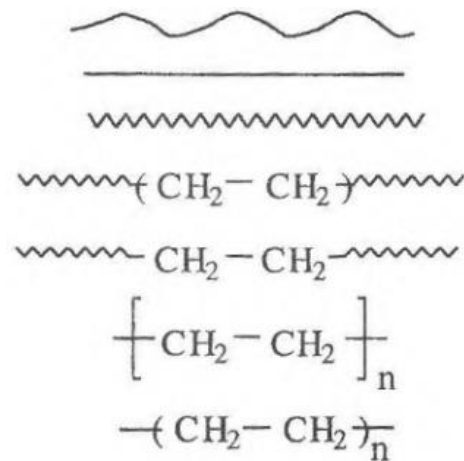
Moleküllerin birbirlerine zayıf bağlarla bağlandığı durumlarda ise polimer amorf molekül yapısı sahiptir. Dolayısıyla kararlı bir yapıya sahip değildir. Kristal yapıda ise malzeme daha düzenli bir geometriye sahiptir ve kararlılığı, rijitliği yüksektir. Polimerlerin yapısı şekil 2.2 de gösterilmiştir.



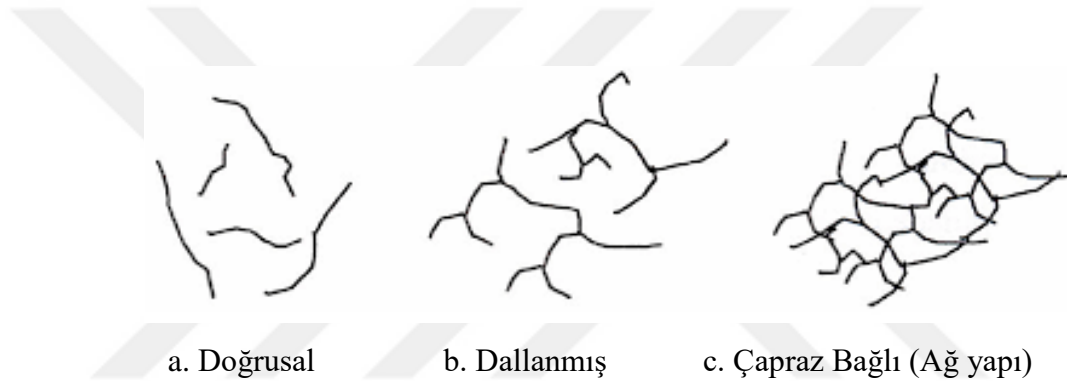
Şekil 2.2. Polimerlerin kristal yapısı [34]

Bir polimer zincirinde binlerce ‘mer’ bulunabilir ancak en az iki ‘mer’ bir araya gelerek bir polimer oluşturulabilir. Oluşan bir polimer zinciri iki ‘mer’den oluşmakta ve en küçük polimer molekülünü oluşturmaktadır. Ayrıca bir polimer zincirinde bulunan ‘mer’ sayısı polimerin fiziksel özelliklerini etkileyebilmektedir. Örneğin; bir polimer içerisinde ‘mer’ sayısı az iken sıvı halde bulunur fakat bu sayının artması ile yoğunluk ve viskozite artarak polimer akışkanlığını kaybeder. Hatta çok yüksek ‘mer’ miktarlarında bir polimer katı formdadır [35].

Bunun yanı sıra polietilen örneğinde olduğu gibi çok sayıda küçük molekülün bir araya gelerek oluşturdukları molekül zincir şekline benzemektedir. Bu polimerleri meydana getiren zincirlerin hepsi de aynı molekül ağırlığına sahip olmadıklarında ve doğrusal, dallanmış veya çapraz bağlı gibi yapılarda olabileceklerinden dolayı molekül ağırlıkları da birbirinden farklıdır. İşte bu nedenden dolayı polimerlerde tek bir molekül ağırlığından değil de ortalama bir molekül ağırlığından bahsetmek gerekir. Yani aslında bir polimeri diğer klasik kimyasal maddelerden ayıran en önemli özellik, moleküllerinin büyüklüğüdür ve zincirlerin biçimidir. Çünkü örneğin; gerekli mekaniksel özellikler belli bir zincir büyüklüğü ile elde edilir [36].



Şekil 2.3. Polimer zincirlerinin (moleküllerinin) basit gösterimleri [37]



Şekil 2.4. Polimer zincirlerinin şekil ve ilişkilerinin şematik gösterimi [37]

Ayrıca bir polimerin malzeme olarak kullanılabilmesi için çeşitli yöntemlerle işlenmesi gerekmektedir ve polimerler çoğu zaman tek başlarına, saf olarak işlenmezler. Bu nedenle polimerler işlenirken içerisine kaydırıcılar, renklendiriciler, güneş ışığına karşı koruyucular, plastikleştiriciler, vb. dolgu malzemeleriyle karıştırılır. Sonucunda elde edilen karışımlar çeşitli üretim yöntemleri ile (Plastik Enjeksiyon, Plastik Ekstrüzyon, Şişirme Kalıplama Yöntemi, Isıl Şekillendirme 3 Yöntemi vb.) ürün ve yarı ürüne dönüştürülür. Bu ve benzeri üretim yöntemleriyle elde edilmiş ve son şekli verilmiş ürün ise “plastik” olarak tanımlanır.

Yapay polimer olarak da bilinen plastikler, son 40-50 yıl içinde büyük gelişme göstererek günümüzde hacim olarak hemen hemen metallerle eşit oranda kullanılmaya başlanmıştır. Bunun başlıca nedenleri ise;

- Nispeten ucuz
- Kolay işlenebilir



- Hafif, düşük özgül ağırlığı
- Yüksek kimyasal ve korozyon direnci
- Yüksek ısı ve elektriksel özellik
- Yüksek mekanik mukavemet
- Düşüklükleme ve elde edilme maliyetleri gibi özelliklere sahip olmalarıdır [38].

## **2.2. Polimerlerin Sınıflandırılması**

Zaman içerisinde uygarlıklarının gelişmesi ile polimerlerin incelenmesini kolaylaştırmak için polimerleri sınıflandırma ihtiyacı doğmuştur. Bu amaç doğrultusunda polimerler farklı gruplar halinde sınıflandırılmıştır.

### **2.2.1. Bileşenlerin Kaynağına Göre Sınıflandırılması**

Polimerler bulunuşuna, yani bileşenlerinin kaynağı doğal ve sentetik olmak üzere ikiye ayrılır.

#### **2.2.1.1. Doğal Polimerler**

Tabiatta canlı varlıkların bünyesinde var olan ve insanların çeşitli uygulama alanlarında bulunan doğal polimerler (kauçuk, yün, pamuk, ipek, deri gibi doğal polimerler) yüzyıllardır hayatımızın bir parçasını oluşturmaktadır. Bitki ve hayvanlardan elde edilebilen farklı birçok polimer mevcut olup özellikle ağaçlardan elde edilen selüloz en bol bulunan polimerdir.

Selüloz gibi polimerlerin geneli canlı yapısında mevcut olup tırnak saç gibi protein yapısı ve polimerik yapıdaki karbonhidratlar, deoksiribonukleik, ribonukleik asitler bunlara önemli örnektir [39].

Biyolojik olarak üretilen ve canlıların hareketlilik, yaşlanma, duyu gibi benzersiz işlevsel özelliklere sahip olan bu polimerlere “biyo-polimerler” denir. Fakat doğal polimerlerin canlı organizmaların karmaşık yapılarından dolayı üretim maliyetleri yüksek ve yeterince büyük ölçeklerde üretilmemeleri, bu polimerlerin karşılaşılan başlıca sorunlarıdır.

Doğal polimerler, sahip oldukları işlevsel özellikler nedeniyle kalınlaştırıcı, jel yapıcı, bağlayıcı, dağıtma ajanı, kayganlaştırıcı, yapıştırıcı gibi birçok alanda kendine kullanım yeri bulmuş özellikle biyo-malzeme alanının vazgeçilmez kaynaklarını oluşturmaktadır. Çünkü doğal polimerler biyolojik ortamda bulunan makro moleküllerin benzeri veya aynısıdır. Böylece canlı vücudu ile temasında herhangi bir iltihaplanma, zehir gibi reaksiyonlar vermez. Fakat yüksek sıcaklıklarda bozunmaları şekillendirme açısından problem teşkil sunmakta ve her şeyden önemlisi immünojenik olmaları (bağışıklık tepkisine yol açmaları) önemli dezavantajlarıdır. Bundan dolayı daha çok geçici uygulamalarda kullanılan biyomalzemeler için avantaj oluşturmaktadır [40].

### 2.2.1.2. Kauçuk

Yüzyıllardan beri kullanılmakta olan ve günümüz endüstrisinde önemli yer tutan lastik diye de adlandırdığımız doğal kauçuk, kauçuk ağacı olarak bilinen Heveabrasilliensis ağacından elde edilmektedir. Bu ağacın içerisinden bir bıçak ile çizik atıldığında beyaz, yapışkan ve süte benzer latex sıvısı akar. Bu latex sıvısı kauçuğun sudaki emülsiyonu olup elde edilen emülsiyona asit katılınca kauçuk çöker ve bu çökelti bir hidrokarbon( $C_5H_8$ ) kompleksidir. Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği'ne(IUPAC) göre adı "2- metil1,3-bütadien" olan bu bileşiğin adı "izopren" olup polimerizasyonu sonucunda doğal kauçuğu meydana getirir.



Şekil 2.5. Kauçuk ağacının öz suyundan elde edilen doğal kauçuk

Kauçuk esnekliği az olan bir maddedir, ısıtılınca yumuşar ve 180 °C'de de yapışkan hale gelir. Bu nedenden dolayı çok kullanışlı olmayan bir maddedir. Ayrıca Kauçuk için

en kötü durumlardan bir tanesi de havadan oksijen almasıdır. Çünkü Işığın etkisiyle bu olay artar ve kauçuğun eskimesi durumunu ortaya çıkar.Yani aslında doğal kauçuk endüstriyel kullanıma çok uygun değildir. Bu nedenle doğal kauçuk kükürtle ısıtılıpvulkanize edilerek çok daha faydalı özelliklere kavuşturulur.Örneğin % 30-50 oranında kükürtle vulkanize edilen kauçuk ile sert bir lastik elde edilir ve bu Sert lastik, oto lastiklerinin yapımında kullanılır [39].

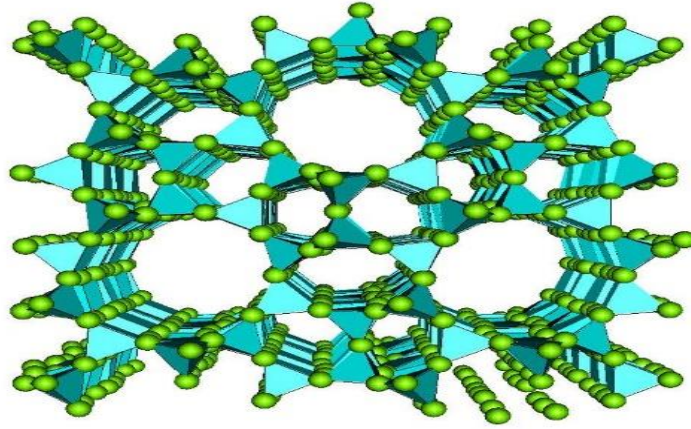
## **2.2.2. Kimyasal Yapılarına Göre Sınıflandırılması**

### **2.2.2.1. Organik Polimerler**

Günlük hayatımızda kullandığımız polimerlerin çoğunun ana zincirinin temel bileşeni karbon atomudur. Organik polimerler de karbon, oksijen hidrojen ve halojen atomlarından oluşmaktadır. Fakat bir atomun polimer ana zinciri üzerinde bulunabilmesi için en az iki değerlikli olması gereklidir. Bu nedenle hidrojen ve halojen atomları ana zincir üzerinde bulunamazlar. Bir diğer yeterlilik için önemli gereklilik ise ana zincir üzerinde bulunan atomların arasında bağ enerjisinin yeterli olmasıdır [35].Organik polimerlerin kendi içerisinde sınırlandırmaları ise diğer organik maddelerin aldıkları isimlere göre yapılır. Örneğin; alifatik, aromatik gibi. Fakat genel olarak polietilen, poliesterler, poliamidler, polipropilen, doğal kauçuk, proteinler, selüloz vb. polimerleri organik polimerlere örnek olarak verebiliriz.

### **2.2.2.2. İnorganik Polimerler**

Organik polimerlerin aksine ana zincirinde karbon(C)atomu yerine silisyum (Si) , Fosfor(P), Kükürt (S )gibi başka atomlar bulunabilir. Ana zincirinde C atomu bulunmayan (yan grup olabilir) bu polimerlere de inorganik polimerler denir. Organik polimerler kadar yaygın kullanılmazlar fakat aslında daha iyi ısı dayanıma ve daha yüksek mekanik dayanıklılığa sahiptirler. Tipik bir inorganik polimer örneği olarak Alümina silikat verilebilir.



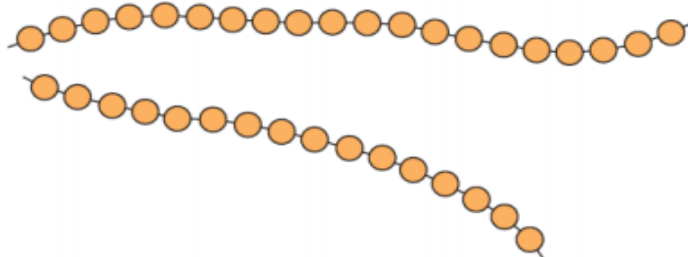
Şekil 2.6. Zeolitin yapısı

### 2.2.3. Zincir Yapılarına Göre Sınıflandırılması

Polimerleri meydana getiren monomerleri bir zincirin halkası olarak düşünersek, bu halkalar da monomerlerin bir araya gelerek polimeri oluşturdukları gibi bir araya gelerek zinciri meydana getirmektedir. Polimer zincirleri hareketli yapıya sahip olup bu zincirler arasında zayıf Van der Waals bağları bulunmaktadır. Eğer zincirde bir polar grup varsa daha kuvvetli etkileşimler mevcuttur ve birbirinden bağımsız olarak hareket edemezler. Özellikle bu zincirler çok uzun ve bükümlü olduklarında, birbirine dolaşmış adeta iplikleri birbirine dolanmış bir yün yumağı görünümündedir. Buradan yola çıkarak polimer moleküllerinin bir araya gelerek oluşturdukları zincirler yapılarına göre düz zincirli, dallanmış ve çapraz bağlanmış olarak 3 gruba ayrılmaktadır [37,39].

#### 2.2.3.1. Düz Zincirli Polimer

Polimer molekülleri; düz bir zincir şeklinde uç uca sıralanmıştır ve zincirleri oluşturan atomlar kendi aralarında kovalent bağlı, fakat zincirler arasında Van der Waals bağları mevcuttur.

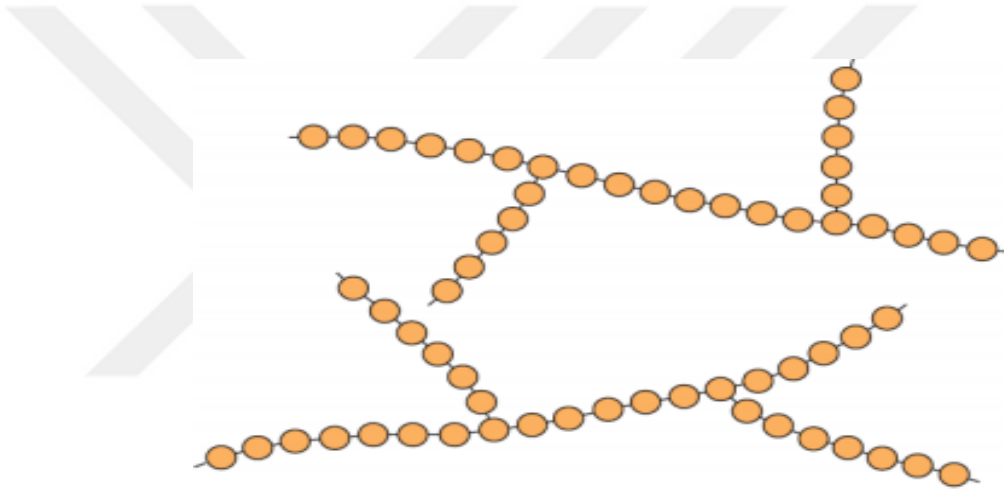


Şekil 2.7. Doğrusal molekül yapısının şematik gösterimi

Doğrusal zincir yapısına sahip en bilinen polimerler; polietilen, poli(vinil klorür), polistiren, poli(metil metakrilat), naylon ve florokarbonlardır. Bu doğrusal polimerler uygun çözücülerde çözünür ve eritilerek tekrar tekrar şekillendirilebilir[37].

### 2.2.3.2. Dallanmış Polimerler

Bu polimerlerin ana zincirine polimerin kendi kimyasal yapısına benzer başka zincirler kovalent bağlarla bağlanmıştır. Bu zincirler yan dal görünümünde olup dallanmış zincirli polimerler olarak adlandırılır. Bu dallar ana zincir molekülünün parçası olarak düşünülür ve polimer sentezi sırasında oluşan yan reaksiyonlar sonucu oluşabilir.

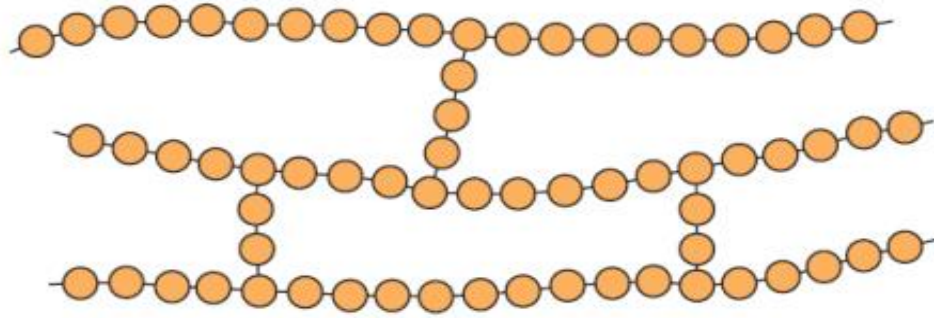


Şekil 2.8. Dallanmış molekül yapılarının şematik gösterimi

Doğrusal yapıdaki polimerlerde de dallanma görülebilir. Örneğin yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) tamamen doğrusal zincirlerden oluşurken alçak yoğunluklu polietilen kısa yan dallar içerir. Bu Dallanmış yapıda bulunan polimer yapı bakımından düz zincirli polimerlere yakından benzer olup sadece dallanmış polimerler yan dalları sebebi ile kristallenme eğilimi daha azdır.

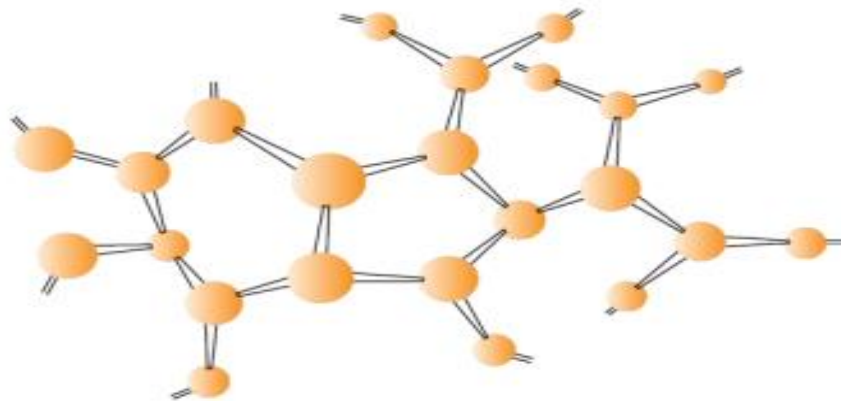
### 2.2.3.3. Çapraz Bağlı Polimerler

Bazı polimerler komşu doğrusal zincirler birbirine değişik yönlerde kovalent bağ ile bağlanırlar. Bu polimerler çapraz bağlı polimer olarak adlandırılır. Bu çapraz bağlar sentezlenme sırasında veya geri dönüşümsüz kimyasal reaksiyon ile elde edilir. Birçok elastik kauçuk da vulkanizasyon işlemiyle çapraz bağlı hale getirilebilir.



Şekil 2.9. Çapraz bağlı molekül yapılarının şematik gösterimi

Çapraz bağ sayısı artması ile ise çapraz bağına sahip ağ yapılı polimerler elde edilir. Bu polimerlerde birden fazla ana zincir mevcuttur ve bu zincirler birbirleriyle bağlı olduğundan ağ yapıda bir özellik gösterir.



Şekil 2.10. Ağ yapılı molekül yapılarının şematik gösterimi

Polimerlerin bu farklı zincir yapıları polimer özelliklerini etkiler. Örneğin; doğrusal veya dallanmış yapıdaki polimerler çözücü içerisinde eritilip uygun bir çözelti içerisinde çözünebilirken ağ yapılı polimerlerde böyle bir durum söz konusu değildir. Polimerler bu ve bunun gibi zincir biçimlerinden kaynaklanan özelliklere göre polimerler kendi içlerinde ayrıca termoplastikler, elastomerler ve termosetler olmak üzere üç ana başlık altında toplanmaktadır [37].

#### 2.2.4. Monomer Çeşitlerine Göre Sınıflandırılması

Polimerler monomer şekillerine göre temel olarak homopolimer, kopolimer, terpolimer olmak üzere üç sınıfta toplanır.

### 2.2.4.1. Homopolimer

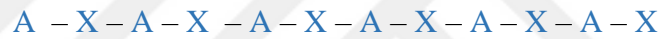
Bir polimer zinciri boyunca tek bir kimyasal yapı tekrarlıyor ise bu polimer 'homopolimer' olarak adlandırılır. Örneğin saf haldeki bir polietilen zinciri bir homopolimerdir.



Şekil 2.11. Homopolimer

### 2.2.4.2. Kopolimer

Polimer zincir molekülünde iki farklı tekrarlayan monomer birimi mevcut ise bu polimerler kopolimer olarak adlandırılır.



Şekil 2.12. Kopolimer

Kopolimerlerin özellikleri yapısını oluşturan monomerlerin oranına bağlıdır. Ayrıca bu polimerlerin yapısındaki monomerlerin diziliş şekli de önemlidir. Bu nedenle bu polimerleri ardışık, blok ve aşı polimerleri olmak üzere dört gruba ayırabiliriz.

- a) **Ardışık** – A – X – A – X – A
- b) **Blok** – A – X – X – X – A
- c) **Gelişigüzel** – A – A – X – A – X
- d) **Aşı Kopolimer** – A – A – A – A – A – A – A – A

## 2.2.5. İşleme Şekilleri Ve/Veya Çözücülere Karşı Gösterdikleri Davranışa Göre Polimerlerin Sınıflandırılması

### 2.2.5.1. Termoplastikler

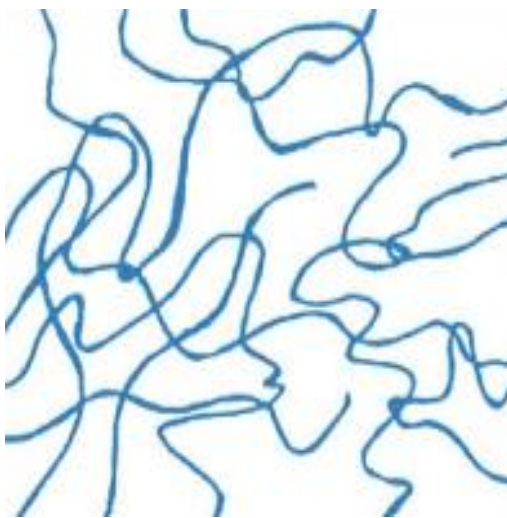
Günlük hayatımızda kullandığımız polimerler arasında en fazla paya sahip ve plastik kavramını tam olarak karşılayan grup termoplastiklerdir. Bu polimerler aynı zamanda

mühendislik plastikleri olarak da adlandırılmaktadır. Uzun zincirler hâlinde bulunan doğrusal ya da dallanmış zincirlerden oluşurlar. Isıtıldığı zaman ise  $T_g$  (camsı geçiş sıcaklığı) üzerinde yumuşar ve şekillendirilebilir, soğutulduğunda ise sertleşebilirler. Bu özelliği ile tekrar tekrar eritebilirler ve çözülebilirler [37, 39]. Dolayısıyla termoplastikler çevre koruma açısından özel bir anlam taşır.

Termoplastikler sıcaklığa bağlı olan mukavemet, süneklik, elastiklik modülü gibi özelliklere sahiptir. Orta seviyede bir sertliğe ve işlem sıcaklığına sahip olup korozyona dayaklı olmalarının aksine rutubete karşı hassas yapıya sahiptirler [9]. Ayrıca üstün kırılma tokluğu, uzun raf ömrü, geri dönüşüm kapasitesi, çarpma dayanımı gibi özelliklere sahiptir. Termoplastiklere polistiren, polipropilen, polikarbonat, polibütilen, gibi önemli örnekler verilebilir.

Plastikler amorf kristal veya yarı kristalin yapıya sahip olabilmektedir ve bir polimer kristalinite derecesine göre farklı özellikler gösterir. Örneğin; Yarı kristalin yapıdaki bir polimer malzeme yüksek bir düzen ve dizilim gösterirken, amorf termoplastikler çapraz bağlar gibi davranan yüksek yoğunluğa sahip karmaşık yapıdadırlar [3].

Amorf bir polimerde, zincirler arasındaki ilişki ve Yarı kristalin polimerler için önerilen saçaklı-misel ve katlanmış-zincir modelleri şekilde verilmiştir.



a. Amorf polimer yapı modelleri



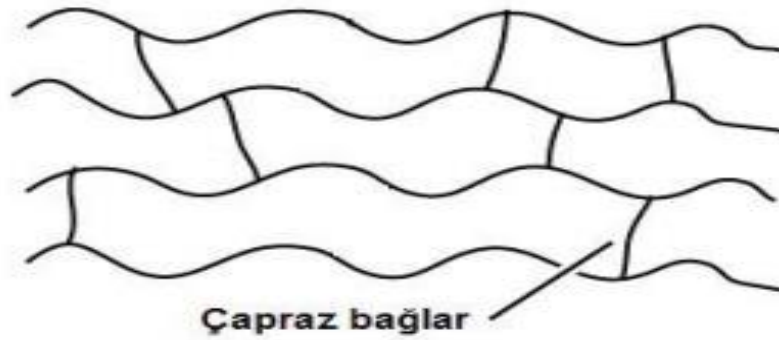
b. Yarı Kristalin polimer yapı modelleri

Şekil 2.13. (a., b.) Polimerlerin yapı modelleri



### 2.2.5.2. Elastomerler

Elastomerler az sayıda çapraz bağ yapmış zincir yapısına sahip esnek ve elastik malzemelerdir. Uygulanan çekme kuvveti ile yüksek oranda uzama ve yük ortadan kalktığıında ise ilk boyutlarına dönebilme özelliğine sahiptirler. Bu özellikleri polimer zincirleri arasında az orandaki çapraz bağa atfedilebilir [41].



Şekil 2.14. Çapraz bağ yapısı

Çekme kuvvetinin etkisi ile polimer zincirleri birbirleri üzerinden kayar, fakat bu çapraz bağlar kalıcı şekil değişimini önler ve kuvvetin ortadan kaldırılmasıyla polimer molekülleri ilk pozisyonlarına geri dönerler [37]. Ek olarak bu malzemeler çapraz bağ oluşumu sonrasında ısı ile eritilemezler.

### 2.2.5.3. Termosetler

Termosetler polimer zincir molekülünde yoğun miktarda çapraz bağa sahip (ağ-yapı) üç boyutlu sert bir polimer türüdür.



Şekil 2.15. Termoset bağ yapısı [42]

Kondenzasyon polimerizasyonu ile elde edilmektedirler. Genellikle ısı ve katalizör etkisiyle mor ötesi ışıkla temas ettirildiğinde çapraz bağlı moleküller oluşturur, sertleşir. Tekrar ısıtıldığında ise elastomerler gibi yumuşamaz, yeniden şekillendirilemez malzeme sadece yanar. Dolayısıyla geri kazanılması çok zordur [42].

Bu polimerler şekillendirilmeden önce viskoz sıvı halinde olup bu sıvı reçine olarak da bilinir. Öncüpolimer çeşitli katkı ve dolgu maddelerini içeriyle kalıplama işleminden sonra kullanılabilir termoset malzeme halini alır. Bu sebepten dolayı termoset polimerler yerine termoset reçineler tanımlaması daha çok kullanılır [37].

Termosetler uygun maliyete sahip bugün telefon kutuları, TV kabinleri, melamin tabak gibi evde, araçlarda, fabrikalarda ve birçok büro malzemesinde kullanılan vazgeçilmez bir malzemedir.

### **2.3. Plastiklerin Tanıtılması**

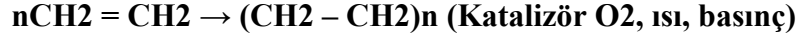
Günümüzde endüstriyel alanda çeşitli pek çok plastik çeşidi mevcut olup bu bölümde çalışmamızda kullanacağımız plastikler tanıtılacaktır.

#### **2.3.1. Polietilen (PE)**

Polietilen, tüm dünyada yıllık toplam 90 milyon metrik ton üzerinde bir üretim payına sahip olan en yaygın polimerdir. Etilenin polimerleştirilmesi ile elde edilen bu plastik 1933 yılında İngiliz kimyasal ürünler şirketi Imperial Chemical Industries (ICI) (İmparatorluk Kimya Endüstrileri) tarafından kazara keşfedildi. Fakat başlarda polimerleşme tepkimesi yaklaşık 2000 barlık çok yüksek basınçlar altında gerçekleştirilebiliyordu. Bu nedenle kolayca uygulanabilir olması gücü ve geliştirilme için yıllar gerekti. Çok geçmeden ise mekanik ve elektriksel özelliklerinin farkına varılan polietilen, birçok farklı uygulamada yaygın olarak kullanılmaya başlandı [43].

1950'li yıllarda ise kimyacı K. Ziegler, düşük basınç altında polimerleştirme tepkimesini geliştirdi. Bu yöntem 1970'li yıllarda polietilenin bütün çeşitlerine yaygınlaştırıldı; hatta dünyada geniş kullanım alanı bulan termoplastiklerden biri olup endüstrinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir.

Polietilen kimyasal olarak en inert oda sıcaklığında herhangi bir çözücü ile çözünmeyentermoplastik bir malzemedir. PE bir katılma polimeridir ve Etilenin polimerleşmesi başlatıcı bir katalizör yardımı ile gerçekleşir.



Şekil 2.16. Polietilen polimerizasyonu

Piyasada yaygın olarak şeffaf olanları kullanılmaktadır. Şeffaflık ile yoğunluk ilişkili olup yoğunluk arttıkça şeffaflık artmaktadır. Yoğunluk dolayısıyla şeffaflık arttıkça sertlik ve mukavemet artar, yumuşama sıcaklığı da yükselir. Böylece bu türlere gaz ve sıvı maddelerin tesir etmesi zorlaşır. Ayrıca polietilen neme ve darbelere de dayanıklıdır. Bu nedenle gıda ambalajlamasında en büyük hacimdeki polimerdir [44].

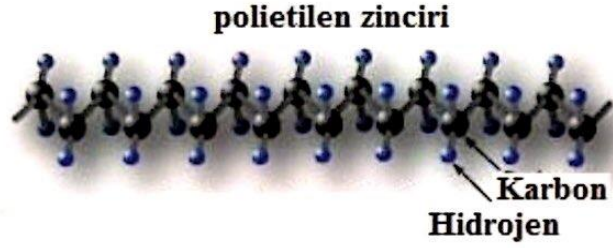
Polietilen yoğunluğuna göre genellikle alçak yoğunluklu polietilen ve yüksek yoğunluklu polietilen olmak üzere 2 çeşit PE bulunmaktadır. Ticarileştirilen ilk ürün ise serbest radikallerle polimerleştirilen alçak yoğunluklu polietilen olmuştur. Bunun yanı sıra polietilenin özellikleri detaylı bir şekilde aşağıdaki alt başlıklarda anlatılmıştır.

### 2.3.2. Polietilenin Yapı ve Genel Özellikleri

PE'nin özellikleri 3 temel yapısal değişkenden etkilenir;

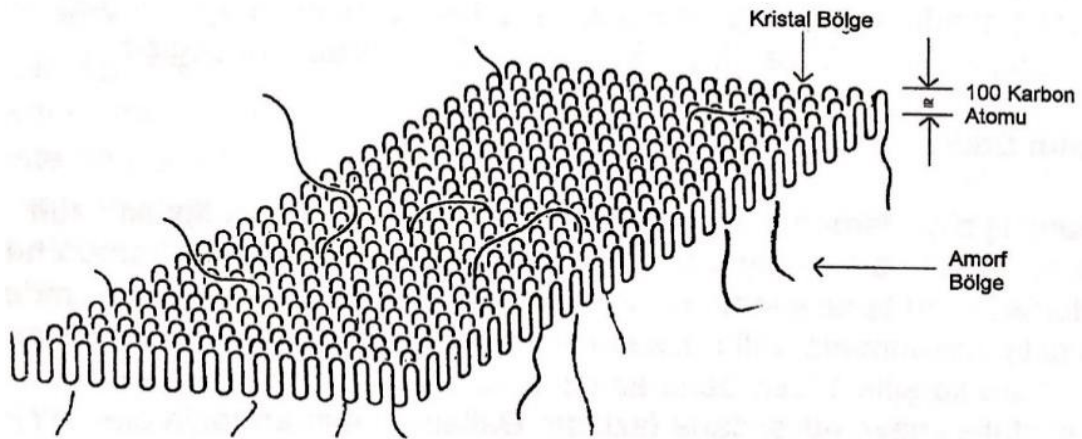
- a. PE'nin molekül ağırlığı ve zincir uzunluğu
- b. Dallanmanın tipi uzunluğu, dağılımı, miktarı
- c. Zincirdeki yapısal bozukluklar ve safsızlıklar

Polimer molekülünü meydana getiren zincir şeklindeki makro moleküllerin değişik dallanma durumları polietilenin çeşitliliğini sağlar ve dallanmanın uzun/kısa oluşu polimer özelliklerini etkiler. Örneğin; AYPE, yüksek yoğunluklu polietilenegöre daha fazla dallanmış yapıda bulunur ve bunun sonucu kristallenmeleri farklılık gösterir. Dallanmanın az olduğu molekül yapılarında kristalinite genellikle daha fazladır. Dolayısıyla YYPE'nin kristalinitesi daha fazladır.



Şekil 2.17. Polietilen polimer zincir örneği

Kristallenme PE zincirlerinin yan yana gelerek düzenli yapı oluşturmasıdır. PE zincirindeki karbonlar da trans seklinde düzenlenmiştir ve polietilen, bir çözücüde çözünüp, soğutulur ve kristallendirilirse, tek kristal elde edilir. Ancak dallanma arttıkça zincirlerin birbirine yaklaşması zorlaştığı için kristallenme özelliği azalır.



Şekil 2.18. Polimerlerin kristal ve amorf yapısı [43]

Sonuç olarak polimer zincirindeki dallanmalar kristalliğin derecesini tayin eder. Dolayısıyla kristallenme ile etkilenen sertlik, şekil muhafaza kabiliyeti, kopma, akma dayanımı kimyasal dayanıklılık gibi özellikler ve sıvı ile gazlara karşı dayanıklılığı dallanma arttıkça azalır.

Bir diğer polimerleri en iyi tanımlayan özellik ise o polimerin ortalama molekül ağırlığıdır. Ortalama molekül ağırlığı erime indeksi ile belirlenir. Erime Akış Hızı ise; ergimiş plastiklerin akışındaki ölçüm kolaylığı olup, termoplastiklerin Kalite Kontrolü için tipik bir indeksi temsil etmektedir. Erime indeksi ile molekül ağırlığı da ters orantılı

olup YYPE'lerin sertliđi ve sađlamliđı daha fazla, erime akıř indeksleri (MFI) daha dūřuktur. Yani genellikle bütün polimerler için geçerli olan bu kurala göre, yüksek molekül ađırlıđı dūřuk erime akıř indeksi ile eřdeđerdir.

Bu bilgilerden de anlaşılacağı üzere PE'nin özellikleri tiplerine göre değişiklik gösterse de genel olarak řu şekilde sıralanabilir;

- Hafiflik Ve Kolay Kullanım
- Dūřuk Maliyet
- Dış Ortam Koşulları Ve Neme Karşı İyi Direnç
- Esneklik
- Sađlamlık
- Üstün Dielektrik zellikleri
- Kolay İşlenebilirlik
- Üstün Kimyasal Direnç
- Sıfır Korozyon
- İyi Kaynak zellikleri
- Dūřuk Sürtünme

Fakat yukarıda ifade edilen önemli özelliklerinin yanı sıra PE'nin dezavantaja sebep olan dūřuk UV, Zor yapıřabilirlik gibi özellikleri de mevcuttur.

Bunun yanı sıra polimerizasyon organik peroksitlerin yardımıyla elde edilir. YYPE için de titanyum tetraklorür katalizör (Ziegler - Natta katalizörü) veya organometalikkatalizrler yardımıyla polimerizasyon sağlanır [43,45].

### **2.3.3. Polietilen İşleme Teknikleri**

Polietilenler plastik isleme sektöründe en yaygın isleme sahasına sahip olan malzemelerdir.

- Film ekstrüzyonu
- Enjeksiyonla kalıplama

- Şişirme ile kalıplama
- Ekstrüzyonla kâğıt metal kaplama
- Toz kaplamalar
- Tel ve kablo imali
- Boru hortum imalatı
- Köpük film imalatı

#### 2.3.4. Polietilen Üretimi

Polietilen, başlıca yüksek ve alçak basınç prosesleri olmak üzere iki temel yöntem ile üretilir.

Yüksek basınç prosesi ile alçak yoğunluklu polietilen ve kopolimeri üretilirken alçak basınç prosesi ile yüksek yoğunluklu polietilen yanı sıra yeni geliştirilmiş olan lineer AYPE üretilebilir. Ayrıca yeni geliştirilen düşük basınç prosesleri ile orta yoğunluklu polietilen üretilebilmekte ve gerekirse aynı proseste hem yüksek yoğunluklu hem alçak yoğunluklu polietilen üretmek mümkündür.

Polietilenler sanayide aşağıdaki gibi adlandırılır.

AYPE  $\Leftrightarrow$  LDPE: Alçak yoğunluklu polietilen

YYPE  $\Leftrightarrow$  HDPE: Yüksek yoğunluklu polietilen

OYPE  $\Leftrightarrow$  MDPE: Orta yoğunluklu polietilen

LAYPE  $\Leftrightarrow$  LLDPE: Lineer alçak yoğunluklu polietilen

AYPE diğer plastiklerin işleme tekniklerinin birçoğu ile üretilebilmekte olup genellikle ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama tekniği ile şekillendirilir. Ekstrüzyon, enjeksiyon, üfleme ile kalıplama gibi birçok işleme tekniği ile film, boru, kablo imalatı, içi boş parçalar, et kalınlığı çeşitlilik gösteren parçalar gibi pek çok parça üretilebilmektedir [45].

### 2.3.5. Yüksek Yoğunluklu Polietilen

YYPE Etilen monomerleri'nin alçak basınç altında polimerizasyonu ile elde edilmektedir.

Yüksek yoğunluk polietilen kimyasal olarak saf polietilene en yakın olan tür olup üretimine ilk olarak Türkiye'deki tek üreticisi olan petrokimya tesisi tarafından başlanmıştır.

YYPE'lerçizgiselliği bozan çok az sayıda kusura sahip dallanmamış moleküller içerir ve dallanmanın çok düşük kaldığı durumlarda YYPE'yeçizgisel polietilen de denmektedir.

Tablo 2.1. YYPE'nin özellikleri [43].

<b>Özgül Ağırlık</b>	0,94 – 0,97 g/cm <sup>3</sup>
<b>Elastiklik Modülü</b>	0,41 – 1,24
<b>Erime Sıcaklığı (°C)</b>	127 – 137
<b>Çekme Dayanımı (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	40-130

Yüksek Elektrik direncine sahip hidrofobik bir polimerdir. Film hâlinde iken gaz geçirgenliği mevcut olup suya ve inorganik tuzların sudaki çözünürlüklerine dayanıklıdır. Hatta 60 0C'nin altında kimyasalların birçoğunda çözünmez fakat Nitrik aside karşı dayanıksızdır [46, 47]. Görünüm olarak AYPE'ye benzese de çok daha sert bir polimerdir ve bu polimerleri ev eşyası, boru, deterjan, kozmetik şişesi (şeffaf olmayan), kanalizasyon, sulama dağıtım şebeke boruları gibi alanlarda görebiliriz.



Şekil 2.19. Polietilen uygulama örnekleri

### 2.3.6. Alçak Yoğunluklu Polietilen

AYPE serbest radikal polimerizasyonu yoluyla yüksek basınçlı süreci kullanarak Imperial Chemical Industries tarafından 1933 yılında üretilen bir termoplastiktir. Aynı zamanda ilk ticari etilen polimeridir. AYPE yüksek oksidasyon etmenleri dışında oda sıcaklığında tepkisizdir ve 80 ° C'ye sürekli ve belli bir zaman dilimi için 95 ° C sıcaklığa kadar dayanabilir. Saydam veya opak varyasyonlarla alçak yoğunluklu polietilen oldukça esnek ve sert olmasının aksine kırılabilir bir yapıya sahip olmaktadır [43].

Şekil 2.20. AYPE'nin özellikleri [43].

<b>Özgül Ağılık</b>	0,91-0,93 g/cm <sup>3</sup>
<b>Elastiklik Modülü N/mm<sup>2</sup></b>	7-10
<b>Erime sıcaklığı(°C)</b>	100-120
<b>Çekme dayanımı (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	70-160

AYPE Türkiye'de ilk 1970 yılında üretilmeye başlanmıştır. Veterinerlik sektöründen haberleşme, enerji dağıtım ve sanayi kabloları hatta oyuncak gibi geniş bir kullanım alanına olmuştur. Özellikle yumuşak ve bükülmeye meyilli parçalarda ve plastik çanta yapımında kullanılmaktadır.



Şekil 2.21. AYPE'nin uygulama örnekleri



AYPE üretimi için kullanılan yöntemler genellikle uygulanan basınca göre adlandırılmakta olup; düşük basınç prosesi ile düz zincirli alçak yoğunluklu polietilen elde edilirken yüksek basınç prosesi ile tüplü veya karıştırmalı reaktörde kesikli veya sürekli olarak dallanmış zincirli AYPE üretilir. Kesikli proses uzun reaksiyon süreleri gerektirir ve her zaman aynı ürün özelliğinin elde etmek kolay olmaz, dolayısıyla kesikli proses ticari olarak kullanılmaz.

### **2.3.7. PE Kullanım Alanları**

Polimer malzemeler çeşitli endüstriyel alanlarında kullanılan bir malzeme türü olup polietilen de bunlardan biridir. Örneğin kâğıdın yerini almakta olan YYPE, yiyeceklerin paketlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü yüzeye sertlik verdiği gibi yüzeyin düzgün olmasını ve dış ortam şartlarına karşı direncini artırmaktadır. Buna benzer AYPE filmler de parlak, şeffaf ve ucuz olup, işlenmesi kolay malzemelerdir. Genel olarak filmlerin uygulama alanları şu şekilde sıralanabilir; yiyecek paketlenme, inşaat örtüsü, ziraat örtüleri, çöp gübre torbaları, büzme ile sarma alanları vb.

Ayrıca YYPE ve AYPE ekstrüzyon kalıplama alanında çok yaygın kullanılıyor olup YYPE, büyük boy eşya, kasa, yer altı kanalları yapımında, AYPE ise, esneklik, sertlik ve parlaklığın istenildiği yerlerde kullanılır. Yine YYPE'nin yeni bir tüketim sahası olarak da oto benzin depoları örnek verilebilir.

### **2.4. Kompozit Malzemeler**

Polimer kompozit malzemelere değinmeden önce malzemelerin geniş bir yere sahip olduğu günümüzde geleneksel malzemelere kıyasla daha üstün özelliklere sahip ileri malzeme sınıfına giren kompozit malzemelerin incelenmesi daha doğru olacaktır. Çünkü dünyada ileri malzemeler alanında yapılan çalışmalarda kompozit malzemeler gerek bilimsel çalışmalarda gerekse de ürün tasarımında geniş yer tutmaktadır.

Kompozit malzeme en genel tanımı ile makroskobik açıdan biri diğerinden farklı iki ya da daha çok malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşan yeni malzemedir. Bu malzemeleri bir araya getirmede ki amaç ise, bileşenlerin hiç birinde tek başına mevcut

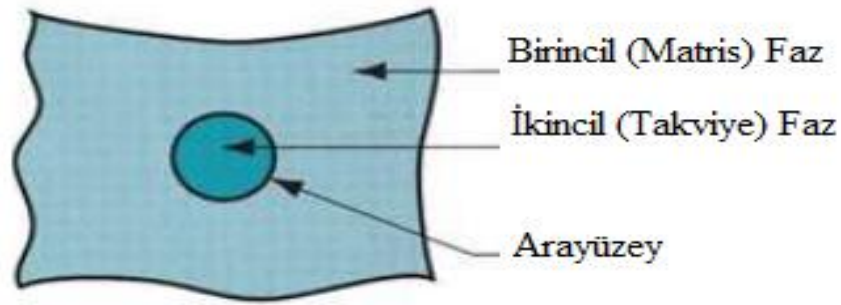
olmayan bir özelliğin elde edilmesidir. Diğer bir deyişle, amaçlanan doğrultuda bileşenlerin daha üstün özelliklere sahip bir malzeme üretilmesi hedeflenmektedir [2, 48].

Bir kompozit malzeme genellikle düşük mukavemete sahip matris olarak adlandırılan ana fazı ile bu ana fazın içerisinde dağılan takviye fazından meydana gelir. Yani aslında kompozit bir karışımdır fakat moleküler boyutta birleşme veya çözünme meydana gelmez. Zaten eğer bileşenler birbiri içerisinde çözünürse bu tür malzemeler kompozit değil alaşım olur. Yani bir kompozit malzemeyi mikroskop altında incelediğimizde makro düzeyde homojen yapıda görüneler de, mikro yapıya inildiğinde heterojen özellik gösterirler. Bir kompozit malzemeyi meydana getiren bileşenler ayırt edilebilir. Alaşımlarda ise çelikteki demir ve karbon atomsal ve moleküler boyutta bir karışım oluşturur. Dolayısıyla bu karışımlar kompozit olarak değil alaşım olarak adlandırılır.

Genel olarak bir kompozit malzemedeki beklenen özellikler ise şu şekilde sıralanabilir;

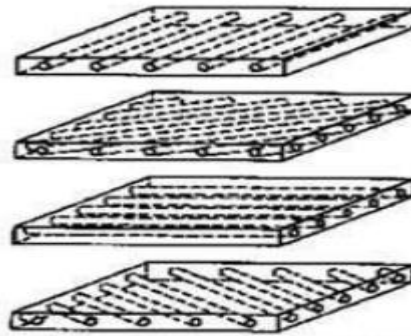
- Yüksek Mukavemet
- Korozyon Dayanımı
- Aşınma Direnci
- Hafiflik
- Termal Dayanım
- Yüksek Rijitlik
- Yüksek Yorulma Dayanımı
- Estetik Görünüm

Yukarıda açıklandığı üzere kompozit malzeme matris ana fazı ve bunun içine dağılmış takviye elemanlarından oluşur (Hahn ve Tsai, 1980). Matris, gevrek ve kırılabilir olan takviye elemanlarını çevresel ve dış etkilere karşı korur ve kompozit malzemenin kopmasını önler, takviye malzemesi ise kompozit malzemenin yük taşıma ve mukavemetini artırır [49,3].

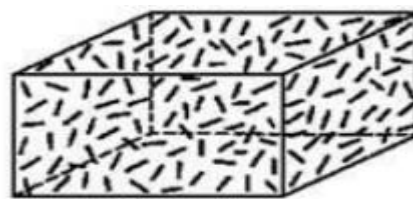


Şekil 2.22. Kompozit yapısı

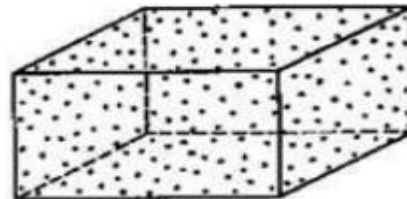
Takviye ve ana malzeme olarak genellikle cam, seramik, plastik, metaller kullanılabilir. Yani mümkün kombinasyonlar için herhangi bir malzeme sınırlaması yoktur. Fakat yapı bileşenlerinin sahip olabilecekleri geometrik şekiller sınırlıdır.



a) Sürekli Elyaf Fiber



b) Kısa Elyaf (Rastgele)



c) Partikül

Şekil 2.23. (a., b., c.) Kompozit malzemede matris-takviye şekilleri [48]

Bunun yanı sıra kompozit malzemelerin üretimi sırasında yüzey kalitesinin iyileştirilmesi, performansın artırılması, maliyetin azaltılması gibi çeşitli fonksiyonlarından ötürü bazı dolgu maddelerin ilavesi yapılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda başlangıçta, kalsiyum karbonat, mika, cam elyafı gibi inorganik maddeler ilave edilse de zamanla yenilenebilir, ucuz, düşük yoğunlukta ve işlenmesi kolay olması ile organik katkı maddelerine yönelinmiştir [50].

Bu bilgilerden yola çıkılarak bir kompozit malzeme özetle şu şekildedir; doğada bulunmayan sadece belirli bir amaç doğrultusunda bir araya getirilen ve birbiri içerisinde çözünmeyen bileşenlerinin hiç birinin tek başına sahip olmadığı üstün özelliklere sahip olan bir malzemedir.

Bu malzemelerin kullanım alanları ise kısaca şu şekilde sıralanabilir;

- Hafiflik ile beraber üstün mekanik özellikleriyle havacılık sektöründe
- Yüksek dayanıklılık ve hafiflik ile hareket kolaylığının sağlabildiği spor malzemelerinde
- İnşaat sektörü (Çit, Yürüme Yolları, Bina Balkon Korkuluğu, Taşıyıcı Konstrüksiyon vb. )
- Yelkenli ve bot gövdelerinde
- Müzik aletleri (Çello, keman vb.)
- Otomotiv sektöründe
- Sağlık sektöründe (Protez vb.)[51]

#### **2.4.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları**

- I. Farklı mekanik/kimyasal özelliklerin eldesi için farklı malzeme kompozisyonlarından kompozit malzeme elde edilebilir.
- II. Kompozit malzemeler korozyona, kimyasallara ve hava gibi çevresel etkenlere karşı dayanıklılık gösterir.
- III. Karmaşık parçaların tek bir malzeme olarak üretilebilmesinden dolayı parça sayısının azalmasını sağlar. Bu sayede ara birleştirme detay parçalarının azalması ile üretim süresini azaltmaktadır.
- IV. Bazıları çok yüksek akma sınırı (akma gerilmesi) değerine sahiptir.
- V. Yüksek yorulma direnci
- VI. Ağırlıkça da tasarruf

#### **2.4.2. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları**

- I. Değişik doğrultuda değişik mekanik özelliklere sahiptirler. Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kopma, eğilme gibi mukavemet değerleri farklılık göstermektedir.

- II. Hammaddeleri ve üretimi nispeten pahalıdır.
- III. Kompozit malzemenin kalitesi üretim yöntemlerinin kalitesine bağlıdır. Bu nedenle standartlaşmış bir kalite yoktur.
- IV. Gevrek malzeme olmalarından dolayı kolaylıkla hassas görebilirler ve tekrar onarılmaları da yeni problemler teşkil eder.

### **2.4.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması**

Kompozit malzemeler açıklandığı üzere, mekanik dayanımını yerine getiren farklı geometrik parçalardan (örneğin lif) ve bu parçaları bir arada tutan polimerik, metal veya seramik malzemelerden oluşmaktadır. Kompozitlerin özelliklerinin, avantaj ve dezavantajlarının, üretim yöntemleri ve kullanım alanlarının daha iyi anlaşılabilmesi için belli başlıklar altında toplamak yerinde olacaktır. Fakat bu malzemelerin sınıflandırılması genellikle oluşum seçeneklerinin fazla olması sebebiyle zordur ve kompozit yapısının oluşturan malzeme çeşidi, yapım türüne göre gibi çok farklı sınıflandırma mevcuttur.

Bu nedenle daha rahat anlaşılabilmesi adına ana matris elemanına göre kompozit malzemeleri 3 ana başlık altında toplamak çok daha yerinde olacaktır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir;

- Metal Matrisli Malzemeler
- Seramik Matrisli Malzemeler
- Polimer Matrisli Malzemeler

#### **2.4.3.1. Metal Matrisli Kompozitler**

Metal matrisli kompozitler eldesinde ana malzeme olarak çelik, bakır, alüminyum gibi çeşitli metal ve metal alaşımlarının kullanıldığı kompozitlerdir. Bu malzemeler bugün uzay ve havacılık alanlarından makine ve otomotiv sektörüne kadar pek çok alanda kullanılmakta olup geleneksel metal malzemelere oranla daha pahalı olmalarından dolayı özel yapım bisiklet ve spor malzemesi, savunma sanayi gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Yüksek sıcaklıklarda çalışabilmeleri, yüksek basma/eğme/çekme dayanımına sahip olmaları yanında elektriksel ve ısı iletimlerinin yüksek oluşu, metal üretim yöntemleri ile üretilibilmeleri, nemden etkilenmemeleri gibi sıralanabilen üstün özellikleri sebebi ile matris fazı için metaller tercih edilmektedir. Fakat her malzeme yapısında olduğu gibi metal matrisli kompozitler de kendi içerisinde önemli engeller teşkil edecek dezavantajlara sahiptir. Örneğin; metallerin çoğu oldukça yüksek özgül ağırlıklarına ve düşük korozyon dayanımı sahiptir. Ayrıca metaller takviye ve matris ara yüzey bileşimleri açısından oldukça hassas malzemelerdir. İfade edilen bu dezavantajlara ek olarak metaller ve alaşımlarının birçoğu bazı yüksek sıcaklık özelliklerini sağlasa da kırılabilir olabilmektedir. Fakat takviye edilmiş metal esaslı kompozitler ise her iki fazın da uyum içerisinde çalışmasını ve yüksek sıcaklıkta da yüksek mukavemet elde etmesini sağlamaktadır. Takviye malzemesi ana fazın özelliklerini iyileştirebildiği gibi ekonomiklik gibi önemli özelliklerin de elde etmesini sağlayabilmektedir. Dolayısıyla metal esaslı malzemelerin takviye edildikleri malzemelere göre üstün özelliklere sahiptir. Örneğin; özellikle termal iletim özellikleri açısından tercih edilen Bakır'a grafit ilavesi ile yüksek sıcaklık çalışma kabiliyeti sağlanır. Fakat yine de bütün metaller çok yüksek sıcaklıklarda özelliklerini yitirdiklerinden dolayı çalışma sıcaklıkları göz önünde bulundurulması gerekir [52, 3]. Metal matrisli kompozit elde etmede en sık sürekli fiber, partikül ve whisker takviye elemanları olarak tercih edilir ve bunlar genellikle oksit, karbür veya nitrür bileşimindedir.

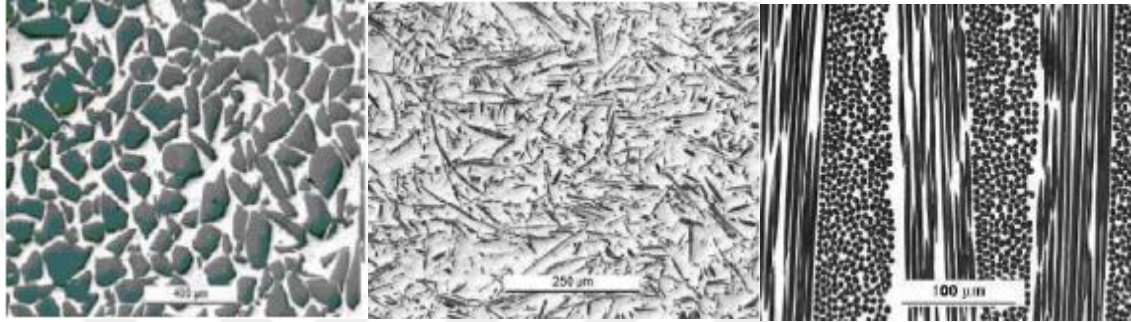
Kimi zaman ise metallerin takviye malzemesi kullanılmayabilir. Böyle durumlarda takviye malzemesi olarak, metal, plastik, seramik, ağaç tozu, pudra, bağlayıcı olarak ise metal bağlayıcıların kullanılması tercih edilebilir [53].

Metal matrisli kompozitler de kendi içerisinde takviye elemanın geometrisine bağlı olarak partikül esaslı, kısa fiber takviyeli ve sürekli fiber takviyeli olarak üç sınıfa ayrılabilir.

- Sürekli fiber takviyeli metal matrisli kompozitler, yüksek elastiklik modülü ve dayanıma sahiptir. Fakat sürekli fiberler anizotropik özellik gösterirler ve bu kompozitlerin üretim maliyeti diğerlerine nazaran çok daha yüksektir [54].
- Partikül takviyeli metal matrisli kompozitler sürekli fiber takviyeli kompozit malzemelerle karşılaştırıldığında daha düşük maliyete, yüksek aşınma direnci ve

ısı kararlılık özelliklerine sahip olması ile ön plana çıkmaktadırlar [55]. Bu kompozitler de matris malzemesi olarak da en sık Alüminyum (Al), Titanyum(Ti) ve Magnezyum(Mg) kullanılmaktadır.

- Kısa fiber takviyeli kompozitler ise partikül takviyeli yapılara nazaran daha pahalı fakat daha yüksek dayanıma sahip olan sınıftır.



a. partikül takviyeli

b. kısa fiber takviyeli

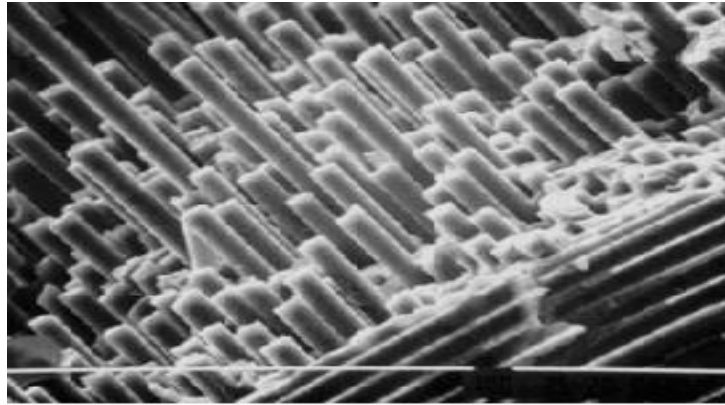
c. sürekli fiber takviyeli

Şekil 2.24. (a., b., c.) Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matrisli kompozitler

#### 2.4.3.2. Seramik Matrisli Kompozitler

Seramikler metal ve metal dışı elemanlardan oluşan inorganik bileşiklerdir. Seramik matrisli kompozitler de ana fazı seramik olan malzemelerdir. Bu malzemeler düşük yoğunluk, yüksek sıcaklığa dayanıklılığı (2000°C üzeri), yüksek elastikiyet modülü ve hafif oluşları ile oldukça çekicidir. Özellikle yüksek sıcaklığa dayanıklı oluşları ile genellikle yüksek sıcaklık parçalarının imalatında tercih edilir. Fakat buna karşılık sert ve kırılgan oluşları ve düşük tokluğa sahip oluşları bu malzemeleri dış etkenlere savunmasız kılmaktadır. Gevrek bir malzeme oluşunun yanı sıra termal şoklara karşı dayanıksız oluşu ve özelliklerinin değişkenlik göstermesi önemli dezavantajları olarak sıralanabilir. Yapı içerisinde kolaylıkla oluşabilecek çatlak, çizik hatta hava kabarcığı dahi kolaylıkla ilerleyip ciddi sorunlara yol açabileceğinden dolayı seramikler genellikle lifler (vb. takviye elemanı) ile takviye edilerek kullanılır.

Seramik matrisli kompozitler de takviye malzemesine bağlı olarak sürekli veya süreksiz olarak iki gruba ayrılır ve sürekli fiberler ile takviye edilmiş olan seramikler daha yüksek tokluk değerleri sebebi ile daha çok tercih görmektedir.



Şekil 2.25. Fiber takviyeli seramik malzemenin kesitinden alınan büyütülmüş bir görüntü [56]

En sık kullanılan seramik matrisli kompozitler ise şu şekilde sıralanabilir;

- Karbürler (Silisyum karbür (SiC))
- Nitrürler (Silisyum nitrür,  $Si_3N_4$ )
- Oksitler (Alümina mullit,  $(Al_6Si_2O_{13})$ )
- Cam seramikler (lityum alüminasilikat)

Bu seramik matrisli kompozitler içerisinde karbon matrisli olanlar yine karbon ile bir araya getirilerek karbon/karbon kompozit malzeme yapısı oluşturulur. Böylece  $2200^{\circ}C$  üzeri sıcaklıklara dayanım sağlanır ve bu extra yüksek sıcaklık dayanımı ile de diğer seramik matrisli kompozitler arasında ön plana çıkmaktadır. Yüksek sıcaklık dayanımının yanı sıra yüksek yorulma direnci ve düşük özgül ağırlıkları ile özellikle uzay mekiklerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca kimyasallara karşı inert oluşu ve biyo-uyumlulukları ile tıp alanında da sıklıkla tercih edilmektedir.

Genel olarak ise seramik matrisli kompozitler ile hayatımızın diğer pek çok alanında karşılaşmaktayız. Örneğin; otomobil fren diskleri, askeri zırh uygulamaları, egzoz valfleri, ısı değiştiriciler vb. uygulamalar [3].

#### 2.4.3.3. Polimer Matrisli Kompozitler

Polimerler özellikle son 25 yıl içerisinde ciddi gelişmeler göstererek endüstrinin hemen hemen her alanından, günlük yaşamımıza kadar çeşitli uygulamalarda kullanım alanı bulan malzemelerdir. Bu malzeme sınıfı özellikle düşük yoğunluğa sahip olması, kolay, hızlı, ekonomik olarak üretilebilmeleriyle korozyon dayanımına sahip oluşu ile ön plana



çıkıştır. Ayrıca yapıları gereği çelik ve diğer alternatif malzemelerden farklı olup avantajlı yanları ortaya çıkartılarak kullanım alanları daha da genişlemektedir [38].

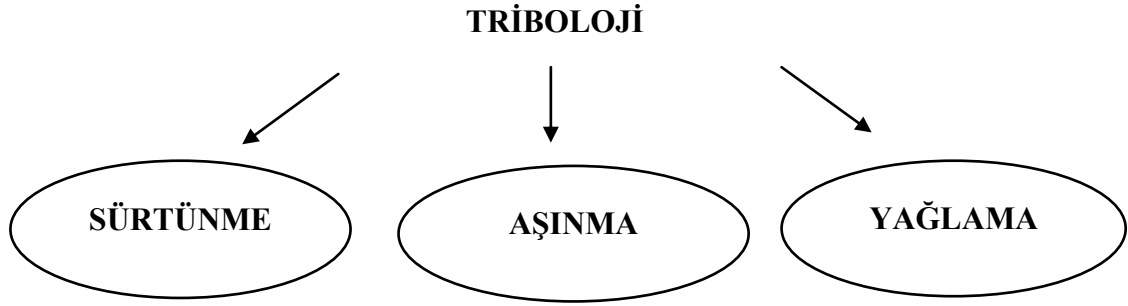
Polimer matrisli kompozitler ise; matris malzemesi olarak polimer reçine, takviye elemanı olarak da elyafın kullanıldığı bir ileri malzeme türüdür. Bugün polimer matrisli kompozitler düşük maliyet ve kolay üretim özellikleri ile günümüz ileri mühendislik sahasında yer bulabilmiştir. Hatta çeşitli mühendislik uygulamalarında metallerin yerine tercihen polimer kompozitler kullanılmaktadır. Çünkü polimer matrisli kompozitlerin hafifliği çelikten 4 kat, alüminyumdan ise 1,5 kat daha fazladır. Ayrıca isteğe göre şekillendirilebilmeleri ve malzeme kaybının azaltılmasına ve montaj sürelerinin kısaltılmasına olanak sağlayabilmektedirler [57].

Ayrıca bunun dışında insan dokuları ile uyum sağlayabilmesi ile yapay doku ve organların uygulamalarında rahatlıkla polimer kompozitler kullanılabilir [38].

Polimer matrisli kompozitlerdetakviye elemanı olarak kullanılan plastik malzeme yük taşıyıcı bir özelliğe sahip olurken, matris olarak kullanılan plastik ise genellikle esneklik verici ve darbe emici özelliğine sahip olmaktadır.Bu kullanılan plastik türleri de termoset ve termoplastik olarak iki gruba ayrılır. Fakat genel olarak polimer matrisli kompozitler parçacık dolgulu ve sürekli elyaf kompozitler olarak ayrılırlar. Özellikle sürekli elyaf içeren polimer kompozitler yüksek performansın istenildiği alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [38].

## 2.5. Triboloji

Triboloji etkileşim halindeki yüzeylerin sürtünmesi, aşınması ve yağlanmasına odaklanan ve1967 yılında Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü komitesi tarafından tanımlanan yeni bir bilim alanıdır. Triboloji, yıpratma veya kayma anlamına gelen Yunanca 'tribos' kelimesinden türemiş olup yeni tanımlanan her bir kelime veya kavram için kaçınılmaz olan ilk şüphecilik döneminden sonra, 'triboloji' sözcüğü aşamalı bir şekilde kabul görmüştür [58].

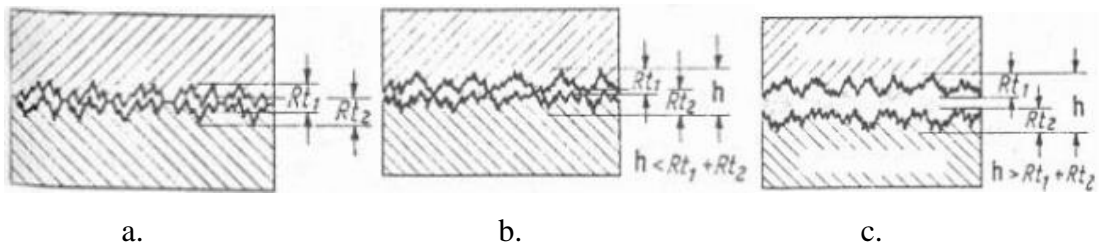


Aşınma, malzeme israfına yol açması ve mekanik performans kaybına neden olur. Dolayısıyla aşınmadaki herhangi bir azalma önemli tasarruflara neden olabilir. Sürtünme, aşınma ve enerjinin yayılmasının ana nedenidir ve sürtünmenin kontrolü ile tasarruf sağlanabilir. Hatta çeşitli kurum ve kuruluşlarca yapılan çalışmalarda, üretilen enerjinin yaklaşık üçte biri sürtünme sonucu harcandığı ortaya çıkmıştır. Yani artan araştırma ve geliştirme temposu, 'triboloji' de gelecekteki yönün ne olduğunu önceden tahmin etmeye ihtiyaç duyuyor.

### 2.5.1. Sürtünme

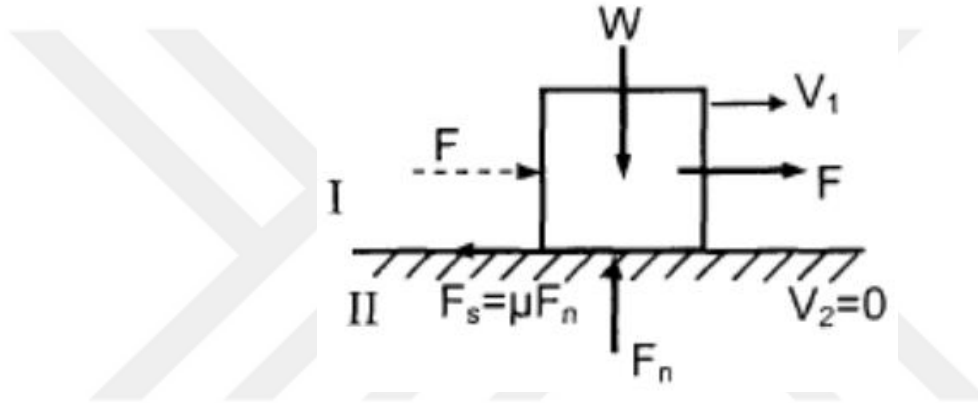
Genel olarak sürtünme birbirleri ile temas halinde olan ve izafi hareket yapan cisimlerin temas halinde olan yüzeyleri arasındaki meydana gelecek hareket ya da hareket ihtimaline karşı gösterdikleri direnç olup fiziksel bir terimdir [59]. İzafi olarak hareket eden parçalar arasında kayma, yuvarlanma veya kayma – yuvarlanma mevcut olabilir. Bunun sonucunda da sürtünme kinematik açıdan kayma, yuvarlanma ya da kayma – yuvarlanma sürtünmesi şeklinde olur.

Aynı zamanda birbirleri ile temas halinde bulunan parçalar arasında herhangi bir yağlayıcı olması ya da olmaması bakımından meydana gelen sürtünme sıvı, kuru, sınır ve yuvarlanma olarak dört durumda incelenir.



Şekil 2.26. Sürtünme çeşitleri (a) Kuru, (b) Sınır, (c) Sıvı sürtünme halleri

Kuru sürtünme; teorik olarak izafi hareket yapan ve tamamen yabancı maddelerden arındırılmış iki parça arasında meydana gelen sürtünmedir. Aslında yüzeyler daha önce temizlenmiş olsa dahi atmosferik koşullarda birbiri üzerinden sürtünürken bu atmosferi teşkil eden elemanların etkisinde bulunduğundan dolayı yüzey oksit, su buharı, pislik vs. gibi yüzey tabakaları ile kaplıdır. Dolayısıyla bu parçalar birbiri yüzey pürüzleri üzerinden kayar ve bu tip sürtünme de kuru sürtünmeye girer. Fakat aynı zamanda kuru sürtünmeye Coulomb sürtünmesi de denmektedir. Çünkü kuru sürtünmeye ait prensiplerin çoğu Coulomb 'un yaptığı deneyler sonucunda elde edilmiştir.



Şekil 2.27. Sürtünme düzlemde serbest cisim diyagramı

Yukarıda şekil 2.26.'da görüleceği üzere harekete ters doğan kuru sürtünme teorik olarak Coulomb-Amontons kanunu dikkate alınarak daha rahat anlaşılabilir. Coulomb – Amontons kanunu olarak tanınan  $F_s = \mu \cdot F_n$  bağıntısına göre;

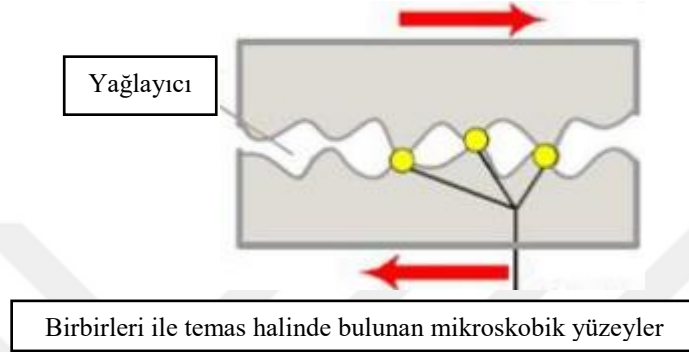
Sürtünme kuvveti normal kuvvetle orantılıdır ve böylece sürtünme katsayısı  $\mu = F_s / F_n$  şeklinde ifade edilir. Ayrıca Coulomb kanununa göre sürtünme kuvveti temas alanına bağlı değildir ve sürtünme kaymanın hızından bağımsızdır [60].

Şekilde de bağıl hareket yapan ve normal bir kuvvetin ( $F_n$ ) etkisinde bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında harekete karşılık  $F_s = \mu \cdot F_n$  değerinde bir sürtünme kuvveti oluşmaktadır [61].

Sınır sürtünmesi; Yüzeyleri oluşturacak parçaların birbirinden tamamen ayrılmadığı ve parça yüzeyleri arasında bulunan yağlayıcının yüzeylerde bulunan pürüzlerin sürtünmesini önleyemediği durumlarda da sınır sürtünmesi ortaya çıkar. Yani kısaca

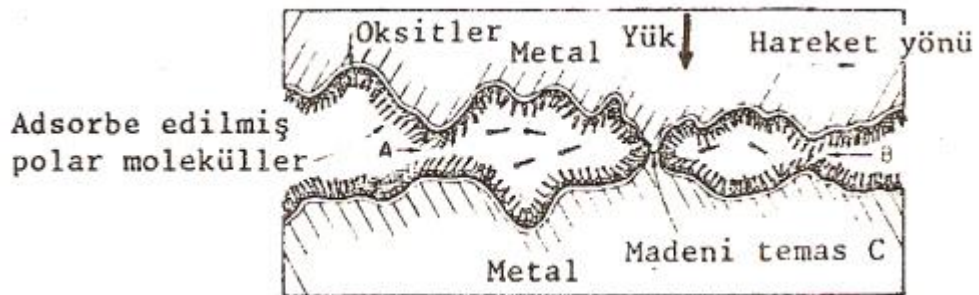
yağlayıcı maddeye rağmen sıvı sürtünmesi hali oluşturulmadığı durumlarda sınır sürtünmesi meydana gelmektedir [60, 61].

En sık rastlanılan sürtünme şekli olup sürtünme katsayısı da genel olarak 0,03 ile 0,1 arasında değişiklik göstermektedir.



Şekil 2.28. Sınır sürtünmesi

Birbiri üzerinde kayan yüzeyler arasına herhangi bir yağlayıcı madde konulması durumunda yağlayıcı maddenin molekülleri, adsorpsiyon olayı sonucu yüzeylere düzgün ve muntazam bir şekilde yapışır. Literatürde de yapılan deneylerde görülmüştür ki; polar karbonlu hidrojen molekülleri aktif karboksil grupları ile madensel yüzeylere bağlanmaktadır (Şekil 2.28.) Bunun sonucunda da yüzeyler üzerinde birkaç molekül tabakası kalınlığında adsorpsiyon tabakaları meydana gelmektedir.



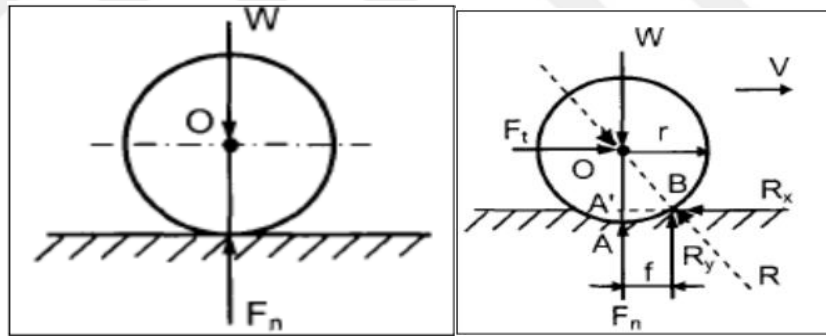
Şekil 2.29. Madensel yüzeylere bağlanan polar moleküller [62]

Sıvı sürtünmesi; izafi hareket eden iki cismin yüzeyleri arasındaki bulunan yağ tabakasındaki basınç dış kuvveti dengeleyecek bir değere ulaştığında yüzeyler birbirinden tamamen ayrılır. Yani metalik yüzeylerde direk olarak temasta olan yağ

tabakaları her iki yüzey boyunca tamamen yapışmış durumdadır ve sürtünme esasen yağlayıcı sıvının tabakaları arasında meydana gelir. Dolayısıyla sürtünme bu tabakalar arasındaki kayma gerilmelerine bağlıdır ve sıvı sürtünmesinin oluşumunda esas etken yağ tabakasında ortaya çıkan basınçtır [62].

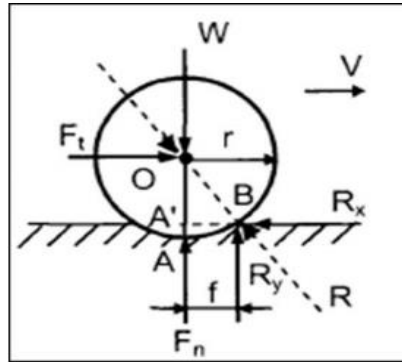
Yuvarlanma sürtünmesi; yuvarlanma hareketi yapan parçaların bu yuvarlanma hareketine karşı temas yüzeylerinde oluşan dirençtir. Diğer bir deyiş ile yuvarlanma sürtünmesi ya da direnci yuvarlanan cismin temas ettiği yüzeyde oluşturduğu deformasyondan meydana gelmektedir.

Teorik açıdan tamamlanmış rijit ve pürüzsüz yüzeye sahip bir silindir ya da küre şeklindeki parçanın yine rijit ve pürüzsüz bir düzlem üzerinde yuvarlanma hareketi sonucunda hiçbir sürtünme kuvveti oluşmaz (Şekil 2.29a.). Genellikle bu parçaların temas yüzeylerinde elastik ve daha az miktarlarda plastik deformasyonlar oluşur (Şekil 2.29b.) . Hatta şöyle ki; temas yüzeyleri doğru veya nokta olarak değil de alan şeklindedir (Şekil 2.29c.) [61].



a.

b.



c

Şekil 2.30. (a., b., c.) Yuvarlanma sürtünmesi mekanizması

### 2.5.2. Aşınma

Aşınma; katı cisimlerin birbirleri ile temas halinde çalıştığı sistemlerde sıkça rastlanılan bir bozulma türü olup, yüzeylerden istenmediği halde ufak ya da tabaklar halinde parçaların ayrılması ile sonuçlanan malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır.

Bir malzeme herhangi bir mekanik etken, sürekli ya da yavaş bir sürtünme sonucu, aşınabilmektedir. Mühendislik malzemeleri açısından da bir malzemenin aşınmış sayılabilmesi için bu etkenlerden en az bir tanesi ile malzemede değişimin meydana gelmesi gerekmektedir. Ayrıca aşınma, mekanik, fiziksel, elektriksel veya termik sebeplerle oluştuğu gibi korozyon sonucunda da meydana gelebilmektedir [63, 64]. Fakat parlatma, talaşlı işleme gibi kontrollü işlemler yüzeyden büyük boyuttaki parçaların kırılması ya da kopması aşınma kavramı içerisinde yer almamaktadır.

Aşınma; malzeme seçimi, yüzey pürüzlülüğü, sertlik, çevre, zaman gibi faktörlerden ve yağlama gibi yüzey işlemlerinden, etkilenmekte ve cisimlerin temas yüzeylerinde meydana gelen çok sayıda fiziksel/kimyasal değişiklikler nedeniyle kendi içerisinde birden fazla çeşide ayrılmaktadır. Kısaca aşınma 5 farklı sistemden meydana gelmektedir. Bunlar;

- Aşınan ana malzeme
- Aşındırıcı malzeme
- Yük
- Ara malzeme
- Hareket

Aşınma sonucu malzemede kayıplar meydana gelmekte ve bu kayıplar malzemede ilerleyen bir bozulmaya sebep olmaktadır. Bu sebepten dolayı zaman içerisinde malzeme şekli ve kondisyon bozularak performans kaybı meydana gelmektedir [65].

Bu durum kullanıcı açısından;

- Azalan çalışma ömrü
- Üretim kalitesinde düşüş
- Yüksek enerji tüketimi ve düşük verimlilik
- Artan iş güvenliği riski

Gibi sonuçlar doğurmaktadır ve aşınma makine elemanlarından, otomobillere, kıyafet, ayakkabı, eşya ve mobilyalar gibi gündelik yaşamın hemen her alanına kadar farklı alanlarda gözlemlenebilmektedir. Yani aşınma, endüstride pek çok malzeme ömrüne etki etmektedir. Bundan sebeple, günümüz yapılan çok sayıdaki araştırmalar sürtünmeyi ve aşınmayı azaltma ve kontrol etme çalışmaları şeklinde yaygınlaşmıştır [66]. Ayrıca aşınma bu kadar çok etki alanına sahip olması ile de kendi içerisinde birden fazla sınıfa ayrılmaktadır.

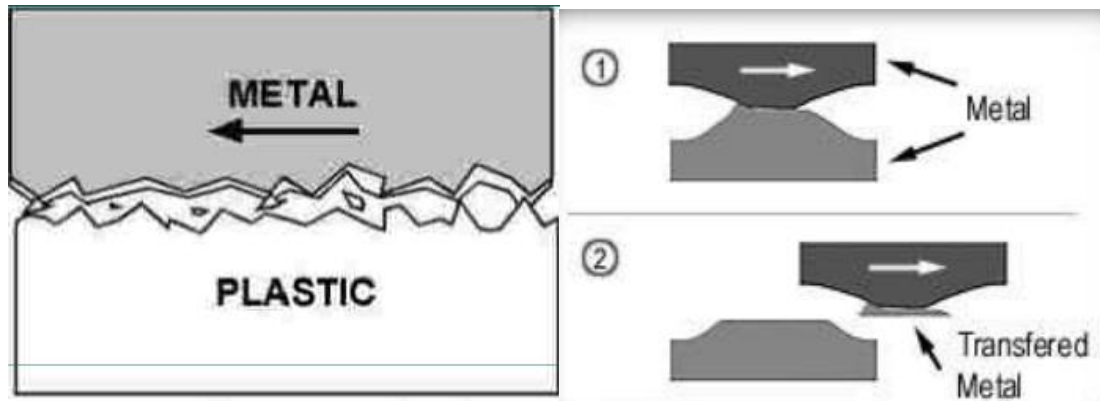
### **2.5.2.1. Aşınma Türleri**

Sürtünmeyle karşılaştırıldığında daha karmaşık bir yapıya sahip olan aşınmanın sınıflandırması da pek çok şekilde yapılabilmektedir. Çünkü beraber çalışan yüzeyler arasında farklı aşınma türlerine rastlanır ve çoğu zamanda bu değişik şekildeki aşınma türleri çok nadir aynı zamanda kendini gösterir. Dolayısıyla bütün aşınma durumlarını genel bir başlık altında toplamak mümkün olmamaktadır.

#### **2.5.2.1.1. Adhezif Aşınma**

Yapışma aşınması olarak da adlandırılan adhezif aşınma, en çok rastlanılan aşınma türü olup birbirini etkileyen ve birbirine göre relatif hareket yapan iki cisimden birinin yüzeyinden parça koparak diğer cisim yüzeyine yapışması sonucunda meydana gelmektedir.

Bir yüzey ne kadar düzgün biçimde işlenmiş ya da parlatılmış olsa da hiçbir zaman için moleküler seviyede bir düzgünlük olmayacaktır ve zaten malzemelerde birbirleri ile pürüzler vasıtasıyla etkileşecektir. Basınç altında bir araya getirilen ve birbiri üzerinden kayan karşılıklı yüzeyler sürtünme ile meydana gelen ısı ve soğuk kaynaklaşma etkisi ile bu pürüzlerden birbirlerine bağ yaparlar. Bu bağ noktaları yüzeyin küçük küçük belirli kısımlarda bulunup, bu küçük temas halinde bulunan yüzeylerdeki gerilmeler çok küçük yüklerde bile akma dayanımı noktasına ulaşır ve hatta kimi zaman geçer. Bunun sonucunda da yapışma kuvveti etkisi kendini göstermeye başlar ve bir parçadan bir diğerine malzeme geçişi veya parçacık kesilmesi olayı meydana gelir.



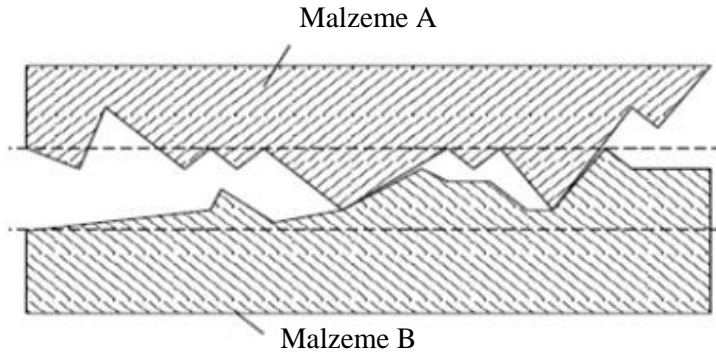
Şekil 2.31. Adhezif aşınma örneği (Yapışma aşınması)

Adhezif aşınma yüzey sertliği, uygulanan kuvvet gibi çeşitli pek çok etkene bağlı olup bu aşınmada yağlamanın etkisi yadsınamayacak kadar büyüktür. Yağlama ile yüzeye tutunan yağ tabakası sayesinde yüksek hızlarda ve yük altında aşınma azaltılabilir. Bunun yanı sıra bir malzemenin sertliği de aşınmada önemli bir etkidir. Çünkü cisimlerden biri bir diğerinden daha sert durumda ise kaynak noktaları daha yumuşak durumda olan cisimden kopar [67].

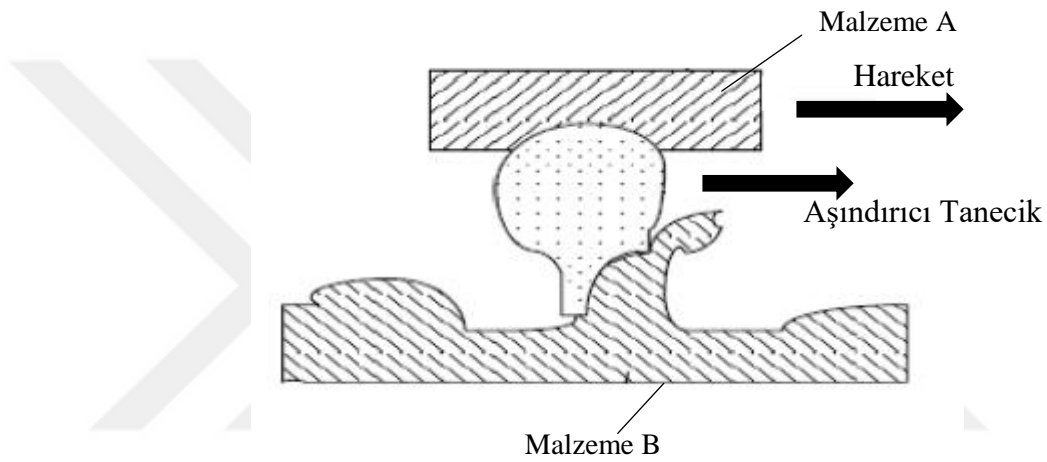
#### 2.5.2.1.2. Abrasif Aşınma

Abrasif aşınma yüksek aşınma hızı ile hızlı bir biçimde gelişerek etkisini anında belli eden ve sistemde ciddi aşınma hasarlarına sebebiyet veren bir aşınma türüdür. Aynı zamanda çizilme ya da yırtılma aşınması olarak da isimlendirilebilen bu aşınma türü en genel tanımıyla, uygulanan hareket ya da kuvvet etkisiyle sert, keskin parçacıkların malzeme yüzeyini mikroskobik alanda çizerek talaş kaldırması ya da malzemede ciddi değişiklikler yaratması olayıdır. Dolayısıyla Aşındırıcılarla temas halinde çalışan araçlar için abrasif aşınma önemli bir zarar çeşididir. Bu mekanizmayatoprak ile temas halinde olan greyder, buldozer bıçakları gibi sisteme dışarıdan gelen toz parçacıklarının etkisi sonucu meydana gelen aşınma şekli örnek verilebilir. Bu aşınma türü; iki ya da üç elemanlı olmak üzere iki şekilde ele alınmaktadır.





Şekil 2.32. İki elemanlı abrasif aşınma



Şekil 2.33. Üç elemanlı abrasif aşınma

Şekil 2.31.'de görüldüğü üzere iki elemanlı aşınan sistemlerde iki malzemedен daha sert ve pürüzlü olan yüzeyin ya da sabit aşındırıcı partiküllerinde daha yumuşak olan malzeme yüzeyinden malzeme kaldırması ya da çizerek tahrip etmesi iken üç elemanlı aşınan sistemlerde ise iki kayan yüzey arasında serbest ara bir malzeme bulunması gibi aşınan yüzeylerden kopan parçacıkların ara malzeme gibi davrandığı yani serbest taneciklerin bulunduğu sistemdir. Abrasif aşınmanın temel sebebi hareketli sistemlerde malzemeler arasındaki setlik farklı ve basınç büyüklüğü olup bu aşınma türü, aşınmaya sebebiyet yaratan toz parçacıkların sistemden uzaklaştırılması ile engellenebileceği gibi malzeme yüzeylerine etki eden yük azaltılarak düşürülebilir [68, 69].

### 2.5.2.1.3. Eroziyon Aşınma

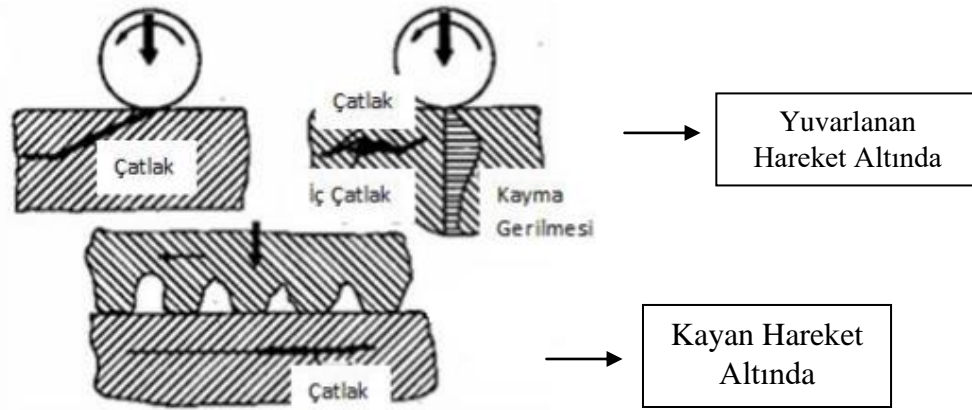
Eroziyon aşınma bir malzemenin yüzeyine belirli bir hızla mevcut olan katı veya sıvı parçacıkların hedef yüzeye çarpması sonucunda yüzeyin üst kısmından malzeme kaybı

meydana getirmesi ile sonuçlanan bir aşınma türüdür. Bir başka tarif ile sıvı bir malzemenin içerisinde bulunan sert parçacıkların yüksek hızlarda malzemenin yüzeyinden yuvarlanması ya da kayması sırasında yüzeyden parça kopararak malzeme kaybına yol açmasıdır. Dolayısıyla parçacıkların şekli, boyutu ve sertliği gibi faktörler erozif aşınmanın oranını belirleyen en önemli etkenlerdir. Bunun yanı sıra çarpma hızı ve sıcaklık diğer önemli faktörlerdendir [59].

Erozif aşınma yüzeyin bozulması, pürüzlülüğü, yapısal işlevinin azalması gibi problemler ile mühendislik uygulamalarının pek çoğunun başarısızlığından sorumludur. Özellikle uzay ve havacılık alanlarında ciddi problemler teşkil etmekte olup tipik bir örneği; toz bulutu arasından geçen bir uçağın pervanelerinde büyük hasarın oluşmasıdır. Ayrıca jet motorlarında, türbin kanatlarında, pervane ve fanlarda, enerji dönüşüm sistemleri vb. uygulamalarda yoğun karşılaşılan bir aşınma türüdür [70].

#### **2.5.2.1.4. Yorulma Aşınması**

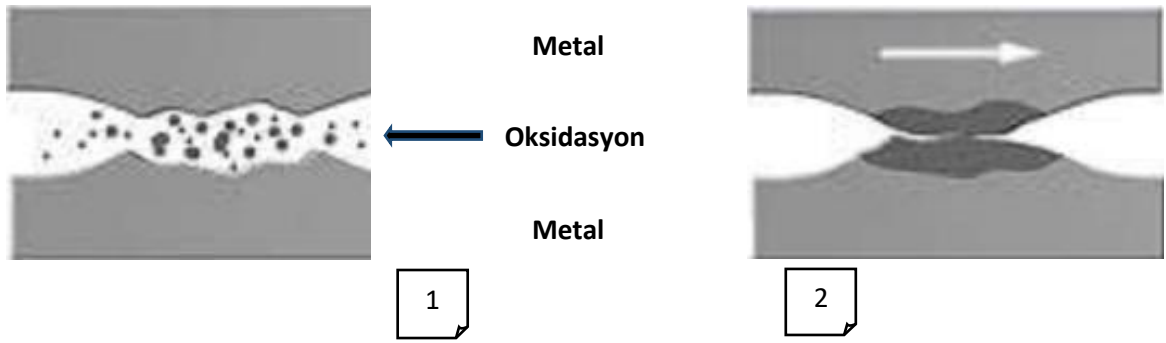
Değişken ya da sürekli olarak yüklemeler sonucu maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu bölgelerde dislokasyon ve plastik deformasyonla küçük tane boşlukları oluşmaktadır. Bu dislokasyon boşlukları zaman içerisinde büyüyerek yüzeye doğru ilerler ve yüzeyde küçük çukurlar meydana getirmektedir. Dolayısıyla bu tür aşınma yüzeyde çok küçük çukurların oluşması sonucu kendini göstermektedir. Bunun yanı sıra malzemelerde sürekli ya da değişken zorlamalar sonucu yorulmalar meydana gelerek zorlamanın etkisi ile yüzeye yakın yerlerde ve temas yüzeyinin altın, üstünde, içyapının yorulması ile yüzeyde kılcal çatlaklar gibi mikro boyutta çatlaklar boy gösterir. Sürtünme olayının sonucunda da malzemede meydana gelen plastik şekil değişimi sonucu dislokasyonların peş peşe dizilimi yani pekleşme olayı meydana gelerek malzeme gevrek bir yapıya geçiş yapar [71, 72]. Gevrekleşen malzeme ise zaman içerisinde uygulanan sürekli ya da değişken yükler sonucu çatlaklar, bu çatlaklar da zaman içerisinde büyüyüp yayılarak yüzeyden ufaklı büyüklü malzeme kayıplarına neden olur. Bu tip aşınma türü özellikle rulman, dişli çark, kam mekanizması gibi yuvarlanma hareketinin mevcut olduğu makine elemanlarında ortaya çıkar ve yukarıda verilen bilgiler ışığında bu aşınma esasen bir malzemenin yorulması sonucu kendini göstermektedir.



Şekil 2.34. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi

#### 2.5.2.1.5. Korozi Aşınma

Birbiri ile temas halinde çalışan sistemlerde mekanik yıpranmaların yanı sıra meydana gelen elektrokimyasal ya da kimyasal yıpranmalara korozyon denir. Metal ve metal alaşımlarında da çevre (katı, sıvı, gaz ortam) ile kimyasal, elektrokimyasal etkileşimi sonucu yüzeylerinde farklı tabakalar meydana gelmekte ve bu tabakalar sürtünme sonucu parçalanıp taşınmaktadır. Sürtünme temas noktasında çatlak oluşumu veya abrasif etkiler ile tabakaların parçalanıp hasara uğramasına korozi aşınma denmektedir ve bu aşınma türünde en önemli etken rol çalışma ortamı ile malzeme yüzeyleri arasındaki etkileşimdir. Korozi aşınma için temel şart ise korozyon ve sürtünmenin bir arada meydana gelmesidir. Bunun yanı sıra korozi aşınmadan bahsedilebilmesi için mekanik ve kimyasal bozulmanın daimi arada meydana gelmesi şarttır [67]. Oluşan korozi aşınmanın önlenmesinde en önemli faktörse pas ve pas oksitlenmeye sebebiyet vermektedir. Bu sebeple korozi ortamda çalışacak yüzeyi oksitten korumak için yüzeye sıkıca yapışan kaplama tabakaları oluşturmak ve reaksiyona girmeyecek alaşım elemanları seçmek gerekir. Fakat kimi zaman bu kaplama tabakaları da sürtünmenin etkisi ile çatlar veya kopar. Kopma ile oluşan korozyon ürünleri ile aşınma hızı büyük miktarda artar. Korozi aşınmanın tek faydası ise yüksek basınç altında çalışan parça yüzeylerine oksit ya da diğer ara tabakaların yapışmasını önleyerek adheziyon aşınmayı azaltmasıdır [71].

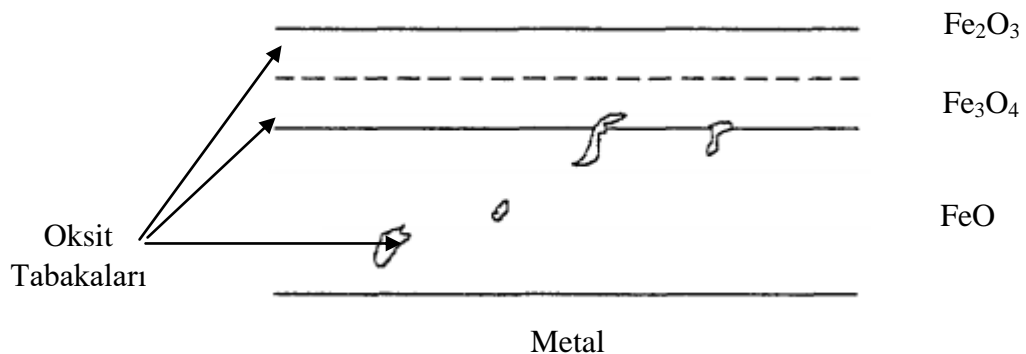


Şekil 2.35. Korozif aşınmanın şematik gösterimi

## 2.6. Tufal ve Tufal Atıklarının Değerlendirilmesi

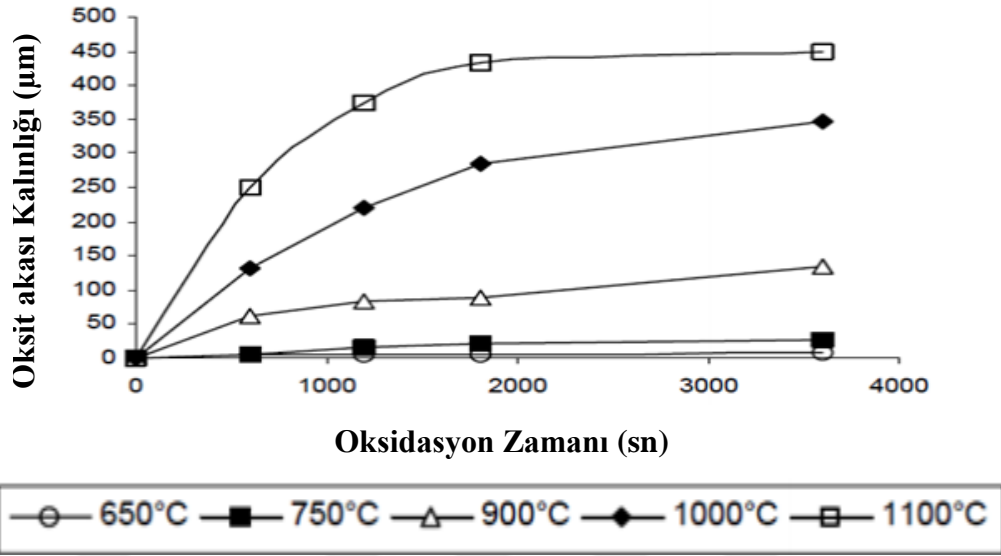
### 2.6.1. Tufal Oluşumu

Çelik ve alaşımlarının üretimi sonrası kütük olarak yarı ürün formunda katılaştırılan ürün, nihai şeklini almak üzere sıcak olarak haddelenir. Bu haddeleme işlemi esnasında, yüksek sıcaklıklardan kaynaklanan çelik yüzeyinde oksitlenme sonucunda oluşan tüm ince demir oksit tabakasına tufal denmektedir. En basit tufal demir oksit ( $\text{FeO}$ ) olup ısıtılan yüzey sıcaklığı  $900^\circ\text{C}$ 'yi aştığı anda tufalleşme hızı da artar ve yüzeyde meydana gelen tufal kalınlığı merkezden dışarı doğru %80 vüstit ( $\text{FeO}$ ), %18 Manyetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ile %2'si  $\alpha$ -Hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) olmak üzere 3 ayrı demir oksit fazı katmanlı bir yapı halinde bulunur. Şekil 2.35.'de tufalin yapısı gösterilmektedir [73, 74].



Şekil 2.36. Tufal tabakası ve yapısı [75]

Tufal oluşumu sıcaklık ve zamana bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Örneğin şekil 2.36.'da görüldüğü üzere  $650^\circ\text{C}$ 'de kısa bir süredeki oksit tabakası kalınlığı en düşük iken,  $1100^\circ\text{C}$ 'de az bir süredeki oksit tabakası kalınlığı en yüksektir.



Şekil 2.37. Düşük karbonlu çeliklerde farklı sıcaklıklarda oksit tabakası kalınlığının sıcaklık ve zamana göre değişimi [76]

En düşük oksijen miktarına sahip ve metale en yakın noktada oluşan oksit tabakası vüsvittir (FeO) ve sıcaklığın artış göstermesi ile beraber tufal içerisindeki vüsvit miktarı artış göstermektedir. Çelik sıcaklığı 700°C'yi aştığında ise tufal tabakasının % 95'ini Vüsvit oluşturmaktadır. Vüsvit çelik ve tufalin diğer demir oksit fazlarına göre 1370-1425°C düşük ergime fazlarına sahiptir. Bu tabakanın erimesi ise tufalleşme hızını arttırarak yüzey kalitesini bozmaktadır [75].

Manyetit tufal katmanlarınına fazını oluşturmaktadır. Çeliklerde yüzey sıcaklığı 500°C sıcaklığın altında olduğu zaman tufal ağırlıklı olarak manyetitten meydana gelmektedir. Sıcaklık 600°C'yi aşınca manyetitin yerini vüstit almaya başlamaktadır ve 700°C aşınca ise manyetit tufal yapısının %4 ünü oluşturur. Manyetit vüstitten daha aşındırıcı ve serttir [73].

Hematit ise tufalin atmosfer ile temas halinde olduğu dış yüzey tabakasıdır. Hematit çelik yüzey sıcaklığı 880 °C ye eriştiği zaman oluşmakta ve tufal tabakasının %1'ini meydana getirmektedir. Hematit de manyetit gibi sert ve aşındırıcı yapıya sahiptir.

Tufaller normal şartlarda genel olarak % 70 civarında Fe içerir. Haddeleme sırasında hadde ekipmanlarından kaynaklı ve yağ dolayısıyla tufalde yağ kalıntıları meydana gelmektedir. Bu yağ içeriği genel itibari ile % 0.1- 2.0 arasında olmaktadır, fakat kımı

zaman ise % 10'lara kadar ulaşabilmektedir. Dolayısıyla aslında tufal pulsu yani diğer bir değiş ile yonga bir yapıya sahiptir [77].

### **2.6.2. Tufallerin Sınıflandırılması**

Çelikyüzeyinde meydana gelen demiroksitler özellikleri, oluşum şekli ya da oluştuğu ortamın cinsine bağlı olarak sınıflandırılmaktadır.

#### **2.6.2.1. Ağır Başlangıç Tufali**

Tav fırınlarında çeliğin uzun süre bırakılması sonucu yüzeyde oluşan ve kalınlığı 3-4 mm civarında olan kalın tufaldır.

#### **2.6.2.2. Fırın Tufali**

Fırın tufali genellikle yarı mamul çelik ürünlerinin yüksek tavlama sıcaklığına maruz bırakılması sonucu oluşur ve çelik ile tufal arasında çok kuvvetli bir bağ oluşturan başlangıç tufal halidir. Bu tip tufal özellikle fırının cehennemlik bölgesinde çelik yüzey sıcaklığı yüksek sıcaklığa erişirken tufal ergiyerek çelik ara yüzeyinde bir bağ oluşturur. Fırındaki redükleyici atmosfer ise bu oluşumu geciktirmektedir [73, 75].

#### **2.6.2.1. Birincil Tufal**

Ağır başlangıç tufaline benzer şekilde meydana gelmekte ve birincil tufal yaygın olarak çelik üst yüzeyinde siyah tanecikler şeklinde görülmektedir.

#### **2.6.2.2. İkincil Tufal**

Fırından çıkarılan çelik yarı mamulün yüzeyinde, tufal kırma işleminden sonra oluşan tufal halidir. Bu tip tufal tabakasının kalınlığı çelik yarı mamulün kimyasal yapısı, sıcaklığı, tufal kırma işleminin verimi ve tufal kırma işleminden sonraki oksidasyon süresine bağlıdır [74].

### 2.6.2.3. Refrakter Tufali

Çelik yüzeyindeki fırın tufali ile refrakter parçaların birleşmesi sonucu oluşmaktadır. Aslında bu tip tufal erime sıcaklığı düşük olan refrakterlerden kopan parçaların çelik yüzeyine yapışması ile oluşmakta ve oluşan refrakter tufalinin rengi kullanılan refrakterin türüne bağlıdır.

Örneğin; kırmızı, sarı, kahve, mor ve siyah renklere olabilirler.

### 2.6.2.4. Kırmızı Oksit Tufali

Vüsvit ile ilgili tufalin farklı çeşitlerini sunmaktadır. Kırmızı oksit tufali yüksek sıcaklıktaki haddeleme sırasında ve özellikle hazırlık grubu hadde tezgâhlarında oluşum göstermektedir.

### 2.6.2. Tufalleşmenin Tavlama ve Haddeleme Üzerindeki Etkileri

Çelik yarı mamullerin tavlama esnasında yüzeyde oluşan tufalin tavlama ve tavlama sonrası yapılan sıcak haddeleme üzerinde olumlu ve olumsuz etkilere sahiptir.

Olumlu Etkileri;

1. Fırın tabanında biriken tufal dolayısıyla ısı kaybında azalma görülür. Fakat bu ısı kaybı önemli bir faktör ise cehennemlik bölge refrakterleri ince tutulmalıdır. Ayrıca tufal içerisinde barındırdığı demir miktarının bir kısmının geri kazanımı açısından önem arz etse de tufal seviyesi minimum tutulmalıdır.
2. Tufal düşük ısı iletkenliğine sahip olması ile çelik yarı mamulün ısı kaybını azaltmak için izolasyon rolü oynar.
3. Tavlama işlemi sonucu çelik yarı ürünün yüzeyinde meydana gelen küçük hatalar oluşan tufal ile kaybolur [78].

Olumsuz Etkileri;

1. İtici tip fırınlarda, kütük tavlama işlemi esnasında çelik yarı mamül yüzeyinde oluşan tufal, fırının tabanında birikerek fırın verimini düşürmektedir.

2. Çelik yarı mamül yüzeyinde oluşan tufal, fırının tabanının yanında baca gazı kanallarında da yığılır. Bu durum yanma verimini azaltmaktadır.
3. Fırın tabanında birikmiş ve erimiş olan tufal ise fırın soğurken katılaşıır. Dolayısıyla bu durum tav fırının tekrar ısıtılmasında genişleme problemleri yaratır.
4. Çelik yarı mamül üzerinde (slab veya kütük) aşırı ısıya maruz kalmış tufal radyasyonla ısının bir kısmını yansıtır. Bu durum çeliğe transfer olan ısıyı azaltmaktadır. Çünkü çelik üzerinde oluşan tufal izolasyon etkisi yaparak ısının çeliğin iç bölgelerine gitmesini engellemektedir
5. Aşırı tufallenmiş olan çelikte haddelemeden sonra ürünün yüzey kalitesi bozuktur.
6. Aşırı tufal oluşumu ise fırında verim kayıplarına sebep olmakta vehaddeleme sırasında motor güçlerinin büyümesine sebep olmaktadır.
7. Ayrıca aşırı tufal oluşumu fırının bakım ihtiyacını arttırmakta ve dolayısıyla fırının kullanılabilirliği azalarak verim kaybına sebep olmaktadır. Çeliğe verilen ısı enerjisinin azalması ise daha uzun süreli ısıtılmalara sebep olmaktadır. Bu durum fırın üretimini düşürmektedir [79].

### 2.6.3. Tufallerin Değerlendirilmesi

Bilindiği üzere demir çelik üretimi sırasında ton çelik başına 400 kg'ı aşan çeşitli katı atıklar (cüruf, tufal, baca tozları vb.) ortaya çıkmaktadır ve bu metalürjik atıkların rastgele çevreye bırakılması ciddi problemlere sebebiyet vermektedir [80]. Bunun yanı sıra bu atıkların işletme alanlarında bekletilmesi ile bu atıklardaki toksik etkili ağır metaller ve bileşikler yağmur, kar sularıyla birlikte toprağa ve suya geçmekte bunun sonucunda da bitki örtüsünü, insan ve hayvan sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir. Dolayısıyla bu atıkların değerlendirilmesi önemli bir konudur. Bu bağlamda literatür değerlendirildiğinde; tufallerin entegre tesislerde sinter fırınlarında demir kaynağı olarak geri kazanımı yapılmaktadır. Fakat orta ve küçük ölçekli elektrik ark ocaklarında ise geri kazanımı mümkün görünmemektedir.



Ayrıca tufal ile günümüz demir-çelik üretiminde ham demir üretim yöntemi kullanılarak üretilen sünger demir üretimi sağlanmıştır. Bunun için dönel bir fırın ve hidrojen atmosferi içerisinde hadde tufali ile kömür karışımı indirgenerek sünger demir üretimi sağlanmıştır[81]. Tufalin bu şekilde geri kazanımı ile sünger demir demir-çelik üretimine dolaylı olarak yapı sektörüne tekrar kazandırılarak girdi oluşturulabilmektedir. Ek olarak tufal atıkları çamaşır makinelerinde de ağırlık oluşturarak titreşimi önlemek gibi demir-çelik üretiminden başka sektörlerde de sahip olduğu ekonomik değer altında ticari kullanımları mevcuttur [73].

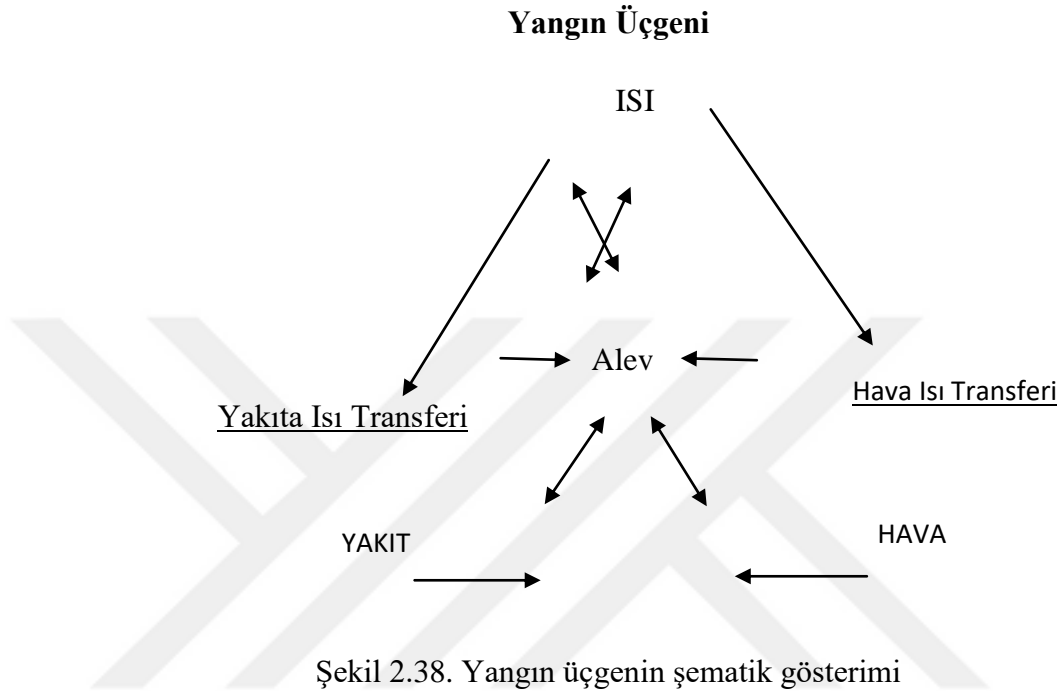
## 2.7. Yanma

Yanma olayı günlük yaşantımızın hemen hemen her alanında (ev, okul, işyeri veya ulaşım araçları gibi) mevcut olmakla hayati risk taşımaktadır. Dolayısıyla çevremizde bulunan eşya ve makinelerden can ve mal güvenliği açısından beklenen en önemli özellik herhangi bir sebep dolayısıyla alev maruz kalındığında tutuşmama özelliği göstermeleridir. Günümüzde gelişen teknoloji ve sanayileşmenin artması, nüfusun giderek artmasına paralel olarak ise konutlaşmanın artması ile yangın meydana gelme riski ve buna bağlı olarak da yangının maddi ve manevi zararlarının artmasına sebep olmaktadır.

Avrupa Birliği ülkeleri ve diğer gelişmiş ülkelerde meydana gelen yangın sayısı, ülkemizde meydana gelen yangın sayısına oranla daha fazladır. Örneğin İstanbul'da yılda 15.000 civarı yangın meydana gelirken Avrupa'nın önemli şehirlerinde bu sayı 50.000 mertebesinde. Fakat buna rağmen ortaya çıkan maddi ve manevi zarar ülkemize göre çok azdır. Bunun sebebi de yangın önleyici ve yayılmasını önleyici tedbirlerin alınmış ve bireylerin daha bilinçli olmasıdır. Bu nedenle son zamanlarda yangın güvenliği, pek çok farklı disiplin ve endüstri kollarında artan bir önem arz etmektedir [82].

Yanma; yanıcı maddenin ısı ve oksijenle birleşmesi sonucu meydana gelen basit bir kimyasal bir olaydır. Daha açık bir ifade ile yanma kimyasal bir oksidasyon olup, yüksek sıcaklık derecelerinde meydana gelir ve fotosentez yoluyla depo edilmiş olan ısı enerjisini açığa çıkarır. Tutuşma sıcaklığı oksijen ve yanıcı madde yeterli miktarda bir araya gelmesi ile yanma olayı meydana gelir. Özetle yanma bu ısı, oksijen ve yakıt üçlü

bileşenin bir araya gelmesi sonucu oluşmaktadır ve bu üç faktörün oluşturduğu üçgene "YANGIN ÜÇGENİ" adı verilmektedir. Bu üçlü bileşende ki yakıt malzemesi de malzeme yapımında kullanılan polimerin kendisidir [83].



Bir yangında ortalama sıcaklık  $500^{\circ}\text{C}$ 'ye ve çok süratli olarak ta  $800^{\circ}\text{C}$  ile  $1200^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ulaşabilir. Herhangi bir yangının şiddetini ve yayılma özelliklerini ise üçlü bileşenin miktar ve niteliği belirler. Yani Yangının çıktığı ortamın özelliklerine bağlı yangın çok kısa bir sürede büyüyerek ortamda yayılabilir. Yangının söndürme çalışmalarında izlenen temel yol bu yangın üçlüsünden herhangi birisinin üçgen dışına çıkarılmasını sağlamaya yöneliktir. Bu yönde en önemli adım ise binadaki insanların hızlıca tahliye edilmesi ve yanıcı maddenin yangın yerinden uzaklaştırılarak yangının devamlılığının kırılmasıdır.

Yangın alanında bulunan çelik yapı ürünleri için bir önlemi alınmaması takdirde bu malzemeler  $600^{\circ}\text{C}$  üzerinde deforme olmaya başlarken polimerler çok yüksek oranda Karbon, Hidrojen ve Oksijen içeren bileşikler olması dolayısıyla çok daha kolay ve hızlı yanarlar (Tahtadan 4 kat daha hızlı).

Tablo 2.2. Bazı plastik ve doğal ürünlerin tutuşma ve yanma sıcaklıkları [84].

Plastik/Doğal Ürün	Tutuşma Sıcaklığı (°C)	Yanma Sıcaklığı (°C)
Polietilen	340	350
Polipropilen	320	350
Polistiren	350	490
Polivinil klorür	390	450
Polietrafloroetilen	560	580
ABS	390	480
Polimetil metakrilat	300	430
Poliakrilonitril	480	560
Poliamid 6	420	450
Poliamid 6,6	490	530
Poliüretan (sert köpük)	310	415
Pamuk	210	400

Ayrıca polimerlerin yanması esnasında ısı ile beraber yanma ürünü zehirli ve yanıcı gazlar ortaya çıkar [85]. Ayrıca, ısı etkisi ile polimer zincirleri küçük parçalara veya moleküllere parçalanır ve ortam daha yanıcı hale gelir. Örneğin polipropilenin yanması sırasında, kendisinden daha yanıcı olan propan gazı açığa çıkar. Yani alında yanmanın yayılması; yanmanın şiddetine aynı zamanda da polimerin buna tepkisine bağlıdır [82]. Bu doğrultuda ideal bir yanma geciktirici polimer sentezi için şunlar gereklidir;

- Alev yayılmasına karşı yüksek direnç,
- Düşük tutuşma hızı,
- Düşük hız ve miktarda duman meydana gelmesi,
- Yanıcı gazların düşük seviyede tutuşması ve zehirli olmaması,
- Kullanım sırasında yanıcılığın şiddetinin azaltılabilmesi,
- Belirli bir kullanım alanı açısından özelliklerinin ve görünümünün kabul edilebilir olması,
- Ürünün fiyatına etkisinin az olması.

Günümüzde polimer malzemelerin tutuşabilirliğini, duman ve özellikle bazı maddelerden çıkan pis kokulu duman oluşumunu indirmek için yanmayı

geciktiricilerin kullanımı, yeni malzemelerin üretimi ve gelişiminin en önemli parçası olmaktadır. Çünkü doğaldan sentetiğe pek çok polimer türü yaşam alanımızın her kısmında kullanılmakta ve artan kullanım ile her nasılsa yangın tehlikelerinin polimerik malzemelerin kullanımıyla birleşmesi sonucu can ve mal kaybına sebep olmaktadır. Dolayısıyla yanma geciktiriciler elektrik ve elektronik parçalar, inşaat, tekstil ve ulaşım ile ilgilenen endüstri dalları başta olmak üzere pek çok endüstri alanında önemli bir konu olarak yer almaktadır. Aynı zamanda evsel uygulamalarda da alev geciktirici malzemelerin gelişimi, genellikle tüketicilerin güvenliği ve çevresel atıklar için artarak önem taşımaktadır.

Bugün dearştırmalar çoğunlukla alev geciktirici ürünlerin yarattığı çevresel etkiler, bunların zehirlilik değerlerinin ölçümü ve endüstride kullanım halinde olan alev geciktiricilerin çeşitleri hakkında bilgi toplamak ve teşhis etmek üzerine yapılmaktadır. Örneğin; Avrupa Birliği (AB), yanma esnasında yüksek derecede toksik ve kuvvetli karsinojenikbromlufuranlar ve dioksinler oluşturması sebebi ile bromludifeniloksit yanmayı geciktiricilerinin kullanımını sınırlamıştır.

### **2.7.1. Yanma Mekanizması**

Yanma olayı hakkında daha iyi yorum yapabilmek adınamakro boyutta incelemenin yanı sıra mikroskobik boyutunun ele alınarakya da malzeme özelliklerinin önemli rol oynadığı moleküler boyutunun ele alarak incelemesigerekmektedir. Çünkü ateş bazı parametrelere bağlı olarak çeşitli kademelerden oluşmaktadır.

Örneğin herhangi bir organik malzemede yanma olayı üç basamakta meydana gelmektedir;

- a) Ürünün ısınması,
- b) Makro moleküllerin termik olarak parçalanması (piroliz),
- c) Tutuşma ve yanmanın başlaması

Bir maddeye belirli bir enerji verilmesi halinde maddenin ısınması yani yüzey sıcaklığının artması o maddenin özgül ısı, ısı iletkenliği, erime ve buharlaşma ısı gibi termik özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Maddenin yüzey sıcaklığı belirli bir seviyeye ulaştığında ise piroliz olayı başlamaktadır. Artan sıcaklıkla birlikte de piroliz

hızı artış göstermekte ve bir kıvılcımla kendiliğinden tutuşabilmektedir. Fakat pirolizin yavaş gerçekleşmesi durumunda yanıcı gaz karışımı meydana dahi gelmemektedir. Piroliz reaksiyonu ürünleri ise şu şekilde sıralanabilir;

- i. Yanabilen gazlar; tutuşmaya sebep olur.
- ii. Yanıcı olmayan gazlar; ateşin soğumasına ve özellikle de ağır yanma gazları yanan madde yüzeyinin etrafını sararak havanın oksijeni ile temasın azalmasına yardımcı olur.
- iii. Yanmayan sıvı parçalanma ürünleri; bu ürünler sahip olmuş oldukları buharlaşma ısı ile sıcaklığın düşmesinde yardımcıdır.
- iv. Katı kömürleşme atıkları; yanabilen gazların dışarıya verdiği difüzyonu azaltırken ısı izolasyonu sağlayarak termik parçalanmayı yavaşlatır [86].

### **2.7.2. Polimerlerin Yanması**

Polimerler günümüzde pek çok alanda yaygın olarak kullanılmasının aksine alev karşı çok hassas olması ile kullanımında ciddi problem teşkil etmektedir. Örneğin; evlerde ya da sinema, tiyatro, park vb. alanlarda polimerlerden yapılmış halı, sandalye, mobilya, panel türü eşyalar yaygın şekilde kullanılmaktadır. Fakat yukarıda da bahsedildiği üzere polimerler yanma esnasında ısı ile beraber zehirli ve yanıcı gazlar açığa çıkarmaktadır. Ayrıca ısının etkisi ile polimer zincirlerinin küçük parçalara veya moleküllere ayrılması ile ortam daha da yanıcı hale geçmektedir[83].

Genel anlamda bir polimer yeterli seviyede ısıya maruz bırakıldığında havada ya da oksijen ortamında kendinden yanmaya başlayabilmektedir. Fakat aslında polimerlerin yanması birkaç adımdan oluşan bir procestirve bu adımların bazıları henüz tam olarak araştırılmamıştır. Bu sebeplesayısal anlamda tanımlanamasa da nicel olarak tanımlanabilmektedir. Gerçek bir yanma prosesinin başlaması üç aşama üzerinden gerçekleşir. Bunlar; ısınma, bozunma ve polimerin tutuşmasıdır.

#### **2.7.2.1. Isınma**

Bu ilk aşamada polimerler ısı ya da alev gibi bir enerji kaynağı tarafından ısıtılabilir. Termoplastik polimerlerde bulunan lineer molekül yapıları ile polimerler başlangıç aşamasında polimerler yumuşar ve tamamen akıcı hale gelir. Termoset polimerlerde ise

yapılarındaki üç boyutlu çapraz bağlar sebebiyle yumuşamaz ve erimezler. Ayrıca enerji miktarının artması ile termoplastikler gibi gaz fazına geçmeden doğrudan bozunmaya uğrarlar.

### 2.7.2.2. Bozunma

Endotermik bir reaksiyon olan bozunmanın gerçekleşebilmesi için atomlar arasında bulunan yüksek enerjili bağları koparabilecek kadar (200-400 kJ/mol) ve aktivasyon için gerekeni sağlayabilecek kadar yeterli enerji sağlanmalıdır. Her bir polimerin yapısı birbirinden farklı olup, bozunma sıcaklık aralıkları da birbirinden farklılık göstermektedir. Polimerlerin oksidatif bozunumlarını hidroperoksit grupların oluşması takip etmektedir. Bu hidroperoksit grupların bozunması ise çok aktif yapıya sahip olan hidrojen (H) ve hidroksil(OH) oluşumuna sebep olmakta ve bunlar zincir dallanmasına yol açmaktadır. Ayrıca bu yüksek enerjili serbest radikaller alevin yayılmasına da neden olmaktadır [84].

Tablo 2.3. Bazı polimerlerin bozunma sıcaklıkları [84].

Polimer	Bozunma Sıcaklığı (°C)	Polimer	Bozunma Sıcaklığı (°C)
Polietilen	340-400	Polimetil metakrilat	180-200
Polipropilen	320-400	Poliakrilonitril	250-300
Polistiren	300-400	Poliamid 6	300-350
Polivinil Klorür	200-300	Poliamid 66	320-400
Polietrafloretillen	500-550	Selüloz	280-380

### 2.7.2.3. Tutuşma (Gaz Ortamı)

Bozunma ortamında meydana gelen küçük molekül ağırlıklı bileşiklerin gaz ortamında bulunan yanıcı gazlarla havanın oksijenin karışması sonucu yanma tepkimelerinin meydana geldiği alevli ortamdır.

#### 2.7.2.4. Alevlenme

Alevlenme, polimerin bozunması sonucu oluşan yanıcı gazların havadaki oksijenle etkileştiği anda görülen bir prosestir. Yanma esnasında polimer zincirlerinin daha yanıcı olan küçük zincirlere veya moleküllere parçalanması ile ortamın alevlenme özelliği de sürekli artar.

Polimerler bilindiği üzere günlük hayatımızın hemen hemen her alanında kullanılmakta fakat polimer malzemeler genelde yanıcı maddelerdir veyanma sonrasında açığa çıkardığı zehirli gazlar ile insan sağlığına ciddi tehlikelerteşkil etmektedir.Bu nedenle polimerik malzemelerin alevlenme özelliği genellikle içlerine alevlenmeyi geciktirmeyi sağlayan kimyasalların katılması ile azaltılır. Ayrıca belli durumlarda alev kaynağından uzaklaştırıldıklarında çoğu polimerin yanması durur. Örneğin; yapılarında halojen atomları bulunan poli(vinil klorür), politetrafloretülen gibi polimerler yandığında karbon, hidrojen veya başka atomlar yanında halojenler de salınır. Bu halojen atomları ise hidrojenle birleşerek hidrojen florür(HF), hidroklorik asit(HCl), hidrojen bromür (HBr) ve hidrojen iyodür(HI) türü ağır gazlar oluştururlar. Bu ağır gazların oluşturduğu tabaka da yanma bölgesinin üstünü örter ve oksijeni yanma bölgesinden uzak tutarak yanmayı engeller.Termoset polimerlerin yanmasında da malzeme yüzeyinde genellikle kül gibi katı yanma atıkları meydana gelir ve bu atık tabakaları ileri seviyede yanmayı engeller. Dolayısıyla polimerler aynı zamanda kendiliğinden sönebilen malzemeler grubunda değerlendirilirler. Ayrıca bu polimerler yanmayı önleyiciliği arttırmak için, kendi baslarına veya geçerli bir hacimde ticari polimerlere eklenerek kullanılabilir [83, 85,87].

Alevlenmeyi geciktiricilerin yanmayı belirli süre engelleme veya yavaşlatmasının olumlu yanları ise şu şekilde sıralanabilir;

- i. Yanma yerinden uzaklaşma süresini 15 kat arttırma.
- ii. Yanma ısısının yalnız %25 kadarı dışarı salınır.
- iii. Zehirli gazların üçte biri dışarı salınır.
- iv. %50 daha az malzeme yanar.

### 2.7.2. Polimer Yanma Önleme Mekanizması

Bir yangının önlenmesinde yangının adımları göz önüne alındığında herhangi bir yangın önlenmesi için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bunlardan önemli bir etken oksijenin yanma bölgesinden uzaklaştırılması ve dolayısıyla oksidasyonun durdurulmasıdır. Bu prensip günümüzde karbondioksit ve karbon tetraklorür ihtiva eden yangın söndürücülerde kullanılmaktadır [88]. Polimerlerde yanma önleyicilerin tanımı ise İkinci Dünya Savaşı'na dayanmakta olup o zamandan bu yana önemli köklü değişikliklere uğramıştır. Örneğin; klorine parafin, antimon oksit içeren doymamış poliesterler, oksijen indeks metodu ve yanma önleyici sistemler geliştirilmiştir. Bu yanma önleyici sistemler ısınma, piroliz, tutuşma ya da alevin yayılması sırasında yanma sürecini bölmek/geciktirmek için kimyasal ve/veya fiziksel bir mekanizma aracılığıyla ya buhar evresinde ya da yoğunlaşma/sıvılaşma/yoğuşma evresinde harekete geçerler. Yanma önleyici mekanizmalardan bir diğer önemli kategori de entümesan (intumescent) olarak bilinir ki bunda maddeler ateşe ya da ısıya maruz bırakıldıklarında şişerek genelde karbonlu ya da gözenekli bir köpük yığını oluştururlar ve bu ısı, hava ve piroliz ürününe bir bariyer görevi görür. Entümesan malzemeler yapısında genellikle aracı olarak davranan bir tabaka, tabaka oluşumu için bir katalizör ve köpüren bir aracı bulunur. Bunlardan halojenli olanlar buhar evresinde sıcaklık düşürücü veya alevin büyümesini önleyen serbest radikal tuzağı olarak davranırken fosforlu olanlar polimer madde yüzeyinde bir tabaka oluşturarak yanma olayının başlaması için gerekli ısı ve hava transferinin engellemesinde etkilidirler. Fakat Halojen atomları (bromin ya da klorin gibi) yaygın olarak kullanılıyor olsa da yanma esnasında açığa çıkardığı hidrojen halidin, zehirlilik ve metal parçaları paslandırması açısından açık bir dezavantaj sunmaktadır. Bu nedenle bu zehirli ve aynı zamanda aşındırıcı gazların oluşmasını önlemeye yönelik giderek artan bir talep mevcuttur. Genel olarak polimerlerde yanma önleyiciliği sağlamada iki yaklaşım bulunmaktadır ve bunlar toplamsal (additive) tip ve reaktif tip olarak bilinir. Toplamsal tip yanma önleyiciler, en ekonomik, hızlı ve kolay yol olması ile yaygın olarak kullanılmakta olup genelde fiziksel yollarla polimerlerle birleştirilirler. Fakat bu tip yanma önleyicilerin düşük uyumluluk, süzülme ve mekanik özelliklerde azalma gibi dezavantajları mevcuttur. Reaktif yanma önleyicilerin uygulanması ise ya yeni yanma önleyici polimerler tasarlanmasını ya da var olan polimerlerin zincir içinde veya asılı bir grup olarak yanma bir önleyici bir birimle ko-



polimerizasyonunun gerekliliğini içerir [82].Reaktif yanma önleyiciler genellikle termoset polimerlerde (özellikle polyester, epoksi, reçine ve poliüretanlarda) kullanılır ve plastifiye edici özellikleri olmaması ile polimerlerin ısıl kararlılıklarını etkilemezler.

### 2.7.3. Yanma Önleyici Test Metodları

Önemli yanma önleyici test metodları şu şekilde sıralanabilir;

- i. Tutuşabilirlik testleri (ya da UL94)
- ii. Duman testleri (smoketests).
- iii. Alev yayılma testleri (flame spread tests)
- iv. Oksijen kısıtlama endeksi (LOI) (Limit Oksijen İndisi)
- v. Isı salma testleri (koni kalorimetre)

LOI (akıcı bir oksijen-nitrojen karışımındaki) mum gibi aşağı yönlü alev parlamasını desteklemek için gerekli olan minimum oksijen konsantrasyonunu ölçer ve bu kendi kendini söndürmenin geçerliliği için LOI 26'dan büyük olmalıdır. LOI genellikle ekipmanın ucuz ve gerekli örnek miktarının az olması sebebiyle uygun bir metottur. Fakat bir malzemenin gerçek boyutlardaki ve miktarlardaki yanma performansına yalnızca LOI değeriyle ulaşamaz çünkü düşük ısı girdisi ve benzetilmiş yüksek oksijen konsantrasyonu söz konusudur [88].

Limit oksijen indisi (LOİ) test metodu bir malzemenin alevlenebilirliği ve yanma karakteristiklerini belirleme açısından en iyi test metodlarından birisidir. LOI değeri, bir materyalin havada yanmaya devam etmesi için gereksinim duyduğu % oksijen miktarı anlamına da gelmektedir. LOI değeri 25'ten büyük olan bir materyal havada genelde kendiliğinden sönmekte iken 25'ten küçük olan ise çok kolay yanmaktadırlar. Dolayısıyla yüksek LOI değeri standart atmosfer ortamında o malzemenin daha zor yanma karakteristiğine sahip olduğunu göstermektedir.

LOİ test metodunda prensip olarak, deney numunesi, içerisinden yukarı doğru bir oksijen ve azot karışımı geçen şeffaf bir baca içine düşey olarak yerleştirilir ve deney numunesinin üst ucu tutuşturulur. Ardından deney numunesinin yanma davranışı gözlenerek yanmanın devam süresi veya yanan deney numunesi uzunluğu, bu tür bir

yanma için önceden belirlenmiş sınır değerlerle mukayese edilir. Farklı oksijen konsantrasyonlarında bir seri deney numunesi kullanılarak yapılan deneylerle ise yanmanın devam etmesi için gerekli en küçük oksijen konsantrasyonu değeri tahmin edilir. Ancak LOI test metodu tam anlamıyla yangın şartlarını taşımadığı için kesin olarak doğru sonuçları vermemekle beraber Uluslar Arası-ISO 4589, Amerika Birleşik Devletleri-ASTM D 2863, Fransa- NFT 51-071 olarak standartlaştırılmıştır [88, 89]



## 3. BÖLÜM

### DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 3.1. Giriş

Tez çalışmasının deneysel kısmında, farklı tane boyutu ve % (yüzde) bileşime sahip takviye fazı tufal ile polietilen matrisli kompozitler hazırlanmış ve bu kompozitlerin farklı parametreler altındaki tribolojik ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

#### 3.2. Malzemeler ve Yöntemler

##### 3.2.1. Kullanılan Malzemeler

Kullanılan Polietilen (Riblene® MP 30 R) peletleri 7.5 g/10dk (190 °C/2.16 kg yükte, ISO 1133) ergiyik akış hızına (MFR), 0.925 g/cm<sup>3</sup> (ISO 1183) yoğunluğa ve 112 °C ergime sıcaklığına sahip olup Versalis Company'den (İtalya) temin edilmiştir. Tufal ise Mescier Demir Çelik San.Tic.Ltd.Şti.(Bartın/Türkiye) tarafından temin edilmiştir. Kimyasal bileşimi Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olan ve içerisinde eser oranlarda safsızlıkların yer aldığı farklı tane boyutlarındaki tufallerin boyut analizleri aşağıda ayrı bir başlık altında verilmiştir.

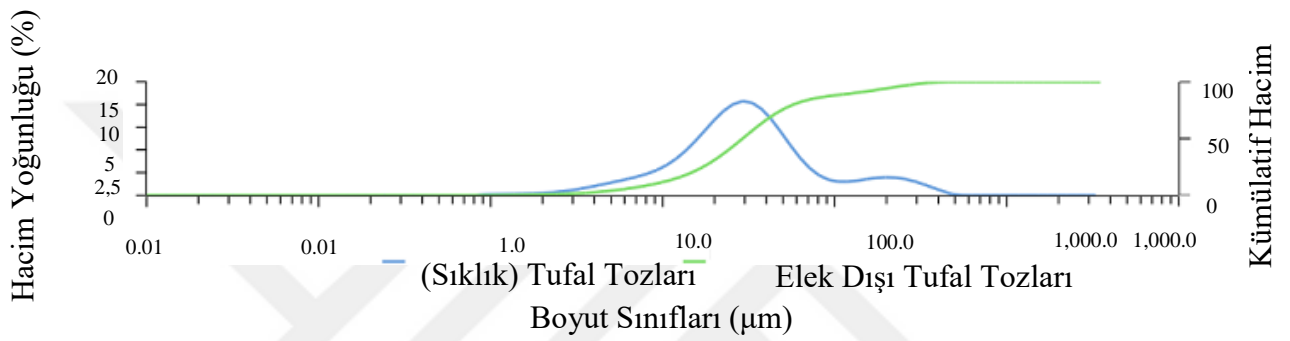
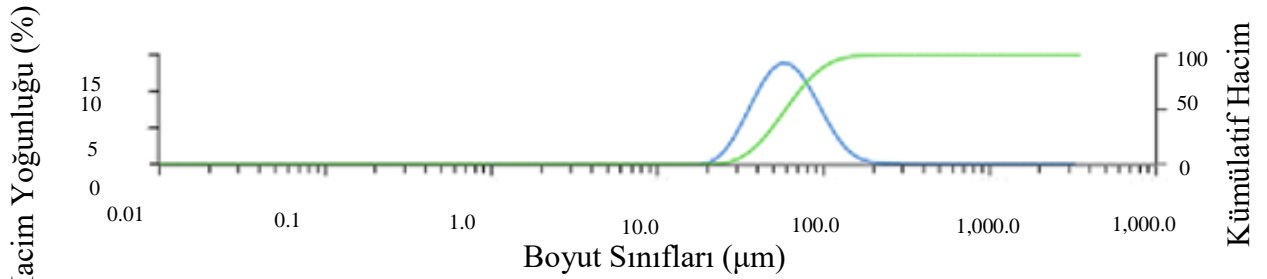
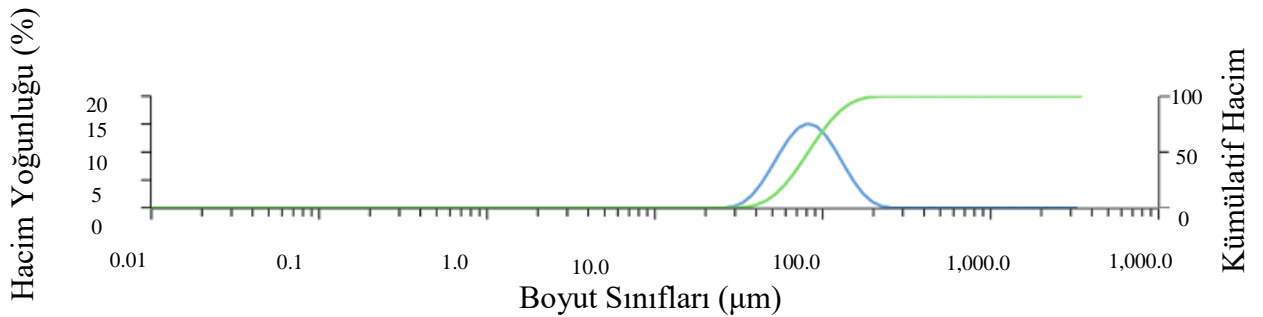
##### 3.2.2. Tufal Tane Boyu Analizi

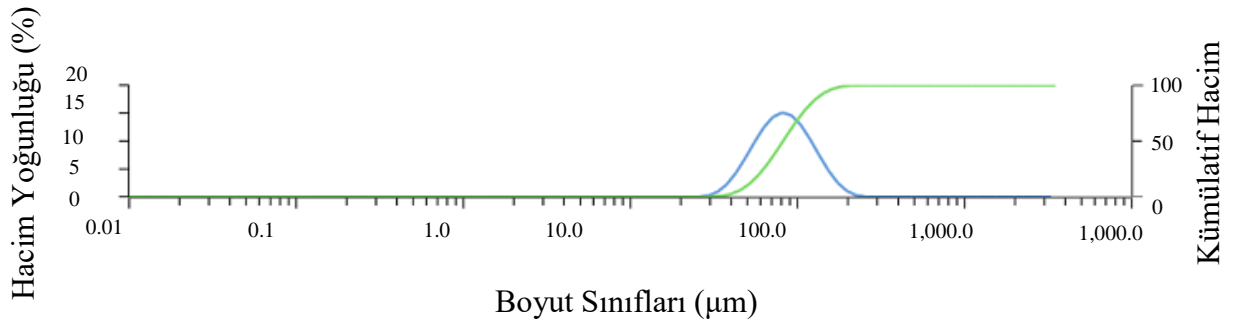
Çalışmada kullanılan farklı tane boyutlarındaki tufallerin parçacık boyut dağılımı Malvern Mastersizer 3000 kullanılarak Zeta Potansiyel Ölçme Deneyi ile Antalya ADOÇİM Çimento Beton Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından gerçekleştirilmiştir.

Tufal tozlarının analizleri partikül boyut dağılımının sıklığına bağlı ortalama bir değer alınarak olarak alınarak tablo 3.1.'de verilmiştir. Ayrıca her tane boyuna ait analiz sonuçlarının grafikleri de aşağıda verilmiştir.

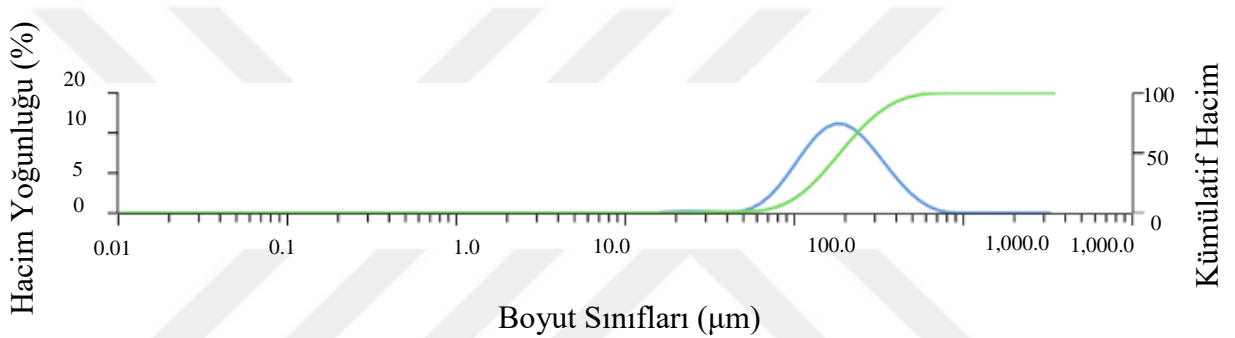
Tablo 3.1. Tufal tane boyu analizi.

Tufal Tane Boyu Kodu	Ortalama Tane Boyu ( $\mu$ )
1	30
2	60
3	90
4	120
5	200

Şekil 3.1. 1 numaralı tane boyuna sahip  $Fe_2O_3$ 'ün Hacim yoğunluğu/Kümülatif hacim dağılımı grafiğiŞekil 3.2. 2 numaralı tane boyuna sahip  $Fe_2O_3$ 'ün Hacim yoğunluğu/Kümülatif hacim dağılımı grafiğiŞekil 3.3. 3 numaralı tane boyuna sahip  $Fe_2O_3$ 'ün Hacim yoğunluğu/Kümülatif hacim dağılımı



Şekil 3.4. 4 numaralı tane boyuna sahip Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün Hacim yoğunluğu/Kümülatif hacim grafiği



Şekil 3.5. 5 numaralı tane boyuna sahip Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün Hacim yoğunluğu/Kümülatif hacim grafiği

### 3.2.3. PE Matrisli Tufal Katkılı Kompozitlerin Sentezi

Kompozit malzeme eldesi için öncelikli olarak Pe peletler ve 5 farklı tane boyutuna sahip takviye elemanları adsorbe olmuş nemin uzaklaştırılması amacıyla 80°C' de 12 saat boyunca etüvde kurutulmuştur. Kurutma işlemi ardından malzemelerin karıştırma işlemine geçilmiş ve ağırlıkça farklı bileşimlerde, farklı tane boyutlarında Tufal katkı PE matrisli kompozitler şekil3.7.'de gösterilen aynı yönde dönen çift vidalı ekstrüder(vida çapı D=16 mm, vida boy/çap oranı (L/D)=40) (Gülner/Türkiye) kullanılarak ergiyik harmanlama metodu ile üretilmiştir. Çalışmada tablo 3.2.'deki gibi ağırlıkça %2.5, 5, 10, 20 tufal tozları kullanılarak numuneler üretilmiştir ve tane boyutu ile % bileşime bağlı olarak numuneler kodlanmıştır. Örneğin; PE12,5' da 1 tane boyutunu temsil ederken 2,5 tufalin % bileşimini temsil etmektedir.

Tablo 3.2. Çalışmada kullanılan numunelerin bileşimi

Tane Boyu	Tufal (ağ.%)	Numune Kodu
1	2.5	PE12,5
	5	PE15
	10	PE110
	20	PE120
2	2.5	PE22,5
	5	PE25
	10	PE210
	20	PE220
3	2.5	PE32,5
	5	PE35
	10	PE310
	20	PE320
4	2.5	PE42,5
	5	PE45
	10	PE410
	20	PE420
5	2.5	PE52,5
	5	PE55
	10	PE510
	20	PE520



a.



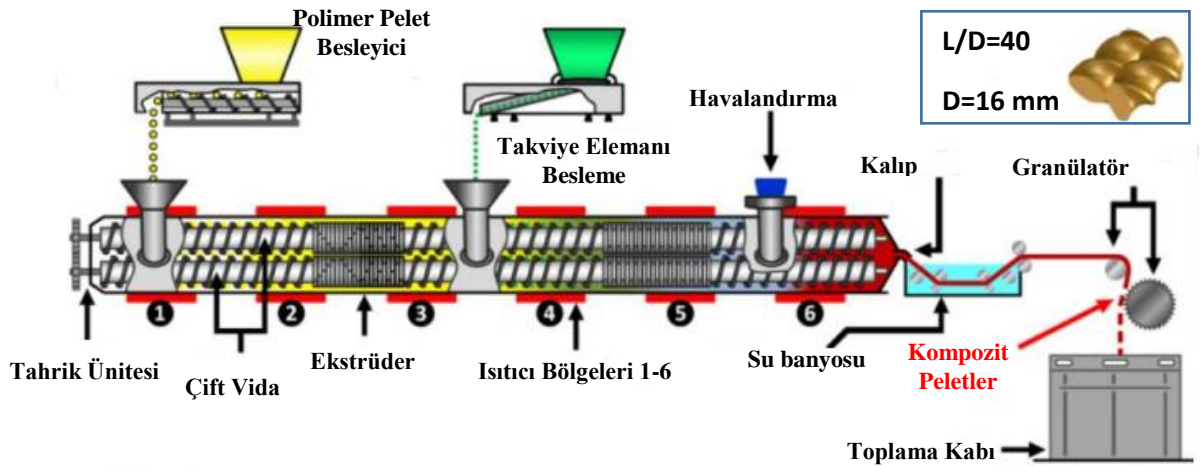
b.

Şekil 3.6. Toz tufal (a.) ve saf PE peletler (b.)

Kurutulan PE peletler (Şekil3.6 (a.)) ve takviye fazları 350 devir/dakika(d/dak) vida hızına sahip ekstrüdere beslenmiştir. Üretimde ekstrüder cihazında bulunan altı sıcaklık bölgesinin (beslemeden kalıp çıkışına doğru) sıcaklıkları sırası ile 50, 165, 175, 180, 175 ve 165 °C şeklinde ayarlanmıştır. Eriyik halinde ekstrüderden çubuk formunda çıkan kompozitler bir su banyosundan geçirilerek soğutulmuş ve böylece katılaşması sağlanmıştır. Ardından boyutların küçültülmesi için granülör içerisindeki yüksek hızla dönen bıçakla doğranmışlardır ve granül halinde kompozit peletler (Şekil 3.9.) elde edilmişlerdir. Kompozit peletler, kalıplamadan önce tekrar 12 saat boyunca 80 °C'de kurutulmuş ve homojen bir karışım elde edebilmek için bir kaşık yardımı ile karıştırılmışlardır.



Şekil 3.7. Gülner Makine 16 mm çift vidalı ekstrüder cihazı



Şekil 3.8. Çift vidalı ekstrüderin şematik gösterimi



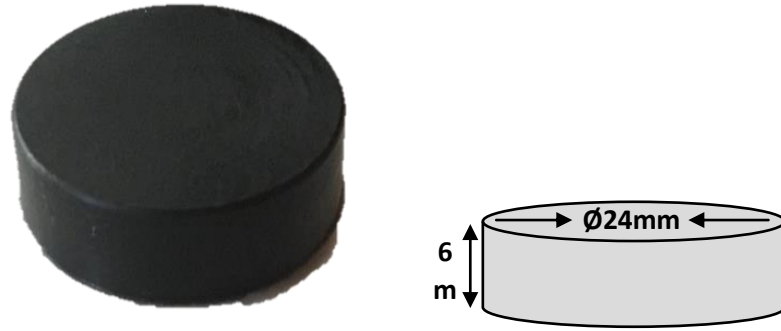
Şekil 3.9. PE Matrisli kompozit peletler

Üretimin ikinci adımında pelet formundaki bu kompozit karışımlar çekme, aşınma, elektriksel ve yapısal analiz test numuneleri formuna şekil 3.10.'da gösterilen dikey enjeksiyon cihazı (YH-15V, Yuhdak Makine, Taiwan) ile kullanılarak şekillendirilmişlerdir. Dikey enjeksiyon cihazında kalıp sıcaklığı 92 °C seçilirken nozul sıcaklıkları sırasıyla 126°C, 133°C, 126°C olarak seçilmiştir.



Şekil 3.10. YH-15V (Yuhdak) Dikey enjeksiyon kalıplama cihazı





Şekil 3.11. Üretilen PE matrisli kompozit aşınma numunesi ve numune ebatları

LOİ yanma testi için ise 12 ml'lik hacme sahip şekil 3.12.'de gösterilen sıcak pres ile (Xplore IM 12, The Netherlands) test numuneleri uygun forma şekillendirilmiştir. Kovan ve kalıp sıcaklığı sırasıyla 200 °C ve 28 °C olarak seçilmiştir. Enjeksiyon basıncı ise; 0.1 bara sabitlenmiştir. Ayrıca saf haldeki Pe'de kontrol numunesi olarak aynı şartlarda enjeksiyonda basılarak kalıplanmıştır. Elde edilen numuneler LOİ testi için standart olan  $30 \times 6.5 \times 3.2 \text{ mm}^3$  ölçülerindedir.



Şekil 3.12. Xplore IM 12 Enjeksiyon kalıplama cihazı

#### 3.2.4. Yapısal Karakterizasyon

Tufalin kimyasal bileşiminin belirlenmesi için dalga boyu dağılımlı x - ışını floresan spektrometresi (XRF)(PanalyticalAxıos Advanced)kullanılmıştır. Kompozitlerin ve tufalin kristal yapıları, X-ışını kırınımı (XRD) ile  $\text{CuK}\alpha$  radyasyonu kullanılarak bir X-

ışını difraktometresi (Bruker AXS-D8 Advanced, Almanya) ile incelenmiştir. Ayrıca hem saf PE'ye hem de PE5 serisi kompozitlere FT-IR analizi gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.5. Mekanik Özellikler

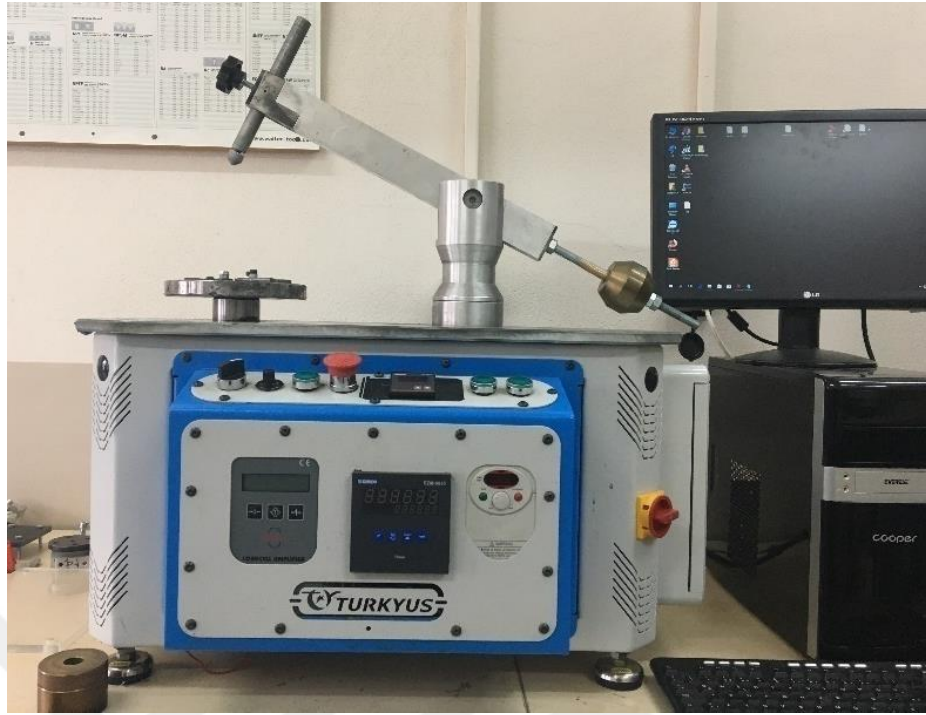
Kompozitlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme testi ve Shore sertlik ölçümü yapılmıştır. Çekme testleri max. 1 KN yük hücresi kapasitesine sahip Devotrans DVT model (DVT BE 161068, Türkiye) test cihazı kullanılmıştır. Çekme testleri, köpek kemiği (dog-bone) şeklinde olan örnekler üzerinde 100mm/dak'lık bir hızda  $10\pm 2$  °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Kompozitlerin sertlik değerleri ise numunelerin sertlik ve aşınma özellikleri arasındaki ilişkiyi tespit edebilmek adına ASTM D2240 standardına uygun bir Shore D sertlik test cihazı (Bareiss HPE II, Almanya) kullanılarak ölçülmüş. Ölçüm sırasında örnek numune üzerinden beş rastgele sertlik ölçümü alınarak ortalamaları hesaplanmıştır.

### 3.2.6. Sürtünme ve Aşınma Testleri

Pe matrisli numunelerin sürtünme testleri klasik kuru kayma şartları altında bir pin/ball-on-disk konfigürasyonunda tasarlanan bir aşınma test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dairesel disk üzerine yatay olarak yerleştirilen numuneye sabit yük kolu yardımıyla normal kuvvet ( $F_n$ ) iletebilmektedir. Çevresel hıza paralel yönde (normal yüke dik yönde) oluşan sürtünme kuvveti ( $F_s$ ) ise dönme hareketinin başlamasından itibaren sabit yük altında aksel olarak oluşan kuvvetleri algılayabilen sensör yardımı ile deney süresince kaydedilebilmekte ve böylece teste ait sürtünme katsayısı hesaplanabilmektedir.

Çalışmamızda dairesel aşınma, sürtünme için numunelere sırasıyla 7ml ve 11 ml olmak üzere iki farklı dairesel aşındırma çapı ayarlanmıştır ve 30 dakika test süresi ile sırasıyla 10N (7ml'de) ve 15N (10ml'de) yükler uygulanmıştır. Test süresince yük hücresi sensörü ile kaydedilen sürtünme kuvvetlerinin hesaplanması ile sürtünme katsayıları elde edilmiştir.

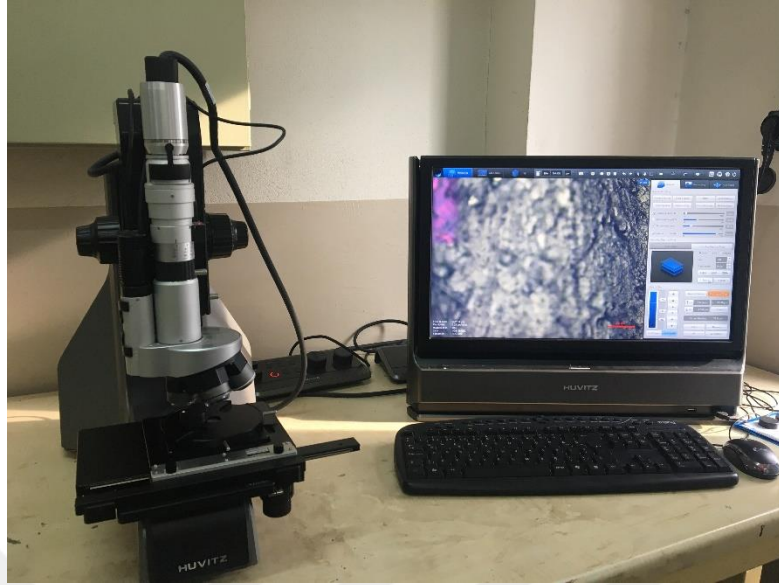


Şekil 3.13. Pin On Disk aşındırma test cihazı (Turkyus Podwt)



Şekil 3.14. Aşınma test anı

Sürtünme sonucu meydana gelen hacim kaybı için ise şekil 3.15.'de görülen optik profilometre (Huvitz HDS-5800) kullanılmıştır. Optik profilometre ile dairesel aşınma izlerinin 3 boyutlu görüntülemesi yapılmış ve iki farklı bölgeden beşer aşınma izi genişliği ( $\text{mm}^2$ ) alınarak ortalaması alınan değerler dairesel aşınma izinin çapı ( $\text{mm}$ ) ile çarpılarak sürünme katsayıları ( $\text{mm}^3$ ) hesaplanmıştır.



Şekil 3.15. Optik profilometre (Huvitz 5800)

Numunelerin aşınma testini gerçekleştirmek için şekil 3.16'da gösterilen Taber marka 5135 model abrazif aşınma test cihazı kullanılmıştır. Abrazif aşınma testi için toplam test süresi 10 dak olarak ayarlanmıştır. Ayrıca yapılan tüm bu testler oda sıcaklığında ( $23 \pm 2$  °C) ve atmosfer koşullarında (nispi nem:  $\%28 \pm 2$ ) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.16. Taber aşınma cihazı ve aşınma anı

### 3.2.7. Fiziksel Özellikler

Çalışmamızda polimerlerin fiziksel özelliklerinden birisi olan elektriksel özelliklerin belirlenebilmesi için iletkenlik ölçümü yapılmıştır. Saf PE ve kompozitlerin elektriksel

iletkenlikleri özel üretim bir cihaz kullanılarak 4 nokta- prob yöntemi ile ölçülmüştür. Testler oda sıcaklığında ( $23 \pm 2$  °C), atmosfer koşullarında, 6 ve 5 Volt parametrelerinde gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.8. Termal Özellikler

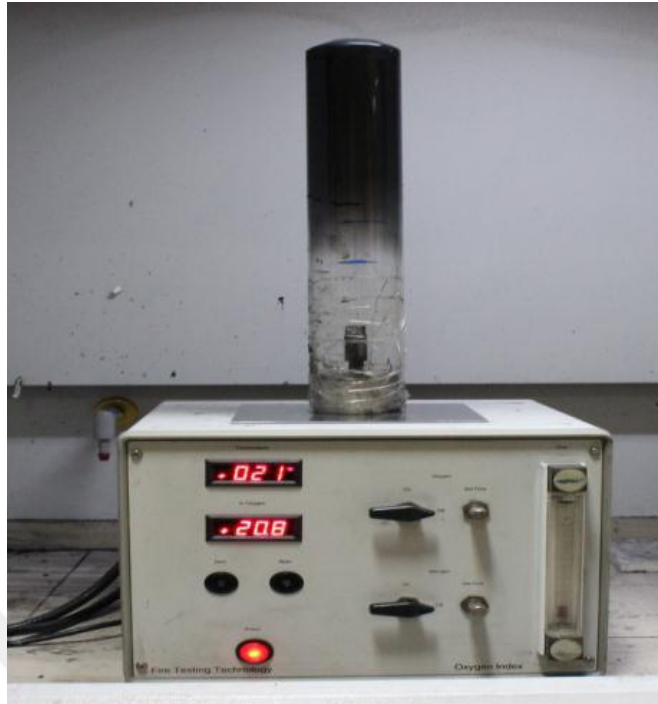
Polimer malzemelerin davranışları sıcaklığa bağlıdır ve genel olarak tüm malzemelerin termal özelliklerinin belirlenmesi hem sanayi için hem de araştırma faaliyetleri için önemlidir. Bu nedenle çalışmamızda elde edilen polimerler kompozitlerin termal davranışlarını (amorf, kristal ve yarı kristal yapı, Camı Geçiş Sıcaklığı, Erime ve Kristalleşme Sıcaklığı gibi...) anlamak adına DSC-TG (Diferansiyel taramalı Kalorimetre- Termo-Gravimetri) ve DMA (Dinamik mekanik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir.

DMA deneyleri, tek mesnetli eğme modunda (1 Hz frekans), PerkinElmer DMA 8000 (PerkinElmer, Inc. ABD) cihazı ile gerçekleştirilmiş ve testlerde 7,20 x 4,80 x 2,40 mm<sup>3</sup> boyutundaki numuneler kullanılmıştır. Sıcaklık modu -50 ila +90 °C arasında değiştirilerek testler tamamlanmıştır.

DSC-TG hesaplamaları ise Hitachi STA 7300 cihazı ile gerçekleştirilmiş ve testlerde granül halinde numuneler kullanılmıştır. Test için hazırlanan kompozitlerden 3-4 mg arasında numuneler alınmış ve kuru havada 50 °C'den 350 °C'ye kadar 10 °C / dakika hızı ile ısıtılarak gerçekleştirilmiştir.

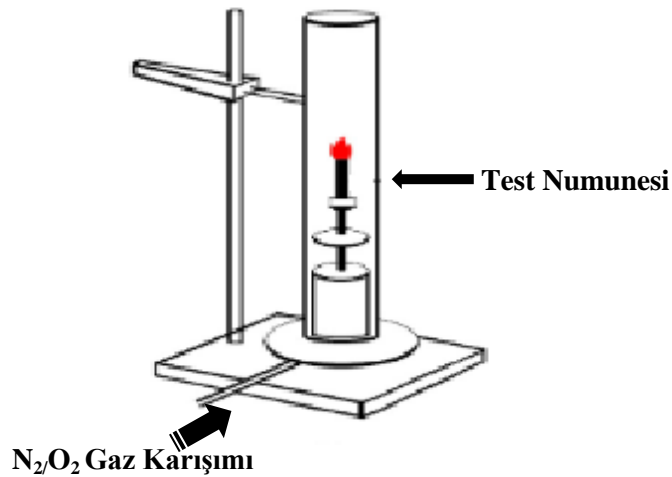
### 3.2.9. LOİ Yanma Testi

Polimer malzemelerin yanma ve tutuşmaya olan eğilimlerini belirlemede yaygın olarak kullanılan LOI test metodu ile PE matrisli kompozit numunelerin yanmasının devamı için gerekli olan en az miktardaki oksijen konsantrasyonubelirlenmeye çalışılmıştır. Bunun içinFire TestingTechnology markalı LOI test cihazı (Şekil 3.17.) kullanılmıştır.



Şekil 3.17. LOI Test cihazı

Test için ilk olarak şekil 3.17.'de verilen LOI test düzeneğinde numunedekikey olarak düzenekteki cam borunun merkezine yerleştirilmiştir. Ardından farklı konsantrasyonlarda homojenize edilmiş olan oksijen-azot gazı karışımı şeffaf baca altından yukarı doğru verilerek numune tutuşturulmuş ve numunenin 180 saniye boyunca yanmasının devamlılığı ya da numune boyunun 50 mm'lik bölümünün yandığı sırada harcanan en az oksijen miktarı ölçülmüştür.



Şekil 3.18. LOI Test düzeneği

### 3.3. Test Sonuçları ve Tartışma

#### 3.3.1. Yapısal Özellikler

Çalışmada takviye elemanı olarak kullanılmış olan tufal tozlarının kimyasal bileşiminin belirlenmesi için yapılan XRF analiz sonuçları tablo.3.3.'de görülmektedir. XRF analizi beş farklı tane boyuna da yapılmıştır ve elde edilen sonuçlardan görüldüğü üzere tufal tozları içerisinde ortalama en çok %92,25 oranında  $Fe_2O_3$  ile beraberinde eser miktarlarda %0,85  $SiO_2$ , %0,50  $MnO$  ve %0,10 oranında  $P_2O_5$  gibi farklı safsızlıklar içermektedir.

Tablo 3.3. Farklı tane boyutlarındaki tufal takviye elemanının XRF analiz sonuçları

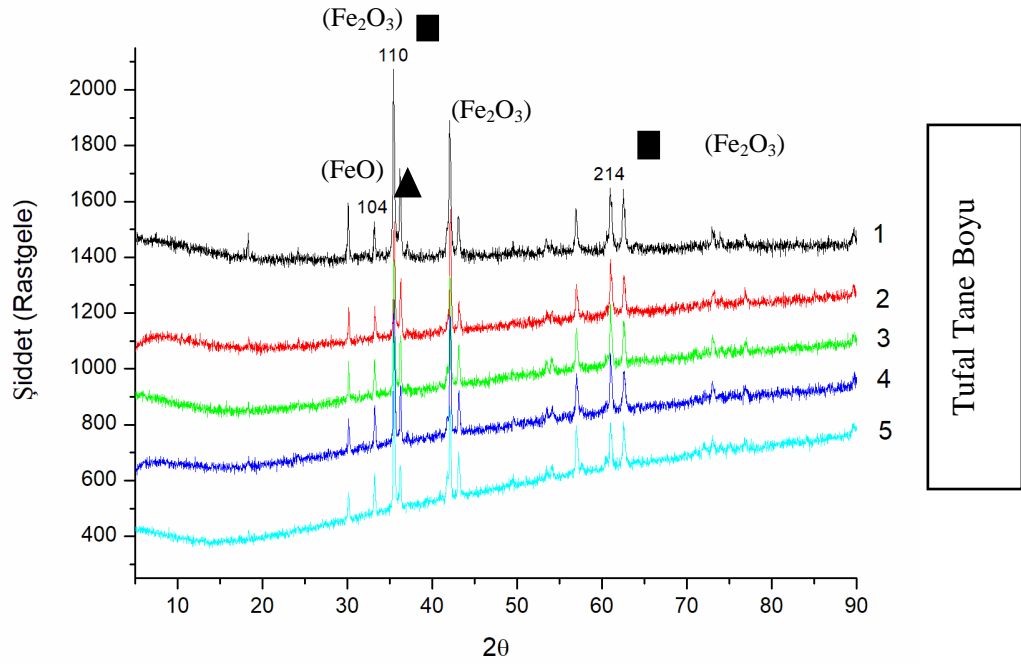
1 Nolu Tufal Tozu	
İsim	%
$Fe_2O_3$	96.51
$SiO_2$	1.32
$MnO$	0.55
$MgO$	0.40
$CuO$	0.26
$Al_2O_3$	0,26
$Na_2O$	0.22
$P_2O_5$	0.18
$Co_3O_4$	0,16
$CaO$	0.09
$SO_3$	0.06
2 Nolu Tufal Tozu	
İsim	%
$Fe_2O_3$	93,09
$SiO_2$	0,79
$MnO$	0,53
$CuO$	0,17
$MgO$	0,13
$P_2O_5$	0,11
$Al_2O_3$	0,08
$Na_2O$	0,07
$Cr_2O_3$	0,05

Tablo 3.3'ün devamı...

3 Nolu Tufal Tozu	
İsim	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	91,23
SiO <sub>2</sub>	0,74
MnO	0,50
CuO	0,18
Na <sub>2</sub> O	0,16
MgO	0,09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05
4 Nolu Tufal Tozu	
İsim	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	91,82
SiO <sub>2</sub>	0,74
MnO	0,50
CuO	0,18
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09
MgO	0,06
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05
Na <sub>2</sub> O	0,05
5 Nolu Tufal Tozu	
İsim	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	88,65
SiO <sub>2</sub>	0,67
MnO	0,45
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07
CuO	0,06
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05

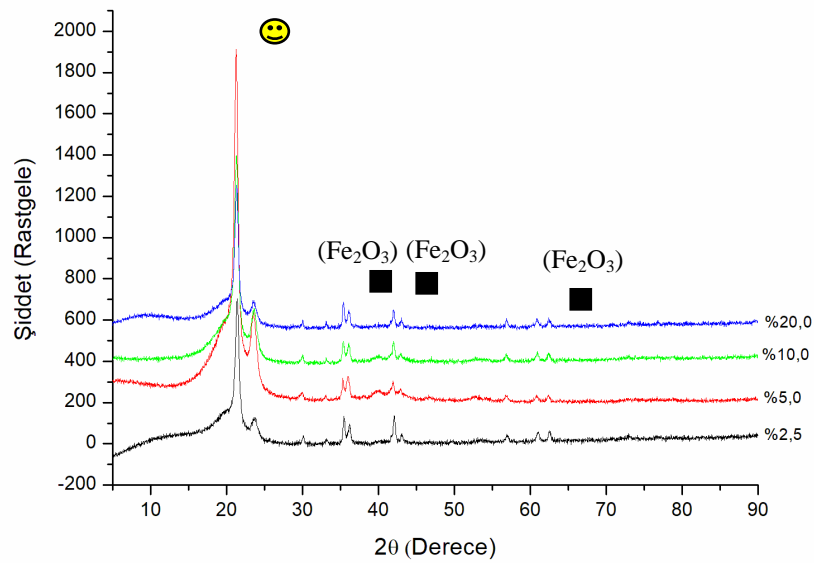
Takviye elemanı tufale ait XRD pikleri şekil 3.19.'da görülmektedir. Grafikte 33,16° (▲), 35,43° (■) ve 62,51° de (■) (2θ) gözlenen pikler sırasıyla [104], [110] ve [214] α-kristali yansımalarına karşılık gelmektedir [90].





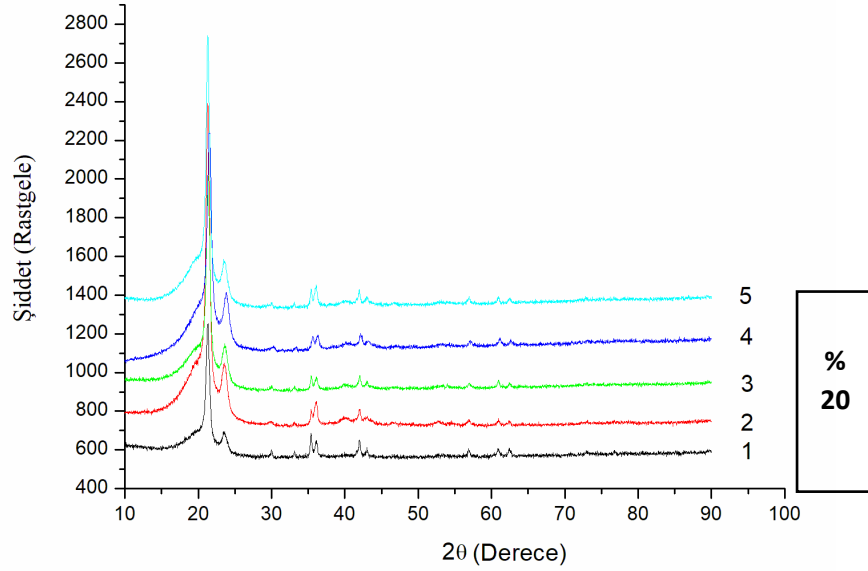
Şekil 3.19. Takviye elemanı XRD pikleri

Şekil 3.20.'de PE12,5, PE15, PE110, PE120 kodlu kompozitlerin konsantrasyona bağlı XRD pikleri görülmektedir.  $21.1^\circ$  ve  $23.8^\circ$  (☺)de ( ) gözlenen pikler PE'ye ait karakteristik piklerin yansımalarına karşılık gelirken yukarıda şekil.3.19'daki grafikte de belirtildiği üzere  $35,43^\circ$  (■) ve yaklaşık olarak  $42^\circ$ 'de tufale ait karakteristik pikler görülmektedir.



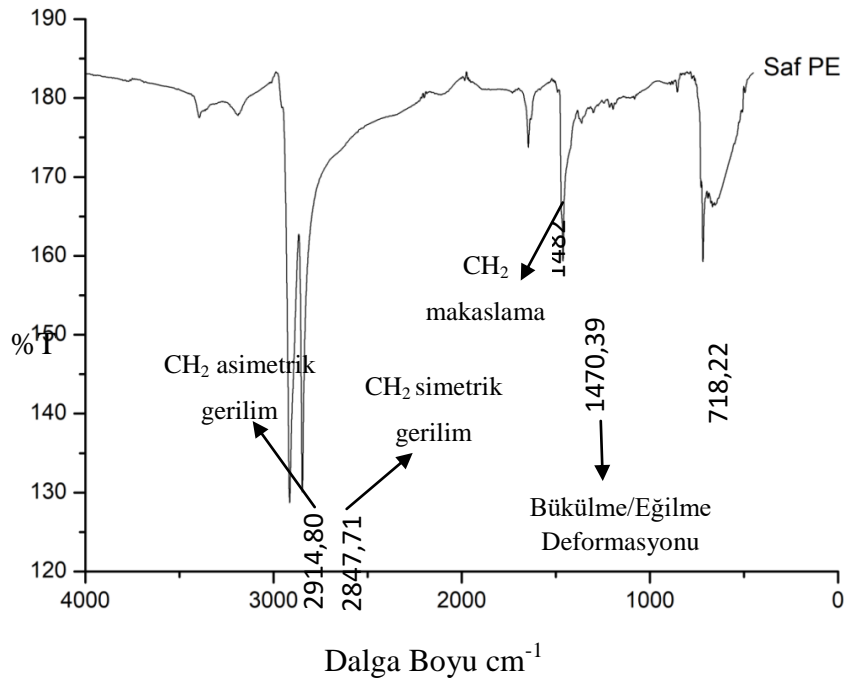
Şekil 3.20. PE1 serisi kompozitlerin takviye elemanı konsantrasyonuna bağlı XRD pikleri

Şekil 3.21'de ise PE120(1), PE220(2) PE320(3), PE420(4), PE520(5) kompozitlerin tane boyuna bağlı XRD pikleri gösterilmektedir. Kompozitler üzerinde tane boyunun etkisi incelenmiştir.



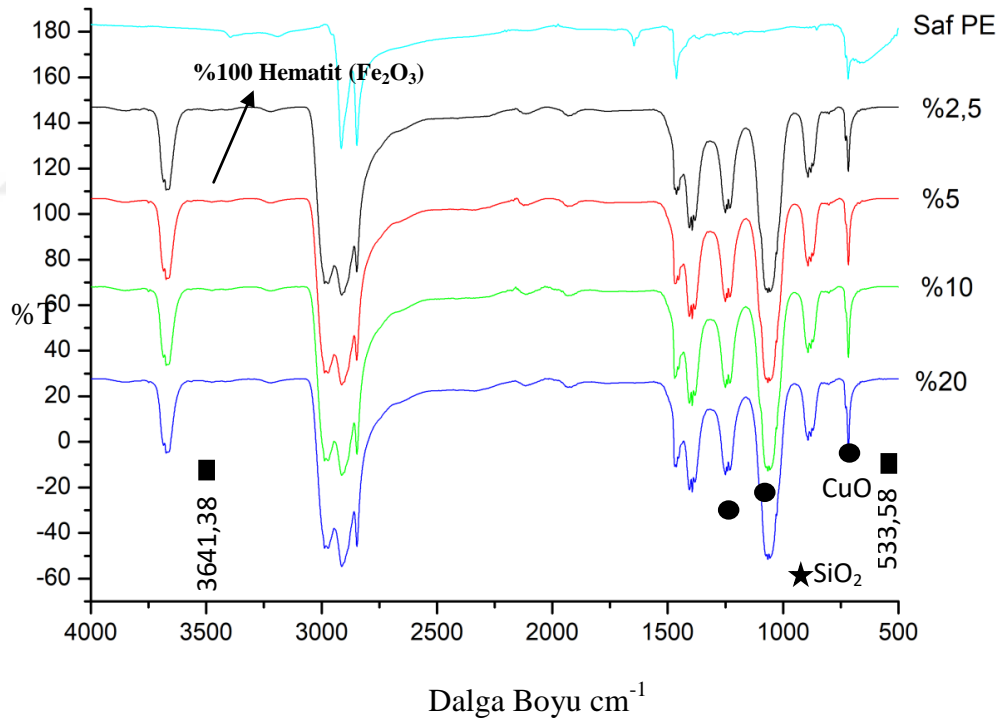
Şekil 3.21. Kompozitlerin takviye Elemanı Tane Boyuna Bağlı XRD Pikleri

Saf PE'ye ait FT-IR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi) spektrumları, şekil 3.22.'de görülmektedir. Saf PE'ler, yaklaşık  $2914,8 \text{ cm}^{-1}$  ve  $2847,7 \text{ cm}^{-1}$ 'de C-H bağlarının asimetrik ve simetrik gerilme titreşimine karşılık gelen pikler göstermektedir [91].



Şekil 3.22. AYPE'nin FT-IR spektrumu

Şekil 3.23'te ise saf PE ve kompozitlerin FT-IR analizi sonuçları karşılaştırılmıştır. Kompozitler yaklaşık  $3641\text{ cm}^{-1}$  ve  $533\text{ cm}^{-1}$  de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 'ün karakteristik pik noktalarına sahiptir. Şekil 3.23.'te gösterilen Hematit,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Tufal)'ün mineral adıdır ve  $3641\text{ cm}^{-1}$ 'deki görülen bu pik %100 Hematite karşılık gelmektedir [92]. Ayrıca yaklaşık olarak  $700\text{ cm}^{-1}$  ve  $1500\text{ cm}^{-1}$  arasında farklı piklerin varlığı görülmektedir. Bu nedenle takviye elemanının kimyasal yapısında mevcut olan safsızlıklardan yola çıkılarak yapılan literatür araştırması ile  $1150\text{ cm}^{-1}$  de  $\text{SiO}_2$  ( ), ve  $675\text{ cm}^{-1}$ ,  $1250\text{ cm}^{-1}$ ,  $1400\text{ cm}^{-1}$  aralıklarında ise  $\text{CuO}$  ( )'ya ait karakteristik piklerin varlığı tespit edilmiştir [93]. Yaklaşık  $2750\text{ -}3000\text{ cm}^{-1}$  arasında mevcut olan pikler ise saf PE ve kompozitlerde de mevcut olup buradan yola çıkarak elde edilen genel sonuç PE'nin yapısında hiçbir bozunmanın meydana gelmemiş olmasıdır. Yani takviye elemanı ile matris eleman arasında hiçbir etkileşim gerçekleşmemiştir.



Şekil 3.23. Saf PE ve PE5 serisi kompozitlerin FT-IR analiz sonuçları

### 3.3.2. Mekanik Özellikler

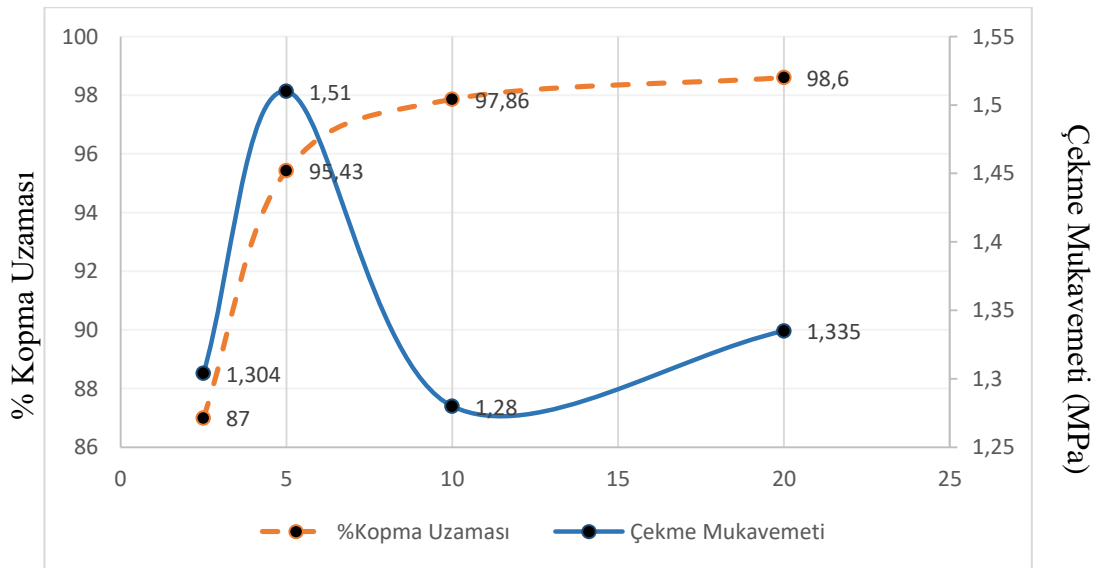
#### 3.3.2.1. Çekme Özellikleri

Saf PE'nin ve tufal takviyeli kompozitlerin ilgili çekme testi verileri ise tablo 3.4. ve tablo 3.5.'te listelenmiş olup temel mekanik özellikleri belirlenirken doğru sonuç

alabilmek adına tüm numunelere üçer kez çekme testi tekrarlanmış ve tabloda ortalama değerleri verilmiştir. Polietilen sahip olduğu düşük sürtünme özelliği ve dayanıklılığı ile bugün mühendislik plastiklerinin önemli gruplarından birini oluşturur. Ayrıca polietilen esnek bir plastiktir. Tufalin ise polietilen içerisine takviye fazı olarak kullanımına literatürde rastlanılmamış olup, PE polimeri içerisinde takviye fazı olarak kullanılmasının kompozitin mukavemet özelliklerinde bir artışa yol açması beklenir. Fakat tablo 3.4. ve şekil 3.24.'te görüldüğü üzere ağırlıkça takviye fazının artışı kompozitlerin çekme dayanımı üzerinde belirgin bir etki yaratmaz iken, kopma uzamasının kompozisyon artışı ile artışı tespit edilmiştir. Kopma mukavemetinde belirgin artışın sebebi ise takviye elemanı tufalin kopma esnasında sinerjik etki yaratarak bağ kopma kuvvetini arttırdığından kaynaklı olduğu söylenebilir.

Tablo 3.4. Saf PE ve kompozitlerin konsantrasyonabağı çekme özellikleri

Numune Kodu	Çekme Özellikleri	
	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kopma Uzaması (%)
PE12,5	1,304 (±) 0,27	87 (±) 15,35
PE15	1,510(±) 0,01	95,4 (±) 9,92
PE110	1,280(±) 0,18	97,8(±) 12,33
PE120	1,335(±) 0,17	98,6(±) 10,04
Saf PE	1,252 (±) 1,17	83,2 (±) 13,57

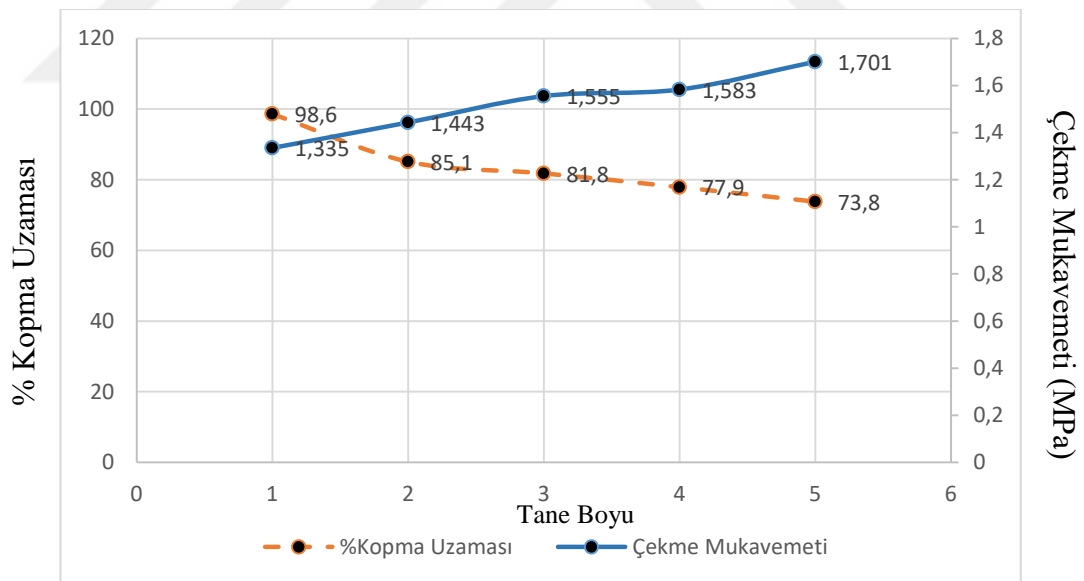


Şekil 3.24. Takviye elemanı % bileşiminin PE/Tufal kompozitlerinin mekanik özellikleri üzerine etkisi

Takviye fazı tane boyunun kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi ise tablo 3.5. ve şekil 3.25.'te görülmektedir. Şekil 3.25.'ten görülebileceği üzere kompozitlerin çekme mukavemeti takviye elemanı tane boyu artışı ile artış gösterirken, kopma (%) uzama değerleri artan tane boyu ile azalma göstermektedir.

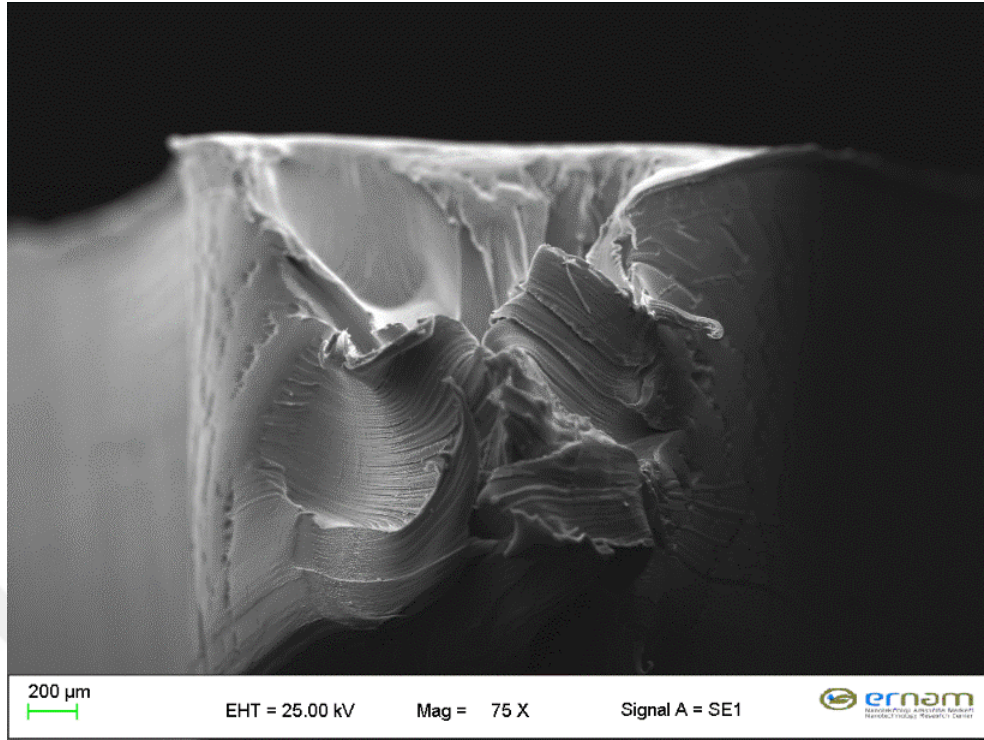
Tablo 3.5. Saf PE ve kompozitlerin tane boyuna çekme özellikleri

Numune Kodu	Çekme Özellikleri	
	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kopma Uzaması (%)
PE120	1,335 (±) 0,17	98,6 (±) 10,4
PE220	1,409(±) 0,10	85,1 (±) 2,72
PE320	1,426 (±) 0,35	81,8 (±) 8,70
PE420	1,617(±) 0,12	77,9 (±) 5,55
PE520	1,748 (±) 0,78	73,8 (±) 4,09
Saf PE	1,447 (±) 1,17	83,2 (±) 13,57

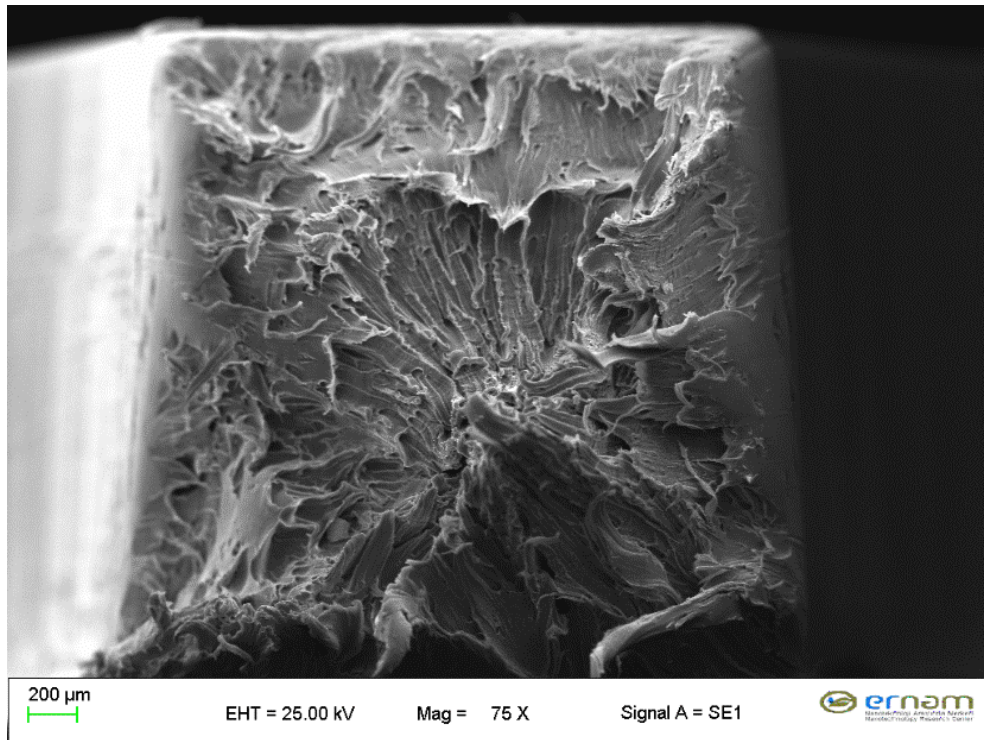


Şekil 3.25. Takviye elemanı tane boyunun PE/Tufal kompozitlerinin mekanik özellikleri üzerine etkisi

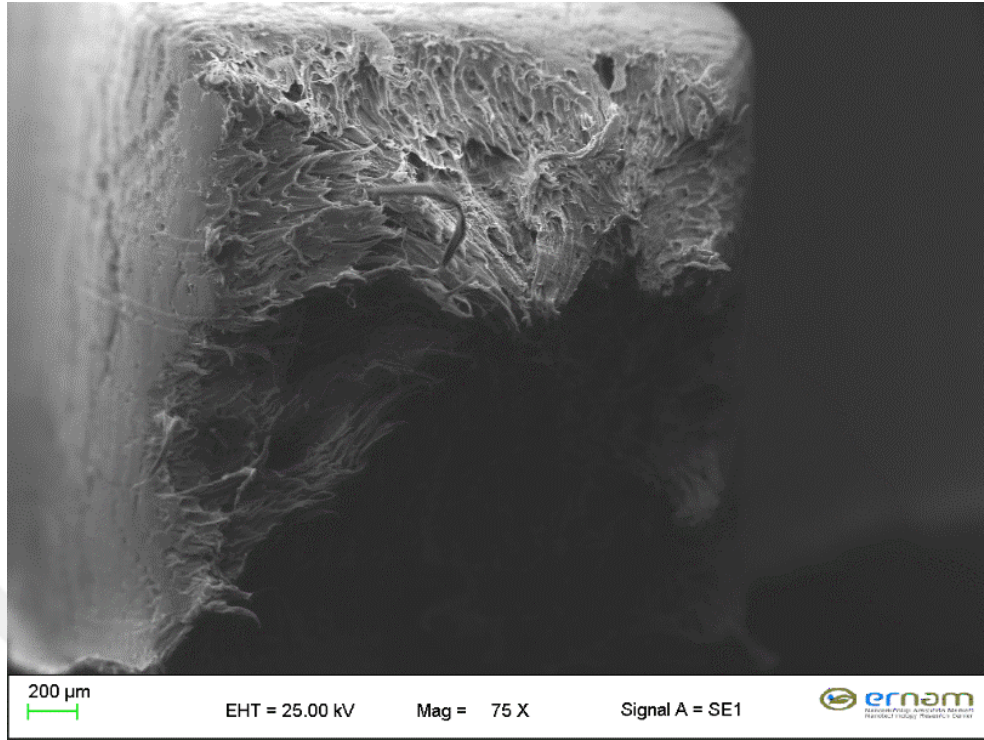
Numunelerin kopma bölgelerinden alınan SEM görüntüleri şekil 3.26. - şekil 3.29.'da görülmektedir.



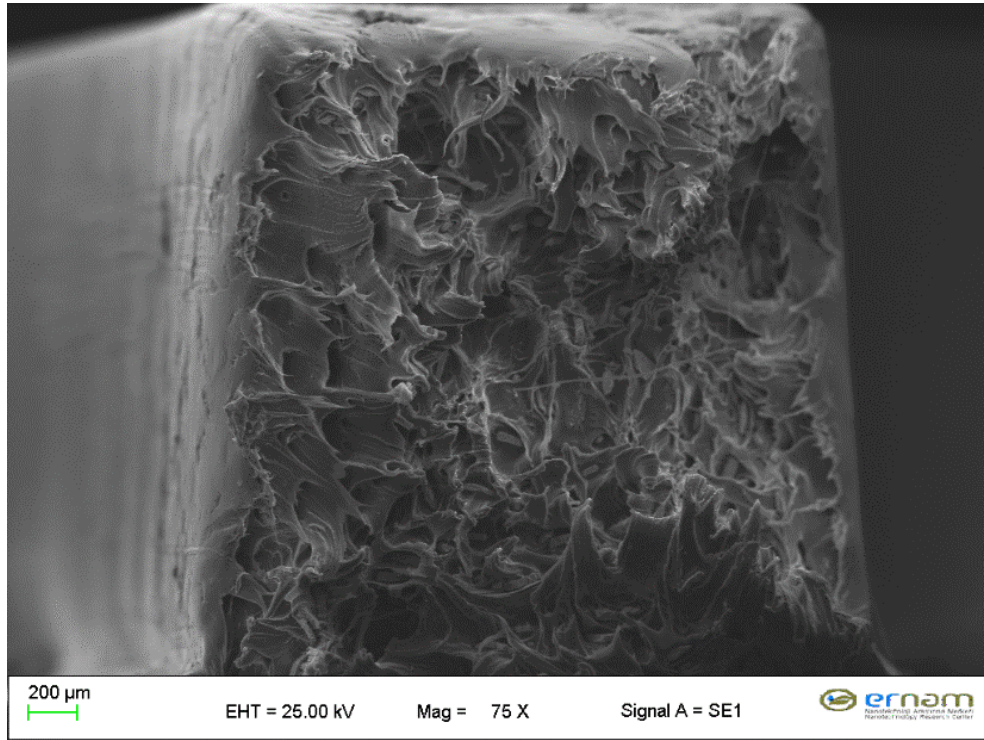
Şekil 3.26. Saf PE'nin çekme testi sonrası kopma bölgesinden alınan SEM görüntüsü



Şekil 3.27. PE12,5'in çekme testi sonrası kopma bölgesinden alınan SEM görüntüsü



Şekil 3.28. PE120'nin çekem testi sonrası kopma bölgesi SEM görüntüsü



Şekil 3.29. PE520'nin çekme testi sonrası kopma bölgesi SEM görüntüsü

### 3.3.2.2. Sertlik Ölçümü

Sertlik terimi, malzemelerin mukavemetinin değerlendirilmesinde (çeliklerde çekme mukavemeti gibi), aşınma mukavemeti, işlenebilirlik vb. gibi önemli kavramlara öncülük eder. Dolayısıyla malzeme sertliklerinin ölçümü, önemli kalite kontrol kavramlarından biridir. Pek çok sertlik ölçme metodları (Karşılaştırılmalı (Mohs ve Breithaupt), Statik ( Brinell, Vickers, Rockwell, Knoop, Grodinski) Dinamik sertlik ölçüm metodları...) mevcut olup çalışmamızda ise polimerler lastikler ve elastomerler için kullanılan Shore sertlik ölçüm metodlarından (Shore A ve ) shore D metodu kullanılmıştır. Test sırasında örneklerin çeşitli bölgelerinden beş farklı sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir ve ortama ölçüm değerleri, standart sapma değerleri tablo 3.6.'da listelenmiştir. Tablo 3.7.'de ise takviye elemanı % konsantrasyon değerleri(2,5-5-10-20) her bir katkılanmış numune için ayrı ayrı (Örneğin; PE12,5, PE2,5, PE32,5, PE42,5 ve PE52,5 için standart sapma değeri; 0,48) sapma değerleri listelenmiştir.

Şekil 3.30'da görülen grafikte PE1, PE2, PE3, PE4 ve PE5 serileri verilmiştir ve böylece hem takviye elemanı %bileşiminin etkisi hem de tane boyu etkisi gözlenebilmiştir. Tablo 3.6. ve Şekil 3.30. üzerinden yapılan değerlendirmeler ile takviye elemanı % konsantrasyonu arttıkça sertlik değerinin de artış gösterdiği görülmektedir. Tablo 3.8 ve şekil 3.31.'de grafiğe baktığımızda ise takviye elemanı tane boyunun sertlik değerine etki etmediği görülmektedir.

Kısaca; kompozitlerin Shore D sertlik değerleri artan tufal bileşimi ile artarken tane boyunun etkisi gözlenmemiştir.

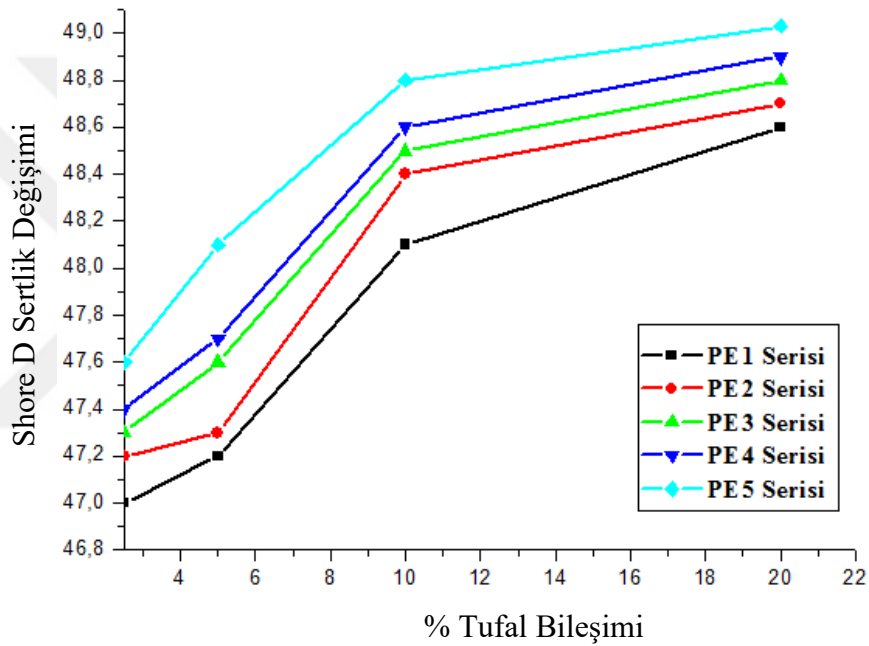
Tablo 3.6. Saf PE ve kompozitlerin kompozisyona bağlı Shore D sertlik ölçümleri

Numune Kodu	Sertlik/Shore D
SAF PE	47
PE12,5	47 (±) 0,2
PE15	47,2 (±) 0,75
PE110	48,1 (±) 0,37
PE120	48,6 (±) 0,20



Tablo 3.7. Tufal takviye elemanının beş farklı tane boyutu için her bir konsantrasyon değerinde standart sapma hesaplaması

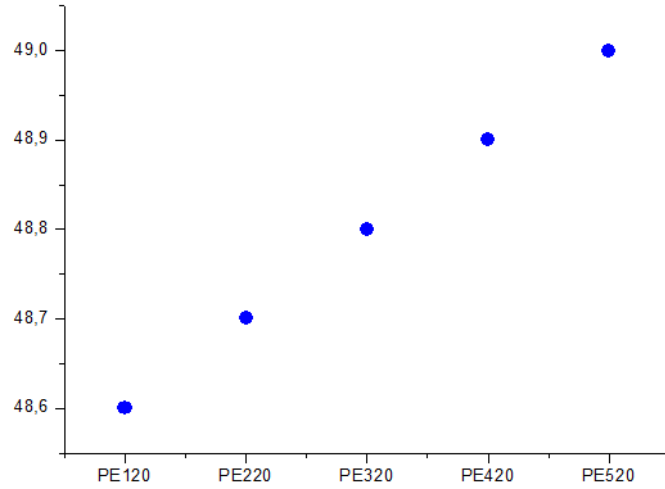
Takviye Elemanı % Konsantrason	Sertlik/Shore D
2,5	(±) 0,48
5	(±) 0,61
10	(±) 0,63
20	(±) 0,58



Şekil 3.30. % Ağırlık takviye Bileşiminin Farklı Tane Boyunda Takviye Bileşimine Sahip PE/Tufal Kompozitlerin Shore D Sertliğine Etkileri

Tablo 3.8. Saf PE ve kompozitlerin tane boyuna bağlı Shore D sertlik ölçümleri

Numune Kodu	Sertlik/Shore D
SAF PE	47
PE120	48,6 (±) 0,20
PE220	48,7 (±) 1,15
PE320	48,8 (±) 0,79
PE420	48,9 (±) 0,91
PE520	49,0 (±) 0,28



Şekil 3.31. Tane boyunun PE/Tufal kompozitlerinin Shore D sertliğine etkileri

### 3.3.3. Fiziksel Özellikler

#### 3.3.3.1. Elektriksel İletkenlik

Saf PE ve tufal katkılı kompozitlerin elektriksel iletkenlikleri ile ilgili test verileri tablo 3.9.'da gösterilmiştir. 4 nokta prob yöntemi kullanılarak ölçülen değerler Ohm Kanunu'nun formülü ile hesaplanmıştır. Ohm kanununun matematiksel formülü ise şu şekilde;  $V = IR$  olup, çalışmamızda 6 ve 5 olarak iki farklı Voltaj değeri kullanılmıştır.

Tablo 3.9. Saf PE ve kompozitlerin elektriksel iletkenlik deney sonuçları

Numune Kodu	Numune Kodu		
PE12,5	0,28	PE120	0,28
PE15	0,24	PE220	0,26
PE110	0,25	PE320	0,23
PE120	0,28	PE420	0,22
		PE520	0,2
<b>SAF PE0,25</b>			

Tablo3.9.'da görüldüğü gibi kompozitlerdeki takviye fazı içeriği arttıkça elektriksel iletkenlik üzerinde herhangi bir değişim görülmez iken takviye fazının tane boyu arttıkça kompozitlerin elektriksel iletkenlik direncinin arttığı görülmektedir.

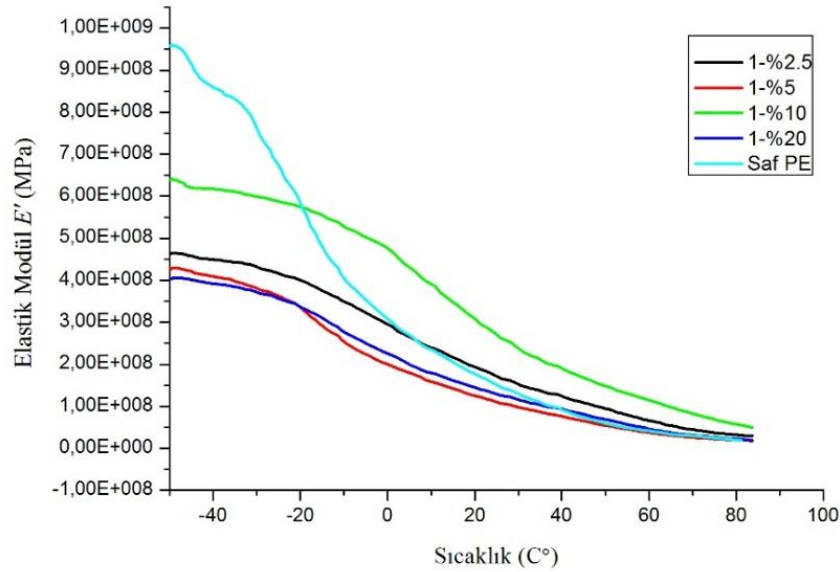
### 3.3.4. Termal Özellikler

#### 3.3.4.1. Dinamik Mekanik Analiz (DMA) Sonuçları

DMA polimerler malzemelerin viskoelastik özelliklerinin karakterizasyonu için tercih edilen güçlü bir tekniktir. DMA ile numune kontrollü frekanslar altında stres veya gerilemeye maruz bırakılır ve numunenin karşı gerilimi ölçülür. Ayrıca malzeme mekanik stres altında deforme edilirken uygulanmış kuvvete göre yer değiştirmedeki faz kaymasını ölçerek malzemenin enerji kaybı veya depolama gibi özelliklerin tayini ve tan delta ( $\delta$ ) ile karmaşık modül ve viskozite verilerinin hesaplanmasına olanak sunar [94]. Takviye elemanı (Tufal) konsantrasyonunun ve tane boyunun kompozitlerin dinamik özelliklerine olan etkisi, kompozitlerin DMA ölçümlerinin yapılması ile tespit edilmiştir.

Elastik modül kısaca bir malzemenin enerjiyi elastik olarak saklayabilmesini ifade eder. Aynı zamanda malzeme sertliğinin bir ölçüsüdür ve polimerlerin moleküler ağırlığı, kürlenme derecesi ve çapraz bağ yoğunluğu hakkında bilgi sağlamak için kullanılabilir [95]. Saf polimerin ve farklı tufal konsantrasyonuna sahip kompozitlerin elastik modül ( $E'$ ), kayıp modülü ( $E''$ ), tan  $\delta$  sıcaklık grafikleri sırasıyla şekil 3.32., şekil 3.33. ve şekil 3.34.'da görülmektedir.

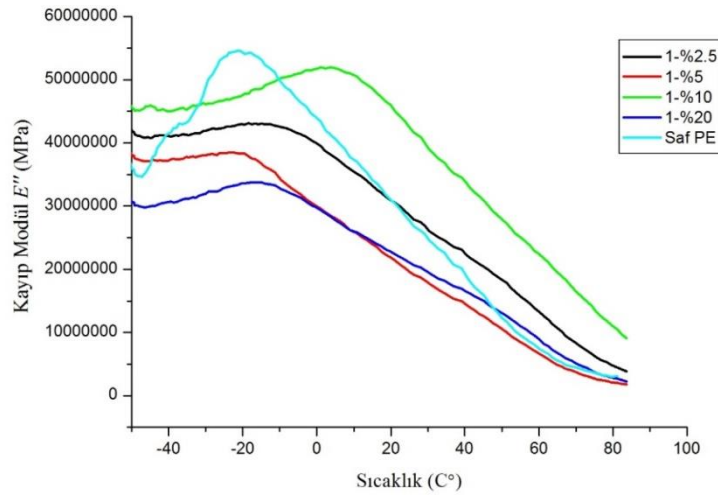
Şekil 3.32'de saf polimerin ve farklı tufal konsantrasyonuna sahip kompozitlerin elastik modülü/sıcaklık eğrilerinden görüldüğü gibi kompozitlerin ve saf PE'nin elastik modülleri PE110 haricinde oda sıcaklıklarına ulaşmadan düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca PE110'un diğer kompozisyonlara kıyasla artan sıcaklıkla zincir hareketliliğinin daha düşük olduğu dolayısıyla daha yüksek elastik modülüne sahip olduğu görülse de saf PE'nin düşük sıcaklıklarda en yüksek elastik modülüne sahip olduğu net bir şekilde görülmektedir. Diğer taraftan ortam sıcaklıklarında takviye elemanının rijitliği artırdığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.32. Saf polimer ve farklı tufal yüzdesine sahip kompozitlerin sıcaklık karşısındaki elastik modülü grafikleri

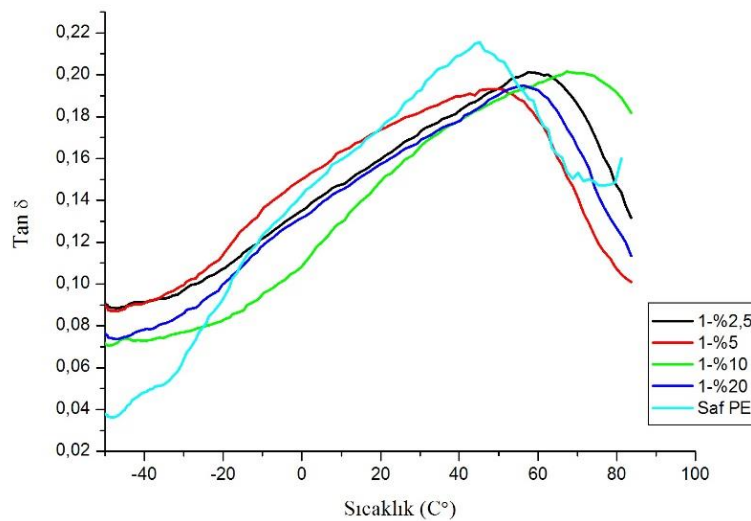
Kayıp modülü bir malzemenin enerjiyi dağıtabilme yeteneğinin bir ifadesidir. Ayrıca malzemenin ısı halinde kaybettiği deformasyon enerjisinin de ölçüsüdür. Kompozit malzemelerde ise esneklik ve bileşenlerin birbiri ile etkileşimine dair bilgi verir. Kayıp modülü piklerinin genişliğinin artmasıyla malzemenin daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu sonucu çıkarılabilmektedir.

Şekil 3.33.'deki grafik incelendiğinde, PE/Tufal kompozitlerin kayıp modüllerinin, tufal konsantrasyonundaki değişim ile saf PE'ye kıyasla değişim gösterdiği ve sıcaklıkla azaldığı görülmektedir. Bununla beraber, PE110 diğer kompozitlere ve saf PE'ye kıyasla nispeten daha yüksek kayıp modüle sahip olduğu ve PE120 haricindeki numunelerin genel olarak kayıp modülünü arttırdığı ve piklerin daha yüksek sıcaklıklara genişlediği tespit edilmiştir. Genel olarak bütün kompozitlerin oda sıcaklığından itibaren artan sıcaklıkla birlikte kayıp modüllerini azaldığı yani deformasyonlarının arttığı söylenebilir. Bunun nedeni olarak zincir hareketlenmeleri gösterilebilir. Diğer taraftan katkı elemanının saf PE'nin kayıp modülünü daha da düşürdüğü artan sıcaklıklarda bu etkinin de ortadan kalktığı genel olarak söylenebilir. Bu durumun nedeni olarak Tufal katkısının PE zincirlerinin arasına girerek zincirler arası etkileşimi azaltması gösterilebilir.



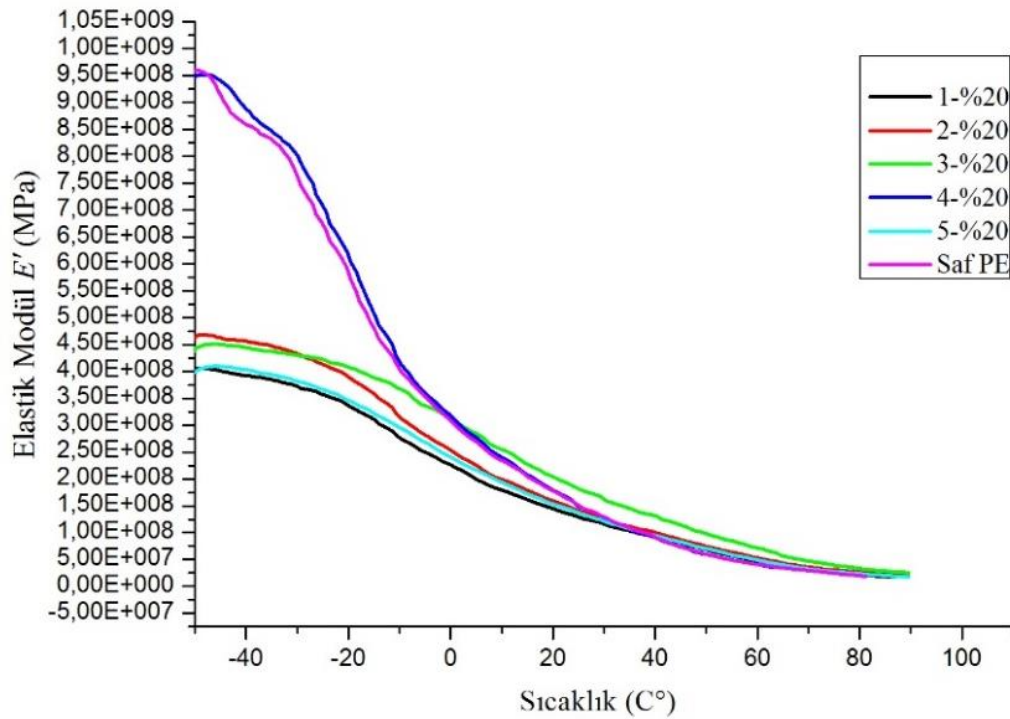
Şekil 3.33. Saf polimer ve farklı tufal yüzdesine sahip kompozitlerin sıcaklık karşısındaki kayıp modül grafikleri

Şekil 3.34.'te kompozitlerin  $\tan \delta$  piklerinin sıcaklığa göre değişim grafiği görülmektedir.  $\tan \delta$  kayıp modülün elastik modüle oranını ifade eder ve bir malzemenin enerji sönümlenme kapasitesini verir.  $\tan \delta$  pikinin göstermiş olduğu maksimum sıcaklık değeri, malzemenin  $T_g$  (camsı geçiş sıcaklığı) değerini verir. Polimerlerin molekül zincirlerinin hareketliliğinin azalması  $\tan \delta$  pikinin genişlemesine ve yüksekliğinin azalmasına neden olurken; piklerin  $T_g$ 'yi gösteren maksimum değeri daha yüksek sıcaklıklara doğru kayar. Şekil 3.32. ve 3.33'teki elastik modül ve kayıp modülü değerleri incelendiğinde, PE/Tufal kompozitlerin  $T_g$ 'lerinin tufal konsantrasyonu ile daha yüksek sıcaklıklara kaydığı net olarak gözlenebilmektedir. Kompozitlerin ortalama  $T_g$  değerlerinin  $60^\circ\text{C}$  civarında olduğu görülmüştür.



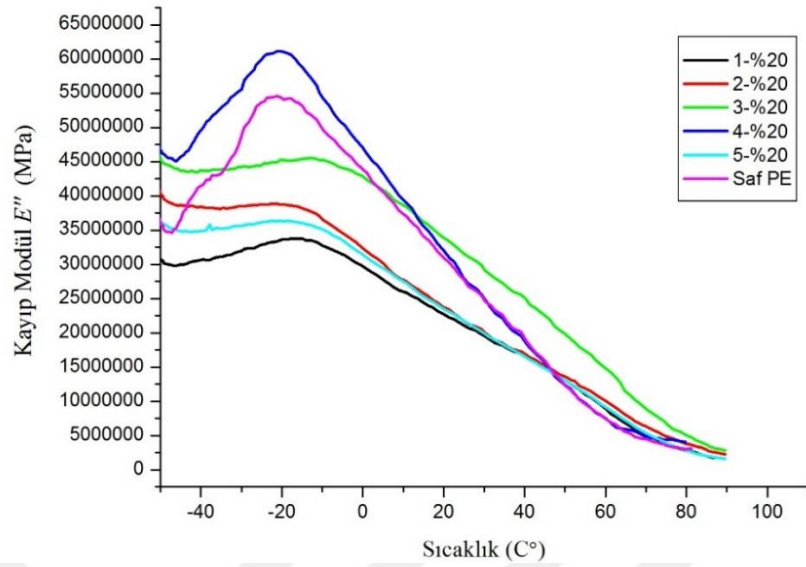
Şekil 3.34. Saf polimer ve Tufal yüzdesine sahip kompozitlerin sıcaklık karşısındaki  $\tan \delta$  grafikleri

Şekil 3.35.- şekil 3.37.'de saf polimerin ve farklı tufal tane boyuna sahip kompozitlerin sırasıyla elastik modül, kayıp modülü, tan  $\delta$  sıcaklık grafikleri verilmiştir. Şekil 3.35.'de saf polimerin ve farklı tufal tane boyuna sahip kompozitlerin elastik modülü/sıcaklık eğrilerinden saf PE ve PE420'nin elastik modülleri diğer kompozisyonlara göre düşük sıcaklıklarda daha yüksek elastik modül değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Fakat genel olarak ortam sıcaklıklarında tane boyutunun kompozitlerin elastik modülü üzerinde etkisinin olmadığı gözlenmiştir.



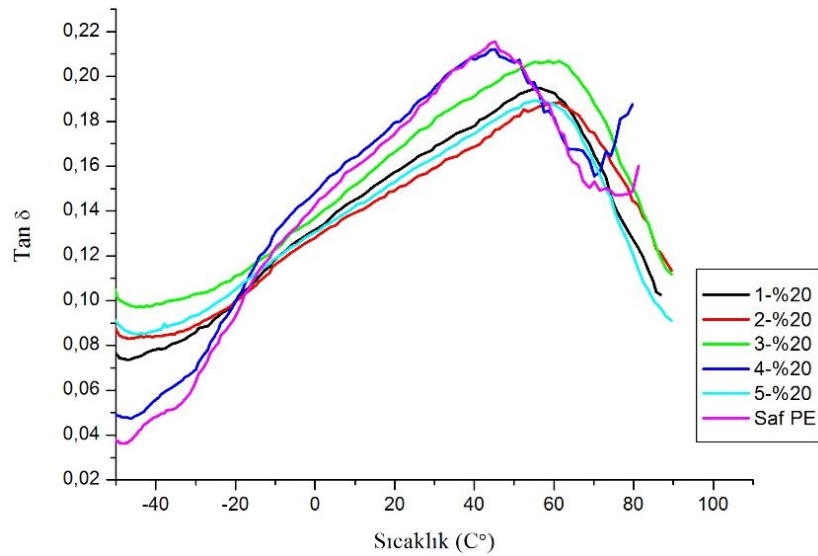
Şekil 3.35. Saf polimer ve farklı tufal tane boyuna sahip kompozitlerin sıcaklık karşısındaki elastik modülü grafikleri

Şekil 3.36.'daki grafik ile PE/Tufal kompozitlerin tane boyuna bağlı kayıp modüllerinin değişimi görülmektedir. Grafik incelendiğinde kompozitlerin tufal tane boyundaki değişim ile saf PE'ye kıyasla değişim gösterdiği, PE120 haricindeki kompozitlerin saf PE'ye nazaran daha yüksek kayıp modülü değerine sahip olduğu ve sıcaklıkla azaldığı görülmektedir. Fakat tane boyutunun kayıp modül üzerinde net bir etkisi gözlenmemiştir.



Şekil 3.36. Saf polimer ve farklı Tufal tane boyuna sahip kompozitlerin sıcaklık karşısındaki kayıp modül grafikleri.

Şekil 3.37.'de ise farklı tane boyutlarındaki kompozitlerin ve saf PE'nin  $\tan \delta$  piklerinin sıcaklığa göre değişim grafiği görülmektedir. Elastik modül ve kayıp modülü değerlerine bakıldığında, PE420 ve saf PE'ye ait pikler birbirine çok yakın olsa da en düşük Tg değerine Saf PE'nin sahip olduğu görülmektedir. Dolayısıyla Tufal katkısı PE'nin Tg değerini artırmıştır. Bunun nedeni ise tufal'in PE ile yapmış olduğu kimyasal etkileşimin bir sonucu olarak zincir hareketini engellemesi olduğu düşünülmektedir. Bununla beraber tane boyutu ile Tg arasındaki ilişki hakkında net bir şey söylenememektedir.



Şekil 3.37. Saf polimer ve farklı tufal tane boyuna sahip kompozitlerin sıcaklık karşısındaki  $\tan \delta$  grafikleri

### 3.3.4.2. DSC-TG Analiz Sonuçları

Termal analiz; kontrollü sıcaklık değişimine karşı bir maddenin fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar sonucu özelliklerinde meydana gelen değişimlerin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülmesi ve yorumlanmasıdır. Çalışmamızda da takviye elemanı (Tufal) konsantrasyonunun ve tane boyunun hazırlanan kompozitlerin termal özelliklerine olan etkisi DSC ve TG yöntemleri ile tespit edilmiştir.

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri tekniği de termal analiz yöntemlerinden bir tanesi olup, numune ısıtılırken, soğutulurken veya sabit bir sıcaklıkta tutulurken soğurulan veya salıverilen enerji miktarı ölçülür. Bu teknikte numune ile beraber bir de referans bulunup, referans ve numuneden gelen veya uzaklaşan ısı farkı sıcaklığa veya zamana bağlı olarak gösterilir. DSC güç telafisi prensibiyle çalışır ve numune sıcaklığı ile referans sıcaklığı daima aynı tutulur. Numune ile referans arasında bir sıcaklık farkı saptanması durumunda ise, sıcaklığı aynı tutmak için numuneye verilen enerji (güç) miktarı değiştirilir. Bu sayede numunedeki faz değişimi sırasındaki ısı transferi miktarı saptanabilir.

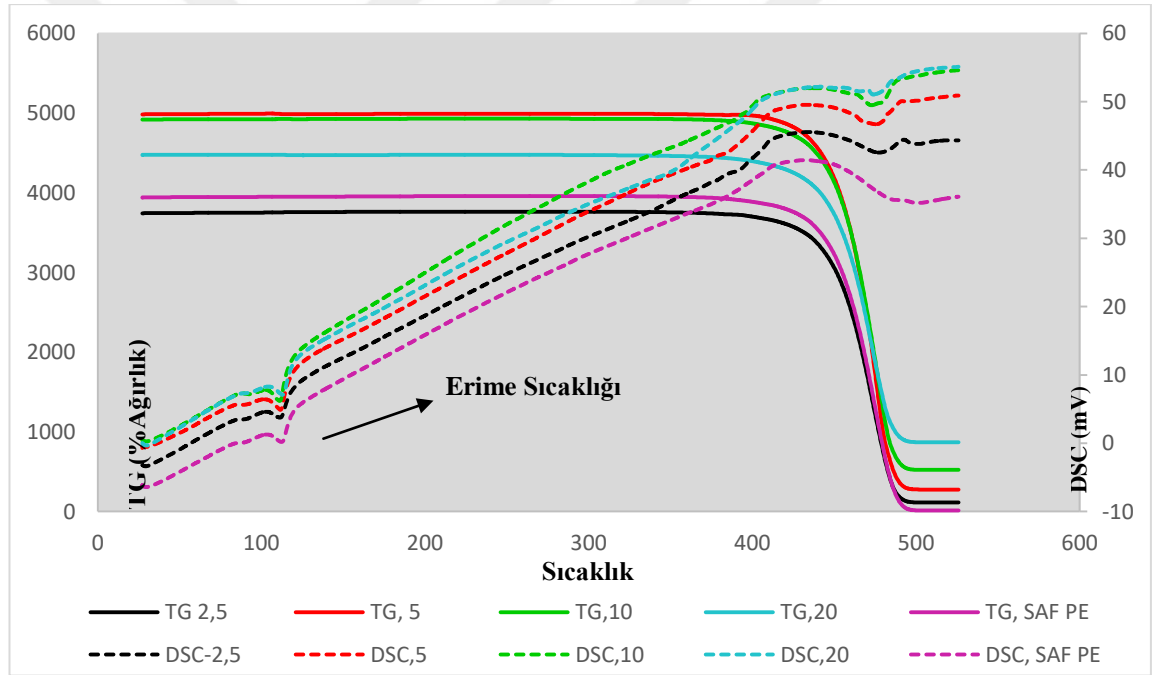
Termogravimetrik tekniği ile ise bir maddenin değişik koşullarda kütle kaybı kabiliyeti (termal stabilite) incelenmektedir. Numune kütle kaybında meydana gelen değişim sıcaklığın fonksiyonu olarak kaydeden bir tekniktir.

Ayrıca TG’de genellikle; örnek maddenin sıcaklık ile bozunmasına (dekompozisyon), süblimleşmesine, yapısından uçucu bileşiklerin uzaklaşmasına ya da tepkimeye girip tepkime sonucunda ise oluşan ürünlerin desorpsiyonuna bağlı meydana gelen kütle kaybı şeklinde olmaktadır, fakat örnek maddenin oksidasyonu ile uçucu olmayan oksitlerin meydana gelmesi sonucunda kütle artışı da gözlemlenebilir[96, 97].

Şekil 3.38.’de saf PE ve farklı tufal bileşimine sahip kompozitlerin şekil 3.39.’da ise farklı tane boyuna sahip kompozitler ile saf PE’nin TG ve DSC grafiği verilmektedir. Her iki grafikte de TG eğrilerinden anlaşılacağı üzere en düşük kütle kaybının olduğu seviye yaklaşık olarak 450 °C sıcaklıktadır ve yaklaşık olarak 480°C civarında ise kompozitlerin, saf PE’nin tek aşamalı bozunmaya yani yanmaya uğradığı görülmektedir.



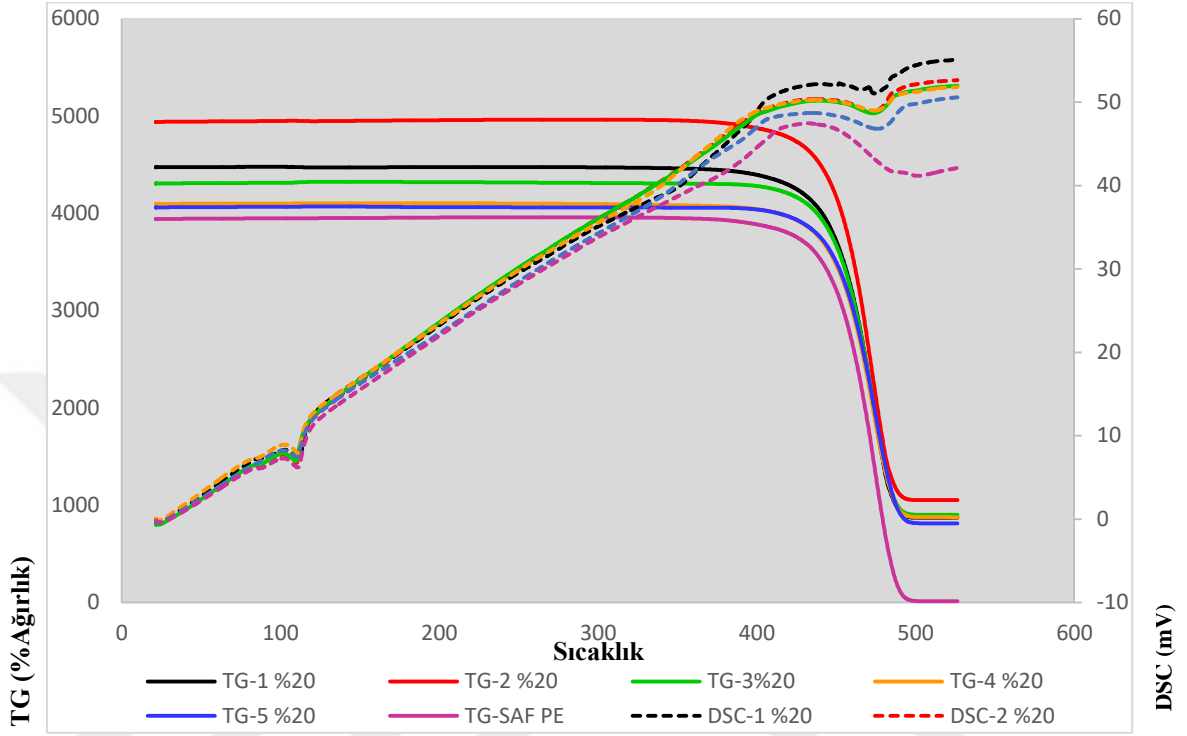
Şekil 3.38.'de takviye elemanı kompozisyonuna bağlı TG eğrilerine bakıldığında saf PE'nin tamamen yandığı görülmekte ve kompozitlerde kütle kaybı saf PE'ye oranla daha düşük miktarlarda meydana gelmektedir. Ayrıca kütle kaybının konsantrasyon artışı ile azaldığı görülmektedir. DSC eğrilerinde meydana gelen değişime bakıldığında ise takviye elemanı ilavesi ile kompozitlerin ısı absorblama miktarının artış gösterdiği görülmektedir. Yani konsantrasyon ile erime entalpisi artmış dolayısıyla bozunma entalpisi de yükselmiştir. Ayrıca saf PE 500°C civarında yanarken ekzotermik reaksiyonu sonucu endotermik pik aşağıya doğru düşüş göstermektedir. Dolayısıyla artan sıcaklıkla beraber yanmadan kalan tufalin endotermik pikleri ise artmaya devam etmektedir.



Şekil 3.38. Saf polimer ve kompozitlerin takviye elemanı konsantrasyonuna bağlı DSC-TG grafiği

Şekil 3.39.'de saf PE ve farklı tane boyuna sahip kompozitlerin TG ve DSC grafiği verilmektedir. TG eğrilerinden anlaşılacağı üzere kompozit örneklerinde kütle kaybı saf PE'ye oranla daha düşük miktarlarda meydana gelmektedir. Ancak tane boyunun azalması ya da artışı kompozitlerin kütle kaybı üzerinde genel bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. DSC eğrilerinde meydana gelen değişime bakıldığında ise takviye elemanı tane boyu arttıkça kompozitlerin ısı absorblama miktarının azalma gösterdiği

görülmektedir. Yani tane boyu arttıkça ile erime entalpisi azalmış dolayısıyla bozunma entalpisi de düşmüştür.



Şekil 3.39. Saf polimer kompozitlerin tane boyuna bağlı DSC-TG grafiği

### 3.3.5. LOİ Yanma Deney Sonuçları

Saf PE'nin ve kompozitlerinin LOİ düşey yanma test sonuçlarına ait veriler tablo 3.10.'da verilmektedir.

Tablo 3.10. Saf PE ve kompozitlerin LOİ düşey yanma test sonuçları

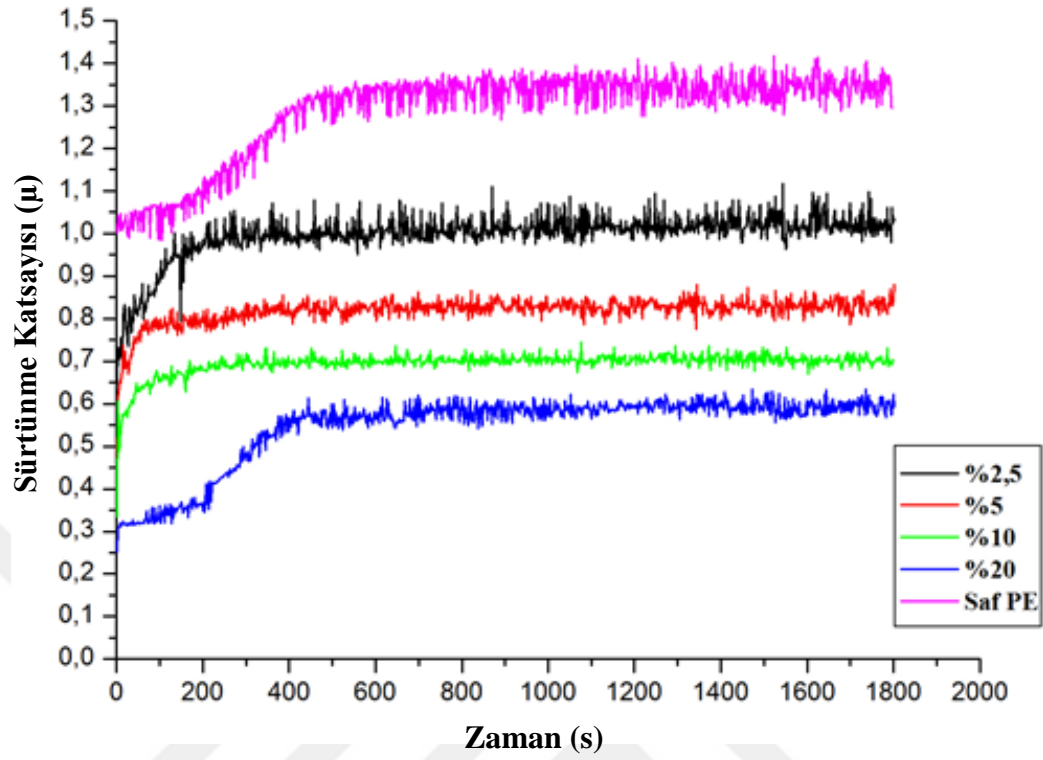
Numune Kodu	LOİ
“PE12,5	19,7
PE32,5	19,8
PE3,20	20,0
PE520	20,0
<b>SAF PE</b>	19,5

Saf PE'nin LOI değeri 19,5'tir. Çalışmamızda yukarıda tablo 3.10.'da da görüldüğü gibi kompozit numunelerde takviye elemanı arttıkça LOI değerinin de artış gösterdiği görülmektedir. En yüksek LOI değeri ağırlıkça %20 oranında takviye elemanı içeren kompozit numunelerde gözlenirken takviye elemanı tane boyunun herhangi bir etkisi gözlenmemiştir.

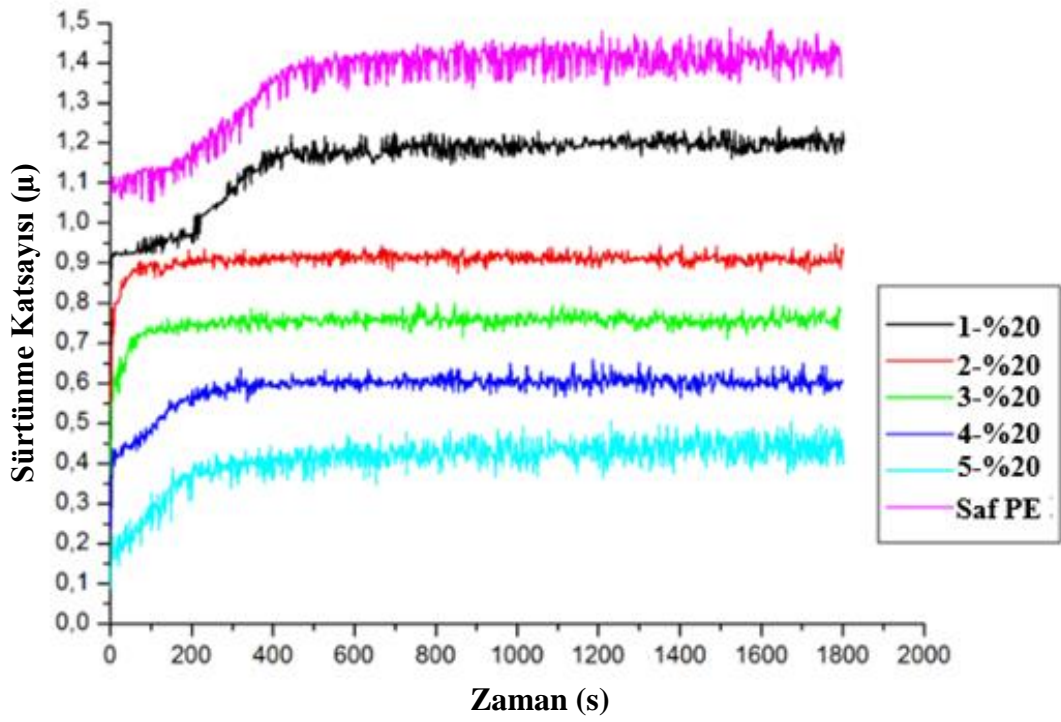
### 3.3.6. Aşınma Testi Sonuçları

PE, termoplastik ailesi içerisinde aşınma mukavemeti bakımından çok üstün performans gösteren ve şiddetli darbelere mukavim olan bir malzeme olsa dahi kompozit yapısında iken bileşiminde mevcut takviye elemanının türü, şekli, ebadı kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerine etki etmektedir Dolayısıyla polimer kompozitlerde doğru bileşim oranlarının tercihi, aşınma direncinin açısından optimal koşullara ulaşılmasına yardımcı olur. Ayrıca uygulanan kimyasal işlemler de kompozitlerin tribolojik özellikleri üzerinde önemli bir etken rol oynamaktadır[14].

Şekil 3.40 (a.)'da saf PE ve kompozitlerde takviye elemanı % bileşiminin sürtünme katsayısı değerleri üzerine etkisini gözlemek amacıyla PE12,5,PE15,PE110, PE120 kompozitlerine 30 dakika test süresince 10N (7ml'de) yük ile teste tabi tutulmuş numunelerin zamanla sürtünme katsayısında meydana gelen bağlı değişim grafikleri verilmektedir. Tane boyu etkisini gözlemek amacıyla ise aynı koşullarda teste tabi tutulan PE120, PE220, PE320, PE420 ve PE520 numuneleri ve saf PE 'ye ait grafik şekil 3.40(b.)'de verilmektedir.

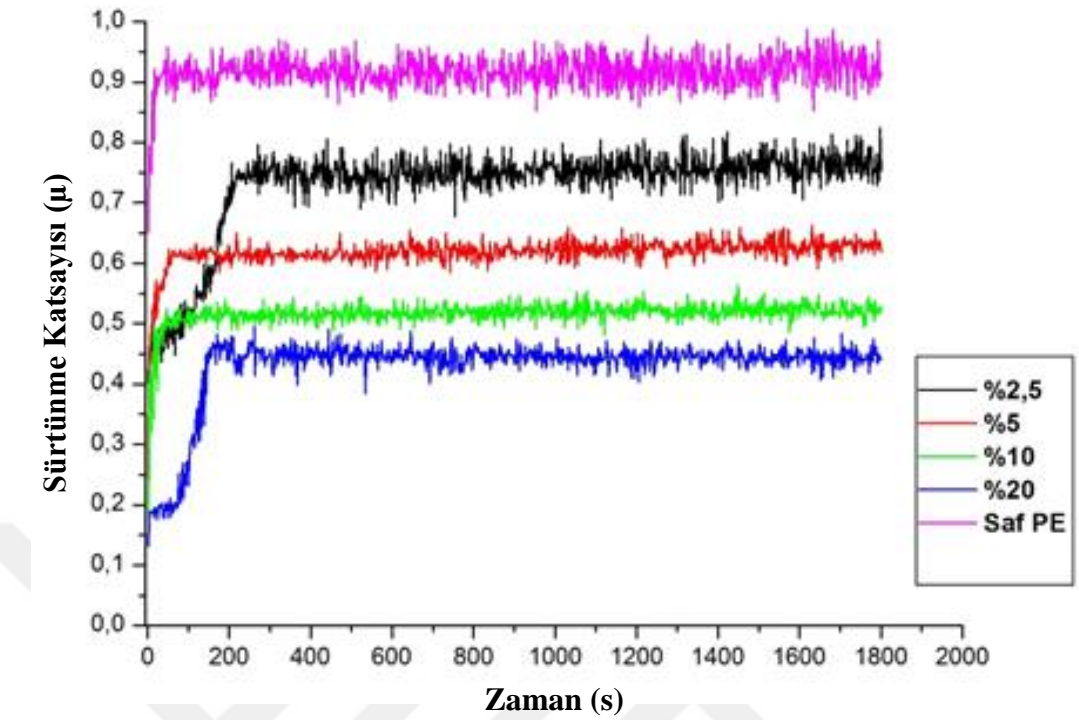


a.

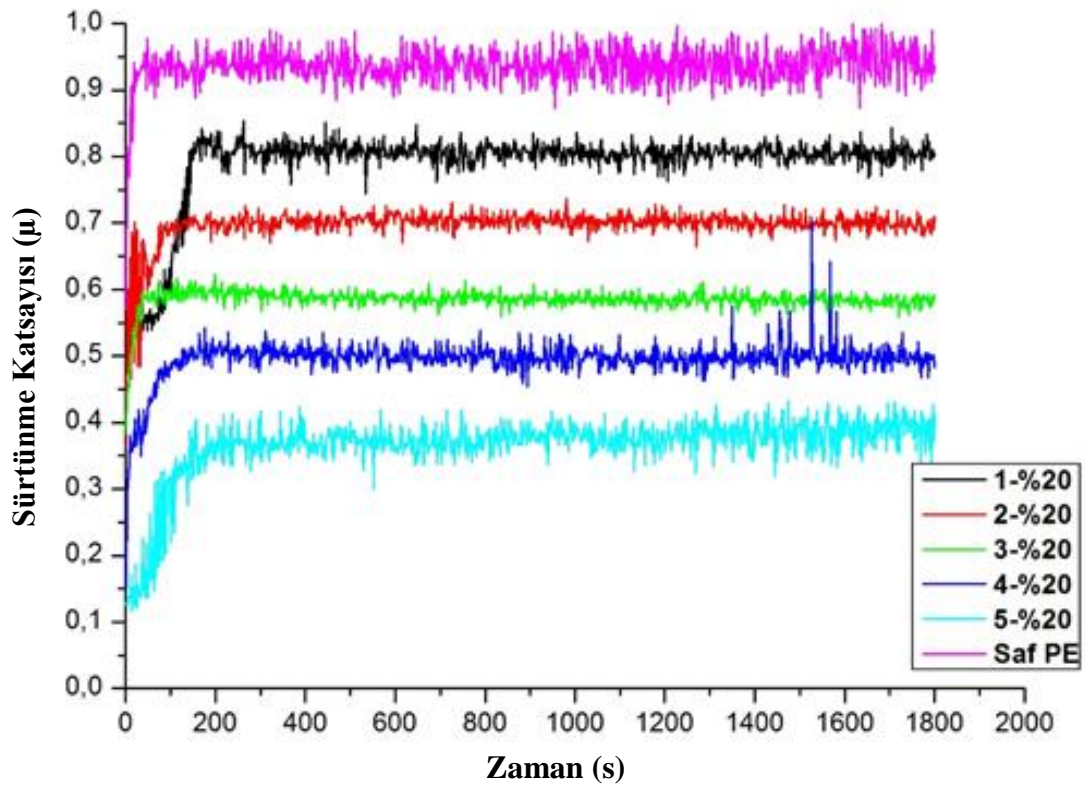


b.

Şekil 3. 40. (a., b.)10N (7ml'de) yük ile gerçekleştirilen teste sırasıyla konstrasyon ve tane boyunun sürtünme katsayısı üzerindeki etkisinin değişim grafikleri



a.

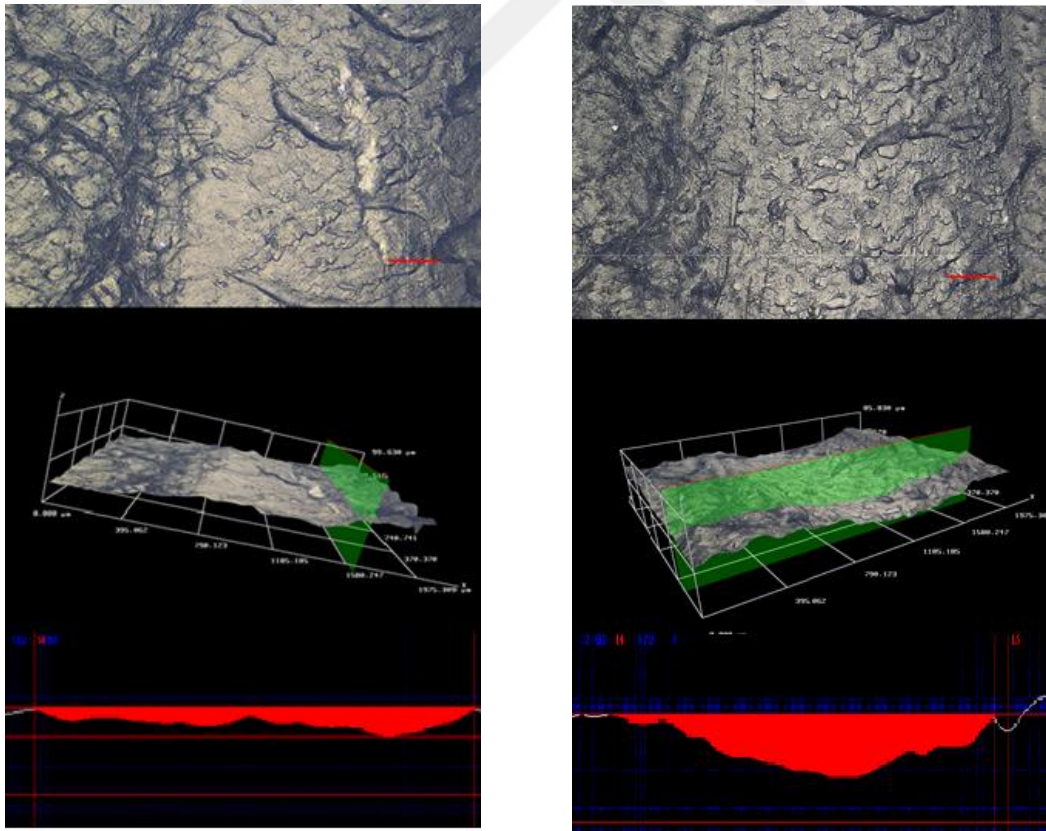


b.

Şekil 3.41. (a., b.) 15N (7ml'de) yük ile gerçekleştirilen teste sırasıyla konstrasyon ve tane boyunun sürtünme katsayısı üzerindeki etkisinin değişim grafikleri

Yukarıdaki Şekil 3.41 (a., b.)’de ise 15N (7ml’de) yük ile gerçekleştirilen testte sırasıyla konsantrasyon ve tane boyunun sürtünme katsayısı üzerindeki etkisinin değişim grafikleri verilmiş olup, şekil 3.40(a., b.) ve şekil.3.41. (a., b.)’den görüleceği üzere hem 10 hem de 15N şartlarında gerçekleştirilen deneylerde konsantrasyon arttıkça sürtünme katsayısı azalmış ve aynı şekilde tane boyutu arttıkça da katsayısı azalma göstermiştir. Dolayısıyla ne kadar büyük tane ve ne kadar çok miktarda tufal mevcut ise o kadar az aşınma meydana gelmektedir. Çalışmamızda elde edilen kompozitlerden ise PE520’nin aşınma direnci diğer kompozit oranlarına ve saf PE’ye göre daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Saf PE ve kompozitlerin yukarıda belirtilen koşullar ile gerçekleştirilmiş aşınma ile meydana gelen hacim kaybı ise anoptik 3B profilometre kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 42 (a.)’da 15N yük uygulamasında saf PE’ye ait şekil 42(b.)’de ise PE12,5 kompozit numunesinin aşınma profilinin izi görülmektedir.

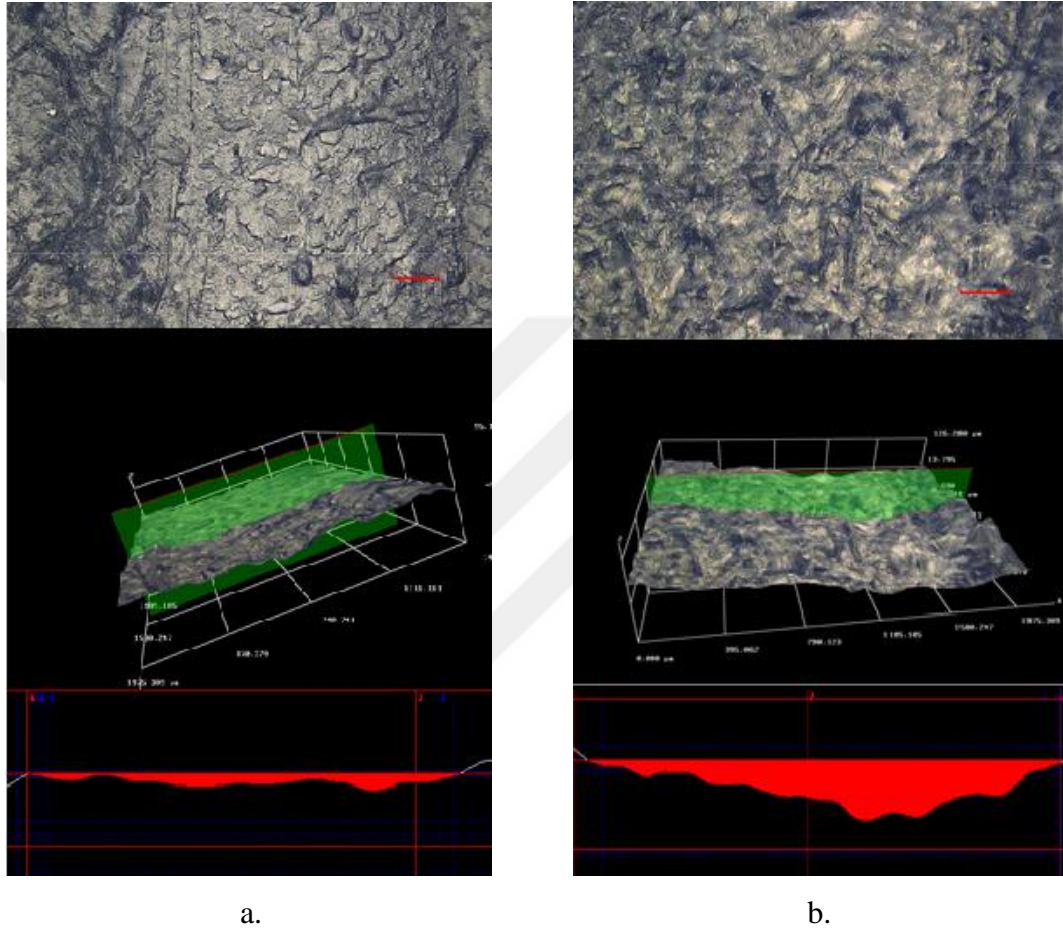


a.

b.

Şekil 3.42. (a., b.) 15N Yüke tabi tutulmuş saf PE (a.) ve PE12,5 (b.) numunesinden alınan aşınma izlerinin kesitsel optik profilometre ölçümleri

Elde edilen sonuçlara göre Saf PE’de aşınma ile meydana gelen hacim kaybı  $0,03 \text{ mm}^3$  iken %2,5 oranında tufal içeren 1 numaralı tane boyuna sahip PE12,5 numunesinde aşınma ile meydana gelen hacim kaybı  $0,04 \text{ mm}^3$  olarak bulunmuştur.



Şekil 3.43. (a., b.) 15N Yüke tabi tutulmuş PE120 (a.) ve PE520 (b.) numunesinden alınan aşınma izlerinin kesitsel optik profilometre ölçümleri

Aynı şekilde şekil 3.43 (a.,b.)’de ise aynı kompozisyonda farklı tane boyuna sahip sırasıyla PE120, PE520 numunelerinin 15N’luk yük uygulaması sonucu meydana gelen hacim kaybı verilmektedir. PE120 numunesinde meydana gelen hacim kaybı  $0,06 \text{ mm}^3$  iken PE520 numunesinde meydana gelen hacim kaybı  $0,09 \text{ mm}^3$  olarak tespit edilmiş ve burada tane boyunun hacim kaybına etkisi rahatlıkla gözlenmiştir. Bir diğer taraftan şekil 3.42 (b.)’de verilen PE12,5 numunesinin hacim kaybı ile şekil 3.43 (a.)’da verilen PE120 numunesinde değerleri karşılaştırılarak takviye elemanı % bileşim farkının etkisi de rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. Genel olarak tüm bu verilerden elde

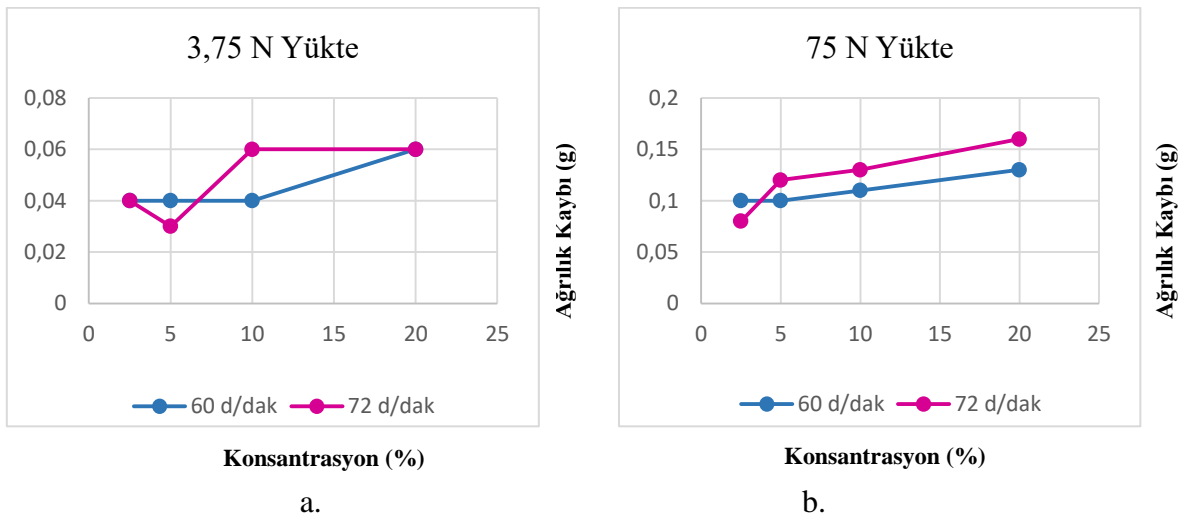
edilen sonuç ise, aşınma ile hacim kaybı hem artan konsantrasyon ile artmış hem de tane boyu ile artış göstermiştir

Aşınma testinde ise yük ve hızı değişken tutarak numunelerde aşınma ile meydana gelecek ağırlık kaybına değişkenlerin etkisi gözlenmiştir. Tablo 3.11.'de test sırasında uygulanan parametreler ve takviye elemanı konsantrasyonuna bağlı meydana gelen ağırlık kaybı detaylı biçimde listelenmiştir.

Tablo 3.11. Saf PE ve PE1 serisi kompozitlerin aşınma test sonuçları

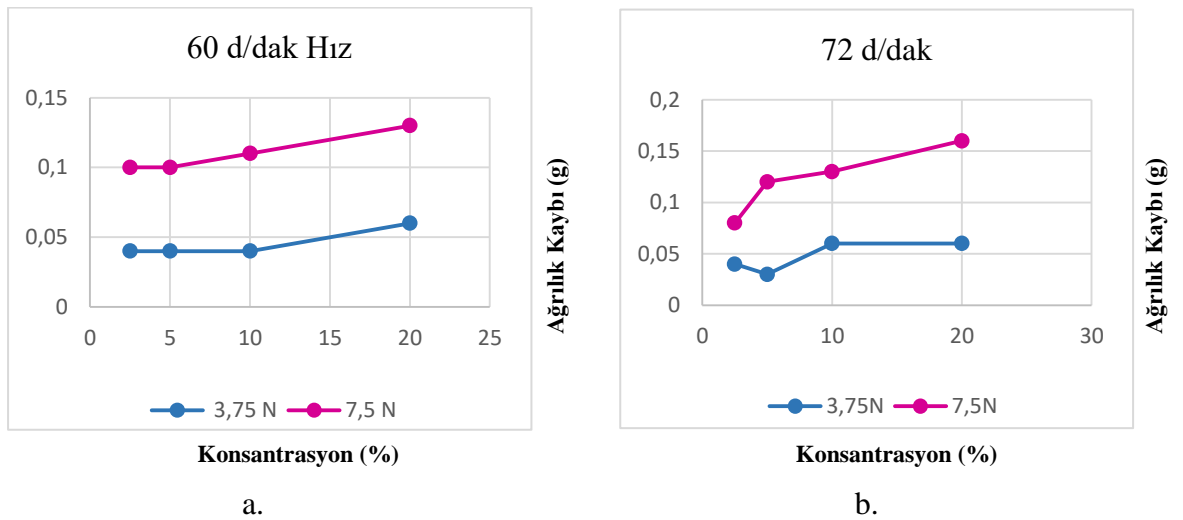
Numune	Parametre			Deney Sonuçları		
	Süre (dak)	NormalYük (N)	Aşınma Hızı (d/dak)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı
PE12,5	10	3,75	60	5,93	5,89	0,04
		3,75	72	6,07	6,03	0,04
		7,5	60	5,94	5,84	0,1
		7,5	72	6,05	5,97	0,08
PE15	10	3,75	60	6,05	6,01	0,04
		3,75	72	5,87	5,84	0,03
		7,5	60	6,03	5,93	0,1
		7,5	72	6,01	5,88	0,12
PE110	10	3,75	60	6,20	6,16	0,04
		3,75	72	6,23	6,17	0,06
		7,5	60	6,16	6,05	0,11
		7,5	72	6,17	6,04	0,13
PE120	10	3,75	60	6,71	6,65	0,06
		3,75	72	6,62	6,56	0,06
		7,5	60	6,84	6,71	0,13
		7,5	72	6,78	6,62	0,16
Saf PE	10	3,75	60	5,79	5,76	0,03
		3,75	72	5,76	5,71	0,05
		7,5	60	5,76	5,66	0,1
		7,5	72	5,71	5,59	0,12





Şekil 3.44. (a., b.) 3,75N (a.) ve 7,5N (b.) yükte PE1 serisi kompozitlerin aşınma sonucu meydana gelen ağırlık kaybının hız ve konsantrasyonuna göre değişim grafikleri

Şekil 3.44 (a.) yükün 3,75N, şekil 3.44 (b.)'de yükün 7,5 N olarak sabit tutulduğu hızın ise değiştiği durumlarda takviye elemanı konsantrasyonunun aşınma sonucu ağırlık kaybına etkisi verilmektedir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere hız ile ağırlık kaybı arttığı gibi artan yük ile de ağırlık kaybı artış göstermiştir. Bunu daha net olarak şekil 3.45 (a.,b.)'de hızın sabit tutulduğu yükün ise değişim gösterdiği durumlardaki grafiğe bakarak görülebilmekteyiz. Sonuç olarak takviye elemanı ilavesinin, artan hız ve yükün kompozitlerde ağırlık kaybını arttırmış olduğu, dolayısıyla aşınma davranışları üzerine pozitif bir etkiye sahip olmadığı gözlenmektedir.

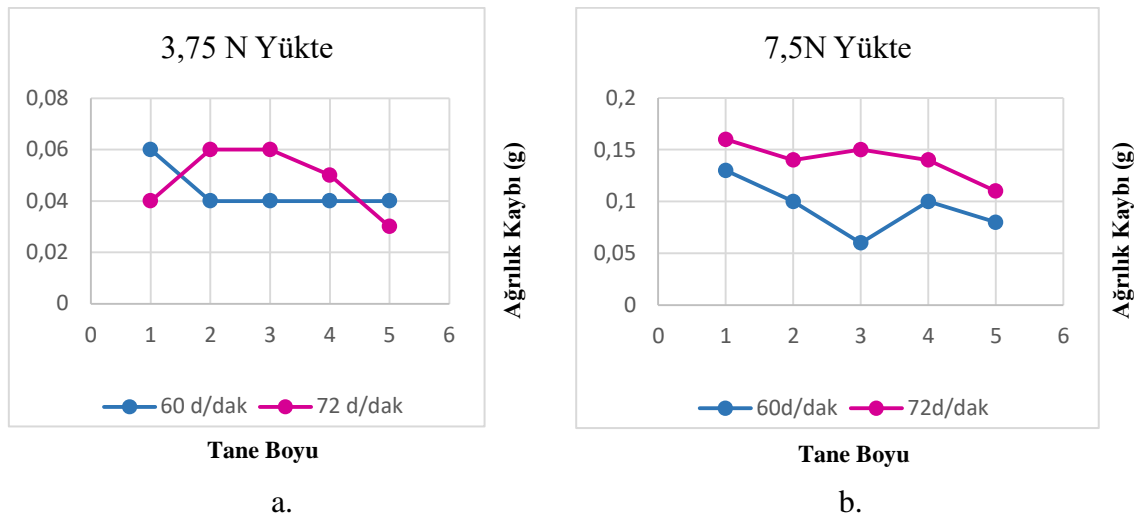


Şekil 3.45. (a., b.) PE1 Serisi kompozitlerin, (a) hızın 60d/dak'da, (b) 72d/dak'da değişen yük ile aşınma sonucu meydana gelen ağırlık kaybının konsantrasyonuna göre değişim grafikleri

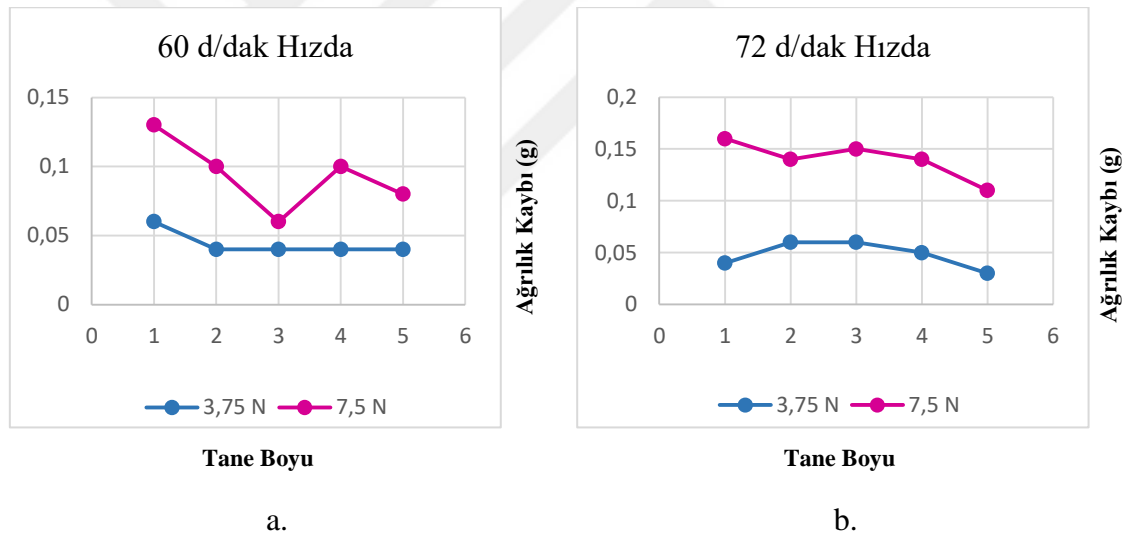
Kompozitlerde takviye elemanı tane boyunun aşınma davranışına etkisi ise tablo.3.12.'de detaylı biçimde listelenmiştir. Şekil 3.46 (a., b.)'de %20 oranında tufal takviye elemanına sahip sırasıyla PE1 ,PE2,PE3, PE4 ve PE5 numuneleri ile tane boyunun aşınma üzerindeki etkisi verilmektedir.Şekil 3.46(a.)'da 3,75N yükte,şekil 3.46(b.)'de ise 7,5N yük uygulaması sonucu kompozitlerde aşınma ile meydana gelen ağırlık kaybının hız ve takviye elemanı tane boyuna göre değişim grafiği verilmektedir. Şekil 3.46(a., b.)'de görüldüğü üzere kompozitlerin aşınma ile ağırlık kaybı artan hız ile artış gösterdiği görülmektedir. Ayrıca sabit hız durumunda yükün aşınma üzerinde etkisinin gözlemlendiği şekil 3.47(a.,b.)'ye bakıldığında da yük artışı ile ağırlık kaybının arttığı gözlenmektedir. Genel olarak varılacak sonuç ise kompozitlerin ağırlık kaybında tane boyunun etkisi artma ya da azalma olarak net şekilde gözlenilmemektedir.

Tablo 3.12. Saf PE ve farklı tane boyutlarında kompozitlerin aşınma test sonuçları

Numune	Parametre			Deney Sonuçları		
	Süre (dak)	NormalYük (N)	Aşınma Hızı (d/dak)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı
PE120	10	3,75	60	6,71	6,65	0,06
		3,75	72	6,62	6,56	0,06
		7,5	60	6,84	6,71	0,13
		7,5	72	6,78	6,62	0,16
PE220	10	3,75	60	6,89	6,85	0,04
		3,75	72	6,78	6,72	0,06
		7,5	60	6,21	6,11	0,1
		7,5	72	6,92	6,78	0,14
PE320	10	3,75	60	6,67	6,63	0,04
		3,75	72	6,71	6,65	0,06
		7,5	60	6,63	6,51	0,12
		7,5	72	6,65	6,50	0,15
PE420	10	3,75	60	6,79	6,75	0,04
		3,75	72	6,82	6,77	0,05
		7,5	60	6,75	6,65	0,1
		7,5	72	6,77	6,63	0,14
PE520	10	3,75	60	6,86	6,82	0,04
		3,75	72	6,86	6,83	0,03
		7,5	60	6,82	6,74	0,08
		7,5	72	6,83	6,72	0,11
Saf PE	10	3,75	60	5,79	5,76	0,03
		3,75	72	5,76	5,71	0,05
		7,5	60	5,76	5,66	0,1
		7,5	72	5,71	5,59	0,12

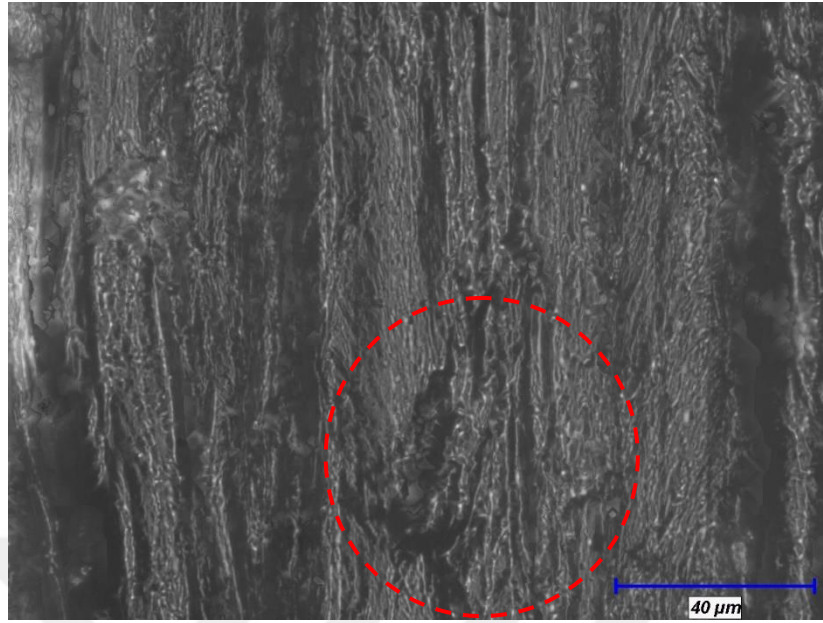


Şekil 3.46. (a., b.) 3,75N yükte (a.) ve 7,5N yükte PE/Tufal (ağ.%20) kompozitlerin (b.) aşınma sonucu meydana gelen ağırlık kaybının hız ve takviye elemanı tane boyuna göre değişim grafiği

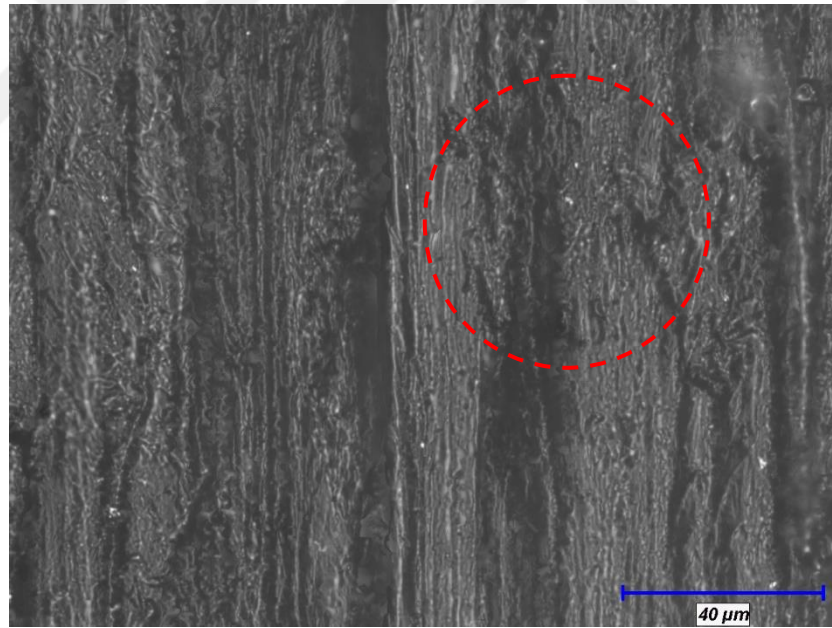


Şekil 3.47. (a., b.) PE/Tufal kompozitlerinin, hızın 60d/dak'da (a.), 72d/dak'da (b) değişen yük ile aşınma sonucu meydana gelen ağırlık kaybının takviye elemanı tane boyuna göre değişim grafiği

Numuneler üzerinde alınan aşınma izi optik mikroskop görüntüleri şekil 3.48.- şekil 3.52.'de görülmektedir. Numunelerde genel olarak adhezif ve abrasif aşınma mekanizmalarının hâkimliği görülmektedir. Şekil 3.48'de görülen 7,5 N yük ve 72 D/dk dönme hızında gerçekleştirilen deneylerde saf PE numunesinin yüzeyinde oluklama ve çizilmelerin varlığı görülmektedir. Kontrast farkından dolayı daha koyu olarak görülen bölgelerde daha derin aşınma olukları oluşmuştur. Çember içerisindeki bölgelerde ise plastik deformasyon meydana gelmiştir.

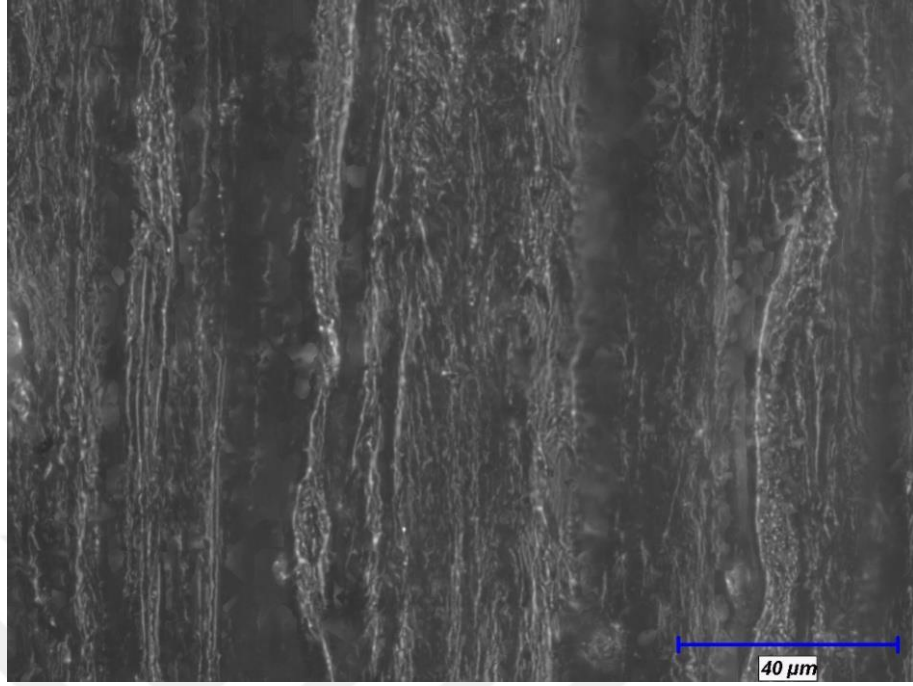


Şekil 3.48. Saf PE'nin 7,5N Yük, 72d/dak hızda aşınma iz görüntüsü

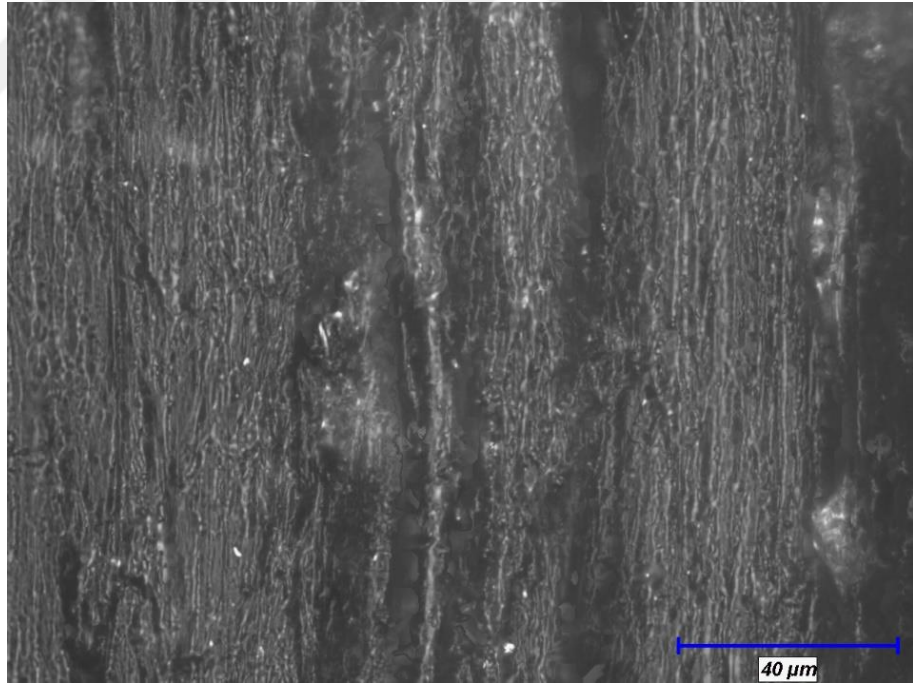


Şekil 3.49. PE12,5 Numunesinin 7,5N yük, 72d/dak hızda aşınma iz görüntüsü

Şekil 3.49.'daki 7,5 N yük ve 72 D/dk dönme hızında PE12,5 numunesi üzerinde gerçekleştirilen deneylerden sonra numune yüzeyinden alınan optik mikroskop resimleri görülmekte olup incelendiğinde bir önceki saf numuneye göre numune yüzeyinin daha pürüzsüz olarak meydana geldiği görülmektedir. Yine yüzeyde meydana gelen olukların daha yüzeysel olduğu ancak mikro çiziklerin varlığı artmış olduğu tespit edilmiştir.

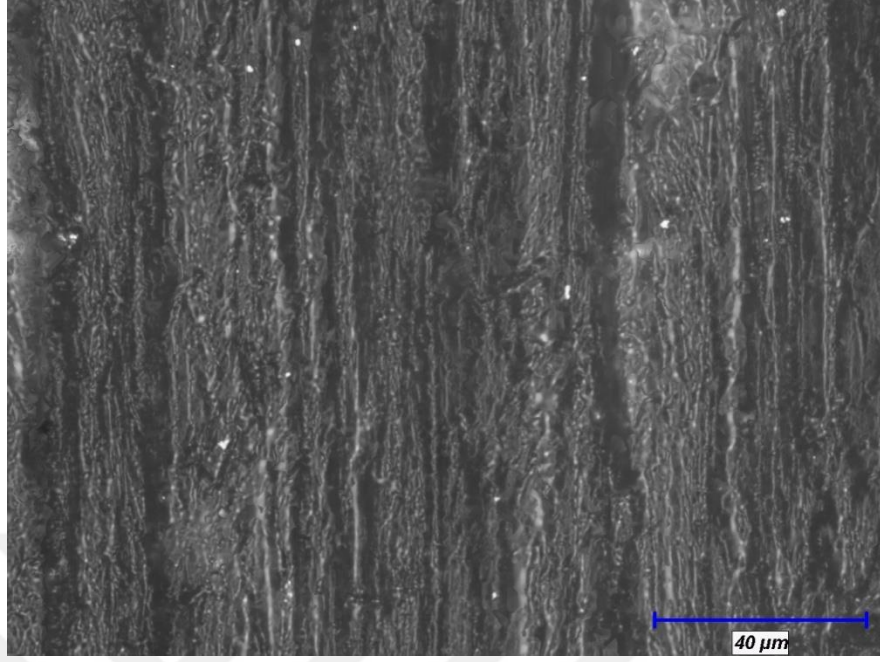


Şekil 3.50. PE120 numunesinin 7,5N Yük 72d/dak hızda aşınma iz görüntüsü



Şekil 3.51. PE120 Numunesinin 3,75 N Yük, 60d/dak hızda aşınma iz görüntüsü

PE 120 yüzeyinden alınan optik mikroskop resimleri incelendiğinde numune yüzeyinde pürüzsüz olarak meydana gelen mikro çiziklerin olduğu bir yüzey elde edilmiştir. 7,5N Yük, 72d/dak hızlarda PE 120 ve PE520 numunelerinde ise mikro çiziklerin yani abrazyona bağlı aşınma mekanizmasının ağır bastığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.52. PE520 Numunesinin 7,5N yük, 72d/dak hızda aşınma iz görüntüsü

## 4. BÖLÜM

### SONUÇ VE ÖNERİLER

#### 4.1. Sonuçlar

Bu çalışmada farklı konsantrasyonlara (%ağ. 2,5, 5,10, 20) ve tane boyuna sahip PE/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit peletleri çift vidalı ekstrüder kullanılarak, ergiyik harmanlama metodu ile başarılı bir şekilde üretilmiş, enjeksiyon ile kalıplama sonrasında ise kompozitlerin farklı tribolojik ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bulunan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- ✓ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün yapıya ilavesinin artışı çekme dayanımı üzerinde belirgin bir etkiye neden olmaz iken, kopma uzamasının takviye oranının artışı ile arttığı tespit edilmiştir. Örneğin, saf PE için kopma uzaması ortalama 83,2 MPa iken PE12,5 kompozit numunesinde 87 MPa olarak bulunan değer 98,6 MPa ile pe120 numunesinde en yüksek kopma uzaması değerine ulaşmıştır. Kopma mukavemetinde takviye oranı ile meydana gelen bu belirgin artışın sebebi ise takviye elemanı tufalin kopma esnasında sinerjik etki yaratarak bağ kopma kuvvetini arttırdığından kaynaklı olduğu söylenebilir. Takviye elemanı tane boyu artışı sonucundaysa kompozitlerin çekme mukavemeti artış gösterirken, kopma (%) uzama değerleri artan tane boyu ile azalma gösterdiği tespit edilmiştir.
- ✓ Kompozitlerin Shore D sertlik değerleri artan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye oranının artışı ile artarken, kompozitlerde tane boyunun etkisi gözlenmemiştir.
- ✓ Elektriksel iletkenlik takviye fazı (ağ.%) oranı arttıkça değişim göstermez iken takviye fazı tane boyunun artışı ile kompozitlerin elektriksel iletkenlik direncinin de arttığı görülmektedir.

- ✓ DMA sonuçlarına göre ise takviye elemanı % oranının artışı PE'nin elastik modülünü çok az dahi olsa düşürdüğü tespit edilmiş fakat artan sıcaklık ile beraber bu etkinin de ortadan kalktığı tespit edilmiştir. Takviye elemanı konsantrasyonu değişiminin kompozitlerin kayıp modüllerine etkisi ise saf PE'ye kıyasla değişim gösterdiği ve sıcaklıkla azaldığı görülmektedir. Dolayısıyla elastik davranış gösterdiği söylenebilir. Ayrıca PE110'nun diğer kompozitlereve saf PE'ye kıyasla nispeten daha yüksek kayıp modüle sahip olduğu ve PE120 haricindeki numunelerin genel olarak kayıp modülünü arttırdığı ve piklerin daha yüksek sıcaklıklara genişlediği tespit edilmiştir. Tüm bu verilerden genel olarak varılan sonuç olarak takviye oranının değişimi ile bütün kompozitlerin oda sıcaklığından itibaren artan sıcaklıkla birlikte kayıp modüllerinin azaldığı yani deformasyonlarının arttığı söylenebilir. Bunun nedeni olarak zincir hareketlenmeleri gösterilebilir. Diğer taraftan katkı elemanının saf PE'nin kayıp modülünü daha da düşürdüğü artan sıcaklıklarda bu etkinin de ortadan kalktığı söylenebilir. Bu durumun nedeni olarak da Tufal katkısının PE zincirlerinin arasına girerek zincirler arası etkileşimi azaltması gösterilebilir.
- ✓ PE/Tufal kompozitlerin Tg'lerinin tufal konsantrasyonu ile daha yüksek sıcaklıklara kaydığı tespit edilmiştir. Kompozitlerin ortalama Tg değerlerinin ise 60°C civarında olduğu görülmüştür.
- ✓ Takviye elemanı tane boyunun ise kompozitlerin elastik modülü üzerinde etkisinin olmadığı gözlenirken kayıp modül değerlerinin tane boyundaki değişim ile saf PE'ye kıyasla değişim gösterdiği, PE120 haricindeki kompozitlerin saf PE'ye nazaran daha yüksek kayıp modülü değerine sahip olduğu ve sıcaklıkla azaldığı tespit edilmiştir. Fakat genelolarak bakıldığında tane boyutunun kayıp modül üzerinde net bir etkisi gözlenmemiştir.
- ✓ Tane boyuna bağlı Tg değerine bakıldığında en düşük Tg değerine Saf PE'nin sahip olduğu görülmüştür. Dolayısıyla Tufal katkısının PE'nin Tg değerini arttırdığı bunun sebebininse Tufal'in PE ile yapmış olduğu kimyasal etkileşimin bir sonucu olarak zincir hareketini engellemesi olduğu düşünülmektedir. Bununla beraber tane boyutu ile Tg arasındaki ilişki hakkında net bir şey söylenememektedir.



- ✓ Takviye elemanı kompozisyonuna bağlı TG eğrilerine bakıldığında saf PE tamamen yanarken kompozitlerde artan takviye oranı ile daha düşük kütle kaybının meydana geldiği tespit edilmiştir. Takviye elemanı tane boyutunda meydana gelen değişiminse kompozitlerin kütle kaybı üzerinde beklendiği üzere genel bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.
- ✓ DSC eğrilerinde meydana gelen değişime bakıldığında kompozitlerin takviye elemanı ilavesi arttıkça ısı absorblama miktarının da artış gösterdiği tespit edilmiştir. Yani konsantrasyon ile erime entalpisi artmış dolayısıyla bozunma entalpisi de yükselmiştir.
- ✓ Takviye elemanı tane boyu arttıkça ise kompozitlerin ısı absorblama miktarının azalma gösterdiği görülmektedir. Yani tane boyu arttıkça ile erime entalpisi azalmış dolayısıyla bozunma entalpisi de düşmüştür.
- ✓ Saf PE'nin LOI değeri 19,5 iken kompozitlerin LOI değerinin takviye elemanı arttıkça artış gösterdiği ve en yüksek LOI değerinin de ağırlıkça %20 oranında takviye elemanı içeren kompozitlerde 20,0 olarak görüldüğü söylenebilir. Fakat takviye elemanı tane boyunun herhangi bir etkisi gözlenmemiştir.
- ✓ Kompozitlerin hem 10N hem de 15N yük şartlarında gerçekleştirilen deneylerde sürtünme katsayısı hem konsantrasyon hem de tane boyutu arttıkça azalma göstermiştir. Dolayısıyla kompozit yapısında ne kadar büyük tane ve ne kadar çok miktarda tufal mevcut ise o kadar az aşınma meydana gelmektedir. Ayrıca elde edilen kompozitlerden PE520'nin aşınma direnci diğer kompozit oranlarına ve saf PE'ye göre daha yüksek olduğu bulunmuştur.
- ✓ Aşınma ile meydana gelen hacim kaybı genel olarak hem artan konsantrasyon ile artmış hem de tane boyu ile artış göstermiştir. Örneğin, Saf PE'de aşınma ile meydana gelen hacim kaybı  $0,03 \text{ mm}^3$  olarak tespit edilirken PE12,5 numunesinde  $0,04 \text{ mm}^3$  olarak bulunmuştur. Aynı şekilde PE120 ve PE520 numunesinde meydana gelen hacim kaybı karşılaştırıldığında ise sırası ile meydana gelen hacim kayıpları  $0,06 \text{ mm}^3$  ile  $0,09 \text{ mm}^3$  olarak tespit edilmiş tane boyunun hacim kaybına etkisi rahatlıkla gözlenebilmiştir. Bu durumun abrasif aşınmadan kaynaklandığı düşünülmektedir.

- ✓ Kompozitlerde aşınma ile farklı yük (3,5, 7,5 N) ve hız (60, 72 d/dak) parametrelerinin meydana gelen ağırlık kaybına bakıldığında artan hız ve yükün kompozitlerde ağırlık kaybını arttırmış olduğu, dolayısıyla takviye elemanının matris elemanının aşınma davranışları üzerine pozitif bir etkisinin olmadığı gözlenmektedir.
- ✓ Takviye elemanı tane boyunun ise aşınma ile ağırlık kaybında artma ya da azalma olarak net şekilde etkisi gözlenmemiştir.
- ✓ Numuneler üzerinde alınan aşınma izi optik mikroskop görüntülerine bakıldığında adhezif ve abrasif aşınma mekanizmalarının hâkimliği tespit edilmiştir.

#### 4.2. Öneriler

- ✓ Bu çalışmada Tufal katkısının ( $Fe_2O_3$ ) PE'nin mekanik, aşınma, elektriksel ve yanma davranışları üzerine etkileri incelenmiştir. Genel çıkarımlar yukarıdaki şekilde verilmiştir.
- ✓ Çalışmada partikül dağılımı ayrıntılı bir şekilde incelenmemiştir. Genel olarak çalışmada partikül dağılımının homojen olduğu söylenebilir ancak aşınma türü konusunda ayrıntıya girilememiştir.
- ✓ Kompozitin elektriksel iletkenlik değerleri ölçülmüş ancak doygunluk değeri belirlenmemiştir. Belli bir partikül takviyesinden sonra elektriksel iletkenlik ya da direnç değerinin sabit olması beklenmektedir bu nokta doygunluk noktası olarak bilinir. Bir başka çalışmada bu noktanın çalışılması bilime katkı sağlayacaktır.
- ✓ Bu tarz bir kompozitin ambalaj sektöründe  $O_2$  bariyer malzeme olarak kullanılması mümkündür. Bu konuda da bir çalışma araştırmacılar için yeni bir konu olacaktır.
- ✓ Benzer şekilde bu kompozitin korozyon bariyer kaplama malzeme olarak kullanılması da mümkündür.

## KAYNAKÇA

1. Onat, A., 2015. Kompozit malzemeler ders notu. (Web sayfası: <https://docplayer.biz.tr/Sakaryameslekyuksekokulumakinavemetalteknolojileribolumumetalurjiprogramikompozitmalzemelerdersnotu.html>) Erişim tarihi: Ocak 2019).
2. Aktaş, M., Kompozit malzemeler üretim yöntemleri. (Web sayfası: <http://debis.deu.edu.tr/userweb//mehmet.aktas/KompozitMalzemeler/Ders/3.pdf>) Erişim tarihi: Aralık 2018).
3. Sönmez, M., 2009. Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi ve Geleceği: Türkiye'den Dört Örnek Firma Üzerine Bir İnceleme. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 183 s.
4. Ünal, H., Yetkin, S. H., 2016. Poliamid 6 polimeri ile Poliamid 6/vaks karışımının kendi üzerlerinde çalışması durumundaki tribolojik davranışlarının incelenmesi. **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, **31** (2): 457-463.
5. Erdin, E., Blitewski, B., 2006. Cam elyaf destekli kompozit polimerlerin geri kazanılması, pp. 47-58. *I. Polimerik Kompozitler Sempozyumu Ve Sergisi*, Kasım 17-19, 2006, İzmir.
6. Çavdar, D. A., Boran, S., 2016. Doğal liflerin otomotiv sanayinde kullanımı. **Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi**, **16** (1): 253-263.
7. İçli, S., 2006. Polimerik kompozitler: geleceğin teknolojileri, s. 43-46. *I. Polimerik Kompozitler Sempozyumu Ve Sergisi*, Kasım 17-19, 2006, İzmir. Güneş Enerjisi Enstitüsü, Ege Üniversitesi, 64.
8. Biron, M., 2007. Thermoplastics and Thermoplastic Composites: Technical Information for Plastic Users. Elsevier Science, Oxford, 944 s.

9. Açar, İ., 2013. Termoplastik Malzemelerin Birleştirme İşlemlerinde Kaynak Parametrelerinin Etkisi ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 77 s.
10. Farah S., Kunduru K. R., Basu A., Domb A. J., 2015. Molecular weight determination of polyethylene terephthalate. **ELSEVIER**, (8) :143-165.
11. Briscoe, B. J., Sinha, S. K., 2002. Wear of polymers, **Sage Journals**, **212** (6): 401-413.
12. Mohandesi, J. A., Refahi, A., Meresht, E. S., Berenji, S., 2011. Effect of temperature and particle weight fraction on mechanical and micromechanical properties of sand-polyethylene terephthalate composites: A laboratory and discrete element method study. **ELSEVIER**, **42** (6): 1461-1467.
13. Friedrich, K., 2018. Polymer composites for tribological applications. **ELSEVIER**, **1** (1): 3-39.
14. Ramesh, B. N., Suresha, B., 2014. Optimization of tribological parameters in abrasive wear mode of carbon-epoxy hybrid composites. **ELSEVIER**, **59** (2014): 38-49.
15. Yallewa, B. T., Kumara, P., Singha, I., 2014. Sliding wear properties of jute fabric reinforced polypropylene composites. **ELSEVIER**, **97** (2014), 402-11.
16. Liu, Y., Timmers, H., 2013. Micro-scratching of polyethylene terephthalate: Mechanisms of wear debris generation. **ELSEVIER**, **49** (8): 1984-1993.
17. Va, B. L., Na, B. R., Rudresh, B. M., 2018. Investigation on the effect of grit size on two body abrasive wear behavior of polyamide66/polypropylene (pa66/pp) blends. **ELSVIER**, (5): 2444- 2452.
18. Lai, S-M., Yeh, F-C., Wang, Y., Chan, H-C., Shen, H-F., 2003. Comparative study of maleated polyolefins as compatibilizers for polyethylene/wood flour composites. **Journal of Applied Polymer Science**, **87** (3): 487-496.

19. Peçenek, H., 2019. Pa6 Matrisli Seramik Partikül Takviyeli Polimer Kompozitlerin Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 53 s.
20. BULUT, M., 2014. Türkiye’de Kompozit Malzeme Üretimi ve Kompozit Malzeme Sektörünün Genel Değerlendirilmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 77 s.
21. Zhang, X., Pei, X., Wang, Q., 2009. Friction and wear studies of polyimide composites filled with short carbon fibers and graphite and micro SiO<sub>2</sub>. **ELSEVIER**, **30** (10): 4414-4420.
22. Rehbein, P., Wallaschek, J., 1998. Friction and wear behavior of polymer/steel and alumina/alumina under high-frequency fretting conditions. **ELSEVIER**, **216** (2): 97-105.
23. John, R. J., Bijwe, J., Tewari, U. S., 2002. Abrasive wear performance of various poly amides. **ELSEVIER**, **252** (9-10): 769-776.
24. Savaşçı, T., 1996. Kısa açıklamalarıyla en yaygın kullanılan fiziksel nitelikli standart plastik testleri, TMMOB, Plastik Teknolojisi 1 seminer notları, İstanbul, pp, 52-77.
25. Akını, A., Yetkin, S. H., Yılmaz, Ş., Şen, U., 2009. Bazalt dolgulu polimer kompozitlerin aşınma davranışları. **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, **13** (1): 60-65.
26. Cho, D. H., Bhushan, B., Dyess, J., 2016. Mechanisms of static and kinetic friction of polypropylene, polyethylene terephthalate, and high-density polyethylene pairs during sliding, **ELSEVIER**, **94** (2016): 165-175.
27. Gao, J., Mao, S., Liu, J., Feng, D., 1997. Tribochemical effects of some polymers/stainless steel. **ELSEVIER**, **212** (2): 238-243.
28. Zhang, S. L., Valentine, M. J., 2002. Stick–slip and temperature effect in the scratching of Materials. **Tribology Letters**, **12** (4): 195-202.

29. Suh, N. P., Mosley, M., Arinez, J., Tribology of polyethylene homocomposites. **ELSEVIER**, **214** (2): 231-236.
30. Aoike, T., Yokoyama, D., Uehara, H., Yamanobe, T., Komoto, T., 2007. Tribology of ultra-high molecular weight polyethylene disks molded at different temperatures. **ELSEVIER**, **262** (5-6): 742-748.
31. Kukureka, S. N., Hooke, C. J., Raob, M., Liao, P., Chen, Y. K., 1999. The effect of fibre reinforcement on the friction and wear of polyamide 66 under dry rolling-sliding contact. **ELSEVIER**, **32** (2):107-116.
32. Gandhi, A. R., Palanikumar, K., Ragunath, B. K., Davim, P. J., 2013. Role of carbon nanotubes (CNTs) in improving wear properties of polypropylene (PP) in dry sliding condition. **ELSEVIER**, **48** (2013): 52-57.
33. Delil, D. A., Yıldırım, D., Köleli, N., 2017. Çelikhane cürufundan ve tufalinden bitki besin elementlerinin geri kazanımı ve bu elementlerin bitki büyümesine etkisi. **Dergi Park**, **5** (1): 1-7.
34. Anonim. Polimerlerde camsı geçiş sıcaklığı ve erime sıcaklığı. (Web sayfası: <http://fforkliftt.blogspot.com/2016/12/polimerlerde-cams-gecis-scaklg-tg-ve.html>), (Erişim tarihi: Aralık 2018).
35. Ekşi, O., 2007. Plastik Esaslı Malzemelerin Isıl Şekil
36. Verme Özelliklerinin İncelenmesi. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Edirne, 131 s.
37. Altıntaş, A., 2013. Organik kimya ders notları. (Web sayfası: [https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/1066/mod\\_resource/content/1/7.%20Polimerler.pdf](https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/1066/mod_resource/content/1/7.%20Polimerler.pdf)), (Erişim Tarihi: Aralık 2018).
38. Saçak, M., 1998. Polimer Kimyasına Giriş. Ankara Üniversitesi, Ankara, 158 s.
39. Akdoğan, A., 2014. Plastik Matrisli Kompozitler. (Web sayfası: <https://docplayer.biz.tr/32390798-Plastik-matrisli-kompozitler-profdr-aysegul-akdogan-eker.html>), (Erişim Tarihi: Kasım 2018).

40. Anonim. Polimerleri özelliklerine göre sınıflandırma. 2014. Milli Eğitim Bakanlığı. (Web sayfası:[http://megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Polimerleri%20%C3%96zelliklerine%20G%C3%B6re%20S%C4%B1n%C4%B1fland%C4%B1rma.pdf](http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Polimerleri%20%C3%96zelliklerine%20G%C3%B6re%20S%C4%B1n%C4%B1fland%C4%B1rma.pdf)), (Erişim tarihi: Ocak 2019.)
41. Anonim. Doğal Polimerler. 2014. (Web sayfası:<http://kimyamatauni.blogspot.com/2012/04/dogal-polimerlerin-olusumu.html?view=flipcard>), (Erişim Tarihi: Ocak 2019.)
42. Kaya, Ö., 2018. Polimer Malzemelerin Ekstrüzyon Prosesinin Modellenmesi ve Analizi. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa, 43 s.
43. Aran, A., 2008. Malzeme bilgisi. (Web sayfası: <http://www2.isikun.edu.tr/personel/ahmet.aran/mal201.pdf>), (Erişim tarihi: Ocak 2019).
44. Yağcı, M., 1999. Polimerler 1. Pagev Yayınları, İstanbul, 175 s.
45. Tuncalı, Y., 2015. Production of the Fresh Produce Packaging Material From Low Density Polyethylene and Polymethylpentene Polymers. İstanbul Teknik University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Master Thesis, İstanbul.
46. Uzun, M. T., 2017. Kil Takviyeli Alçak Yoğunluklu Polietilen Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 123 s.
47. Anonim. Polietilenler. (Web sayfası:<https://docplayer.biz.tr/21872926-Plastik-urunleri-sanayii-ozel-ih-tisas-komisyonu-raporu.html>), (Erişim tarihi: Ocak 2019).
48. Anonim. Polietilen. (Web sayfası: [http://www.plastfam.com.tr/pdf/Polietilen\\_Nedir.pdf](http://www.plastfam.com.tr/pdf/Polietilen_Nedir.pdf)), Erişim tarihi: Mart 2019).

49. Evcin, A., 2017. Polimer malzemeler. (Web sayfası: <http://blog.aku.edu.tr/evcin/files/2017/05/10-polimer-uygulamalar%C4%B1-polimerik-kompozitler.pdf>), Erişim tarihi: Ocak 2019).
50. Babat, V., 2014. Alüminyum, Cam Küre ve Bor Karbür İlaveli Akrilonitril Bütadien Stiren (Abs) Polimer Kompozitinin Mekanik, Sürtünme ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 129 s.
51. Karakuş, K., Mengeloğlu, F., 2016. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) esaslı polimer kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine nişasta oranının etkisi. **Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi**, 16 (1): 285-292.
52. Yıldızhan, M., 2008. Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 71 s.
53. Pala, İ., 2015. Tekstil Lifleri İle Takviyelendirilmiş Kompozit Malzemelerin Ürün Tasarımında Kullanılması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 123 s.
54. Şahin, Y., 2000. Kompozit Malzemelere Giriş. Gazi Kitabevi, Ankara, 227 s.
55. Akdoğan, A., 2008. Metal matrisli kompozit malzemeler ve üretim yöntemleri. (Web sayfası: <https://www.scribd.com/document/65056285/MMK-son>), (Erişim tarihi: Şubat 2019).
56. Ozan, S., Karaoğlu, S., İpek, R. 2012. Partikül takviyeli alüminyum esaslı metal matris kompozitlerin difüzyon kaynak kabiliyetlerinin incelenmesi. **TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi**, 53 (630): 45-53.
57. Anonim. Composite materials handbook. (Web sayfası: <https://snebulos.mit.edu/projects/reference/MIL-STD/MIL-HDBK-17-2F.pdf>), (Erişim Tarihi: Mart 2019).



58. Bulut, M., 2014. Türkiyede Kompozit Malzeme Üretimi ve Kompozit Malzeme Sektörünün Genel Değerlendirilmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 77 s.
59. Stachowiak, G., Batchelor, A., 2013. Engineering Tribology. Fourth Edition. Butterworth-Heinemann, 884 pp.
60. Temiz, V., Triboloji. (Web sayfası: <https://web.itu.edu.tr/temizv/Sunular/Triboloji.pdf>), (Erişim tarihi: Şubat 2019).
61. Kaymaz, İ., Triboloji ders notu. (Web sayfası: [http://muhserv.atauni.edu.tr/makine/ikaymaz/makelII/DersNotlari/DERS\\_N OTU V TRIBOLOJL.pdf](http://muhserv.atauni.edu.tr/makine/ikaymaz/makelII/DersNotlari/DERS_N OTU_V TRIBOLOJL.pdf)), (Erişim Tarihi: Şubat 2019).
62. Yılmaz, M., 2013. Kompozitlerin Kuru Kaymadaki Aşınma Davranışlarının Deneysel Olarak Araştırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 99 s.
63. Akkurt, M., 2012. Makine Elemanları Cilt: II. Birsen Yayınevi, İstanbul, 417 s.
64. Kayalı, K., 2011. Borlanmış AISI 316L Paslanmaz Çeliğin Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Afyon, 219 s.
65. Çam, S., 2012. A356 Alüminyum Alaşımında Titanyum Miktarının Aşınma Davranışı Üzerinde Etkisinin İncelenmesi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük, 82 s.
66. Bağcı, M., 2010. Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışının İncelenmesi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya, 167 s.
67. Kılıç, C., 2008. Sıkıştırma Döküm Yöntemi ile Üretilmiş ve Soğuk Haddelenmiş AlMg3/SiCp Kompozitinin Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Edirne, 203 s.

68. Avcu, E., 2011. Farklı Büyüklüklere Sahip Aşındırıcı Partikül Karışımlarının Ti6Al4V Alaşımının Eroziyon Davranışına Etkileri. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli, 122 s.
69. Aytaç, A., 2007. A356 Alüminyum Alaşımının Yarı Katı İşleme Üretimi ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Metal Eğitimi Bölümü Döküm Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük, 95 s.
70. Işık, E., 2014. Sic Takviyeli Al-12Si Matrisli Kompozitin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Aşınma Davranışının İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 87 s.
71. Harbelioğlu, E., 2018. Bilyalı Dövmenin Aa7075-T6 Alaşımının Yüzey Özelliklerine ve Eroziyon Davranışına Etkileri. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli, 127 s.
72. Ünlüoğlu, O., 2012. Grafit Partiküllerinin Yağ Katkısı Olarak AISI H11 Çeliğinde Sürtünme ve Aşınma Davranışı Üzerine Etkisi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, 56 s.
73. Gültaş, A., 1998. Aşınma Deney Aparatının Tasarımı, Üretimi ve Metal Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, Ankara, 76 s.
74. Gündüz, İ. G., 2013. Hadde Tufallerinden Demir Tanesi Üretiminin İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 60 s.
75. Gündoğdu, N., 2013. Demir-Çelik Tesislerinde Açığa Çıkan Tufalden Demirin Geri Kazanımı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 107 s.
76. Çakıroğlu, Ö. L., 1995. Sanayi Tav Fırınlarında Çelik Yüzey Oksidasyonu ve Verimliliğe Etkileri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 129 s.

77. Meydan, O., 2017. 20MnB4 Özel Alaşımli Çelik Tel Çubukların Haddelenmesi Esnasındaki Soğuma Hızının ve Serme Kafa Sıcaklığının Tufal Yapısına Etkisi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 54 s.
78. Işıkgül, O., 2012. Tufalin Demir Cevheri Konsantresi ile Karıştırılarak Pelet Üretiminde Kullanılabilirliğinin ve İndirgenebilirliğinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 75 s.
79. Kofstad, P., Rahmel, A., Rapp, R. A., Douglas, D. L., 1989. International workshop on "New fundamentals of scale growth. **Oxidation Of Metals**, 32 (1-2):125-166.
80. Önkibar, G., 2006. Entegre Demir-Çelik Tesisi Tufalinden Doğrudan Redüklenme Yöntemi ile Ham Demir Üretimi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 120 s.
81. Robinson, R., 2008. Studies In Low Temperature Self-Reduction of By-Products from Integrated Iron and Steelmaking. Luleå University of Technology, PhD Thesis, 64 s.
82. Kayılı, T. M., Çelebi, G., Gültaş A., 2016. Yapı sektöründe atık kullanımına ilişkin bir inceleme: demir- çelik üretim atıkları, *Uluslararası Malzeme Bilimi ve Teknolojisi Konferansı*, Nisan 6-8, Kapadokya.
83. Ünsal, Ç., 2007. Tekstil Malzemelerine Yanmazlık Özelliğinin Kazandırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 177 s.
84. Saçak, M., 2002. Polimer Kimyası. Gazi Kitabevi, Ankara, 525 s.
85. Yılmaz, A., 2004. Mühendislik Polimerlerinin Yanmazlık Özelliklerinin İncelenmesi. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 187 s.
86. Lu, S., Hamerton, I., 2002. Recent developments in the chemistry of halojenfree flame retardant polymers. **ELSEVIER**, 27 (8): 1661-1712.

87. Dietz, A. G. G., 1971. Encyclopedia of polymer science and technology plastics, resins, rubbers, fibers, volume 11, polyesters to rayons. wiley-interscience. **Journal of Polymer Science Part B: Polymer Letters**, **9** (3): 232.
88. Yavuz, H., 2007. Plazma Polimerizasyon Yöntemiyle Polimerik Malzemelere Yanmazlık Özelliğinin Kazandırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 130 s.
89. Demirel, M., 2007. Cam Elyaf Takviyeli Poliester Kompozitlere Yanmazlık Özelliği Kazandırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 160s.
90. Mngomezulu, M. E., John, M. J., Jacobs, V., Luyt, A. S., 2014. Review on flammability of biofibres and biocomposites. **ELSEVIER**, **111** (2014): 149-182.
91. Shalaby, H. B., 2008. A review of the modes and mechanisms of boiler tube failures.(Web sayfası:[http://www.korozyondernegi.org.tr/upload/mce/bildiriler/korseml/korseml\\_11\\_2008sizmir.pdf](http://www.korozyondernegi.org.tr/upload/mce/bildiriler/korseml/korseml_11_2008sizmir.pdf)), Erişim tarihi: Mart 2019).
92. Rajandas, H., Parimannan, S., Sathavisam, K., 2012. A novel FTIR-ATR spectroscopy based technique for the estimation of low-density polyethylene biodegradation. **ELSEVIER**, **31** (2012): 1094-1099.
93. Namduri, H., Nasrazadani, S., 2008. Quantitative analysis of iron oxides using Fourier transform infrared spectrophotometry. **ELSEVIER**, **50** (2008): 2493-2497.
94. Thekkae, P. VV., Černík, M., 2013. Green synthesis of copper oxide nanoparticles using gum karaya as a biotemplate and their antibacterial application. **International Journal Of Nanomedicine**, **2013** (8): 889-898.
95. Menard, K. P., 1999. Dynamic Mechanical Analysis: A Practical Introduction, CRC Press LLC, New York, 194 pp.

96. Crawford, D. M., Escarsega, J. A., 2000. Dynamic mechanical analysis of novel polyurethane coating for military applications. **ELSEVIER**, **357-358** (2000): 161-168.
97. Kızıltepe, E., 2014. Preparation And Characterization Of Nano-Calcite (Caco3) Filled Thermoplastic Composites. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 72 s.
98. Madakbaş, S., Kahraman, V. M., Şen, F., Esmer, K., 2013. Polipirol ve Poliakrilonitril / Kil Kompozitlerin Hazırlanması ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi. **Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, **25** (3): 134-139.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Gamze BAYRAKTAR

**Uyruğu** : Türkiye (T.C)

**Doğum Tarihi ve Yeri** : 6 Ağustos 1995, Antalya

**Medeni Durum** : Bekar

**e-mail** : gamzebayraktar07@gmail.com

**Yazışma Adresi** : Erciyes Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi

### EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği	2017-
Lisans	Nevşehir Hacı Bektaş-ı Veli Üniversitesi	2013-2017
Lise	Çağlayan Lisesi, Antalya	2009-2013