

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELYAF TAKVİYELİ PPS KOMPOZİTLERİNİN  
SÜRTÜNME VE AŞINMA  
KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Levent ESATOĞLU**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT**  
**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. M. İskender ÖZSOY**

**Ocak 2018**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELYAF TAKVİYELİ PPS KOMPOZİTLERİNİN  
SÜRTÜNME VE AŞINMA  
KARAKTERİZASYONU**

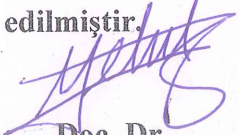
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**


**Levent ESATOĞLU**

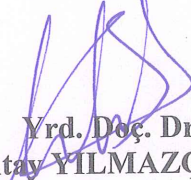
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT

Bu tez 30/01/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Doç. Dr.  
Mehmet YETMEZ  
Jüri Başkanı

  
Yrd. Doç. Dr.  
M. İskender ÖZSOY  
Üye

  
Yrd. Doç. Dr.  
İ. Kutay YILMAZÇOBAN  
Üye

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Levent ESATOĞLU

16.06.2017

## **TEŞEKKÜR**

Yüksek lisans eğitiminin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. M.İskender ÖZSOY'a ve bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım sayın Prof. Dr. Abdullah MİMAROĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, test numunelerinin yurt dışından temininde ve enjeksiyonla hazırlanmasında yardımcı olan Ayyıldız Kalıp Plastik Firması çalışanlarına, maddi ve manevi desteğini hiçbir şekilde esirgemeyen eşim Fatma Esatoğlu'na çok teşekkür ederim.

Bu çalışma Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Komisyon başkanlığı tarafından desteklenmektedir. (PROJE NO: 2017-50-01-083)

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vi
TABLolar LİSTESİ .....	x
ÖZET .....	xi
SUMMARY .....	xii

### BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	1
1.2. Polimerler ve Kompozitleri Üzerine Literatür İncelemesi .....	4
1.1. Tezin Amacı .....	16

### BÖLÜM 2.

POLİMERLERİN SÜRTÜNME VE AŞINMA DAVRANIŞLARI .....	17
2.1. Giriş .....	17
2.2. Sürtünme Mekanizmaları .....	17
2.2.1. Kuru sürtünme .....	19
2.2.2. Sınır sürtünmesi .....	19
2.2.3. Yuvarlanma sürtünmesi .....	20
2.2.4. Kayma sürtünmesi .....	22
2.3. Aşınma .....	22
2.3.1. Tribolojik sistem .....	23
2.3.2. Aşınmanın ekonomik rolü .....	26
2.3.3. Aşınma faktörleri .....	27

2.3.4. Aşınma test modelleri .....	29
2.3.5. Aşınma mekanizmaları .....	31
2.3.5.1. Adheziv aşınma .....	32
2.3.5.2. Abrazif aşınma .....	35
2.3.5.3. Yorulma aşınması .....	38
2.3.5.4. Difüzyon aşınması .....	39
2.3.5.5. Tribo-Oksidasyon aşınması .....	39
2.3.5.6. Erozyon ve Kavitasyon aşınması .....	40
2.3.5.7. Yenme aşınması .....	41
2.3.5.8. Korozif aşınma .....	41
2.3.6. Aşınmaya etki eden parametreler.....	41
2.4. Polimerlerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları .....	44
2.4.1. Polimerlerde sürtünme .....	44
2.4.2. Polimerlerde aşınma .....	45
2.4.2.1. Adheziv aşınma .....	46
2.4.2.2. Abrazif aşınma .....	48
2.4.2.2. Yorulma aşınma .....	48
2.4.3. Polimerlerde aşınmaya etki eden parametreler .....	48
2.4.4. Polimerlerde kullanılan katkı malzemeleri .....	49
2.5. Polimer Kompozitler .....	53
2.5.1. Fiber takviyeli kompozitler .....	55
2.5.1.1. Cam elyaf takviyeli kompozit .....	56
2.5.1.2. Karbon fiber takviyeli kompozit .....	56
2.5.2. Partikül fiber takviyeli kompozitler .....	57
2.6. Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları .....	57
2.7. Polifenilen Sülfid (PPS) Polimerinin Özellikleri .....	60
2.7.1. PPS polimerinin fiziksel özellikleri .....	61
2.7.2. PPS polimerinin mekanik özellikleri .....	61
2.7.3. PPS polimerinin termal özellikleri .....	63
2.7.4. PPS kullanımı, sağladığı avantajları ve kullanım yerleri .....	64

### BÖLÜM 3.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	65
3.1. Giriş .....	65
3.2. Deney Malzemeleri .....	65
3.2.1. Aşınma deneyinin uygulanma yöntemi .....	69
3.2.2. Sürtünme ve aşınma deneyi .....	71

### BÖLÜM 4.

SONUÇLAR VE SONUÇLARIN İRDELEMESİ .....	75
4.1. Giriş .....	75
4.2. Sürtünme Sonuçları .....	75
4.2.1. PPS cam elyaf katkılı kompozit .....	75
4.2.2. PPS karbon fiber katkılı kompozit .....	85
4.3. Aşınma Sonuçları .....	98
4.3.1. PPS cam elyaf katkılı kompozit .....	99
4.3.2. PPS karbon fiber katkılı kompozit .....	105
4.4. PPS Polimerinin ve Çelik Diskin Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi .	113
4.5. PPS Kompozitlerinin Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi .....	116

### BÖLÜM 5.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	124
5.1. Giriş .....	124
5.2. Sonuçlar .....	124
5.3. Öneriler .....	126

KAYNAKLAR .....	128
-----------------	-----

ÖZGEÇMİŞ .....	134
----------------	-----

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Numune kesit alanı
ASTM	: Amerikan standart
BMC	: Doymamış Poliester
CF	: Karbon fiber
ÇYMAPE	: Çok Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen
F	: Kuvvet
F <sub>s</sub>	: Sürtünme kuvveti
G	: Ağırlık kaybı
GF	: Cam fiber
H	: Sertlik
MPa	: Megapaskal
N	: Yük
PPS	: Polifenilen Sülfid
PTFE	: Teflon
R <sub>a</sub>	: Yüzey pürülülüğü
s	: Kayma mesafesi
SAE	: Otomotiv Mühendisliği Kurumu
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
$\mu$	: Sürtünme katsayısı
$\mu_s$	: Statik sürtünme katsayısı
$\mu_k$	: Kinetik sürtünme katsayısı
$\rho$	: Yoğunluk
W <sub>s</sub>	: Aşınma oranı



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Sürtünme mekanizması .....	17
Şekil 2.2. Sürtünme çeşitleri .....	18
Şekil 2.3. Kuru sürtünme modeli ve sistemin serbest cisim diyagramı .....	19
Şekil 2.4. Sınır sürtünme modeli .....	20
Şekil 2.5. Yuvarlanma sürtünme modeli ve sistemin serbest cisim diyagramı .....	20
Şekil 2.6. Bir tribolojik sistemin şematik gösterimi .....	25
Şekil 2.7. Aşınma safhaları .....	29
Şekil 2.8. Şematik aşınma test modelleri .....	30
Şekil 2.9. Şematik abrasif aşınma test modelleri .....	31
Şekil 2.10. Aşınma mekanizmalarını belirleyen bileşenler .....	32
Şekil 2.11. Adhesiv aşınma oluşumunun şematik gösterimi .....	33
Şekil 2.12. Adhesiv aşınma deneyinde kullanılan geometriler .....	35
Şekil 2.13. İki cisimli abrazif aşınma .....	36
Şekil 2.14. Üç cisimli Abrasif aşınma .....	36
Şekil 2.15. Abrasif aşınmada aşınma hızını ölçmekte kullanılan yöntemler .....	38
Şekil 2.16. Yorulma aşınması .....	39
Şekil 2.17. E-Cam Fiber .....	50
Şekil 2.18. Karbon Fiber .....	51
Şekil 2.19. Aramid Fiber .....	52
Şekil 2.20. Polimerlerin sınıflandırılması .....	54
Şekil 2.21. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması .....	54
Şekil 2.22. Polifenilen sülfid (PPS) polimerinin eriyik haldeki ve katı haldeki yapısı .....	62
Şekil 2.23. Polifenilen sülfid (PPS) polimerinin polimerizasyon reaksiyonu .....	62
Şekil 3.1. PPS polimeri ve cam elyaf katkılı PPS kompozit kalıpları .....	67

Şekil 3.2. PPS polimeri ve PPS kompozit malzeme numuneleri .....	68
Şekil 3.3. Pim disk aşınma cihazı .....	69
Şekil 3.4. Aşınma testinin uygulanma şekli .....	70
Şekil 3.5. Sürtünme katsayısı hesaplama görüntüsü .....	71
Şekil 3.6. Deney malzemelerinin yüzey sıcaklık-zaman verileri (1 m/sn 50 N) ....	72
Şekil 4.1. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı kayma mesafesi ilişkisi (Yük: 50N, hız: 2 m/sn) .....	76
Şekil 4.2. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı yük ilişkisi (1 m/sn) .....	77
Şekil 4.3. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı yük ilişkisi (2 m/sn) .....	78
Şekil 4.4. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı yük ilişkisi (3 m/sn) .....	80
Şekil 4.5. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı hız ilişkisi (50 N) .....	81
Şekil 4.6. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı hız ilişkisi (100 N) .....	82
Şekil 4.7. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı hız ilişkisi (200 N) .....	83
Şekil 4.8. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı katkı oranı ilişkisi (50 N) .....	84
Şekil 4.9. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı katkı oranı ilişkisi (100 N) .....	84
Şekil 4.10. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı katkı oranı ilişkisi (200 N) .....	85
Şekil 4.11. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı kayma mesafesi ilişkisi (Yük: 50N, hız: 2 m/sn) .....	86
Şekil 4.12. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı yük ilişkisi (1 m/sn) .....	87
Şekil 4.13. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı yük ilişkisi (2 m/sn) .....	89
Şekil 4.14. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme	

katsayısı yük ilişkisi (3 m/sn) .....	90
Şekil 4.15. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı hız ilişkisi (50 N) .....	91
Şekil 4.16. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı hız ilişkisi (100 N) .....	92
Şekil 4.17. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı hız ilişkisi (200 N) .....	93
Şekil 4.18. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı katkı oranı ilişkisi (50 N) .....	94
Şekil 4.19. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı katkı oranı ilişkisi (100 N) .....	95
Şekil 4.20. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı katkı oranı ilişkisi (200 N) .....	95
Şekil 4.21. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-hız ilişkisi (50 N) .....	99
Şekil 4.22. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-hız ilişkisi (100 N) .....	100
Şekil 4.23. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-hız ilişkisi (200 N) .....	100
Şekil 4.24. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi (1 m/sn) .....	101
Şekil 4.25. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi (2 m/sn) .....	101
Şekil 4.26. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi (3 m/sn) .....	102
Şekil 4.27. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-katkı oranı ilişkisi (50 N) .....	103
Şekil 4.28. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-katkı oranı ilişkisi (100 N) .....	103
Şekil 4.29. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-katkı oranı ilişkisi (200 N) .....	104
Şekil 4.30. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-	

hız ilişkisi (50 N) .....	105
Şekil 4.31. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı- hız ilişkisi (100 N) .....	106
Şekil 4.32. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı- hız ilişkisi (200 N) .....	106
Şekil 4.33. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı- yük ilişkisi (1 m/sn) .....	107
Şekil 4.34. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı- yük ilişkisi (2 m/sn) .....	107
Şekil 4.35. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı- yük ilişkisi (3 m/sn) .....	108
Şekil 4.36. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı- katkı oranı ilişkisi (50 N) .....	108
Şekil 4.37. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı- katkı oranı ilişkisi (100 N) .....	109
Şekil 4.38. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı- katkı oranı ilişkisi (200 N) .....	109
Şekil 4.39. Disk üzerindeki aşınmanın SEM görüntüsü .....	114
Şekil 4.40. Katkısız PPS polimer aşınmasının SEM görüntüsü (500X) .....	115
Şekil 4.41. %20 Cam elyafı PPS kompozit aşınmasının SEM görüntüsü (500X) ...	117
Şekil 4.42. %30 Cam elyafı PPS kompozit aşınmasının SEM görüntüsü (500X) ...	118
Şekil 4.43. %40 Cam elyafı PPS kompozit aşınmasının SEM görüntüsü (500X) ...	118
Şekil 4.44. %30 Karbon fiberli PPS kompozit aşınmasının SEM görüntüsü (500X) .....	120
Şekil 4.45. %40 Karbon fiberli PPS kompozit aşınmasının SEM görüntüsü (500X) .....	120
Şekil 4.46. %50 Karbon fiberli PPS kompozit aşınmasının SEM görüntüsü (500X) .....	121

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Dünya malzeme tüketiminin değişim tablosu (milyon ton) .....	26
Tablo 2.2.	Cam fiber üretiminde kullanılan cam çeşitleri ve bileşimleri .....	50
Tablo 3.1.	PPS polimerinin özellikleri .....	65
Tablo 3.2.	Deney şartları ve numunelerin özellikleri .....	68
Tablo 3.3.	Deney malzemelerinin nem-zaman verileri (1 m/sn 50 N) .....	73
Tablo 3.4.	Deney numunelerinin aşınma miktarları .....	74

## ÖZET

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Sürtünme, Mühendislik plastikleri, Polifenilensülfid (PPS)

Bu çalışmada, Polifenilen sülfid polimer matrisli cam elyaf ve karbon fiber katkıli PPS mühendislik kompozitlerinin sürtünme ve aşınma özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Aşınma deneyleri pim-disk aşınma deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Mühendislik plastiklerinin aşınma deneylerinde üç farklı yük (50N, 100N ve 200N) ve üç farklı (1-2-3 m/s) kayma hızı kullanılmıştır. Deneylerde, karşı disk malzemesi olarak AISI 4140 çeliği kullanılmıştır. Farklı yük ve kayma hızlarında gerçekleştirilen aşınma deneylerinde PPS, %20, %30, %40 cam elyaf katkıli ve %30, %40, %50 karbon fiber katkıli mühendislik plastiklerinin sürtünme katsayıları ve aşınma oranları tespit edilmiş ve deney sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre deneylerde kullanılan polimerler içinde en düşük sürtünme katsayısı ve en düşük aşınma oranı %50 karbon fiber katkıli PPS kompozitinde tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmalarda kayma hızının artışı ile aşınma oranlarının arttığı görülmüştür. PPS polimeri ve cam elyaf ve karbon fiber katkı maddeli PPS kompozitlerinde yükün artışı ile aşınma oranının arttığı görülürken, PPS polimeri ve cam elyaf ve karbon fiber katkı maddeli PPS kompozitlerinde yükün artışı ile sürtünme katsayısının azaldığı görülmüştür.

# **FRICION AND WEAR CHARACTERISATION OF FIBER REINFORCED PPS COMPOSITE MATERIALS**

## **SUMMARY**

Keywords: Wear, Friction, Engineering Polymers, Polyphenylene Sulfide.

In this study, friction and wear properties of carbon reinforced polyphenylene sulfide (PPSCF) and glass fiber reinforced polyphenylene sulfide (PPSGF) composite materials were investigated. Friction and wear tests were performed by pin-on-disc test configuration. Tests were carried out at room temperature and 50, 100, 200 N normal loads and 1, 2, 3 m/s sliding speeds were applied. The disc material is AISI 1040 steel. PPS composites filler content consisted of %20, %30 and %40 by weight ratio of glass fiber and %30, %40 and %50 by weight ratio of carbon fiber.

The results showed that for carbon fiber filled composites, the friction coefficient and wear rate increased with the increase in applied load. The friction coefficient of glass fiber, reinforced composites, the friction coefficient value decreased with increase in applied load. Finally it is concluded that the lowest wear rate and friction coefficient was reached by 50% carbonfiber PPS composites.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Günümüzde termoplastikler mühendislik plastikleri olarak da adlandırılmaktadırlar. Bu malzemelerin en önemli özellikleri ise geri kazanılabilmeleridir. Termoplastikler, kolay şekil alabilen ve hafif olmaları sebebiyle kolay şekillendirilebilen malzeme grubudur. Sertlikleri ve işlem sıcaklıkları orta derecededir. Yapı bakımından ya amorf kristal ya da yarı kristal yapıda faaliyet göstermektedirler. Korozyona dayanıklı olmalarına rağmen rutubete karşı duyarlıdırlar. Termoplastik malzemelerin yapısal zincirlerinde bulunan bağlar termosetlere göre daha uzundur. Bu sebeple bağlar daha gevşek olduğundan sünekliğe sahiptirler ve tekrar tekrar ısıtılıp soğutulabilirler [1].

Termoplastiklerde malzemelerin bağlarını incelediğimizde zincir içinde kovalent, zincirler arası van der Waals bağlara sahiptirler. Bütün polimerler düşük sıcaklıklarda yüksek bir elastiklik modülü ve kayma modülü gösterirler ve bu sebeple gevrek davranış sergilerler. Termoplastikler tekrar tekrar eritebilirler ve çözülebilirler. Bu da çevre duyarlılığı bakımından özel bir anlam taşır. Polimer türleri birbirleri ile karıştırılmazlarsa, termoplastikler yeniden kazanım için mükemmel uygunluktadırlar. Bir başka avantajları da malzeme üzerinde mevcut çatlak ve kırıkların ısı ile kaynatılarak iyileştirmenin sağlanmasıdır [1].

Zincir molekülleri donma sıcaklığının ( $T_g$ ) belirli bir sıcaklık bölgesinin üzerinde belirli bir ısı hareketliliği kazanırlar. Bunun neticesinde madde daha kolay bükülebilir hale gelir ve esnekleşir. Fakat sekonder bağlar ve hareket sonucu ortaya çıkan düğümlenmeler kaymayı engeller. Böylece Termoplastik malzeme termo-elastik duruma geçer.

Termoplastikler sıcaklık ile ilişkili fonksiyonlara sahiptir. Bu fonksiyonlar ise elastiklik modülü, mukavemet ve sünekliktir. Sıcaklık daha da artarsa, primer bağlar



teker teker çözülmeye başlar, bunun sonucunda molekül zincirleri parçalanır ve düşük moleküllü maddeler haline geçer. Bunun neticesinde malzeme aşırı sıcaklık nedeniyle hasara uğrar.

Termoplastik polimerlerin çeşitlerinin çok fazla olmasıyla birlikte matris olarak kullanılan polimerler sınırlı sayıdadır. Termoplastikler düşük sıcaklıklarda sert halde bulunurlar ve ısıtıldıklarında yumuşarlar. Termosetlere göre matris olarak kullanımları daha düşük oranda olmakla birlikte üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme süreci için organik çözücülere gereksinim duyulmamasından dolayı güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Bunun yanı sıra şekil verilen termoplastik malzeme işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir. Oda sıcaklığında katı halde bulunan termoplastik malzeme soğutucu içinde bekletilmeden depolanabilir. Tüm bu özelliklerin yanında termoplastikler yüksek sertlik ve çarpma dayanımı özelliğine de sahiptirler.

Termoplastiklerin kompozit malzemelerde matris olarak tercih edilmemelerinin başlıca sebebi üretiminin zor olması ve yüksek maliyetidir. Oda sıcaklığında işleme kaliteleri düşük düzeydedir, bu onların üretimde zaman kaybına yol açmasına sebep olur. Bazı termoplastiklerin istenilen şekillere getirebilmesi çözücüler tarafından sağlanır. Termoplastiklerin termosetlere kıyasla hammaddesi daha pahalıdır. Devamlı kullanım sıcaklıkları 60 °C ile 245 °C arasında değişebilen termoplastik reçine çeşitleri bulunmaktadır [1].

Başlangıçta amorf yapıli reçinelerden polietersulfon (PES) ve polieterimid (PEI) matris olarak kullanılmaktaydı. Sonraki dönemde ise havacılık sektörü uygulamaları için çözücülere karşı mukavemet önemli bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmıştır. Bu ihtiyaç sonrasında polietereterketon (PEEK) ve polifenilen sülfid (PPS) gibi yarı-kristal yapıli plastik malzemeler geliştirilmiştir. Ayrıca sınırlı oranlarda poliamidimid (PAI) ve poliimid (PI) gibi plastiklerde kullanılmaktadır.

Bu polimerler diğler termoplastiklerden farklı olarak polimerizasyonlarını özel

korunma süreçlerinde tamamlarlar. En yoğun çalışmalar ise PA, PC, PBT/PET ve PP gibi düşük sıcaklıklarda kullanılan polimerlerin üzerine yapılmıştır. Tüm bu polimerlerin haricinde ABS, SAN, SMA (StirenMaleikAnhidrit), PSU (Polisülfon), PPE (Polifenilen eter) matris olarak kullanılır. Termoplastik reçineler malzemenin çekme ve eğilme mukavemetlerinin artırılması için kullanılır. Otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan termoplastikler uçak sanayisinde de yüksek performanslı malzeme seçimlerinde kullanılmaktadır. Çoğunlukla enjeksiyon ve ekstrüzyon kalıplama yöntemleri ile üretilmektedir. Bu yöntemle hazırlanan takviyeli termoplastikler soğuk plakaların preslenebilmesi ve geri dönüşüm sürecine uygunluğundan dolayı özellikle otomotiv sektöründe sıkça tercih edilmektedir.

Termoplastikler termal enerji ve basınç uygulandığında kolaylıkla yumuşar, deforme olabilir ve akarlar. Bunun sonucunda termoplastik malzemeler herhangi bir şekil alabilir ve soğutulduğunda tekrar sertleşebilirler. Bu özelliklerinden dolayı geri dönüşüm yolu ile tekrar tekrar kullanılabilirler. Bu şekillendirme sırasında herhangi bir kimyasal değişikliğe uğramazlar. Bu özellikleri esasen termoplastiklerin molekül yapısından ileri gelmektedir.

Termoplastikler lineer moleküller yapısına sahiptirler. Lineer moleküllerde zinciri oluşturan ünitelerin arasında çok kuvvetli kovalent bağlar bulunmaktadır. Moleküller arasında ise fiziksel bir bağ bulunmamaktadır. Sadece molekülleri bir arada tutan zayıf elektrostatik çekme kuvvetleri vardır. Bu moleküller arası kuvvet zincirlerinin birbirine göre hareketlerini engelleyen, ısıya karşı duyarlı bir kuvvettir. Dolayısıyla lineer molekül zincirlerinden oluşan bir termoplastik ısıtıldığında moleküller arasındaki kuvvet zayıflar, molekül zincirleri birbirlerine göre hareket bakımından sıvılara benzer şekilde serbest haline gelir ve malzemeye bir kalıpta kolayca şekil verilebilir. Malzeme soğutulduğunda, moleküller arası kuvvet büyür ve molekül zincirlerini verilen yeni şekilde dondurur. Ancak çok ısı verilirse molekül zincirleri kopar ve malzeme özelliklerinde bir yıpranma meydana gelir. Termoplastikler, buharlaşma ile bileşimlerinin değişmemeleri şartıyla ile tekrar tekrar şekillendirmek ve kaynak yapmak mümkündür [1].

Bu tez çalışmasının ilk bölümünde, yarı kristal yapıda bulunan PPS polimer ve kompozitleri ile ilgili araştırmacıların yaptıkları literatür araştırmasına değinilmiştir.

Bu araştırmacıların çalışmaları, farklı polimer ve polimer kompozit malzemeler ile ilgili olup polimerlerin sürtünme ve aşınma davranışlarına etkiyen kayma hızının, uygulanan yükün, sıcaklığın ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelerin etkilerinden oluşmaktadır.

### **1.1. Polimer ve Kompozitleri Üzerine Literatür İncelemesi**

Lhymn ve arkadaşları [2]; Polifenilen Sülfid (PPS) polimerinin %10-40 karbon fiber ve %10-40 cam elyaf katkılı kompozitlerini incelemişlerdir. Çalışmalarında pim-disk aşınma cihazı kullanmışlardır. Çalışmada kompozit malzemelerin maruz kaldığı abrazyon ve adeziv aşınma sonuçları ayrı ayrı ele alınmıştır. Deneyler düşük 6.37-20-32.3 ve 40 mm/s hızlarda, 0.89 ve 0.22 kg düşük yüklerde ve 1 saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Cam elyaf ve karbon fiber yüzdesi arttıkça PPS polimerinin aşınma miktarının azaldığı değerlendirilmiştir. Kayma hızının cam elyafli kompozitte etkili olduğu fakat karbon fiber katkılı kompozitte aşınmaya karşı fazla etkili olmadığı tespit edilmiştir.

Mens ve arkadaşları [3]; Birbirinden farklı 18 polimerin kuru ve sulu ortam şartları altında sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan deney 20 saat boyunca 0.25 m/s kayma hızında ve 5 MPa basınç altında gerçekleşmiştir. Karşı disk malzeme olarak AISI 52100 çeliği kullanılmıştır. PPS polimerinin kuru ortam şartları altında yükün artmasıyla aşınma miktarının arttığı sürtünme katsayısının ise azaldığı tespit etmişlerdir. Ayrıca PPS polimerine %15 PTFE ve %15 PTFE + %20 Cam elyaf katkıları katılarak deneyler tekrarlanmış ve aşınma miktarının/sürtünme katsayısının azaldığını tespit etmişlerdir.

Cho [4]; %5, 10 ve 15 karbon fiber katkılı PPS (PPS+CF), PPS+%1, 2 ve 4 CuO katkılı (PPS+CuO) ve PPS + %5, 10 ve 15 Kevlar (PPS+Kevlar) katkılı kompozitlerinin kuru ortam şartlarında tribolojik özelliklerini incelemiştir. Yapılan

deneyler 20 km kayma mesafesinde 1 m/s ve 0.65 MPa basınç altında gerçekleştirilmiştir. Aşınma mekanizması olarak ise pim-disk test cihazı ve aşındırıcı olarak ise AISI 304 çeliği kullanmıştır. Deneyde çıkan sonuçlara göre kayma mesafesi arttıkça PPS CF kompozitinin sürtünme katsayısının ve aşınma oranının azaldığını tespit etmiştir. PPS polimerine keklar ve CuO eklendiği takdirde aşınma kaybını önemli oranda azalttığı fakat karbon fiberin aksine sürtünme katsayısını arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca artan karbon fiberlerin aşınmayı azalttığı fakat uzun süre kayma sonucunda fiberlerin çelik disk üzerine yapışıp adhezif aşınması meydana getirdiği tespit edilmiştir.

Chen ve arkadaşları [5]; PA6/PPS polimerlerinin %5-35 oranları arasında karbon fiber katkılı kompozitlerin kuru ortam şartlarında sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Karbon fiber ilavesi ile PA6/PPS'nin sürtünme ve aşınma oranları azalmıştır. Artan yük ile birlikte yüzeyin yumuşaması nedeniyle sürtünme katsayısının azaldığı belirlenmiştir. Kuru ortam şartları altında artan yük ile özgül aşınma oranının arttığını tespit etmişlerdir.

Ünal ve Arkadaşları [6]; PA66, POM, ÇYMAPE, %30 cam fiber takviyeli polifenilen sülfid (PPS+%30GF) ve Alifatik keton (APK) polimerlerinin farklı kayma hızı (0.5-2 m/s) ve farklı yükler arasında (0.35-1.05 MPa) sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemiştir. Karşı disk malzeme olarak AISI D2 çeliği kullanmıştır. Çalışmada kullanılan %30 cam elyaf takviyeli PPS'nin, uygulanan yükün artmasıyla aşınma oranını arttırdığı ve sürtünme katsayısını azalttığı gözlemlenmiştir. Kayma hızının artmasıyla sürtünme katsayısı ve aşınmanın arttığı tespit edilmiştir. PPS kompozitinin aşınma oranı ise ortalama  $10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/Nm olarak tespit edilmiştir. Kayma hızı ise uygulanan yükten daha önemli bir faktör olarak göze çarpmaktadır.

Ünal ve Arkadaşları [7]; Kısa cam elyaf takviyeli naylon 6 polimer kompozitlerin aşınma ve sürtünme davranışlarını incelemiştir. Çalışmada kullanılan kısa cam fiberler, naylon polimerine ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranında olacak şekilde çift vidalı bir ekstrüzyon makinası kullanılarak katılmıştır. Tribolojik deneylerde kullanılan numuneler enjeksiyonla kalıplama tekniğiyle üretilmiştir. Aşınma

deneyleri pim-disk aşınma cihazında 20, 30 ve 40N yüklerde ve 0.5 m/s kayma hızında %30 oranında cam elyaf takviyeli diske karşı yapılmıştır. Deneyler sonucunda, cam fiber takviyeli naylon 6 esaslı kompozitlerin hepsinin aşınma direnci, katkısız naylon 6 polimerine göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Optimum aşınma direnci ise %30 cam elyaf takviyeli naylon 6 kompozitinde elde edilmiştir.

Yılmaz ve arkadaşları [8]; Polifenilen sülfid matrisli, iki farklı boyutta (<100µm ve >100µm) pomza tozu, karbon elyaf (CF) ve karbon elyaf/pomza tozu takviyeli hibrit kompozitler üretilmiş ve üretilen kompozitlerin adhezif aşınma davranışları incelenmiştir. Aşınma testleri ball-on disk metodu ile üç farklı yük altında (10, 20 ve 30 N) ve üç farklı disk dönme hızında (100, 250 ve 500 rpm) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen test sonuçları göstermiştir ki pomza ve karbon elyaf takviyesi, PPS'nin aşınma direncini artırmaktadır. Dolayısıyla çalışma sonucunda adhesif aşınmaya maruz kalan uygulamalarda bu malzemelerin ayrı ayrı ya da hibrit olarak takviye malzemesi olarak kullanılabilmesinin uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Sümer ve arkadaşları [9]; Saf PEEK matrisle %30 cam elyaf takviyeli PEEK matrisli kompozit malzemelerin pim-disk şeklindeki aşınma deney cihazında kuru ve sulu ortamdaki tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Uygulanan yükün artmasıyla sürtünme katsayılarının arttığını ve aşınma miktarlarının arttığını belirlemişlerdir. Sulu ortamlarda yapılan deneylerde kompozit malzemelerin aşınma dayanımı daha yüksek olmuştur.

Yousif ve arkadaşları [10]; Keçe şeklindeki cam elyaf takviyeli polyester kompozit malzemenin pim-disk şeklindeki aşınma deney cihazındaki aşınma yüzeylerini incelemişlerdir. Sürtünme katsayısının ve aşınma miktarının aşınmadaki kayma yönüne bağlı olduğunu belirtmektedirler. Büyük yüklerde ve kayma mesafelerinde matris malzemesinde mikro ve makro çatlakların, elyaflarda kırılma, ayrılma yüzeylerinin meydana geldiğini gözlemlemişlerdir.

Fındık ve Arkadaşları [11]; Bu deneysel çalışmada, çok yüksek moleküler ağırlıklı

polietilen (ÇYMAPE) polimerinin paslanmaz çelik yüzeyine karşı aşınma ve sürtünme davranışını incelemişlerdir. Deneyler kuru ve saf su ortamlarında pim-disk aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 38N, 88N ve 138N olmak üzere üç farklı yük ve 0.4 m/s, 0.8 m/s ve 1.2 m/s olmak üzere üç farklı kayma hızı kullanılmıştır. Deneyler sonunda, ÇYMAPE polimerinin sürtünme katsayısının uygulanan yükün artması ile azalmakta olduğu gözlenmiştir. Ancak sürtünme katsayısı kayma hızının artmasıyla artmıştır. Benzer şekilde ÇYMAPE polimerinin spesifik aşınma oranı uygulanan yükün artması ile azalırken, kayma hızının artması ile artmıştır. Bu durum hem kuru hem de sulu ortam şartları için geçerlidir. Sulu ortamdaki spesifik aşınma oranı kuru ortama göre daha düşüktür. ÇYMAPE polimerinin çelik karşı yüzeyine karşı aşınma yüzeyleri optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Bu deneysel çalışma sonunda kullanılan yük ve kayma hızı aralığında ÇYMAPE polimeri için su ortamının elde edilen sonuçlar açısından daha uygun olduğu kanısına varılmıştır.

Mimaroğlu ve arkadaşları [12]; Deneyde PA66, Çok yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (ÇYMPE), Alifatik Poliketon (APK) ve PPS+%30GF kompozit malzemelerini kullanmışlardır. Bu malzemelere karşı AISI D2 çelik disk, 1 m/s kayma hızı ile 10 N yük kullanılarak kuru ortam şartlarında abrazif aşınma testlerini uygulamışlardır. Burada karşı aşındırıcı malzeme olarak zımpara kağıt gridi kullanılmıştır. Bu testler sonucunda kayma mesafesi arttıkça aşınma oranı azalmıştır ve grid sayısı arttıkça aşınma oranının azaldığını tespit etmişlerdir.

Mimaroğlu ve arkadaşları [13]; Deneyde PA66, PA66 + %10 PTFE, PA46 + %30 GF, PEEK, PEEK + %20GF, PTFE + %25 bronz, PTFE + %17 GF, %15 GF Alifatik Poliketon (APK) ve PPS + %30 GF kompozit malzemelerini kullanmışlardır. Aşınma testlerinde karşı aşındırıcı disk olarak %15 cam elyaf takviyeli doymamış poliester (BMC) kullanmışlardır. Aşınma testlerini 20,40 ve 60 N yüklerinde ve 0.5 m/s kayma hızında gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalar sonucunda PPS kompozitinde yük arttıkça aşınma oranının arttığı ve sürtünme katsayısının azaldığı belirtilmiştir.

Jia ve arkadaşları [14]; Poliamid 66, PTFE ve PPS polimer malzemelerini

kullanmışlardır. Karşı aşındırıcı malzeme olarak da kendi polimer malzemelerini kullanmışlardır. Deneyler kuru ve yağlı ortam şartları altında, 0.1-1.2 m/s kayma hızları arasında ve 0.1 N-1.2 N yükleri arasında uygulanarak yapılmıştır. Polimer-polimer çiftinin sürtünme katsayısı 0.25-0.30 arasında tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda PPS polimerinin kendi polimerine karşı kullanılmasından, ortamda parafin yağı kullanıldığından aşınmayı azaltıcı etki gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca polimer-polimer kombinasyonunda sürtünme mekanizmasında sıcaklığın önemli olduğu ve ortama yağ ilavesi yapıldığında bu sıcaklığı düşürdüğü görülmüştür.

Quintelier ve arkadaşları [15]; Deneyde PPS polimerini çalışmışlardır. PPS polimerinin içerisine karbon fiber takviye malzemesi katmışlardır. Katkı malzemesi takviyesi sonucunda elde edilen PPS kompozitini aşındırıcı malzeme olarak kullanmışlardır. Pim-disk test cihazı kullanmışlardır. Deneyler 20 mm/s hızda, 250 N yükte ve 1 saat süre ile gerçekleşmiştir. Deney sonuçlarında sürtünme katsayısı ortalama 0.33 bulunmuş ve artan yük miktarı sonucunda elde edilen kompozit malzemelerde (polimer-polimer) aşınma miktarının polimer-metal aşınmasına göre çok daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca polimer-polimer sürtünme katsayısı daha yüksek oranda bulunmuştur.

Guo [16]; PPS polimer içerisine %5, %10 ve %17 oranında takviye malzemesi olarak MC (Molibdenyum konsantresi) ve PTFE katmışlardır. Aşınma mekanizması olarak ise pim-disk ve aşındırıcı olarak ise AISI 304 çeliği kullanılmıştır. Deneyde kayma hızı olarak 0.5, 1 ve 2 m/s ve yük olarak 0.65 MPa kullanılmıştır. Kayma mesafesi artığında MC ve PTFE katkılı kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. En yüksek sürtünme katsayısı değeri katkısız PPS polimerinde en düşük değer ise %17 MC + %5 PTFE katkılı kompozitte tespit edilmiştir. Bunun nedeni yüzeydeki film tabakasının artması sonucu gerçekleşmiş olmasıdır. Transfer film tabakasının malzeme yüzeyinde eşit dağılmış şekilde olduğunu belirtmişlerdir. Transfer film tabakasının eşit dağılım olması ve aşınma sırasında malzemede kopmaların daha az olması nedeni ile malzemenin aşınma direncinin artmasına sebebiyet verdiğini gözlemlemişlerdir.

Besnea ve arkadaşları [17]; %40 cam elyaf katkılı PPS (PPS GF40) ve PPS + %10 PTFE + %20 karbon fiber katkılı (PPS PVX) kompozitlerinin kuru sürtünme şartlarında sürtünme özelliklerini incelemiştir. Deneyler 10 km kayma mesafesinde ve 0.25-0.5 ve 0.75 MPa yükleri altında ve 0.25-0.5 ve 0.75 m/s kayma hızlarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, sürtünme katsayısının yük ve kayma hızı ile birlikte nasıl bir ilişki içinde olduğu vurgulanmaktadır. Ayrıca deneyde çıkan sonuçlarda PPS PVX kompozitinin yük ve kayma hızı arttıkça sürtünme katsayısı artmıştır. PPS GF40 kompozitinin ise kayma hızı artarken sürtünme katsayısında azalma, yük artınca sürtünme katsayısına çok belirgin bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

Z. Jiang [18]; PPS'nin mekanik ve tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi amacı ile polimer malzemesi içerisine karbon nano takviye etmiştir. Deney şartları kuru ortamda gerçekleştirilmiştir. Aşınma deney düzeneği olarak pim-disk kullanılmıştır. Aşınma deneyi 1 ve 3 m/s hızlarda 1, 2 ve 3 MPa yük altında 60 dakika süre boyunca gerçekleştirilmiştir. PPS + %10 CF ve PPS + %15 CF kompozitlerinin kuru ortamdaki sürtünme katsayısı değerlerinin, katkısız PPS malzemenin kuru ortamdaki sürtünme katsayısı değerlerinden düşük olduğu gözlenmiştir. Kuru ortamda yapılan deneyde yük miktarı arttırıldığında sürtünme katsayısı değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Karbon fiber oranı arttıkça sürtünme katsayısı ve aşınma oranının azaldığı belirlenmiştir. Karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinde kayma hızı arttığında sürtünme katsayısı artmış ancak aşınma oranına belli bir etkisi olmamıştır.

Kurt [19]; PAI ve PAI kompoziti, PEEK + %30 CF, PEEK + %30 GF, PPS + %40 GF, PSU + %20 GF, PEI + %15 PTFE kompozitleri ile PK ve LCP polimerlerinin kuru sürtünme şartlarında sürtünme ve aşınma özelliklerini normal oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda incelemiştir. Yaptığı deneyler sonucunda PPS kompozit malzemesi için; artan yük ile birlikte sürtünme katsayısının azaldığını, artan kayma hızıyla da sürtünme katsayısının arttığını tespit etmiştir. Ayrıca artan yük ile aşınma oranının diğer kompozit malzemelere göre çok fazla etkilenmediğini değerlendirmiştir.



Hanmin ve arkadaşları [20]; %10-70 oranlarında karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin kuru sürtünme şartlarında sürtünme ve aşınma özelliklerini oda sıcaklığında incelemiştir. Aşındırıcı malzeme olarak karbon çeliği (%0.45 C, %0.37 Si ve %0.80 Mn) kullanılmıştır. Aşınma deneyi 0.4 m/s hızında 0-800 N yükleri arasında ve 1.5 km kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda yük arttıkça sürtünme katsayısı azalmıştır. Ayrıca karbon yüzdesi arttıkça aşınma oranının ve sürtünme katsayısının PPS polimerine göre daha düşük seviyede olduğunu tespit etmişlerdir.

Myshkin ve arkadaşları [21]; PA6 polimerinin kuru sürtünme şartlarında sürtünme ve aşınma özelliklerini oda sıcaklığında incelemiştir. Aşındırıcı malzeme olarak karbon çeliği kullanmışlardır. Aşınma deneyi 0.5-1 m/s hızları arasında 0-20 MPa yükleri altında ve 1 km kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda yük arttıkça sürtünme katsayısı azalmıştır. Ayrıca polimerlerin aşınmasında deformasyon ve temas sıcaklığının önemli bir faktör olduğunu ortaya koymuşlardır.

Zhou ve arkadaşları [22]; %0-15 oranlarında karbon fiber katkılı PA6/PPS kompozitlerinin kuru sürtünme şartlarında sürtünme ve aşınma özelliklerini oda sıcaklığında incelemiştir. Aşındırıcı malzeme olarak karbon çeliğini kullanmışlardır. Aşınma deneyi 500-1500 rpm devirleri arasında 10-20 N yükleri altında ve 1 km kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda sürtünme katsayısı kayma mesafesinin artmasıyla önce artmış sonra stabil hale gelmiştir. Ayrıca karbon yüzdesi arttıkça aşınmanın arttığı tespit edilmiştir. Yük ve kayma hızı arttıkça, sürtünme katsayısı azalma aşınma oranı ise artma eğilimi göstermiştir.

Bahadur ve arkadaşları [23]; Nikel sülfid (NiS) ve kurşun selenid (PbSe) katkılı PPS kompozitinin tribolojik özelliklerini incelemiştir. Nikel sülfid (NiS) katkılı PPS kompoziti aşınma oranını azaltırken, kurşun selenid (PbSe) katkılı PPS kompoziti ise aşınma oranını arttırmaktadır. Transfer film tabakası her katkı malzemesi için farklı davranışlar sergilemektedir. Katkısız PPS polimerinde transfer filmi karşı yüzeyde

kalın ve taneli, NiS katkılı kompozitte ince ve bütün halde görülmüştür. PbSe katkılı kompozitte transfer filmi görülmemiştir. Aşınmada maksimum malzeme kaybı %20-30 NiS katkılı PPS kompozitinde tespit edilmiştir.

Sinha ve arkadaşları [24]; %0-10 oranlarında CuO, ZnO, TiO<sub>2</sub> ve SiC PPS kompozitlerinin kuru sürtünme şartlarında aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Aşındırıcı malzeme olarak AISI 304 çeliği kullanılmıştır. Aşınma deneyi 1 m/s kayma hızında 0.65 MPa basıncı altında ve 50 km kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda katkı maddelerinden CuO ve TiO<sub>2</sub> ilavesi aşınma kaybını önemli derecede azaltırken, ZnO ve SiC aşınma kaybını arttırmıştır.

Yılmaz [25]; Kuru kayma aşınması şartlarında örgü kumaş şeklinde iki yönlü, üç yönlü cam elyaf, iki yönlü karbon elyaf ve cam ile karbon elyaflardan oluşan iki yönlü hibrit elyaf takviyeli epoksi reçine matrisli kompozit malzemelerin aşınma davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Disk üzerinde blok (block on roller) aşınma test yöntemi kullanılarak, farklı kayma mesafelerinde, farklı yük (67N ve 92N), kayma hızı (1 m/s ve 2 m/s) parametrelerinin kombinasyonu altında aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı disk olarak AISI 52100, 65 HRC sertleştirilmiş rulman çeliği kullanılmıştır. Aşınma testleri sonunda ağırlık kaybı olarak aşınma miktarları ölçülerek, aşınma performansı analizleri yapılmıştır. Karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin, tüm kayma mesafelerinde her bir deney parametresi kombinasyonu için aşınma performansı, cam elyaf takviyesi içeren kompozit malzemelere göre çok daha yüksek olduğu sonucu elde edilmiştir. Bu sonucun, karbon elyaflarının kendinden yağlama özelliğine, yüksek dayanıma ve katılığa sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Mihu ve arkadaşları [26]; Üç farklı epoksi reçine kompozitlerinin kuru sürtünme şartlarında aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Aşındırıcı malzeme olarak çelik disk kullanılmıştır. Aşınma deneyi 0.5-3.5 m/s kayma hızları arasında 5-35 N yükleri arasında ve 1 km kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Epoksi termoplastiklerle karşılaştırıldığında kayma aşınmasına karşı çok dayanıklı değildir. Her üç epoksi

reçinenin sürtünme katsayısı artan yüklerle birlikte artış göstermiştir.

Şahin ve arkadaşları [27]; %42 karbon fiber katkılı epoksi kompozitlerinin kuru sürtünme şartlarında aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Aşındırıcı malzeme olarak çelik disk kullanılmıştır. Aşınma deneyi 0.42 m/s kayma hızında 90 ve 160 N yükleri altında ve 1 km kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Karbon fiber katkısı epoksi üzerinde aşınma oranını azaltırken sürtünme katsayısını arttırmaktadır. Yükün artması aşınma oranını arttırırken, sürtünme katsayısını azaltmıştır. Sürtünme katsayıları ortalama 0.13 ve 0.35 arasında çıkmaktadır.

Kulkarni ve arkadaşları [28]; Deneyde Polyamide 6 (PA6), Poly-Acrylonitrile ve Butadiene Styrene (ABS) polimer malzemelerini kullanmışlardır. Aşınma deney yöntemi olarak pim-disk test konfigürasyonu kullanılmıştır. Bu malzemelere karşı çelik disk kullanarak, 2.5-7.5 m/s kayma hızları arasında, 10-70 N yükler altında kullanılarak kuru ortam şartlarında adhezif aşınma testleri uygulamışlardır. Bu testler sonucunda en fazla aşınma PA6 polimerinde görülmüştür. Yük arttıkça aşınma artmıştır. Sürtünme katsayısı ise başlangıç hal aşamasında artma, kararlı hal aşamasında azalma eğilimi göstermiştir.

Lan-Hiu yaptıkları çalışmada [29]; Değişik oranlarda (%3-%12 ağırlıkça) cam elyaf takviyeli POM malzemesinin tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Deneylerde aşınma cihazı olarak pin disk sistemini kullanmışlardır. Deneyleri kuru ve yağlı ortam şartlarında gerçekleştirmişlerdir. Deneyleri 0.42 m/s kayma hızında, 98 N, 147 N, 196 N, 245 N ve 394 N yükler ve 2 saat kayma süresinde gerçekleştirmişlerdir. Ortam sıcaklığı 23 °C, ortamdaki nem oranı ise %60 oranında olarak belirtilmiştir. Kuru ortam şartlarında gerçekleştirilen deneyde POM+%3 cam elyaf kompozit malzemenin aşınma miktarı ve sürtünme katsayısı değerlerinin katkısız POM polimerinden düşük olduğu tespit edilmiştir. Fakat aşındırıcı malzeme üzerinde kalıntı parçacıkların olduğunu belirtmişlerdir. Yağlı ortam şartlarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda ise POM+%3 cam elyaf kompozit malzemesinin aşınma miktarı ve sürtünme katsayısı değerleri yine benzer şekilde katkısız POM polimerine göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Briscoe ve arkadaşları [30]; Deneyde Politetrafloretillen (PTFE) polimer malzemelerini ve %15 ve %25 cam elyaf oranlarında PTFE kompozitlerinin kuru sürtünme şartlarında aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Aşınma deney yöntemi olarak pim-disk test konfigürasyonu kullanılmıştır. Bu malzemelere karşı 440C çelik disk kullanarak, 1 m/s kayma hızında, 2000 m kayma mesafesinde ve 0.66 MPa basınç altında kullanılarak kuru ortam şartlarında adhezif aşınma testleri uygulanmışlardır. Bu testler sonucunda sürtünme katsayıları cam elyaf oranı arttıkça azalmaktadır. Kayma hızının artması ile cam elyafı PTFE kompozitlerinin sürtünme katsayısı artmaktadır ancak yükün artmasıyla sürtünme katsayısı belirgin bir şekilde artmamaktadır. En az aşınma saf PTFE polimerinde, en yüksek aşınma oranı ise %25 GF+PTFE kompozitinde görülmüştür.

Bolvari ve arkadaşları [31]; Deneyde Poli amid (PA66), %5-30 oranları arasında karbon fiber katkılı PA66 kompozit malzemelerini ve %5-30 karbon fiber + %10 PTFE katkılı PA66 kompozit malzemelerini kullanmışlardır. Aşınma deney yöntemi olarak pim-disk test konfigürasyonu kullanılmıştır. Bu malzemelere karşı A2 çelik disk kullanarak, 30 N yük altında ve 1 m/s kayma hızında kuru ortam şartlarında adhezif aşınma testleri uygulanmışlardır. En az sürtünme katsayısı ve aşınma oranı ise %15 CF+PA66 kompozit malzemesinde görülmüştür. SEM görüntüler incelendiğinde karbon fiber adhezif aşınma boyunca transfer film tabakası meydana getirmiş ve böylece sürtünme katsayısını ve aşınma oranını düşürmüştür.

Voss ve arkadaşları [32]; Bu çalışmada Poli eter eter keton (PEEK), %20 ve %30 cam elyaf katkılı PEEK kompoziti ile %30 karbon fiber katkılı PEEK kompozitini kullanmışlardır. Aşınma deney yöntemi olarak pim-disk test konfigürasyonu kullanılmıştır. Bu malzemelere karşı 100Cr6 çelik disk kullanarak, 0.2 ile 8.4 MPa basınçlar arasında, 0.6 ile 3 m/s kayma hızlarında kuru ortam şartlarında abrazif aşınma testleri uygulanmışlardır. Bu testler sonucunda en fazla sürtünme katsayısı ve aşınma oranı saf PEEK polimerinde görülmüştür. PEEK polimerine cam elyaf katkısı eklendiğinde aşınma direnci artmaktadır. Karbon fiber katkılı PEEK kompoziti ise cam elyafıya oranla daha mukavemetli ve dirençli bir malzeme olarak ortaya çıkmaktadır.

Cai [33]; Deneyde Polietilen imin (PEI) polimer malzemesini ve cam elyaf/karbon fiber katkılı PEI kompozitlerinin kuru sürtünme şartlarında aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Aşınma deney yöntemi olarak pim-disk test konfigürasyonu kullanılmıştır. Bu malzemelere karşı AISI D2 çelik disk kullanarak, 0.5 m/s kayma hızında, 2000 m kayma mesafesinde ve 50-150 N yükler arasında kullanılarak kuru ortam şartlarında adhezif aşınma testleri uygulanmışlardır. Bu testler sonucunda sürtünme katsayıları katkı oranı arttıkça azalmaktadır. Yükün artması ile cam elyafı/karbon fiber katkılı PEI kompozitlerinin sürtünme katsayısı azalmaktadır. Bu testler sonucunda en fazla sürtünme katsayısı ve aşınma oranı saf PEI polimerinde görülmüştür. En az sürtünme katsayısı ve aşınma oranı ise CF+PEI kompozit malzemesinde görülmüştür.

Rajesh ve arkadaşları [34]; yaptıkları çalışmada, saf PET ve ağırlıkça %30 oranında cam elyaf içeren polietilentetra (PET) mekanik performansı araştırılmıştır. Aşınma deney yöntemi olarak pim-disk test konfigürasyonu kullanılmıştır. Bu malzemelere karşı çelik disk kullanarak, 30 N yük altında ve 2 m/s kayma hızında kuru ortam şartlarında adhezif aşınma testleri uygulanmışlardır. En az sürtünme katsayısı ve aşınma oranı ise %30 GF+PET kompozit malzemesinde görülmüştür. SEM görüntüleri incelendiğinde cam elyaf aşınma boyunca transfer film tabakası meydana getirmiştir. Yapılan çalışma neticesinde PET polimeri ile cam elyaf katkısının birlikte çalışmasının uygun olmadığı değerlendirilmiştir.

Reinicke ve arkadaşları [35]; Yapmış oldukları çalışmada farklı fiber takviyeli termoplastik malzemelerin tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada “enjeksiyonla kalıplama” metoduyla elde edilmiş PA46 (polyamid 46), PP (polyphthalamide), PPS (polyphenylensulfid) ve PEI (polyetherimide) malzemeleri ele alınmıştır. Farklı miktarlarda cam fiber ile takviye edilmiş bu malzemelerin kuru sürtünme şartlarında sürtünme ve aşınma özellikleri irdelenmiştir. Araştırmacılar yağlayıcı olarak kullanılan PTFE'nin (polytetrafloroetilen) tüm polimer uygulamalarında tribolojik özellikleri olumlu yönde etkilediğini ve abrazyonun cam fiberle takviye edilmiş malzemede aşınmayı daha çok şiddetlendirdiğini belirtmişlerdir. Yaptıkları test sonuçlarına göre PA46 ve PPA bileşimlerinde en iyi

tribolojik özellikleri elde etmişler ve farklı biçimlerde tasarlanan malzemelerde kuru sürtünme şartlarında farklı aşınma mekanizmalarının ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Yüksek sıcaklıklardaki en iyi aşınma performansının PPA+GF+TFE kompozisyonunda olduğunu ve PA46+GF+PTFE kompozitinde yüksek aşınma direncine sahip olmasıyla birlikte yüksek sürtünme katsayısına da sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Cam fiber ile takviye edilmiş kompozitlerde PTFE takviye malzemesi olarak kullanılmadığında aşınma oranında çok yüksek bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Takviye malzemelerinin tribolojik özelliklerinin oda sıcaklığı ile 150 °C arasında belirlenmesi gerektiğini ve daha az abrazif etki gösteren takviye malzemeleri ile daha iyi aşınma direncine sahip kompozit malzemeler üretilbileceği sonucuna varmışlardır.

Tewari ve arkadaşları [36]; yaptıkları çalışmada, ağırlıkça %16, %20 ve %25 oranlarında cam elyaf içeren cam elyaf takviyeli polyetherimidin (PEI) mekanik performansı incelenmiştir. Aşınma deney yöntemi olarak pim-disk test konfigürasyonu kullanılmıştır. Bu malzemelere karşı çelik disk kullanarak, 2.1 m/s kayma hızında, 2000 m kayma mesafesinde ve 25 N yük altında kullanılarak kuru ortam şartlarında adhezif aşınma testleri uygulanmışlardır. Bu testler sonucunda sürtünme katsayıları katkı oranı arttıkça azalmaktadır. Yükün artması ile cam elyaf katkılı PEI kompozitlerinin sürtünme katsayısı azalmaktadır. Bu testler sonucunda en fazla sürtünme katsayısı ve aşınma oranı saf PEI polimerinde görülmüştür. En az sürtünme katsayısı ve aşınma oranı ise %16 GF+PEI kompozit malzemesinde görülmüştür.

Friedrich ve arkadaşları [37]; Bu çalışmada Poli tetra flor etilen (PTFE), %13, %22 ve %36 cam elyaf katkılı PTFE kompozitlerini kullanmışlardır. Aşınma deney yöntemi olarak pim-disk test konfigürasyonu kullanılmıştır. Bu malzemelere karşı çelik disk kullanarak, 0.5 ile 5 MPa basınçlar arasında, 0.6 ile 3 m/s kayma hızlarında kuru ortam şartlarında abrazif aşınma testleri uygulanmışlardır. Bu testler sonucunda en fazla aşınma oranı saf PTFE polimerinde görülmüştür. Kayma hızı ve uygulanan basınç arttıkça aşınma oranının arttığı görülmektedir. PTFE polimerine cam elyaf katkısı eklendiğinde aşınma direnci azalmaktadır. En fazla aşınma oranına

sahip kompozit malzeme %36 cam elyaf katkılı PTFE olarak tespit edilmiştir.

## 1.2 Tezin Amacı

Elyaf takviyeli PPS kompozit uygulamalarının sağladığı tasarım esnekliği ve mukavemeti gemi bordalarının posta ve tulaniler arasında oluşturduğu çift eğrilikli yapılar ile havacılık alanında mukavemet gerektiren alanlar bu çalışmanın çıkış noktasını oluşturmaktadır. Polifenilen Sülfid (PPS) polimeri ve kompozitleri ile ilgili yeterli sayıda sürtünme ve aşınma çalışmalarının bulunmadığı, yüksek yük ve kayma hızlarında deneylerin yapılmadığı ve özellikle mevcut çalışmalarda %50 karbon fiber katkılı PPS kompozitin kullanılmadığı görülmüştür. Bu çalışmada; Bu sonuçlar ışığında %30-%50 arası karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin ve %20-%40 arası cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin incelenmesi ön görülmüştür. Deney şartları olarak katkısız PPS ve cam elyaf/karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin 50, 100 ve 200 N yükler altında ve 1, 2 ve 3 m/s'lik kayma hızları altında sürtünme ve aşınma deneyleri ile ifade edilmesine yönelik analitik ve sayısal incelemeler yapılacaktır.

Sürtünme ve aşınma deneylerinin ardından, farklı malzeme tipleri için ortam koşulları göz önünde bulundurularak maruz kalınan yük ve kayma hızı altında ne kadar süre dayandığı ve aşındığı tespit edilmiştir. Deneyler ile sayısal sonuçlar elde edilecektir. Sonuçların karşılaştırılabilmesi ve aşınma oranlarının belirlenebilmesi için pim disk aşınma cihazı kullanılacaktır.

Bu çalışmanın sonucunda, literatürde bulunmayan malzemelerin (%40 ve %50 karbon fiberli PPS kompozit malzemeler gibi) yukarıda tanımlanmış ortam şartları altında sürtünme ve aşınma deneyleri yapılarak mekanik karakterizasyonu hakkında bilgi sahibi olunması ve elde edilen verilen uygulanan alanlarda kullanılması maksadıyla literatüre kazandırılması hedeflenmektedir.

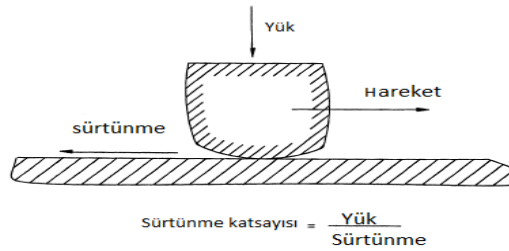
## BÖLÜM 2. POLİMERLERİN SÜRTÜNME VE AŞINMA DAVRANIŞLARI

### 2.1. Giriş

Bu bölümde polifenilen sülfid (PPS) polimerinin fiziksel, mekanik, termal özellikleri, sürtünme ve aşınma mekanizmaları, aşınma test modelleri, polimerlerin maruz kaldığı sürtünme ve aşınma çeşitleri, aşınmayı azaltan katkıları detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

### 2.2. Sürtünme Mekanizmaları

Sürtünme, bir katı cismin dokunduğu bir başkasının yüzeyine göre teğetsel olarak hareket ettiğinde veya böyle bir hareketi meydana getirme girişiminde, bu harekete karşı mevcut olan bir dirençtir [38]. Şekil 2.1.'de bir sürtünme mekanizması görülmektedir. Toplam enerji sarfiyatının çok ciddi bir bölümünün kayma sırasında oluşan sürtünme kayıplarından kaynaklandığı algısı, sürtünmenin önemini vurgulamaya yeterli olmaktadır. Bu sebeple herhangi bir mekanizmada sürtünmenin azaltılması, modern teknoloji açısından son derece önemli bir sorun haline gelmektedir. Bununla birlikte günlük yaşamda meydana gelen süreçlerin, etkinlik açısından geniş ölçüde sürtünmeye dayandığı da göz ardı edilmeyecektir.

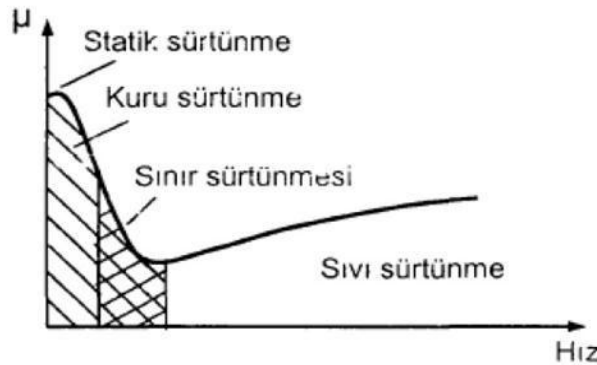


Şekil.2.1. Sürtünme mekanizması



Bunun için yeterli düzeylerde sürtünmenin hayatımızda aktif olması büyük bir görev olmaktadır. Yürüme veya otomobil kullanmayı düşündüğümüzde, cisimleri elimizde tutmak gibi basit süreçlerle iç içeyiz ve sürtünmenin çok az olması halinde bunları gerçekleştirememiz mümkün değildir. Bu durumda, koşulların kaygan olduğunu söyleriz ve bu çözüm bulunması gereken bir sürtünme sorunu haline gelir. Bilindiği üzere çiviler, cıvata-somunlar gibi sıkıştırıcı-birleştirici makine elemanlarının normal çalışma koşullarında yüksek sürtünme altında çalışmasının sağlanması gereklidir.

Yukarıda sözü edilen iki kategori başlıca iki sürtünme ihtiyacını, istenmediğinde sürtünmeyi azaltma ya da gerektiğinde onu yeterince yüksek düzeyde tutmayı içermektedir. Belli bir öneme sahip üçüncü sürtünme sorunu da, dar sınırlar içinde sürtünmeyi sabit tutmaktır. Buna tipik bir örnek, otomobil frenleri olup bunlar, sürtünme çok seviyelerde olduklarında arabayı yeterli sürede çabuk durduramazlar, sürtünme fazla olduğunda da yolculara rahatsızlık verecek derecede bir ileri fırlama hareketi yaşayabilirler. Sürtünmenin denetim altında tutulmasının gerektiği diğer uygulamalar, metal haddeleme endüstrisinde veya hassasiyetle denetlenebilir hareketin istendiği yerlerde olur [38]. Şekil 2.2.'de sürtünme çeşitlerinin hızla olan ilişkisi gösterilmiştir.

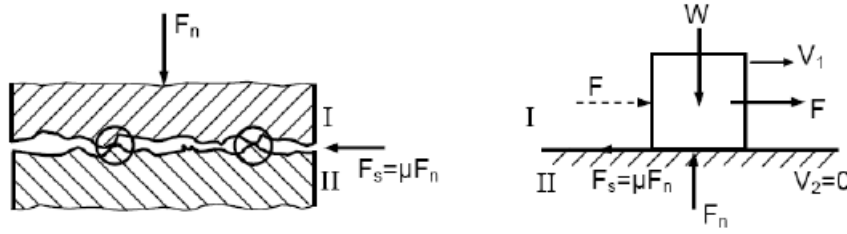


Şekil.2.2. Sürtünme Çeşitleri

Birçok pratik uygulamada oldukça önemli bir dördüncü sorun da, ince sesler, sürekli gürültüler şeklinde beliren sürtünmenin sebep olduğu titreşimlerdir. Bunun aksinin istenme durumunun örneği keman türü çalgılarda görülmekte, bunlar ancak bu titreşimler sayesinde ses verirler.

### 2.2.1. Kuru sürtünme

Genel anlamda sürtünme denilince akla gelen ilk sürtünme çeşidi kuru sürtünmedir. Aşınma, enerji kaybı ve sıcaklık yükselişi gibi olaylar kuru sürtünme neticesinde oluşur. Buna göre teknikte sürtünme hem istenilen hem de istenilmeyen olaylar olarak ortaya çıkan fren, kavrama ve sürtülmeli çarklar gibi makine elemanlarında istenilen bir olaydır. Bu yerlerde sürtünme yukarı seviyelere çıkarılır. Bunların dışında, bütün izafi hareket yapan yüzeylerde istenilmeyen bir olay olarak ortaya çıkan ve Şekil 2.3.'te belirtilen kuru sürtünme modelinde ve sistemin serbest cisim diyagramında sürtünmenin aşağı seviyelere çekilmesi gerekir.



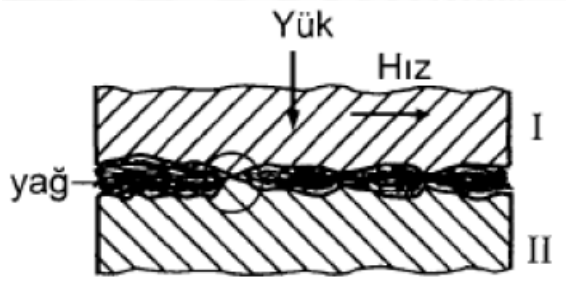
Şekil.2.3. Kuru sürtünme modeli ve sistemin serbest cisim diyagramı [38]

Yük uygulanmadan önce temas halindeki tabakalar arasında bir bağlantı oluşur. Yük uygulandıktan sonra tabakanın bir kısmı kopar ve buradaki küçük temas alanlarında metal kaynama meydana gelir. İzafi hareket yapan yüzeylerde sürtünme metal kaynak bağlar ile tabakalar arasındaki bağlantıların oluşturduğu dirençtir. Sürtünme kuvveti, hem kaynak bağlarını hem de bağlantıları koparan kuvvettir.

### 2.2.2. Sınır sürtünmesi

Yüzeyler arasında bulunan herhangi bir yağlayıcı maddeye rağmen sıvı sürtünmesi hali oluşturulmadığı takdirde, sınır sürtünmesi hali ortaya çıkar. Pratikte en çok karşılaşılan bu sürtünme halinde sürtünme katsayısı genel olarak 0.03-0.10 arasında değişir. Yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde bulunması halinde yağlayıcı maddenin molekülleri, absorbe olayının sonucu olarak madensel yüzeylere düzgün ve muntazam bir şekilde tutunurlar. Kuru ve sıvı sürtünme arasında gerçekleşebilen

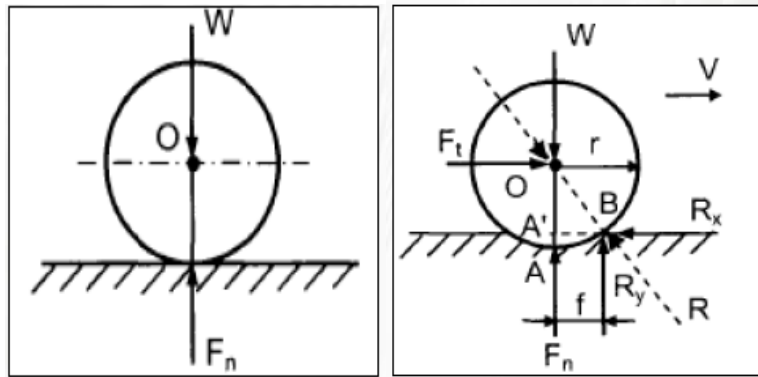
temas yüzeylerinin çabuk ısındığı bir ara sürtünme şeklidir. Sınır sürtünme modeli Şekil 2.4.'te görülmektedir.



Şekil.2.4. Sınır sürtünme modeli [38]

### 2.2.3. Yuvarlanma sürtünmesi

Yuvarlanma sürtünmesi, yuvarlanma hareketine karşı temas yüzeylerinde meydana gelen bir dirençtir. Teorik bakımdan tam rijit ve yüzeyi pürüzsüz olan tam silindirik veya küre şeklinde bir elemanın, rijit pürüzsüz bir düzlem üzerinde serbest yuvarlanmasında hiçbir sürtünme meydana gelmez. Şekil 2.5.'te yuvarlanma sürtünme modeli ve sistemin serbest cisim diyagramında bu durum görülmektedir.



Şekil.2.5. Yuvarlanma sürtünme modeli ve sistemin serbest cisim diyagramı [28]

Aslında bu tür elemanların temas yüzeylerinde elastik ve daha az olarak da plastik deformasyonlar oluşur. Temas yüzeyleri doğru veya nokta değil de alan şeklindedir. Ayrıca hareket yönüne doğru temas alanında bir dalga oluşmaktadır. Genellikle yuvarlanma, elastik deformasyon ve kaynamadan oluşan bir sürtünme olayı şeklindedir. Sonuç olarak yuvarlanma sürtünmesinde sürtünme kuvveti normal kuvvetin çok küçük kısmını oluşturur.

Malzemeler arasındaki sürtünme olaylarını izah ve formüle etmek için tarihsel gelişim içerisinde birçok teori ileri sürülmüştür. İlk zamanlar, sürtünme katsayısının pürüzlerin eğim açısının tanjantı ile ilişkili olduğu düşünülmüş, daha sonraları sürtünmede, iki katı arasındaki moleküllerin çekim kuvvetinin de etkili olduğu açıklanmıştır. Bunlar arasında Amontons ve Coulomb'un teorileri önemlidir. Coulomb, sürtünme katsayısının hızdan bağımsız olduğunu gözlemlemiş ve statik sürtünme katsayısını ( $\mu_s$ ) kaymaya başlama kuvveti ile, kinetik sürtünme katsayısını da ( $\mu_k$ ) hareketi devam ettirme kuvveti ile tarif etmiştir. Bu teorilere göre:

- Sürtünme kuvveti, normal yükü orantılıdır,
- Sürtünme kuvveti, geometrik temas alanına bağlı değildir,
- Sürtünme kuvveti, kayma hızına bağlı değildir,
- Statik sürtünme katsayısı, dinamik sürtünme katsayısından daha büyüktür ( $\mu_s > \mu_k$ ).

Sürtünme katsayısı, Denklem 2.1 ile ifade edilir.

$$\mu = F_s/F_n \quad (2.1)$$

Burada;  $\mu$ : Sürtünme katsayısı,  $F_s$ : Sürtünme kuvveti ve  $F_n$ : Normal kuvveti ifade etmektedir.

1940 yılında Bowden ve Tabor, kuru yüzeylerde kayma sürtünmesinin temelini açıklayan basit bir teori ileri sürmüşlerdir. Bu teoriye göre sürtünme kuvveti, iki cisim arasında oluşan soğuk kaynaklanmış bağlantıyı kesmek için gerekli olan kuvvettir. Sürtünmenin meydana gelmesinde en büyük etken yüzeylerin birbirine temas eden tepciklerindeki adhezif ve kohezif bağlardır. Ayrıca bu tepciklerdeki deformasyonların da direncin artmasında etkisi bulunmaktadır. Temas halindeki iki yüzey arasında adhezyon ve kohezyon bağının oluşumu, büyük ölçüde yüzeylerin yapılarına ve bunların temas halindeki muhtemel temas şekillerine bağlıdır.

Teorik olarak ilk temas anında üç noktadan oturma olacaktır. Bu değme noktalarının elastik ve plastik deformasyonu sonucu değme alanı genişleyecek ve diğer

tepecikleri de içine alacaktır. Bu yayılma, uygulanan kuvvetin büyüklüğüne bağlı olarak denge durumu oluşuncaya kadar sürecektir.

Bowden ve Tabor'un teorisine göre sürtünme kuvveti, yüzeyde tepeciklerdeki gerçek temas alanlarında oluşan adhezyon kuvveti ve sert yüzeyin yumuşak yüzey üzerinde oluşturduğu deformasyon kuvveti olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır.

#### 2.2.4. Kayma sürtünmesi

İki katı yüzey birbirine bastırıldığında veya biri diğeri üzerinde kaydığında bu yüzeyler arasındaki gerçek temas sadece sınırlı sayıdaki küçük noktalarda oluşur. Bu noktalara pürüzlülük denir. Kayma sırasında teğetsel kuvvet artarken, birleşmeler kaymaya başlar. Tüm bağların kesilmesi için ihtiyaç duyulan sürtünme kuvveti, bağlarda malzemenin gerilmesiyle orantılı olacaktır. Bunun neticesinde sürtünme kuvveti Denklem 2.2'de verilmiştir.

$$F_s = A.S \quad (2.2)$$

$F_s$ : Kesme için gerekli sürtünme kuvveti,  $A$ : Kayma yüzeyinin boyutundan bağımsız gerçek temas alanını ve  $S$ : Malzemenin kesme gerilmesini ifade etmektedir.

Pratikte kayma sürtünmesi, bazı ilave etkilerle de ilişkili olabilir. Bu etkiler, daha sert malzemenin pürüzlülüğünün yumuşak malzemede meydana getirdiği çizikler ve yüzey düzgünsüzlüklerinin birbiri içine girmesi gibi etkilerdir.

#### 2.3. Aşınma

Aşınma denilince akla gelen ilk şey, farklı etkiler sonucunda malzeme yüzeyinden sürekli malzeme kayıplarının oluşması olarak algılanmaktadır. DIN 50320 ve ASTM G4093 standardına göre aşınma, "kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı ve gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların

ayrılması sonucu meydana gelen ve istenilmeyen yüzey bozulması” şeklinde tanımlanmaktadır [39].

Bu şekilde; yüzeylerin ilk şekilleri bozulur, parçalar arasındaki boşluklar büyür ve amaçlanan fonksiyon normal şekilde yerine getirilemez. Sürtünerek çalışan bütün makine elemanlarında kaçınılmaz olan ve kompleks bir sistem özelliği gösteren aşınma, sanayide birçok tribolojik sistemlerde görülen korozyonun ve yorulmanın yanında önemli bir problemdir. Bu nedenden dolayı da günümüz teknik sistemlerindeki araştırmalar sürtünmeyi ve aşınmayı azaltma ve kontrol etme çalışmaları şeklinde yoğunlaşmıştır. Sürtünmenin ve aşınmanın azaltılmasıyla malzeme kaybı önlenerek boyut hassasiyeti sağlanırken enerji israfı da önlenmiş olur.

Ayrıca aşınma, dış etkiler altında temas yüzeylerinde meydana gelen fiziki ve kimyasal değişimlerin sonucudur. Mühendislik malzemelerinde görülen malzeme kaybının aşınma sayılabilmesi için;

- Mekanik bir etken olması
- Sürtünmenin (bağıl hareketin) olması
- Yavaş ve devamlı olması
- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi
- İsteğimiz dışında gerçekleşmiş olması gerekir.

### **2.3.1 Tribolojik sistem**

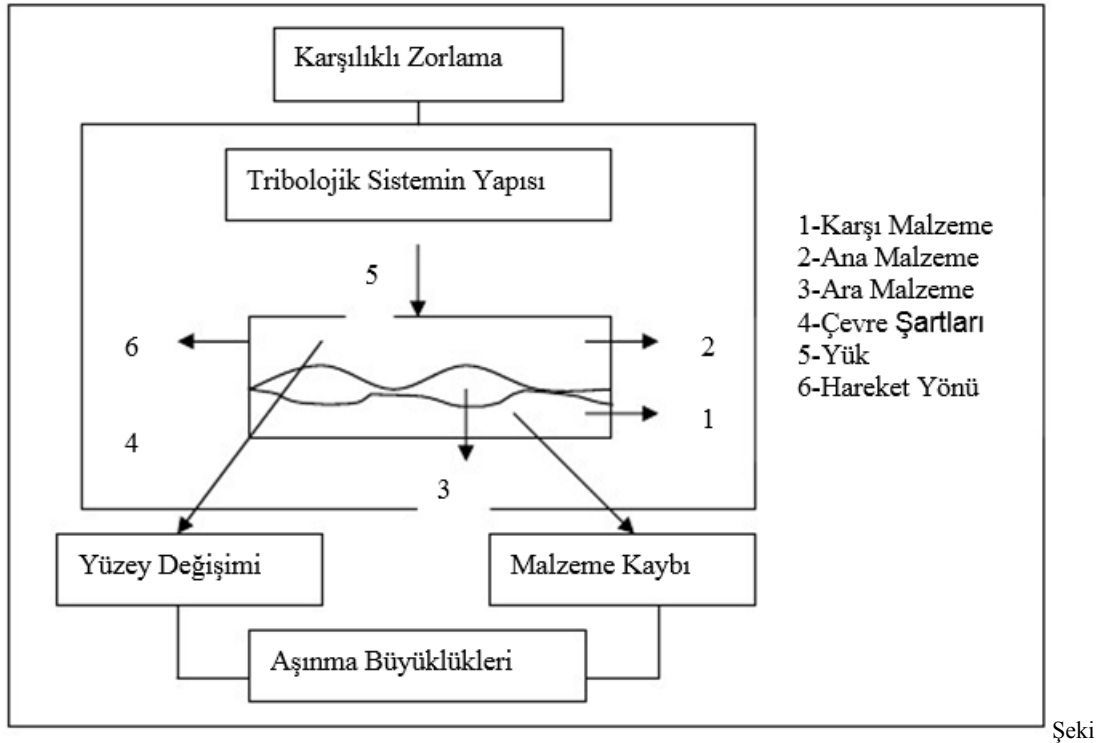
Triboloji, sürtünme, aşınma ve yağlamanın bilimsel incelenmesini ve tribolojik bilgilerin teknik uygulanmasını içermektedir. İçinde aşınma ve sürtünme olaylarının gerçekleştiği teknik sistemlere tribolojik sistem denilmektedir. Mühendislik malzemelerinin sürtünme ve aşınma davranışlarının araştırılmasında mekanik sistemleri bir tribolojik sistem olarak dikkate almak gerekir. Yani aşınma olayı bir sistem bütünlüğü içinde ele alınmalıdır. Şekil 2.6.’da tribolojik bir sistemin elemanları görülmektedir [40,41].

Tribolojik sistemi oluşturan unsurlar, ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük, hareket ve çevreden oluşmaktadır. Bir tribolojik sistem bu unsurların birçoğunu içinde bulundurur. Aşınma çiftini oluşturan ana malzeme ve karşı malzeme aralarında belirli bir ara malzeme varken az veya çok yük altında hareket ettiklerinde aşınma başlar. Ana malzeme; metal, mineral, plastik, kauçuk, ağaç, deri v.s. gibi aşınma karakteristiğine önem verilen katı cisimdir. Aşındıran malzeme ise metal, mineral, plastik, ağaç v.s. şeklinde katı olabileceği gibi sıvı veya gazlarla karışım durumunda da olabilir.

Ara malzeme ise yağlar, aşınma partikülleri v.b. olabildiği gibi bazen hiçbir madde olmayabilir. Endüstride çoğu zaman aşınma partikülleri yüzeylerden önemli oranda temizlenememektedir. Böyle durumlarda arada yağlayıcı yoksa, oluşan durum kuru sürtünme olarak tanımlanabilir. Çevre çalışma ortamıdır. Yükleme darbeli, darbesiz, sabit, değişken, artan, azalan v.s. şeklinde veya bunların birden fazlasının bir arada bulunması halinde olabilmektedir. Hareket ise kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, darbe gibi biçimlerde olabilir [42].

Tribolojik sistemde ortaya çıkan aşınma mekanizmaları da farklıdır. Adhesiv aşınma, abrazif aşınma, yorulma aşınması, tribooksidasyon aşınması gibi mekanizmalarla tanımlanan aşınma, tribolojik sistem içerisinde genellikle tek başlarına bulunmazlar ve etkin oranları kesin olarak belirlenemez. Ancak etken olan aşınma mekanizmasına göre önlemler yoğunlaştırılabilir.

Tribolojik test cihazları; aşınmanın analiz edilebilmesinin zorluğu, ölçümlerin uzun sürelerde ve güçlükle yapılabilmesinden dolayı model sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Araştırmacılar genellikle inceledikleri sistemi dikkate alarak çalışmalarında kullanacakları aşınma test cihazlarını seçerler ve tasarlarlar. Bu seçim veya tasarımlarda, gerçek sistemi oluşturan tribolojik unsurları sağlayabilen ve sonuçları büyük oranda tekrarlayabilen cihazların belirlenmesi önemlidir. Aşınma test cihazları kısmen standartlaştırılmıştır. Ancak standart test cihazlarında her sistemin şartlarını bulmak mümkün olmamaktadır [43,44].



12.6. Bir tribolojik sistemin şematik gösterimi [43]

a) Esas malzeme (Aşınan): Aşınması istenen elemandır, fiziksel ve kimyasal özellikleri, yüzey yapısı, şekli tamamen belirlenmiş ve daima katı halde bulunması gereken elemandır.

b) Karşı malzeme (Aşındıran): aşındıran eleman olup, katı sıvı veya gaz halinde olabilir.

c) Ara malzeme: Aşınma çifti arasında katı, sıvı, gaz veya bunların karışımı halinde bulunan maddelerdir.

d) Yük: Aşınma çiftlerinin temas alanını etkileyen önemli bir faktördür. Temas alanının artması yük miktarına bağlı olduğu gibi malzemelerin özelliği ve geometrilerine de bağlıdır. Uygulanan yük, dinamik, titreşimli, darbeli veya statik olabileceği gibi artan veya azalan şeklinde de olabilir.

e) Hareket: Tribolojik sistem içindeki esas ve karşı elemanların birbirine göre yaptığı izafi harekettir. Bu hareket; kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma ve çarpma

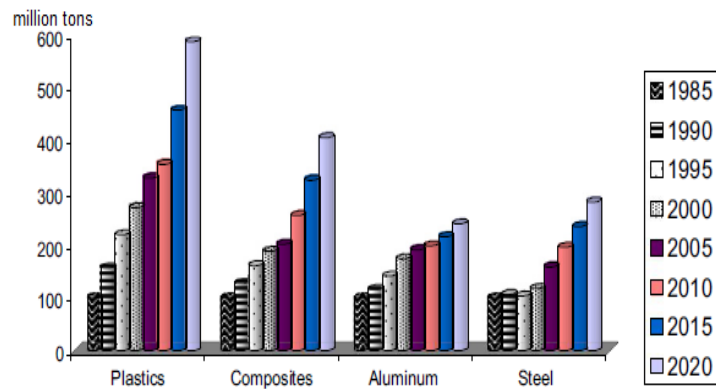


şeklinde olabilir. Hareketin yönü ve kat ettiği yol aşınma miktarına etki eder.

f) Çevre: Vakumsuz bir ortamda gerçekleşen olayda sıcaklık, nem ve atmosfer aşınma üzerinde etkisi olan çevre etkenleridir.

### 2.3.2. Aşınmanın ekonomik rolü

Teorik yönlerini incelemiş olduğumuz sürtünmeden oluşan aşınma, tüm endüstri kollarında önemli bir tehlike olarak karşımızda durup, zamanında ve sistematik önlem alınmadığı takdirde çok pahalıya mal olabilecek sonuçlara götürebilir. Konunun boyutları hakkında bir fikir vermiş olmak için sadece Almanya'da aşınmanın 2 milyarı metalurji, 1.5 milyarı madencilik, 500 milyonu plastik imalat sanayileri ve 1 milyarı da diğer sanayi kolları olmak üzere 5 milyar DM'lik bir maliyet yüklediğini söyleyebiliriz. Dünya genelinde aşınma çok etkili olup yapılan çalışmalarla özellikle plastik malzemelere yapılan katkı malzemeleri ile bunun azaltılması amaçlanmaktadır. Plastik hammadde talebi Türkiye'de 1950 yıllarında üst seviyeye ulaşmış ve hızla artmıştır. Talebin çok yüksek rakamlara ulaşması sonucu ülkede 1965 yılında Petkim A.Ş.'nin kurulmasına neden olmuş ve ilk ürün 1970 yılında alınmıştır. Türkiye'de plastik malzemelerin imal ve ithal edilen miktarı 1970 yılında 51821 ton, 1977'de 227196 ton, 1988 yılında 466000 ton ve 2000'li yıllara geldiğimizde bu rakam 1500000 ton değerlerine kadar ulaşmıştır. Bunun açık bir örneği olarak Tablo 2.1.'de Dünya'da geçmişten günümüze malzemelerin tüketimi, özellikle plastik malzeme ve kompozitlerine olan talep artışı görülmektedir [45].



Tablo 2.1. Dünya malzeme tüketiminin değişim tablosu (milyon ton) [46]

Plastik malzemeler tüm dünyada araştırma, geliştirme ve uygulama alanı bakımından hızlı bir gelişme gösterdiğinden, metallerin yerlerini almaya başlamışlardır. Ayrıca motor gövdeleri, uçak gövdeleri, otomobil gövdeleri, türbin kanatları gibi oldukça ağır koşullarda çalışan makine sistemlerinde, evlerde kullanılan birçok elektronik veya eşya yapımında kullanılmaktadırlar. Doğal olarak plastik malzemeler de kullanılan tüm malzemelerde olduğu gibi belli bir ömre sahip olmaktadır.

Kainatta hiçbir şey ilk günkü gibi kalmaz, sürekli bir değişim içerisinde. Bu değişimde aşınma mekanizmalarının etkisi büyüktür. Deniz kenarında dalgalar sebebiyle oluşan kıyı erozyonu, çöllerde rüzgâr nedeniyle olan rüzgâr erozyonu tabiatın kendi mekanizmalarıyla oluşturduğu aşınmalara birer örnektir. Aşınmayı gündelik yaşamın her cephesinde de görmek mümkündür. Giydiğimiz giysi ve ayakkabıların zamanla yıpranmasında, kullandığımız eşya ve mobilyaların hızla eskimesinde ve bıçakların ve diğer kesici aletlerin körelmesinde aşınmayı gözlemleyebiliriz.

İstatistiklere göre makine elemanlarının ortalama %70'inin hurdaya ayrılma sebebi aşınmadır. Aşınmanın sonucu olarak meydana gelen malzeme kayıpları, aşınan parçaların yenileriyle değiştirilmesi zorunluluğu, makinelerin bakım-onarım faaliyetleri için harcanan zaman ve emek ve bu faaliyetler için istihdam edilen teknik personel göz önüne alındığında her yıl milli sermayeye oldukça büyük yükler getirmektedir [46].

### **2.3.3 Aşınma faktörleri**

Genel olarak aşınmaya etki eden faktörler;

- Malzemelerin cinsi ve kimyasal bileşimi
- Malzemelerin mikro yapısı
- Malzemelerin kristal yapısı
- Malzemelerin sertliği
- Isıl işlem

- Kayma çifti
- Ortama bağlı faktörler
- Yük ve hız
- Sıcaklık

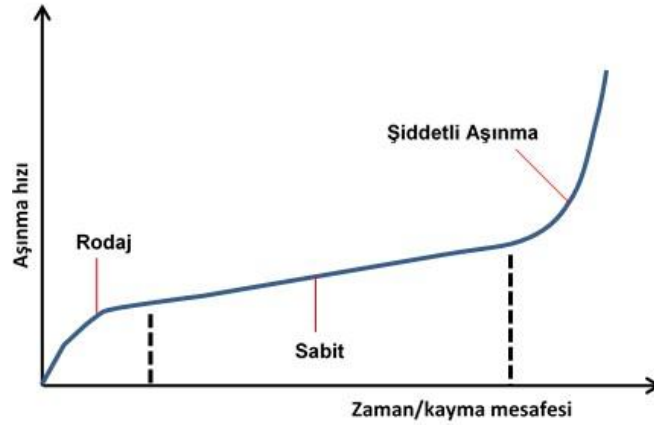
Yapılan çalışmalarda yüzey basıncının artması ile aşınmanın hızlandığı ve aynı yükte çalışma hızının artması ile aşınmanın da arttığı tespit edilmiştir. Basınç artışına paralel olarak çalışma hızının da artması aşınmayı hızlandırmaktadır. Ayrıca sürtünmeyi arttıran yük aşınmanın artmasına neden olmaktadır. Sürtünme enerjisinin ısıya dönüşmesi ile gerçek temas alanının sıcaklığı artar. Artan sıcaklığın etkisi ile sürtünen yüzeylerde bölgesel ergimeler olur ve yüzeylerden küçük parçacıklar koparak aşınmayı hızlandırır. Sürtünme ve aşınma sonucu meydana gelen yapı dönüşümleri de ısıl çatlamalara ve sürtünme esnasında parçacıkların koparak aşınmanın artmasına neden olur. Bu nedenle katı cisimlerin aşınmasında sürtünen yüzeylerin sıcaklığı çok önemlidir.

Aşınma zamanla gelişen ve ani oluşan diye ikiye ayrılmaktadır. Zamanla oluşan aşınma Şekil 2.7.'de gösterildiği gibi üç safhadan oluşmaktadır:

I. aşama rodaj olup aşınma hızının yükselerek arttığı bölümdür. Bu aşama parçaların birbirine alıştığı aşamadır. Aşınmayı azaltmak için bu aşamaya özel yağlar kullanılabilir. Yüksüz ya da normal hızdan daha düşük hızlarda çalışılarak ta bu safha gerçekleştirilebilir.

II. aşamada kararlı durum söz konusudur ve aşınma hızı sabittir. Artık malzemeler birbirine alışmıştır.

III. aşamada ise hasar meydana gelene kadar aşınma hızı artarak devam eder [47].



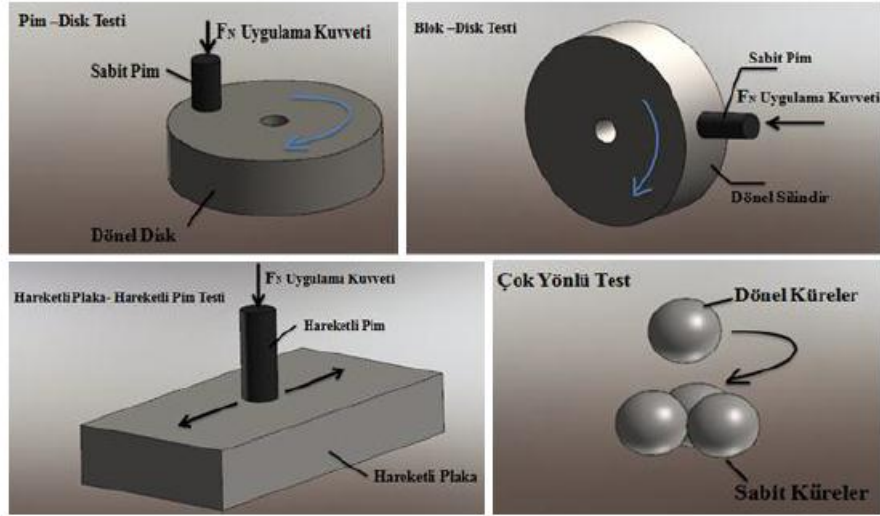
Şekil 2.7. Aşınma safhaları

Aşınmanın gerçek sistemlerde belirlenmesinin zorluğu, bir kısmı standartlaştırılan model cihazların geliştirilmesine yol açmıştır. Model cihazlarda tribo-sistemi oluşturan unsurların, gerçek sisteme uygun şekilde oluşturulması amaçlanır. Parametrelerin kolayca kontrol edilebilmesi ve değiştirilebilmesi, deney sonuçlarının tekrarlanabilir olması bu cihazlardan beklenen özelliklerdir.

Sürtünme aşınmasında aşınma miktarı, zamana ve kayma mesafesine bağlı olarak belirtilir. Aşınma miktarları, aşınan parçanın şekil ve ağırlık değişimine ait sayısal bir büyüklük olup aşınma, aşınma miktarı olarak birbirinden ayırt edilmesi gerekir. Buna göre aşınma miktarı parçanın ağırlık kaybı ve hacimsel aşınma veya sürtünme yüzeyinin yükseklik kaybı olarak ifade edilir.

### 2.3.4 Aşınma test modelleri

Aşınmanın gerçek sistemlerde tespitinin zorluğu, bir kısmı standartlaştırılan model cihazların geliştirilmesine sebep olmuştur. Bu cihazlardan beklenen özellikler, tribo sistemi oluşturan unsurların gerçek sisteme uygun şekilde oluşturulması ve sonuçların tekrarlanabilir olmasıdır. Kayma sürtünme ve aşınma test cihazı modelleri tribolojik prensiplere göre Şekil 2.8.'de şematik olarak gösterilmiştir.

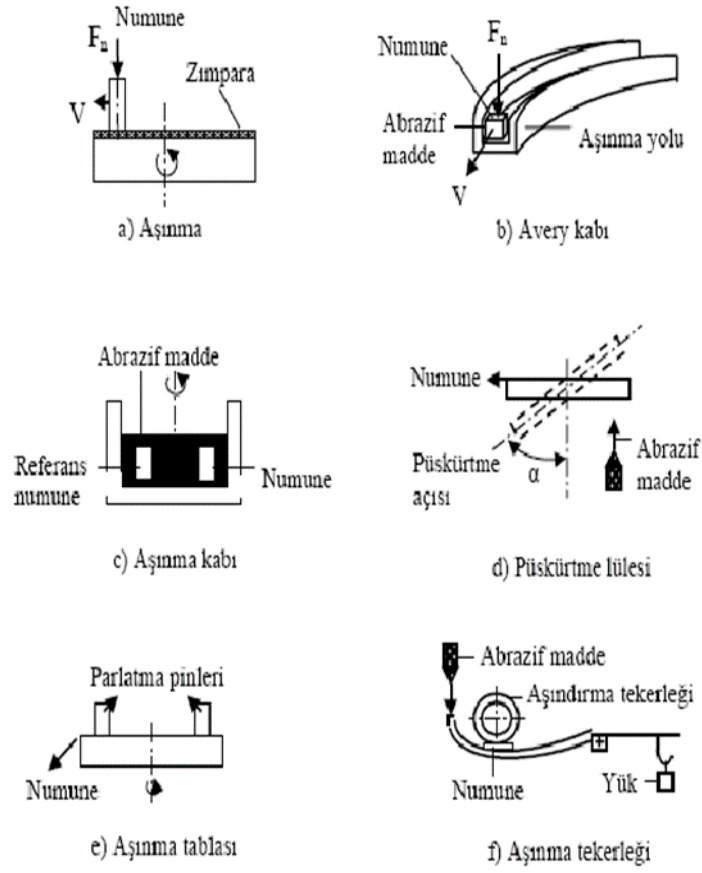


Şekil 2.8. Şematik aşınma test modelleri [37]

Aşınma ve sürtünme deneyleri Society of Automotive Engineers(SAE), American Societies of Standards and Materials(ASTM) firmaları ile ISO ve DIN standartları tarafından standartlaştırılmıştır [48]. Katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin etkisi altında ve yalnız karşı malzeme aşınmasının ölçüldüğü aşınma test cihazı modelleri de şematik olarak Şekil 2.9.'da gösterilmiştir.

Model aşınma test cihazlarıyla yapılan testlerin amaçları genellikle şu şekilde sıralanabilir;

- Sistem elemanlarının verimini, ömrünü, güvenilirliğini, fonksiyonunu, bakım yapılıp yapılmaması gerektiğini belirlemek,
- Kalite kontrolünü yapmak,
- Malzemelerin ve yağlayıcıların tribolojik davranışlarını belirlemek,
- Malzeme kayıplarını araştırmak,
- Yeni malzeme veya sürtünme ve aşınmayı azaltıcı yöntemleri geliştirmektir.



Şekil 2.9. Şematik abrasif aşınma test modelleri [49]

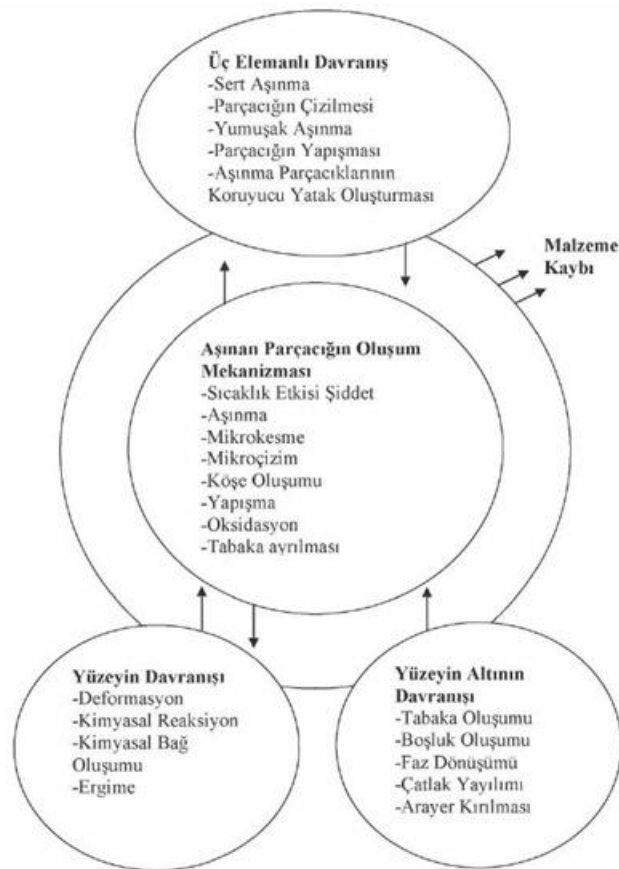
### 2.3.5 Aşınma mekanizmaları

Aşınmanın meydana gelmesi ve sürekliliği için gerekli faktörlerin tribolojik sistem içerisinde yaptığı fiziksel ve kimyasal etkilerin iletilmesine göre yedi çeşit aşınma mekanizması vardır. Bunlar:

- Adhesiv aşınma,
- Abrasif aşınma,
- Yorulma aşınması,
- Difüzyon aşınması,
- Tribo-oksidasyon aşınması,
- Erozyon ve Kavitasyon aşınması,
- Yenme aşınmasıdır.

Aşınma, hareketli makine parçalarının ömürlerini, performanslarını azaltan ve bu parçaların bozulmasına sebep olan çok önemli bir faktördür. Bu nedenle, ekonomik açıdan aşınmanın sebep olduğu kayıplar ve hasarlar oldukça fazladır.

Aşınmanın oluşması ve sürekliliği için parametrelerin tribolojik sistem içerisinde yaptığı fiziksel ve kimyasal etkilerin iletilmesine göre, aşınma mekanizmalarını belirleyen bileşenler Şekil 2.10.'da görülmektedir.



Şekil 2.10. Aşınma mekanizmalarını belirleyen bileşenler [49]

### 2.3.5.1. Adhesiv aşınma

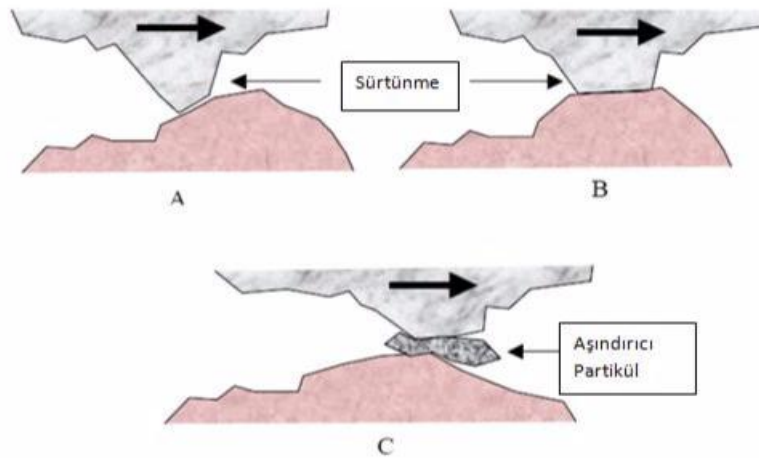
Adhesiv aşınma en çok meydana gelen aşınma çeşitidir. Bu aşınma çeşitinde birbiriyle temas halinde bulunan iki malzeme yüzeyinin, yüksek basınç ve meydana gelen sıcaklığın yükselmesi ile birlikte yüzey kısımlarında bir kaynama meydana gelir. Çalışma sırasında bu kaynaklar birbirinden ayrılırken, yüzeylerden ufak

parçalar kopar. Bu şekilde meydana gelen aşınma adhesiv aşınma olarak adlandırılır.

Aşınmanın en yaygın türü olan adhesiv aşınma, bir katı malzemenin diğeri üzerinde kaydığında ya da ona karşı baskı oluşturduğunda meydana gelir. Her ne kadar malzeme kaybı diğere yüzeye transfer olmuş partiküller şeklinde olursa da, bu partiküller şekillerini kaybedebilirler. Bazen adhesiv aşınma terimi yerine kayma aşınması terimi kullanılmaktadır. Yanlış bir uygulama olmakla beraber kayma aşınması terimi daha genel bir terimdir.

Temas eden yüzeylerin yapışma eğilimi, iki malzemenin yüzey atomları arasında mevcut olan çekme kuvvetlerinden kaynaklanır. İki yüzey ister normal, ister teğetsel şekilde bir araya getirilip ayrılınsın, bu çekici kuvvetler malzemeyi bir yüzeyden diğere çekecek şekilde etkili olur. Bu şekilde malzeme orijinal yüzeyinden uzaklaştırıldığında, bir adhesiv aşınma parçası meydana getirilir.

Adhesiv aşınma en çok, benzer kristal kafes yapılı malzemelerde görülür. Benzer kristal kafes yapısına sahip malzemelerin hareket ve sürtünmeleri nedeniyle sıcaklığın artmasıyla birlikte yüzeylerinde kaynama daha kolaydır. Buradaki kaynamadan maksat malzemelerin yüksek sıcaklıktan dolayı birbirleriyle bağ oluşturmalarıdır. Şekil 2.11.'de adhesiv aşınmadaki kaynak bağının oluşumu görülmektedir.



Şekil 2.11. Adhesiv aşınma oluşumunun şematik gösterimi [50]



Birbiriyle temas halinde bulunan metaller, yüzeylerindeki pürüzler nedeniyle etkileşirler. Çok düzgün yüzeylerde bile bu durum söz konusudur. Malzemenin ağırlığında veya herhangi bir yükleme durumunda, pürüz tepelerinde meydana gelen gerilme sonucu plastik deformasyon oluşur.

Malzemenin deforme edilebilirliği kolay ise temas alanı artarak bütün yüzeye dağılır. Bu durumda yüzeylerde bulunan absorbe olmuş sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanarak, malzeme moleküllerinin direkt temas etmelerine imkân verir. Böylece temas noktalarında soğuk kaynak bölgeleri oluşur. Bu bölgeler izafi hareket durumunda, sürtünme kuvvetinin etkisiyle kırılarak yüzeyler arasına taşınır.

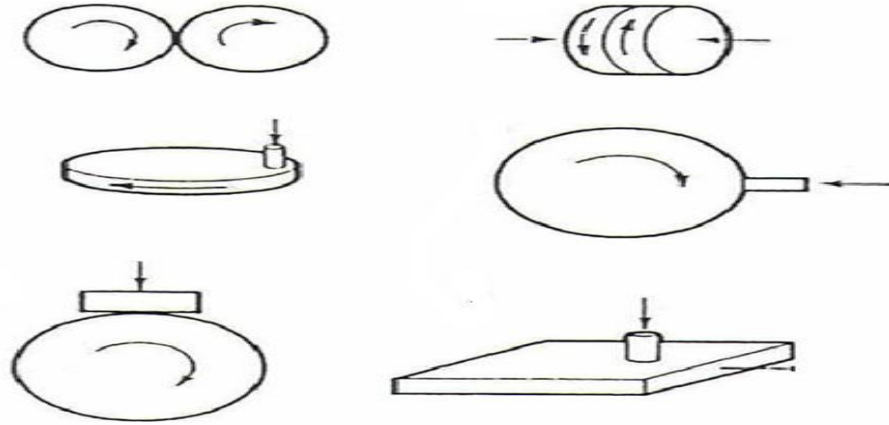
Sürtünme sırasında malzeme yüzeyinde meydana gelen kaynak bağlarının kırılması temas yüzeyinde meydana gelirse malzeme kaybı olmaz. Fakat kırılmanın temas yüzeyinin uzağında herhangi birinin içinde olması durumunda, kırılan parçacıklar bir yüzeyden diğerine geçerek malzeme transferi meydana gelir.

Metal-polimer çiftlerinde olduğu gibi birinin diğerine göre yumuşak olmasından meydana gelen kaynak bağı vasıtasıyla kırılma yumuşak malzemede olur ve malzeme transferi sert olan malzemeye doğru oluşur. Fakat yüzeyde bulunan oksit tabakaları koparak yumuşak malzemeye gömülerek sert olan malzemeyi de aşındırabilir [51].

Adhesiv aşınmanın söz konusu olduğu durumlarda, sökölüp takılması ve tamir olması kolay olan parçaların diğerine göre yumuşak olması tercih edilir. Örnek verecek olursak, ana dişliye göre pinyon dişlinin yumuşak olması istenir. Adhesiv aşınma genellikle yataklarda, dişlilerde, kam mekanizmalarında ve demir yollarında çalışan teker-ray sistemlerinde görülür. Yüksek yükleme ve hız durumlarında yağlama aşınmasının azaltılması istenir. Yapılan çalışmalarda azotlu ortamdaki aşınmanın, karbondioksitli ortamda meydana gelen aşınmadan daha fazla olduğu ispat edilmiştir. Yüzeyler arasında bulunan oksit, CO<sub>2</sub> ve nem gibi maddeler adhesiv aşınma miktarının azalmasını sağlar [52].

Aşınma esnasında kırılma çoğu zaman ara yüzeyde meydana gelir. Bir pürüzden kopan makine parçasının boyutu kaymanın bağlantı noktasına ne kadar uzakta meydana geldiğine bağlıdır. Aşınma hızını en düşük seviyeye indirmek için, kopan parçaların her birinin boyutu mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır. Bunun sağlanması için temas alanının küçük olması gerekir.

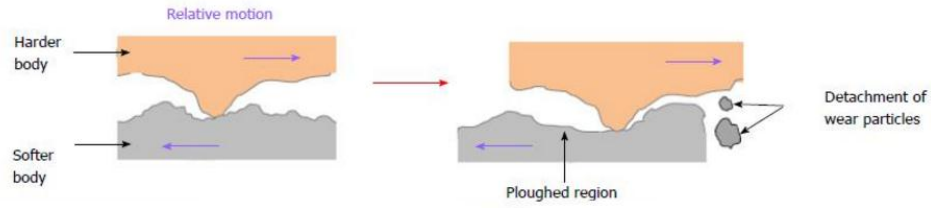
Adhesiv aşınmada en yaygın asimetrik deney donanımlarından birisi, bir disk üzerine bastırılan bir pimdir. "Disk üzerinde pim" yönteminin başka şekilleri de vardır. Ancak ana fikir hep aynıdır. Şekil 2.12.'de adhesiv aşınma deneyinde kullanılan geometriler görülmektedir.



Şekil 2.12. Adhesiv aşınma deneyinde kullanılan geometriler [53]

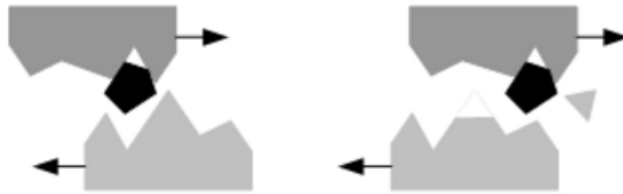
### 2.3.5.2. Abrasif aşınma

Abrasif aşınma iki cisimli ve üç cisimli olmak üzere iki şekilde meydana gelir. İki cisimli abrasif aşınma, sert ve pürüzlü bir yüzeyin kendinden daha yumuşak malzeme ile temas ettiği durumda, kuvvet ve basıncın etkisiyle yumuşak malzeme yüzeyinde oluşan çizilme ve küçük parçacıkların kaldırılması suretiyle meydana gelen deformasyondur. İki cisimli abrasif aşınmaya kazı makinelerini, toprak işleme aletlerini, eğeleme ve zımparalama işlemini örnek olarak verebiliriz. Şekil 2.13.'teki iki cisimli abrasif aşınmanın şematik şekli görülmektedir.



Şekil 2.13. İki cisimli abrasif aşınma [53]

Abrasif aşınma, sert ve pürüzlü bir yüzey, daha yumuşak bir yüzey üzerinde kaydığında, yumuşak yüzeyi oyduğunda ve bir grup oluk açtığında ortaya çıkar. Abrasif aşınma, sert abrasif partiküller kayma yüzeyleri arasına girdiğinde ve malzemeyi aşındırdığında da meydana gelmektedir. Abrasif aşınma, iki ve üç boyutlu abrasif aşınma olarak iki türdür [54]. "iki boyutlu abrasif aşınma" denen aşınma mekanizmasında, aşınma dış yüzey üzerindeki sert tümseklerden kaynaklanır. Üç boyutlu abrasif aşınmada ise Şekil 2.14.'te görüldüğü gibi sert abrasif partiküller vardır ve muhtemelen iki farklı kayma yüzeyi arasında yuvarlanıp aşınırlar. İki boyutlu aşınmada, aşınma hızları üç boyutlu aşınmaya göre daha hızlıdır. Abrasif aşınma olayında, aşındırıcı partikül şekli ile aşınma hızı arasında bir bağıntı vardır. Yuvarlatılmış aşındırıcı partiküller kullanıldığında, aşınma hızı çok yüksek değildir.



Şekil 2.14. Üç cisimli abrasif aşınma [54]

Abrasif aşınmada, partikül boyutları 5-500 µm arasında değişir. Eğer farklı boyutlardaki partiküller, malzemenin ortamdan uzaklaştırılmasında (aşındırılmasında) eşit şekilde etkin ise, aşınma hızları sabit olacaktır. Gevrek malzemelerde, aşınma hızı-partikül boyutu bağımlılığı daha güçlüdür.

Pek çok araştırmacının yaptığı çalışmalara göre, malzeme ve abrasif sabit tutulup

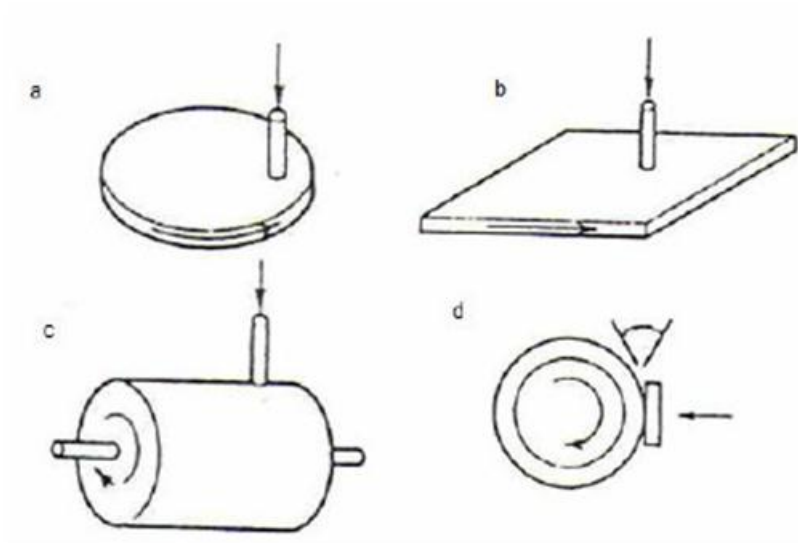
abrasifin boyutu değiştirildiğinde, kritik bir abrasif partikül boyutu ortaya çıkar. Bu kritik değerin üzerinde, aşınma hızı abrasif partikül boyutundan bağımsızdır. Bu kritik değerin altında aşınma hızı, abrasif partikül boyutuna kuvvetle bağımlıdır. Deneysel veriler göstermektedir ki, büyük (geniş) abrasif partiküller söz konusu olduğunda, toplam aşınma hızı partikül boyutundan bağımsızdır.

Küçük partiküller kullanıldığında aşınma hızı azalır. Bu sonucu, küçük partiküller kullanıldığında batıcı uç geometrisinin farklı olması ya da aşınma enkazının meydana gelmesiyle sistemin tıkanması şeklinde açıklamak mümkündür Ayrıca çalışılan ortamdaki yüksek nem oranı da aşınma hızını yaklaşık %15 artırır.

Abrasif aşınma esnasında iki tür malzeme kullanılır. Bunlardan ilki abrasif olarak kullanılacak malzeme diğeri ise abrasif aşındırıcıların mevcut olduğu durumda kayma malzemesi olarak kullanılacak olanlardır.

Abrasif olarak kullanılacak malzemelerde sertlik ve keskinlik önemlidir. Abrasif malzeme, aşındıracağı malzemedен sert olmalıdır. Yumuşak malzemenin sertliği sert malzemenin en az 1/3'ü olmalıdır. En uygun olanı, çok yüksek bir aşınma hızına ulaşmadan, aşınma hızının uzun bir süre korunabileceği sert bir abrasif kullanmaktır Şekil 2.15.'te malzemelerin abrasif aşınma hızlarını ölçmekte kullanılan 4 yaygın yöntem şematik olarak gösterilmiştir. Bunlardan a, b ve c seçeneklerinde sabitlenmiş abrasif partiküller üzerinde aşınan pim şeklinde bir numune vardır ve iki boyutlu abrasif aşınmayı göstermektedir.

Disk üzerinde pim şeklindeki abrasif aşınmada, numune hep taze abrasif üstünde kayar. Bu olay pimi disk üstünde radyal şekilde aşındırarak gerçekleştirir ve spiral bir iz bırakır. Aşınma hızı, pimi deneyden önce ve sonra tartarak ölçülür. Pim şeklindeki numuneler genelde iki boyutlu abrasif aşınmaya uğrar.

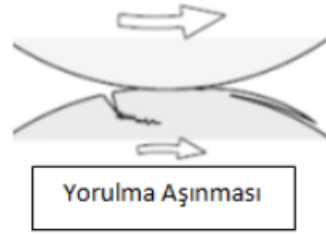


Şekil 2.15. Abrasif aşınmada aşınma hızını ölçmekte kullanılan yöntemler [54]

### 2.3.5.3. Yorulma aşınması

Yorulma aşınması, makine parçalarında tekrarlanan yüklere maruz kalmaları veya titreşimden dolayı zamanla yorulmaları sebebiyle meydana gelir. Özellikle, yüzeylerin sürekli ve değişken yüklere maruz kalmaları, yüzeyin hemen altında yorulma çatlakları oluşmasına neden olur. Bu mikro çatlaklar zamanla ilerleyerek, malzemenin yüzeyinden mikro parçaların kopmasına sebep olur. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya yorulma aşınması denir.

Yorulma aşınması yuvarlama hareketi yapan rulmanlı yataklarda, dişli çarklarda ve kam mekanizması gibi yüzeylerde oluşur. Malzemeye etki eden değişken yükler elastik sınırı geçmemesine rağmen, malzemedeki boşluk ve kesit daralmalarının bulunduğu süreksiz bölgelerin çevresini aşarak malzemenin yüzeyinde Şekil 2.16.'da belirtilen küçük boşluklar meydana gelir. Yapılan araştırmalarda pullanmayı başlatan çatlağın bazen yüzeyde bazen de yüzeyin altında kendini gösterdiğini tespit edilmiştir. Bu yorulmada ulaşılan aşınma hızları, abrasif aşınma hızlarından daha düşüktür [54].



Şekil.2.16. Yorulma aşınması [54].

#### 2.3.5.4. Difüzyon aşınması

Birbirleriyle temas halinde bulunan yüzeyler arasında sürtünmeden dolayı bir sıcaklık yükselmesiyle birlikte temas yüzeyinde bulunan ortamların kristal kafes içinde atom yoğunluğu yüksek olan bölgelerden düşük olan bölgelere doğru hareket ederek difüzyon meydana gelir. Sıcaklığın yükselmesi ve yeterli zaman sonunda sürtünme yüzey bölgesinde atom ve moleküllerin çevreye transfer olması ya da karşı sürtünme elemanına girmesi difüzyon esasına dayanır.

Sürtünme esnasında, uygulanan kuvvetle yüzeylerin teması sağlanarak malzeme yüzeylerinde gerilme yığılmaları ve sıcaklığın artışı ile birlikte, temas noktalarında akma ve sürünme başlar. Bunun sonucunda temas noktaları plastik şekil değiştirmeye maruz kalarak temas alanları artar. Böylece yüzeyler arasında atom alışverişi meydana gelerek, mukavemeti düşük olan bir yüzey tabakası meydana gelir. Bu tabaka sürtünmeden ve izafi hareketin devam etmesiyle birlikte esas malzeme yüzeyinden koparak malzeme kaybına sebep olur. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya difüzyon aşınması denir. Bu aşınma mekanizması fren balatalarında, uzay araçlarında ve takım tezgâhlarında görülür.

#### 2.3.5.5. Tribo-Oksidasyon aşınması

Malzemenin izafi hareket sırasında statik ve dinamik sürtünme kuvvetlerinin farklılık göstermesi sebebiyle düşük kayma hızlarında yüzeyler arasında titreşimler meydana gelir. Bu titreşimler yüzeyler arasında bir oksit filminin oluşmasına yol açar. Bu olaya tribolojik zorlama esnasında meydana gelmesinden dolayı sürtünme oksidasyonu veya tribo-oksidasyon denir.

Sürtünen elmanlar arasında oluşan oksit tabakası ana malzemenin aşınma direncini önemli ölçüde etkiler. Meydana gelen oksit filmi adhesiv aşınmaya karşı direncini artırmasına rağmen, izafi hareketin devam etmesiyle birlikte parçalanmış oksit filmi malzemeler arasında aşındırıcı tane oluşturarak abrasif aşınmayı hızlandırır.

### **2.3.5.6. Erozyon ve kaviteleşme aşınması**

Erozyon; ortam ile malzeme yüzeyi arasındaki hızın çok yüksek olması nedeniyle meydana gelen bozulma olayı olarak tarif edilebilir. Gaz veya sıvı ortamında taşınan abrasif tanelerin yüzeye belirli bir açıda çarpmasıyla oluşan enerji, katı cismin basınç mukavemetini aştığı zaman, cismin yüzeyinde plastik deformasyon meydana gelerek yüzeyde kırılmalara sebep olur. Bunun sonucu olarak yüzey aşınır. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya erozyon aşınması denir. Aşındırıcı parçaların büyüklüğü, hızı, şekli, sertliğe çarpma açısının değeri, erozyon aşınma mekanizmasını etkileyen en önemli faktörlerdir [55].

Kaviteleşme aşınması, izafi hareket halinde bulunan bir sıvı ile katı bir cismin arasında meydana gelir. Sıvı içerisinde bulunan zerreciklerin basıncı, buharlaşma basıncından daha küçük bir ortamdan geçerken zerreciklerin büyümesi ve patlamasıyla oluşan basınç dalgalarının katı cismin yüzeyine çarpması sonucu kaviteleşme meydana gelir. Kaviteleşme aşınması genellikle, su türbinleri, su pompaları, buhar türbinleri ve gemi pervanelerinde görülür.

Kaviteleşme erozyonu, sırasıyla basma, çekme ve tekrar basma etkisi altında kalan bir sıvının kaviteleşme sonucu meydana gelir. Bir sıvı, çekme etkisi altındayken, sıvının kendi buharı ile dolu bir kabarcık meydana gelir ve sıvı tekrar basma etkisi altında iken kabarcık çöker ve kabarcığın ortasında bir fiskiye fişkirir, sahip olduğu yüksek hız ile yüzeye çarpar ve yüzeyi yüksek hızlı erozyon ile hasara uğratar. Kaviteleşme erozyonu, içinde negatif basınç bölgeleri olan tam olarak sıvı yağlanmış sistemlerde meydana gelir.

### 2.3.5.7. Yenme aşınması

Yenme aşınma mekanizması, adhesiv aşınma mekanizmasına benzemektedir. Birbirine kuvvetle bastırılan iki metalin yüzeyinde düşük genlikli titreşim hareketinden dolayı, yüzeylerde bulunan pürüzler, yüzeyden koparak aşınmayı meydana getirirler.

Yüzeyden kopan bu parçacıklar oksitlenerek aşındırıcı tane haline gelerek abrasif aşınma miktarını artırır. Kuvvetli etkileşimden dolayı, temas noktalarında gerilme yığılmaları meydana gelerek titreşim artar. Bu nedenle yüzeyde yorulma çatlakları artarak zararın artmasına neden olur. Bu tür aşınma, iş makinelerinde, sıkı geçmelerde, kama ve cıvata bağlantılarında meydana gelir.

### 2.3.5.8. Koroziif aşınma

Korozyon aşınması düşük ve yüksek sıcaklık korozyon aşınması olmak üzere iki şekilde gerçekleşir. Metalik malzemeler içerdikleri alaşım elementlerinin cinsine ve miktarına bağlı olarak yüzeylerinde 0,1 mikron kadar doğal bir oksit tabakası bulundurlar. Bu tabaka sayesinde de koroziif ortamlara karşı direnç gösterirler. Aşındırıcı ortam tarafından metal yüzeyine uygulanan tekrarlı darbeler esnasında yüzeyden malzeme ile beraber oksit tabakası da kalkar. Tekrarlı darbelerin sıklığından veya koruyucu tabakayı oluşturan elementin alaşım içinde zamanla tükenmesinden dolayı oksit tabakası tekrar şekillenemez duruma gelir ve metal yüzeyi koroziif saldırılara karşı savunmasız kalır. Aşınma ile korozyonun beraber geliştiği ve korozyonun aşınma hasarına katkıda bulunduğu olaya korozyon aşınması denir [56].

### 2.3.6. Aşınmaya etki eden parametreler

Aşınma davranışı, kayma hızı, basınç ve yük, sıcaklık, kayma yolu, sertlik, yüzey pürüzlülüğü, atmosfer, nem ve işletme koşulları gibi parametrelere bağlıdır [57].



#### - Sertlik

Malzemenin sertliğinin arttırılması ile aşınma direnci artar. Bu demek, sertliğin arttırılması aşınma miktarını azaltır. Sertleştirilmemiş malzemenin yüzeyinde deformasyon sertleşmenin etkisinde mikro bölgeler oluşur. Oluşan bu kısımların kopması da mümkündür. Aşınma dayanımını arttırmak için ısıl işleme veya alaşımlandırmayla yüzey sertleştirilebilir. Malzemenin sertliğiyle ana malzemeye katılan alaşım elementlerin cins ve miktarı arasında sıkı ilişki vardır. Genelde alaşım elementleri malzemenin mukavemetini arttırırlar.

#### - Hız, kayma yolu

Aşınma miktarı, şiddetli aşınma durumunda kayma hızı ile ters orantılıdır. Nedeni; sürtünen alanın azalması ve ısıdan dolayı sürtünme katsayısını düşürecek etki yapmasıdır. Yapılan araştırmalarda, kayma hızının artmasıyla hacimsel aşınmanın yavaş yavaş arttığı ve abrazif aşınma sırasında sürtünme katsayısının uzun bir kayma yolundan sonra dengeye geldiği tespit edilmiştir. Düşük hızlarda aşınma önemli ölçüde olmayacağından aşınma miktarı sürtünme hızına bağlı olmayacaktır.

#### - Basınç ve yük

Uygulanan kuvvetin artması ile orantılı olarak aşınma miktarı da artacaktır. Açıklaması; aşınma yüzeyinin etkileneceği yükün büyüklüğü, birim yüzeye uygulanan kuvvetin ve sürtünme kuvvetinin artmasına neden olacağından aşınmayı da arttıracaktır.

Aşınma miktarının iki kat arttığı noktadaki yüke kritik yük denir. Araştırmalara göre kritik yük miktarına yükün artışı ile hacimsel aşınmanın orantılı bir şekilde değiştiği belirlenmiştir. Kritik yükleme miktarı; aşınma yüzeyinin soğuk deformasyonla sertliğin belli bir oranda arttığı değer olarak tanımlanır.

Kayma olayı süresince malzeme yüzeyindeki tabak aşınarak adheziv aşınma meydana getirir. Uygulanan yük miktarı arttıkça oksit tabakası aşınacak ve sürekli

kendisini yenileme yoluna gidecektir. Bu olaylar sırasında şiddetli aşınma olayı gerçekleşecektir.

#### - Nem

Atmosferdeki bağıl nem oranı aşınmayı etkilememektedir. Nem oranının artması sürtünme katsayısının azalmasına neden olacaktır. Sürtünme katsayısının azalması ile aşınma miktarı düşer.

#### - Atmosfer

Atmosferde bulunan oksijen malzeme yüzeyinde koruyucu olan oksit tabakasını oluşturur. Ortamda argon gibi soygaz kullanılır ise yüzeylerdeki oksit oranı azalır ve yüzeylerden oksit tabakalarının koparılmasından sonra bölgede adheziv aşınmasının gözlemlenmesi mümkündür.

#### - Sıcaklık

Sürtünen yüzeyler arasında oluşan sıcaklık aşınmayı etkiler. Hafif aşınma bölgesinde artan sıcaklığın yüzey sertliğini düşürdüğü, oksidasyonu gerçekleştirdiği, plastik deformasyonu kolaylaştırdığı belirlenmiştir. Aşırı aşınmada ise çevre sıcaklığının aşınmaya etkisi, yüzeyin özelliklerini iyileştirdiğinden olumlu yönde olmaktadır. Bu nedenle; malzemelerin temel özelliklerinin bilinmesi gerekir.

Yapılan araştırmalara göre; belli bir sıcaklık değerine kadar sıcaklığın aşınmayı etkilemediği ancak daha fazla sıcaklıklarda aşınmayı artırdığı ve ergime sıcaklığı yüksek olan malzemelerin yüksek aşınma direncine sahip olduğu tesbit edilmiştir. Bu nedenle malzemelerin temel özelliklerinin bilinmesi gerekir. Özellikle sürtünmenin istenmediği kaymalı yatak ve kızaklarda yatağın ısınması problem yaratır. Yatağın çalışma sıcaklığının düşük tutulması için, ısı iletim görevi yapan yağlayıcı maddenin kullanılması gerekmektedir. Ergime sıcaklığı yüksek olan malzemelerin yüksek aşınma direncine sahip olduğu tesbit edilmiştir.

## - Yüzey pürüzlülüğü

Aşındırıcı malzemelerin yüzey pürüzlülüğü, sürtünme kuvvetini yakından ilgilendirdiği için, aşınmaya etkisi büyüktür. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça yükü taşıyacak olan gerçek alan azalır. Gerçek alanın azalması ile aşınma miktarı doğru orantılıdır. Sürtünen iki yüzeyin arasındaki çekim kuvvetinin fazla olması, pürüzsüz bir yüzeyde aşınma artıklarının kalması adheziv ve abrazif aşınmalarını artırır. Sürtünme hareketinin yönü pürüzlülüğün yönüne dik ise aşınma miktarı azalır.

Pürüzlü yüzeyde temas alanı küçük olduğundan birim yüzeye etkiyen kuvvet büyük olacak ve aşınma daha fazla olacaktır. Yüzey pürüzlülüğünün artması aşınma miktarını arttıracaktır. Pürüzlülüğün az olduğu yüzeylerde ise; temas alanı büyük, birim yüzeye etki eden kuvvet küçük olacaktır.

Yüzey pürüzlülüğü (Ra);

Ra < 0.01 ise adhesiv aşınma,

Ra > 0.01 ise abrazif ve yorulma aşınması,

Ra = 0.01-0.10 ise aşınma tesirinde kademeli değişiklikler bölgesidir.

## 2.4. Polimerlerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları

### 2.4.1. Polimerlerde sürtünme

Polimerlerin sürtünmesi metal ve seramiklerden farklıdır. Gerçek temas alanı yüke bağlıdır. Adhezyon, sürtünmenin önemli parçasıdır. Polimer sürtünmelerinde kendinden yağlamalı özellikteki polimerler ve diğer polimer yüzeyleri ile birlikte kayma testlerinde deformasyon ve adhezyon minimuma indirilir. Düşük yüklerde pürüzlü temas oluşmaktadır ve bu temas alanı yük ile orantılıdır. Polimerler kuru sürtünme şartlarında metallere göre daha iyi davranmaktadır. Bu hususta PTFE, poliamid gibi plastikler örnek verilebilir. Polimerlerin sürtünme davranışı; kayma hızı, temas yüzeyinin çeşidi, çevre koşulları gibi faktörlerden etkilenir. Bu yüzden polimer malzemeler için tam bir sürtünme katsayısı değeri verilemez. Bazı polimer

malzemelerde adhezyon bağ güçleri çok düşüktür. Kayma esnasında karşı yüzeyde ince bir transfer film tabakası oluştuğu zaman, sürtünme katsayısı yaklaşık 0.2-0.3 arasında oluşur. Kaymanın artması ile transfer film tabakası her bir yüzeyde artarak oluşur ve yaklaşık 0.05  $\mu\text{m}$ 'e kadar düşer. Eğer kayma yüzeylerinde hatalı polimer zincirleri dizilirse, tekrar 0.2-0.3  $\mu\text{m}$  değerlerine yükselir [57].

#### 2.4.2. Polimerlerde aşınma

Polimerlerde mevcut genel aşınma mekanizmaları; adheziv, abrasif ve yorulmadır. Birçok plastiğin sert yüzeye karşı sürtünmesi sırasında plastiğin yüzeye yapışması sonucu transfer film meydana gelmektedir. Transfer film oluşumu sürtünme ve aşınma açısından önemli faktördür. Transfer film yağlayıcı etkisi göstererek sürtünme katsayısını düşürür [57].

Aşınma ve sürtünmeye maruz malzemelerin iyi tribolojik özellikler yanında, başka özelliklere de sahip olması beklenir: yorulma ve basma dayanımının iyi, ısıl genişleme katsayısının küçük, ısıl iletim katsayısının, şekil verilebilme yeteneğinin ve aşınma dayanımının iyi olması gibi.

Polimerik malzemeler, çok düşük sürtünme katsayılarına sahiptirler; bazı tribolojik şartlarda aşınmaya karşı çok yüksek direnç gösterirler, özgül ağırlıkları oldukça düşüktür ( $0.9-2.2 \text{ g/cm}^3$ ). Oksidasyon ya da korozyona karşı dayanıklı malzemelerdir ve oldukça kolay şekillendirilebilirler. Küçük miktarlarda toz ya da diğer partikülleri yatak yüzeyine absorbe edebilirler, böylece abrasif aşınma önlenmiş ve sessiz çalışma sağlanmış olur. Elastik deformasyon kabiliyetinin yüksek oluşu titreşimlerin sönümlenmesini ve sessiz çalışmayı sağlar. Özellikle dinamik yüklemelerde sönümleme özelliği dolayısıyla, karşı elamanın da dinamik zorlanmasını ve aşınma hızını düşürür [57].

Polimerlerde sürtünme ve aşınmayı azaltma çalışmaları, sürtünme elemanlarının aşınma dayanımlarının artırılması üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Polimerlerde aşınmaya dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi, sürtünme yüzeylerinin aşınmaya daha dayanıklı malzemelerle kaplanması, sürtünme elemanlarının malzeme açısından doğru seçilmesi, aşınma yüzey bölgesi ve malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi söylenebilir.

#### **2.4.2.1. Adhesiv aşınma**

Malzeme yüzeyleri ne kadar işlenirse işlensin pürüzlülük tamamen giderilemez ve değişik pürüzlülük seviyeleri elde edilir. Yükün etkisi altında, pürüzlülük seviyesinde oluşan küçük temas alanlarında, çok büyük basınçlar meydana gelir ve bazı temas alanlarında, mikroskopik seviyede kaynak bağları oluşmaktadır. İzafi hareket sırasında bu bağlar kopar. Bağların kopması için gereken kuvvet, sürtünme kuvvetini temsil eder. Bağların kopmasında meydana gelen malzeme kaybı ise adhesiv aşınmayı oluşturur. Adhesiv aşınma, tekrarlanan hareket ile aşınma partiküllerinin öncülüğünde oluşan transfer film tabakası ile meydana gelir. Transfer film tabakaları düşük yüklerde çok düşük aşınma oranlarına öncülük edebilirler [57].

Adhesiv aşınma en yaygın aşınma çeşididir. Bu nedenle pratikte polimerlerde aşınma denilince adhesiv aşınma anlaşılmaktadır. Polimerler mühendislik malzeme kullanımlarında metallerin yağlı olarak kullanımlarının tersine, yaygın bir şekilde metal karşı yüzeylerine yağlamasız olarak kullanılırlar.

Polimerlerle ilgili adhezyon iki kaynaktan açığa çıkar. Biri Kolomb'un elektrostatik kuvvetleridir, bu bağ tipinin önemi ise uyumsuzluk göstermesidir. Diğeri Van der Wals bağlarıdır. Ayrıca polimer/karşı yüzeydeki oksitlenmiş tabakalar arasında hidrojen bağları da olabilir. Eğer iki yüzey kuvvetlice yapışmışsa, adhezyon işi, adhezyonun termodinamik işinden daha büyük olabilir. Çünkü işin büyük bir kısmı sünek ve viskoelastik kayıpları içerir. Bu kayıplar polimerin ve elastomerin camsı hale geçiş sıcaklıklarının üzerinde meydana gelir. Sonuç olarak, transfer film gerçekleşebilir. Temas sıcaklığı camsı geçiş sıcaklığının altında ise, polimerler veya kauçukların adhezyonu ve polimer transfer film eğilimi çok daha düşük olacaktır.

Yüzeyleri temizlenen polimerler ve elastomerlerin pürüzsüz yüzeyleri ile elastomerik bileşimler, ara yüzeyde kendi başlarına bozulabilirler ve bu durumda yapışık bir transfer gerçekleşmez. Sünek malzemeler sürekli olarak karşı yüzeye polimer transfer ederler. Transfer edilen polimerlerde kayma durumuna göre farklı davranışlar görülür. En genel davranış, yapıştırıcı oluşumunda, oldukça yüksek miktarda polimer madde içeren filmin nispeten kalınlığı da 0.1-10 µm arasındadır.

Kimyasal indirgemenin olmadığı bir ortamda bağ, Kolomb ve Van der Wals olacaktır. Transfer edilmiş bir katman, ara yüzeyden soyulursa elektrostatik kuvvetler bu durumda daha büyük olacaktır. Bununla beraber filmlerin adhezyonu biraz zayıftır. Polimerlerin aşınmasını azaltmak için ilave katkıları kullanılmalıdır. Polimerlerin kayma sürtünmelerinde ilave katkıların etkisiyle transfer edilmiş film tabakası karşı yüzeyi biçimlendirmekte ve polimerin aşınma direncini geliştirmektedir.

Bazı durumlarda, çekme gerilmesi tarafından transfer edilen film katmanlarının yüzeyinden film parçacıkları çekilirler. Bu çekilen film parçacıkları polimerlerin yüzeyine yapışırken gözlenebilmektedir. Transfer film tabakasında malzeme transferine sebep olan 3 genel düşünce vardır.

- Yük altında yüzeyin deforme olması,
- Ana malzemenin çatlaması,
- Karşı yüzeye malzemenin transfer olmasıdır.

Deformasyon ve çatlama, normal yük, temas geometrisi ve sürtünme katsayısının etkisiyle temas bölgesindeki gerilme durumlarından ortaya çıkar. Transfer film tabakası, hız, yük, atmosfer, sıcaklık, polimer yapısı, kristalite, yüzey pürüzlülüğü, karşı yüzey ile olan kimyasal reaksiyonlar gibi kayma şartları tarafından etkilenir. Transfer film tabakaları arasındaki kohezyon ve transfer film-karşı yüzey arasındaki adhezyon tam anlamıyla çözülememiştir [57].

#### 2.4.2.2. Abrasif aşınma

Abrasif aşınma numuneyi sert bir partikülün kesmesi veya numuneden bir parça koparması, yerinden çıkarması sonucu meydana gelir. Dışarıdan yüzeyler arasında giren toz, talaş gibi sert parçacıkların etkisi altında meydana gelmektedir. Abrasif aşınma hemen hemen metallere benzerdir. Genellikle yumuşak polimer yüzeylerin karşı yüzeydeki sert metal pürüzlülüklerini doldurarak koruyucu bir kılıf oluşumunu ve dolayısıyla sürtünme olayında abrasif etkinin azaltıldığı açıklanmıştır [57].

#### 2.4.2.3. Yorulma aşınması

Temas yüzeylerindeki tekrarlı hareketlerin sonucu oluşan aşınmadır. Polimerlerdeki yorulma aşınması metallerdeki yorulma aşınması kadar etkili değildir. Polimerlerdeki aşınma oranı etkili bir şekilde yüke ve karşı yüzeyin yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Çatlaklar kayma yönü doğrultusundadır [58].

#### 2.4.3. Polimerlerde aşınmaya etki eden parametreler

Aşınma ve sürtünmeye maruz malzemelerin iyi tribolojik özellikler yanında, başka özelliklere de sahip olması beklenir: yorulma ve basma dayanımının iyi, ısıl genişleme katsayısının küçük, ısıl iletim katsayısının, şekil verilebilme yeteneğinin ve aşınma dayanımının iyi olması gibi. Polimerlerde aşınma davranışı ise en çok kayma hızı, basınç ve yük, sıcaklık, kayma yolu parametrelerine bağlıdır.

- Sertlik

Plastik malzemelerin bir dezavantajı, yüzeylerinin yumuşaklığı ve çizilmeye karşı direncinin az olmasıdır. Plastikler cam, seramik ve metallere göre daha az serttirler.

Termoplastiklerin sertliği sıcaklık ve katılan katkı miktarının artmasıyla azalır. Malzemenin sertliğiyle ana malzemeye katılan alaşım elementlerin cins ve miktarı arasında sıkı ilişki vardır. Genelde alaşım elementleri malzemenin mukavemetini arttırmaları.

- Hız, kayma yolu

Genel olarak aşınma miktarı kayma hızı ile artmaktadır. Bilim insanlarının çalışmalarında katkısız polimer ve cam elyaf katkılı kompozitlerin aşınma miktarının hız arttıkça arttığı, karbon fiber katkılı kompozitlerin aşınma miktarının ise kayma hızı arttıkça önemli oranda bir artışı görülmemektedir.

- Basınç ve yük

Uygulanan kuvvetin artması ile orantılı olarak aşınma miktarı da artacaktır. Çünkü; aşınma yüzeyinin etkileneceği yükün büyüklüğü, birim yüzeye uygulanan kuvvetin ve sürtünme kuvvetinin artmasına neden olacağından aşınmayı da arttıracaktır. Uygulanan yük katkısız Polifenilen Sülfid (PPS) de çok önemli bir etkenken, katkılı polimerlerde aşınma miktarının yükle fazla değişmediği görülmüştür.

- Sıcaklık

Aşınma polimer cinsine bağlı olarak sıcaklıkla değişir. Sıcaklığın artması ile ara yüzeyde moleküllerin esnekliği değişir ve karşı yüzeyin reaktivitesini etkiler.

#### **2.4.4. Polimerlerde kullanılan katkı malzemeleri**

Polimerin özellikleri, dolgu maddesi kullanılarak değiştirilebilir. Örneğin; mukavemeti artırmak ve maliyeti azaltmak için polimer içerisine değişik elyaf veya fiber parçacıklar katılabilir. Dolayısıyla polimer kompozite dönüştürülebilir. Isıl ve boyutsal kararlılığı iyileştirilebilir. Katkı maddelerinin pekiştirici, yağlayıcı, yanmayı geciktirici ve oksit giderici gibi görevleri vardır [59].

Cam fiberler, polimerlerin mekanik özelliklerini iyileştirir. Bu takviye elemanı, malzemenin akma, kopma ve darbe dayanımı gibi temel mekanik değerlerini, ısı ve yük altındaki boyutsal kararlılığını artırır. Daha yüksek yüzey basıncı, kayma hızı ve kayma mesafesi sağlar. Fiber üretimi amacıyla çok değişik bileşimde cam mineralleri



kullanılmaktadır. Tablo 2.2.'de cam fiber üretiminde kullanılan cam çeşitleri ve bileşimleri verilmektedir. Bunlardan en önemlisi oksit, kalsiyum, bor, sodyum, demir ve alüminyum içeren silika ( $\text{SiO}_2$ ) dır.

Tablo 2.2. Cam fiber üretiminde kullanılan cam çeşitleri ve bileşimleri (% ağırlıkça) [59].

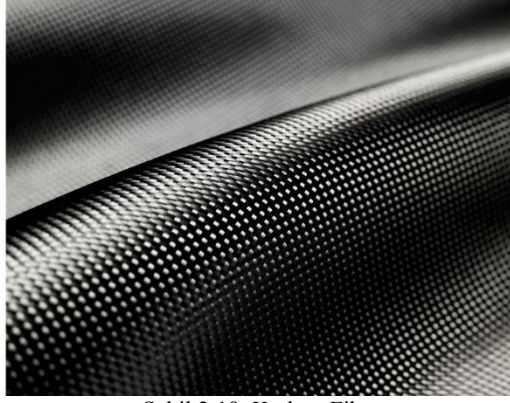
Bileşen	E-Camı	C-	S-
$\text{SiO}_2$	52,4	64,4	64,4
$\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	14,4	4,01	25,0
CaO	17,2	13,4	-
MgO	4,6	3,3	10,3
$\text{Na}_2.\text{K}_2\text{O}$	0,8	9,6	0,3
$\text{Ba}_2 \text{O}_3$	10,6	4,7	-
BaO	-	0,9	-

E camları (E elektriksel özellikli camı ifade eder) iyi mukavemet, modül ve elektriksel özelliklerinden dolayı kullanılır ve Şekil 2.17.'de görülen cam fiberin üretimi oldukça kolaydır. C camı kimyasal korozyona karşı oldukça dirençlidir ancak mekanik özellikleri E camına göre daha kötüdür. Bunun yanında maliyeti de yüksektir. S camı (S yüksek mukavemet ve modülü temsil eder) hem E ve hem de C camından daha yüksek maliyete sahip olmasına rağmen çok daha yüksek mukavemet ve elastik modül özellikleri sergiler.



Şekil 2.17. E-Cam Fiber

Karbon fiberler, polimerlerin mekanik performansını geliştirir. Karbon fiberlerin yoğunluğunun daha düşük olması nedeniyle yüksek mekanik değerler ve hafiflik gerektiren uygulamalarda cam elyafın yerine kullanılır. Şekil 2.18.'de görülen uzun karbon fiberlerin kullanılması bu değerleri üst noktalara taşır.



Şekil 2.18. Karbon Fiber

Bu takviye elemanı ayrıca malzemenin sürtünme katsayısını düşürür, aşınma direncini ve UV dayanımını artırır. Daha yüksek kayma hızı, yüzey basıncı ve kayma mesafesi sağlar. Karbon (C) elementi  $2,268 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğu ile oldukça hafif bir elementtir. Bunun yanında fiber üretimi amacıyla çok değişik bileşimde cam mineralleri kullanılmaktadır.

Bunlardan en önemlisi oksit, kalsiyum, bor, sodyum, demir ve alüminyum içeren silika ( $\text{SiO}_2$ )'dır. Fiber üretiminde, daha doğrusu takviye amaçlı kullanılan C fiberler hegzagonal yapıda olan grafit kristalleri halindedir. C element olarak kovalent elmas yapıda iken grafit kristalleri, karbon atomlarının üç boyutta dizilmeleri sonucu oluşan ve oldukça yüksek elastik modül değerleri veren sıkı hegzagonal kristal yapısındadır. Karbon fiberlerde fiber çapları  $7\text{-}8 \mu\text{m}$ , sürekli veya kısa olabilir. Bu fiberler petrol veya kömürden üretilirler. Önemli karbon fiberleri, PAN fiberlerdir.

Şekil 2.19.'da görülenlen aramid fiberler, polimerlerin aşınma faktörünü geliştirir. Bakır ve alüminyum gibi yumuşak metallere karşı, karşı yüzeyin aşınmasını düşürür. Plastik üzerinde plastik aşınmasını düşürür ve gürültü ve abrazif aşınmayı azaltır.



Şekil 2.19. Aramid Fiber

Yaygın olarak kullanılan PTFE, teflon ticari ismiyle tanınır. PTFE, bir yüksek sıcaklık fluorokarbon polimeridir. Bilinen en iyi özelliği yüksek sıcaklıklarda bile yapışmazlığıdır (anti-stick). PTFE dolgu partikülleri malzemenin yüzeyinde bir film etkisi yaparak kaydırıcılığı üst değerlere çıkartır. Sürtünme katsayısını düşürür ve malzemenin yüksek basınçlarda kullanılmasını sağlar.

Grafit tozu, saf karbon allotropu olup polimer malzemeye çok ince toz halinde ve dengeli olarak karıştırıldığında yayılma özelliği ile kristal yapının her tarafını kaplar. Kuru yağlayıcı etkisiyle malzemenin sürtünme katsayısını alt değerlere çeker. Polimer içerisinde yağlayıcı bağ gibi sulu ve nemli ortamlarda sık sık kullanılır. Grafit tozu, kuru yağlayıcı etkisiyle malzemenin sürtünme katsayısını düşük sürtünme katsayısı değerlere çeker.

Çok az miktarlardaki molibden disülfid ( $\text{MoS}_2$ ) katkısı polimer malzemenin zincirine etki yaparak çok iyi bir kristal yapının oluşmasına yardımcı olur. Bu yapı malzemenin sürtünme katsayısını azalttığı gibi aşınma direncini de artırır. Polifenilen Sülfidlerin (PPS) kristalleşmesini (yüzey sertliğini) artırır. Yapışarak kayma (slip-stick) etkisini azaltır. Molibden disülfid kullanımının aşınma probleminin çözümüne katkısında iki ayrı yaklaşım vardır. Birincisi deformasyon ve kırılma işlemlerine direnç göstermesi ile aşınmaya direnen sert yüzeyler üretmek, ikincisi yüzeyler arasında yumuşak yağlama filmleri uygulayarak yapışmayı yani yapışmayı azaltmaktır. Sürtünme katsayısını katkı malzemesi

olan silikon yağı da düşürür. Yüzey aşınmasını engeller. Yüksek hızlarda ve başlangıçta yağlayıcılık sunar.

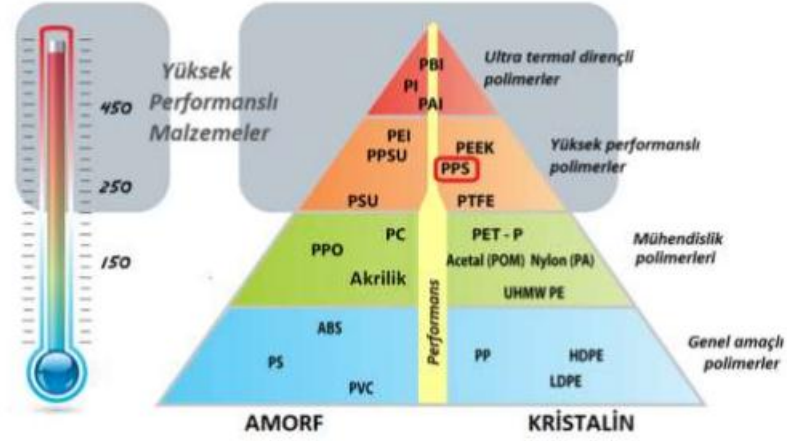
Yüksek yüzey basıncında etkili değildir. Ayrıca silikon reçineler, plastikleştirici ve yüzey yağlayıcı olarak değerlendirilirler. Sürtünmeye dirençli kaplama imalinde silikon elastomerleri takviye etmek için ve basınca duyarlı yapışkan imalinde kullanılırlar.

Silikon yağlı Polifenilen Sülfid (PPS), yüksek hız oranlarında tribolojik özellikleri geliştirir. Değişken hareketler için mükemmeldir. Yüksek hızlarda yüzey basıncı ve yüksek kayma mesafesi gerektiren uygulama alanlarında dikkate alınabilir.

## **2.5. Polimer Kompozitler**

Bilim ve teknolojinin hayatımızın vazgeçilmezi haline geldiği son yıllarda insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılamak her geçen gün daha da zorlu hale gelmektedir. Fakat bilim ve teknolojideki değişim de o kadar hızlı yaşanmaktadır ki, bilim değil insanoğlu bu değişime ayak uydurmakta zorluk çekmektedir. Yenilikler arttıkça bizlerin hayal gücünü zorlayan ihtimaller ortaya çıkmakta, daha dün imkânsız olarak gördüğümüz şeyler bugün hayatımızın bir parçası haline gelebilmektedir.

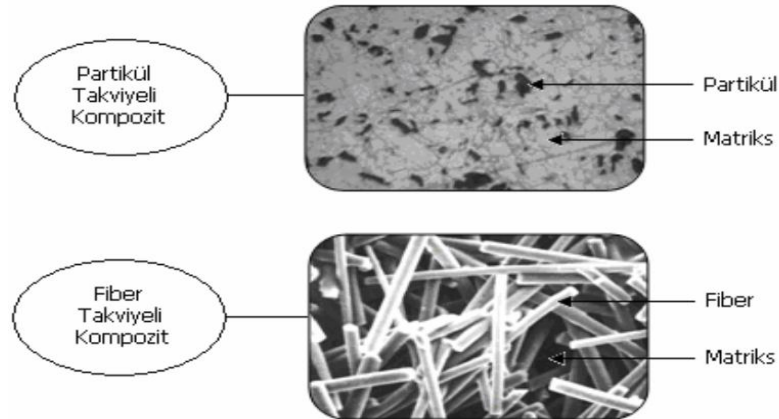
Yüksek performanslı polimerler de bu değişimin en büyük örneklerindedir. Malzeme bilimi her geçen gün yeni bir polimerin geliştirilmesi ile genişlemekte, bu genişleme sonucunda da üretilebilecek ürün yelpazesi her geçen gün daha da artmaktadır. Genellikle, ısıya, kimyasal maddelere, darbeye, aleve karşı dayanıklı ve dirençli olan polimerler grubu olarak bilinen yüksek performanslı polimer sınıfı, yeniliklerin en sık yaşandığı polimer gruplarından biridir. Genel amaçlı polimerler, mühendislik polimerleri, yüksek performanslı polimerler ve ultra termal dirençli polimerler olarak 4 farklı başlık altında incelenen polimerlerin Şekil 2.20.'de görülen grafikte performans özellikleri arttıkça üretim miktarı ve maliyeti de giderek artmaktadır [60].



Şekil 2.20. Polimerlerin sınıflandırılması [60]

Yüksek performanslı polimerlerin 2013 rakamlarına göre yıllık toplam üretiminin 500 bin tonu geçtiği, market hacminin ise 7 milyar dolara ulaştığı kaydedilmiştir. Yıllar 2018'i gösterdiğinde ise bu rakamların 20 milyar dolara ulaşabileceği tahmin edilmektedir [61].

Önümüzdeki yıllarda uzay ve havacılık başta olmak üzere, robotik ve tıp alanında ve gelişen diğer teknolojilerde polimer kompozitlere daha da çok ağırlık verileceği açıktır. Bu amaçla hem daha güçlü ve sağlam fiberler, hem de daha yüksek ısı dayanımlı, çatlak oluşturmeyen, darbe dayanımı yüksek ve sert polimer matrisler üzerinde çalışmalar dünyada ve ülkemizde devam etmektedir [62]. Polimer kompozit malzemelerin sınıflandırılması Şekil 2.21.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.21. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [58].

### 2.5.1. Fiber takviyeli kompozitler

Bu kompozit tipi ince fiberlerin matris içinde yer almasıyla meydana gelmiştir. Fiberlerin kompozit dokusundaki yerleşimi kompozit malzemenin dayanımını etkileyen önemli bir unsurdur. Sürekli fiberlerin matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile fiberler doğrultusunda yüksek dayanım sağlanırken, fiberlere dik doğrultuda düşük dayanım elde edilir. İki boyutlu yerleştirilmiş (dokuma) fiber takviyelerle her iki yönde de eşit dayanım sağlanırken, matris içerisinde rasgele dağılmış kısa fiberlerle ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Fiberlerin dayanımı kompozit malzemenin dayanımı açısından çok önemlidir. Ayrıca, fiberlerin uzunluk/çap oranları arttıkça matris tarafından fiberlere iletilen yük miktarı artmaktadır. Fiberlerin yapısal kusurlarının olmaması da dayanım açısından çok önemlidir. Kompozit malzemenin dayanımında önemli olan diğer bir unsur ise fiber ile matris arasındaki bağın özellikleridir. Matris içinde boşluklar söz konusu ise fiberlerle temas azalacaktır. Nem absorpsiyonu da fiber ile matris arasındaki bağı azaltan olumsuz bir özelliktir [62]. Fiber takviyesi kompozite dayanım ve sertlik sağlarken matris taşıyıcı iskeleti tutar. Fiber takviyeler (uzun sürekli fiberler, kumaş dokuma, kısa doğranmış fiberler ve örülmüş) farklı biçimlerde bulunabilirler. Her bir şekil farklı bir özellikte sonuçlanır. Özellikler ağırlıkla fiberlerin kompozit içindeki yerleşimlerine bağlıdır. Kompozitler hakkında bilinmesi gereken önemli şeylerden biri de fiberlerin yükü taşıdığı ve dayanımın fiberin eksenine boyunca maksimum olduğudur. Uygulamanın tipine (yapısal veya yapısal olmayan) ve üretim metoduna bağlı olarak fiber şekli seçilir. Endüstriyel uygulamalar için sürekli veya uzun fiberler tavsiye edilir. Oysa yapısal olmayan uygulamalar için kısa fiberler tavsiye edilir (Şekil 2.21). Enjeksiyon ve basınç kalıplamasında kısa fiberler kullanılırken elyaf sarma (filament winding), profil çekme (pultrusion) ve rulo sarma (roll wrapping) gibi işlemlerde sürekli fiberler kullanılır [63].

### 2.5.1.1. Cam elyaf takviyeli kompozit

Deneysel çalışmalarda kullanılan cam elyaf keçe takviyeli Polifenilen sülfid (PPS) kompozitler rastgele yönlenmeli kısa fiber takviyeli kompozitler sınıfına girmektedirler. Cam elyaf keçe takviyesi çabuk ve kolay ıslanabilirliği, elyaf yapısı nedeniyle düşük reçine tüketimi, sıcak pres kalıplarına çok kolay yatırılma ve kolay işlenebilirlik gibi özellikleri nedeniyle özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Cam elyaf keçe takviyesinde fiberlerin kısa oluşu sıcak pres ile imalat esnasında erimiş haldeki PPS'nin fiberlerin yüzeylerini daha rahat ıslatabilmesi ve bu sayede daha iyi bir ara yüzey oluşturabilme imkanı vermektedir. Islatabilme özelliğinin yanı sıra üretilen polimer matrisli kompozitlerin takviye elemanı olan cam elyaf keçeyi oluşturulan fiberlerin kısa oluşunun bir diğer yararı ise sıcak pres üretimi esnasında uygulanan basınç işlemi esnasında erimiş haldeki PPS ile birlikte kalıp çerçevesinden sürekli fiber katmanlar gibi çıkmamasıdır. Bu sayede üretilen polimer matrisli kompozitin her yerinde yaklaşık aynı oranda takviye elemanı bulunmaktadır.

Termoplastik polimerlerinin çeşitlerinin çok fazla olmasına rağmen matris olarak kullanılan polimerler sınırlıdır. Termoplastiklerin termosetlere göre matris olarak kullanımları daha az olmakla birlikte üstün kırılma tokluğu, raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme prosesi için organik çözücülere ihtiyaç duymaması gibi avantajları nedeni ile endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedirler. Bunun yanı sıra şekil verilen termoplastik parça işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir. Termoplastikler yüksek sertlik ve darbe dayanımı özelliğine de sahiptirler [64].

### 2.5.1.2. Karbon fiber takviyeli kompozit

Karbon, gelişmiş polimer matrisli kompozitlerde takviye için en yaygın olarak kullanılan yüksek performanslı bir fiber malzemedir. Karbon, yoğunluğu  $2.268 \text{ g/cm}^3$  olan kristal yapıda bir malzemedir. Karbon elyaflar cam elyaflardan daha sonra gelişen ve çok yaygın olarak kullanılan bir elyaf grubudur. Karbon ve grafit

elyaflar organik maddelerden üretildikleri için organik fiber olarak da adlandırılırlar. Karbon elyafların en önemli özellikleri düşük yoğunluğunun yanında yüksek mukavemet ve tokluk değerleridir. Karbon elyaflar, nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Bu nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Karbon fiber takviyeli polimer kompozitler spor ve eğlence ekipmanları (balıkçılık çubuklar, golf kulüpleri), filament-sargılı roket motor gövdeleri, basınçlı kaplar ve uçak yapısal bileşenleri hem askeri hem ticari, sabit kanatlı ve helikopterlerde (örneğin, kanat, gövde, stabilizatör ve dümen bileşenler gibi) kullanılmaktadır [65].

### **2.5.2. Partikül takviyeli kompozitler**

Bu tip kompozitler, makroskobik veya mikroskobik partiküllerin matris ile oluşturdukları malzemelerdir. Ortalama gömülen parçacık boyutu 1 mm' den büyük ve takviye hacim oranı genelde %50'den fazla kullanılmamaktadır [65].

Bu tip kompozitler tek veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen mikroskobik partiküllerin matris ile oluşturdukları malzemeler olup ortalama gömülen parçacık boyutu 1 µm'den büyük ve elyaf hacim oranı %25'den fazla kullanılmamaktadır. En çok kullanılan parçacıklar ise  $Al_2O_3$  ve SiC'den oluşan seramiklerdir. Burada yük, elyaf ve matris tarafından birlikte taşınır ve özellikler izotropiktir. Bu kompozitler dayanımı iyileştirmekten ziyade beklenilmeyen alışılmışın dışında birleştirilmiş özellikler elde etmek için tasarlanmaktadır.

## **2.6. Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları**

Kompozit malzemeler artık gittikçe artan oranlarda ve yeni sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır. Uzun zaman uçak sanayisindeki ihtiyaçların yönlendirdiği kompozit malzeme gelişimleri son dönemde yeni birçok sektörde birçok farklı amaç için kullanılmaktadır. Çay tepsisi, masa, sandalye, depo, küvet, tekne, bot ve otomotiv



sanayi bu kompozitlerin uygulama örnekleridir. Ayrıca formika, baskılı devre plakası, elektrikçi fiberleri, spor malzemeleri ve araç sarjı atlama sırtıkları, kaynak takımı, tenis raketi, yarış kanoları değişik birlesik malzemelerden yapılan ürünlerdir.

Uzay ve havacılık sanayisinde: Birleşik malzemelerin uzay ve havacılık sanayinde kullanımı başta hafiflik ve sağlamlık nitelikleri sayesinde. Amaç daha az yakıt harcamak, daha yüksek hıza ulaşmak ve verimliliği sağlamaktır. Bu kullanımda sadece maddi kazanç düşünülmeyp stratejik performanslarda dikkate alınmıştır. Özellikle titreşim, yorulma ve ısı dayanımı gibi nitelikler uzay ve havacılık sanayinde birleşik malzemelerin önde gelen avantajlarıdır. Birleşik malzemeler, değerli niteliklerden dolayı uzay ve havacılık araçlarında gittikçe daha fazla kullanılmaktadır. Bugün bir av bombardıman uçağında birleşik malzeme kullanımı toplam uçak ağırlığının yarısına ulaşmış bulunmaktadır. Bu sayede bor karbür, silisyum karbür, alümina karbon, cam ve kevlar elyafı değişik reçinelerle değişik birleşik malzemeler yapımında kullanılmaktadır [66].

Silah, roket ve diğer mühimmat sanayisinde: Birleşik malzemelerin silah üretimi de kullanımı pek yaygın olmamakla beraber 3000 bara kadar dayanabilen 60 ve 81 mm gibi küçük çaplı havanlar için bazı çalışmalar olmuştur. Bu silahlar hafifliği nedeniyle piyadenin savaş performansını artırıcı niteliktedir. Roket üretiminde birleşik malzemelerin rolü oldukça büyüktür. Örnek olarak M72 de motor lançeri cam elyafı ve epoksiden, Apilasta ve diğer tanksavar roketlerde gövde kısmen kevlar ve epoksiden, M77 MLRS'de lüle (nozzle) karbon birleşik malzemesinden yapılmaktadır. Miğfer konusunda kevlar ve değişik reçineler kullanılmaktadır. Kursun geçirmez yeleklerde günümüzde bitisli kevlardan, balistik testler için zırh levhaları cam ve fenolik reçineler imal edilmektedir ve tasarım alternatiflerinin bulunmasıyla git gide artacak ve birçok avantajlarıyla insanlığın hizmetine verilmiş olacaktır [66].

Şehircilik: Bu alanda kompozitler, toplu konut yapımında, çevre güzelleştirme çalışmalarında (heykel, banklar, elektrik direkleri v.s.) kullanılmaktadır. Üreticinin çok sayıda standart ürünü kısa zamanda imal edebilmesi, montajdan tasarruf ve ucuz

maliyet imkanları, kullanıcıya da yüksek izolasyon kapasitesi, hafiflik ve yüksek mekanik dayanım imkanları sağlamaktadır.

Ev aletleri: Masa, sandalye, televizyon kabinleri, dikiş makinesi parçaları, saç kurutma makinesi gibi çok kullanılan ev aletlerinde ve dekoratif ev eşyalarında kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu şekilde komple ve karışık parça üretimi, montaj kolaylığı, elektriksel etkilerden korunum ve hafiflik gibi avantajlar sağlamaktadır [66].

Elektrik ve elektronik sanayi: Kompozitler, başta elektriksel izolasyon olmak üzere her tür elektrik ve elektronik malzemenin yapımında kullanılmaktadır.

Otomotiv sanayi: Bu alanda kompozitlerden oluşan başlıca ürünler; otomobil kaportası parçaları, iç donanımı, bazı motor parçaları, tamponlar ve oto lastikleridir.

İş makineleri: İş makinelerinin kapakları ve çalışma kabinleri yapımında da kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu şekilde üretimde kullanılan parça sayısı azaltılabilmekte, tek parça üretim mümkün olmaktadır. Ayrıca elektrik izolasyon malzemelerinden de tasarruf sağlanmaktadır.

İnşaat sektörü: Cephe korumaları, tatil evleri, büfeler, otobüs durakları, soğuk hava depoları, inşaat kalıpları birer kompozit malzeme uygulamalarıdır. Tasarım esnek ve kolay olmakta, nakliye ve montajda büyük avantajlar sağlamaktadır. İzolasyon problemi çözülmekte ve bakım giderleri azalmaktadır [66].

Tarım sektörü: Seralar, tahıl toplama siloları, su boruları ve sulama kanalları yapımında kompozitler özel bir öneme sahiptirler. Kompozit malzemelerden yapılan bu örnekler istenirse ışık geçirgenliği, tabiat şartlarına ve korozyona dayanıklılık, düşük yatırım ve kolay montaj gibi avantajlar sağlamaktadır [66].

## 2.7. Polifenilen Sülfid (PPS) Polimerinin Özellikleri

Polifenilen Sülfid (PPS) aromatik bir termoplastik olup yüksek derecede ısıya karşı mukavemet göstermektedir. 220°C altında kullanılabilir. Ateşe ve tutuşmaya karşı mukavemetli olup, mükemmel derecede kimyasallara karşı mukavemet gösterir. Su absorpsiyonu son derece düşük olup iyi derecede elektriksel özelliklere sahiptir. Belirtilen özellikleri nedeniyle otomotiv sektöründe; elektrik elektronik aksamlarda, yakıt sistemlerinde, ısıtma soğutma sistemlerinde, şanzıman parçalarında vb. kullanılır. Elektrik sektöründe; kontaktör, switch ve motor aksamlarında kullanılmaktadır.

Sıcak pres tekniği yüksek hacim ve basınç altında, karmaşık yada düzlemsel cam elyaf takviyeli termoset veya termoplastik üretimi için uygun bir yöntemdir. Oldukça büyük parçalar mükemmel son bitirme yüzeyi ile kalıplanabilir. Genel olarak termoset reçineler kullanılır. Eş çalışan kalıplar, hidrolik kalıplama presine tesbit edilir. Levha veya döküm kalıplama bileşimi miktarı veya reçine eklenmiş ön biçimlendirilmiş veya cam keçe ile preste açık kalıp içerisine yerleştirilir. Ön biçimlendirilmiş veya keçe kalıplama durumunda ise ya önce ya da takviye elemanı sonrası reçine kalıp içindeki parça şekline bağlı olarak ilave edilebilir. Otomobil tamponları, ev aletleri ve elektrik parçaları tipik üretilen parçalardır. Yüksek kalıplama sıcaklıkları ve basınçları gerekli olmadığından oldukça düşük takım maliyeti ile basit, iyi yüzey görünümü ve iyi mekanik özelliklere sahip boyutsal olarak hassas yüzeyler elde edilebilir. Sıcak pres tekniği ile üretilmesi hedeflenen cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerinin özellikle otomotiv sektöründe kullanılan malzemelere alternatif olacağı düşünülmektedir.

Moleküler ağırlık PPS'in üretilen ilk versiyonlarında nispeten düşüktür, bu nedenle uygulamalar geliştirilerek özel kaplamalarda kullanılmıştır. Ancak, moleküler ağırlığı oksijenli ortamda termal çapraz bağlama reaksiyonu nedeniyle arttığında, işlenebilirlik ve mekanik özellikleri daha iyi hale gelmiştir. PPS'in enjeksiyonlu kalıplamaya uygun olduğu ve ısıya ve kimyasallara karşı mükemmel direnç

gösterdiği keşfedildiğinde, özellikle daha gelişmiş mühendislik gerektiren bileşenlerde talep artmıştır.

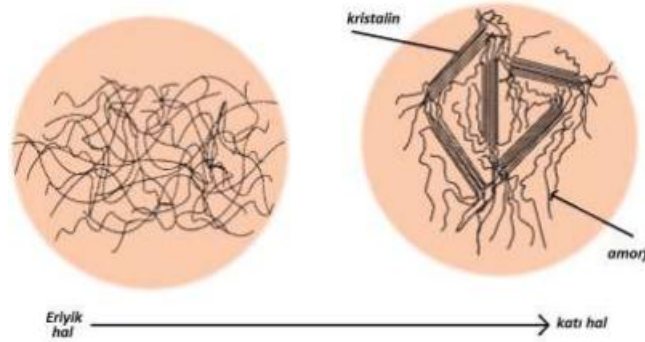
Polifenilen sülfid (PPS) polimeri de yüksek performanslı polimerler sınıfına ait polimer türlerinden biridir. Molekül yapısı içerisinde kükürt bağlarına sahip aromatik halkalar içeren PPS polimeri organik termoplastik bir polimerdir. PPS polimeri aynı zamanda yarı kristalin bir yapıya sahiptir. Kimyasallara dayanıklılığı ve termal özellikleri ile bilinen bu polimerin geniş bir kullanım alanı mevcuttur [67].

### **2.7.1. Polifenilen Sülfid (PPS) polimerinin fiziksel özellikleri**

Polifenilen-Sülfid (PPS) aromatik halka ve sülfür atomlarının birbiri takip etmesiyle oluşan bir polimer malzemedir. Aromatik halkaya kükürtün bağlanmasıyla çok kararlı bir bileşik oluşur. Bu yüzden PPS kimyasallık, alev direnci ve yüksek sıcaklık direnci bakımından çok iyi özelliklere sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı PPS'nin imalat endüstrisinde kullanım alanı yaygındır. Kullanıldığı şekle ve kalınlığa bağlı olarak 200-240°C arası kullanım sıcaklığına sahiptir. PPS malzemesi sıcaklığa karşı dayanıklı bir başka deyişle ısı yalıtımı çok iyidir.

### **2.7.2. Polifenilen Sülfid (PPS) polimerinin mekanik özellikleri**

Termoplastik bir polimer olan Polifenilen sülfid (PPS) polimeri dengeli yüksek performans özelliklerine sahip önemli polimerlerden biridir. İlk olarak Philips Chemical Company tarafından 'Ryton' adı altında üretilen polifenilen sülfid (PPS) polimeri yarı-kristalin aromatik bir polimerdir. Isıya ve kimyasallara karşı dayanıklılığı yüksek olan bu polimer sodyum sülfid ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) ile p-diklorbenzen'in ısı altında gerçekleşen polikondenzasyon reaksiyonu sonucunda elde edilmektedir. Reaksiyon Şekil 2.22.'de görüldüğü gibi 1-metil-2-pirolidinon (NMP) ya da poli(tiyo-1,4-fenilen) içerisinde genellikle 250-280°C sıcaklıkta ve 1,1 MPa basınçta (160 psi) gerçekleştirilmektedir [68,69,70].



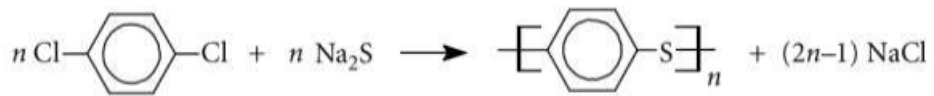
Şekil 2.22. Polifenilen sülfid (PPS) polimerinin eriyik haldeki ve katı haldeki yapısı [68]

PPS polimerinin yapısı kükürt atomu ile bağlı benzen halkasından oluşmaktadır. Polimeri oluşturan monomerin içerdiği kükürt atomu ve benzen halkalarının simetrik dizilimi sayesinde yüksek kristalizasyon derecesine izin vermektedir. Kükürt bağları içeren benzen halkaları sayesinde termal bozunmaya karşı dirençli bir yapıya sahip bu polimer aynı zamanda doğasından gelen bir yanmazlığa, termal stabiliteye ve kimyasallara karşı dayanıklı bir yapıya sahiptir [68].

PPS, para-diklorobenzen (p-DCB) ve sodyum sülfür ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) yahut sodyum hidro sülfürün polikondansasyon reaksiyonu sonucu, yüksek sıcaklık ve basınç koşulları altında ve bir polar solvent içerisinde polimerleştirilebilir.

PPS, dehidrasyon reaksiyonu, sodyum klorür ayırma reaksiyonu, egzotermik reaksiyon ve yüksek ısılı basınçlama reaksiyonu gibi birçok faktörün bir araya gelmesiyle oluşmaktadır.

Aşağıdaki Şekil 2.23.'te görülen bu polimerin reaksiyonu, bir rafınaj ve termal çapraz bağlama işleminden geçerek kalıba dökülmek suretiyle işlem görür. Böylece PPS oluşur.



Şekil.2.23. Polifenilen sülfid (PPS) polimerinin polimerizasyon reaksiyonu [71]

### 2.7.3. Polifenilen Sülfid (PPS) polimerinin termal özellikleri

Erime noktası yaklaşık 285-290°C olan PPS polimeri 200°C'e kadar olan sıcaklıklarda sahip olduğu özelliklerinde herhangi bir kayıp gözlemlenmezken, uzun süreli uygulamalarda maksimum kullanım sıcaklığı 218-240°C arasında değişmektedir. Bu polimer ortalama 200°C'nin altındaki sıcaklıklarda hiçbir çözücü içerisinde çözünmemektedir. Fakat yüksek sıcaklıklarda organik çözücüler içerisinde çözünebilir [72,73].

PPS'nin kalıplanması poliolefinlerle benzerlik göstermektedir. Tek farkı, daha yüksek erime ve kalıp derecesine sahip olmasıdır. 315-330°C erime derecesi gereklidir.

120-150°C arasındaki kalıp derecesinde, çok büyük boyutsal kararlılığı olan parçalar üretilebilir ve parlak yüzey sağlanır. 65°C'nin altında ise darbe dayanımı yüksek parçalar üretilir. PPS akış ve mekanik özelliklerinde bir değişme olmadan, devamlı olarak işlenebilir.

Polifenilen sülfid kristal halinde bir aromatik polimerdir. Kimyasal yapısı yüksek derecede kristalleşmeye uygundur. Yüksek erime noktasına ve ısı kararlılığına sahiptir. İyi kimyasal direnç gösterir ve yanmaya karşı dayanıklıdır. Bu polimer sert olması ve mekanik özelliklerini çok yüksek sıcaklıklarda koruyabilmesi nedeniyle, kalıplama ve kaplama uygulamalarında iyi sonuç verir. Dolgu maddesi olmaksızın, normal sıcaklıkta sert bir madde olup, yüksek gerilme dayanımına sahiptir. Cam elyafi gibi dolgu maddeleri ilavesi ile bu özelliklerde önemli derecede artışlar olur. Çeşitli enjeksiyon kalıplama türleri mevcuttur. %40 cam içeren türü, mekanik ve elektronik uygulamalarında, cam ve mineral içeren türü ise elektriksel uygulamalarda kullanılmaktadır.

#### **2.7.4. Polifenilen Sülfid (PPS) polimerinin kullanımı, sağladığı avantajları ve kullanım yerleri**

Polifenilen Sülfid (PPS), bilgisayar parçalarının yapımında, yüksek voltaj alanlarında, mekanik güç, yüksek ısı kararlılık ve kimyasal direncin gerektiği, su altı aletlerinde; santrifüj, pervane kanadı ve dişli pompaların yapımında kullanılmaktadır.

Oldukça kristalin bir polimer olan Polifenilen sülfid (PPS) polimeri sahip olduğu iyi özellikler sayesinde, yüksek performanslı termoplastik polimerler arasında öne çıkan önemli polimerlerden biri haline gelmiştir. Isıya karşı gösterdikleri dayanımın yanında, klorlu hidrokarbonlar, bazı aminler ve halojen içeren gruplar dışında neredeyse tüm kimyasallara karşı da dayanıklıdır. Ayrıca mükemmel bir boyut stabilitesine sahip PPS polimerinin nem absorpsiyonu düşük, dielektrik özellikleri iyidir. Bunun yanında PPS polimerinin sürtünme katsayısı ve darbe dayanımı da pek yüksek değildir. Yanmaz ve kendi kendini söndürebilir olarak kabul edilen PPS polimeri, sadece çok az miktarlarda çözücü absorbe edebildiğinden boyanması zordur. Polifenilen sülfid (PPS) polimeri yüksek sıcaklıklarda bile minimum sünme yaşamaktadır ve bu polimerin istenilen kalıba üflenmesi kolay olduğundan uzun, ince ve kompleks yapıların üretiminde kolaylıkla kullanılabilir [72,73,74].

Enjeksiyonla kalıplama reçineleri için en geniş uygulama alanları, elektrik elektronik ve endüstriyel makinalardır. Ayrıca haberleşmede, bilgisayar parçalarının ve bobinlerin yapımında, yüksek voltaj alanlarında kullanılır. Mekanik güç, yüksek ısı kararlılık ve kimyasal direncin gerektiği, su altı aletlerinde; santrifüj, pervane kanadı ve dişli pompaların yapımında kullanılmaktadır. Bu ürünler, ısıya dayanıklı ve boyutsal kararlılığa sahip olmaları nedeni ile otomotiv sanayinde kullanılır. Söz konusu reçineler, özellikle egzoz gazının aşındırmalarına, etilen glikol ve benzine karşı dayanıklıdır. El aletlerinde kullanılmaları ise ısıya ve aleve karşı dayanıklı olmaları ve renk çeşitlerinin bolluğudur. Söz konusu uygulama alanı ise, saç kurutma makineleri, bakım aletleri ve küçük mutfak aletleridir. PPS tozu elektrostatik kaplamalarda ve besin maddelerinin ambalajında kullanılmaktadır [74].

## BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 3.1. Giriş

Bu bölümde tez çalışması kapsamındaki deneysel çalışmalar sunulmuştur. Yapılan çalışmalarda Polifenilen Sülfid (PPS) polimerinin ve cam elyaf/karbon fiber katkıli kompozitlerinin çelik disk karşısında maruz kaldığı sürtünme ve aşınma durumları incelenmiştir. Deneyler kuru ortam şartlarında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olup farklı yük ve kayma hızlarındaki aşınma miktarları hesaplanmıştır.

### 3.2. Deney Malzemeleri

Polimerik ana yapı olarak ABD'nin Curbell firmasından 5,5 mm çapında ve 45 mm uzunluğunda pim kalıp olarak hazırlanmış Polifenilen Sülfid (PPS) polimeri (Ticari ismi=Ryton) dış piyasadan temin edilerek satın alınmış ve kullanılmıştır. Polimerin ısı, mekanik, fiziksel ve diğer özellikleri aşağıda Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. PPS Polimerinin özellikleri [59].

<b>Fiziksel Özellikler</b>	<b>Metrik</b>	<b>İngiliz Standart</b>
Yoğunluk (Density)	1.35 g/cm <sup>3</sup>	0.0488 lb/in <sup>3</sup> ASTM D792
Su Emilimi (Water Absorption)	0.01 %	0.01 % Immersion, 24hr; ASTM D570(2)
Su emiliminin doyma noktası (Water Absorption at Saturation)	0.03 %	0.03 % Immersion; ASTM D570(2)



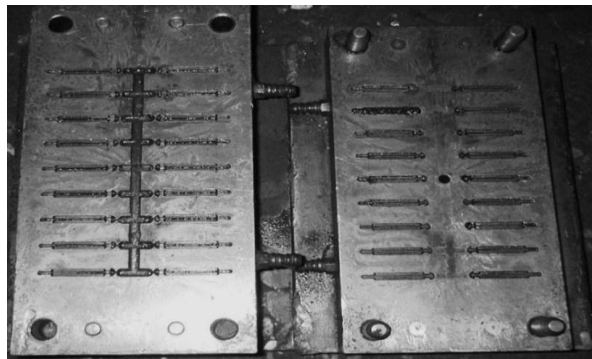
Tablo 3.1. (Devamı).

<b>Mekanik Özellikler</b>	<b>Metrik</b>	<b>İngiliz Standart</b>
Sertlik (Rockwell M)	95	ASTM D785
Sertlik (Rockwell R)	125	ASTM D785
Sertlik (Shore D)	85	ASTM D2240
Çekme Dayanımı (Tensile Strength)	93.1 MPa	ASTM D638
Kopma Uzaması (Elongation at Break)	15%	ASTM D638
Gerilme Modülü (Tensile Modulus)	3.45 GPa	ASTM D638
Eğilme Çarpanı (Flexural Modulus)	3.96 GPa	ASTM D790
Eğilme Dayanımı (Flexural Yield Strength)	145 MPa	ASTM D790
Sıkıştırma Dayanımı (Compressive Strength)	148 MPa	ASTM D695
Sıkıştırma Çarpanı (Compressive Modulus)	2.96 GPa	ASTM D695
Kesme Mukavemeti (Shear Strength)	62.1 MPa	ASTM D732
Sürtünme Katsayısı (Coefficient of Friction)	0.4	QTM 55007
Aşınma Faktörü K (wear) Factor	$4830 \times 10^{-8}$ mm <sup>3</sup> /Nm	QTM 55010
Basınç-Hız (Limiting Pressure Velocity)	0.105 MPa- m/sec	QTM 55007
İzod Çarpma değeri (Izod Impact)	0.32 J/cm	ASTM D256 Type A

Tablo 3.1. (Devamı).

Termik Özellikler	Metrik	İngiliz Standart
Termal iletkenlik (Thermal Conductivity)	0.288 W/m-K	2 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F ASTM F433
Erime Noktası  (Melting Point)	282 °C	540 °F Crystalline,Peak; ASTM D3418
Max.Çalışma Sıcaklığı (Maximum Service Temperature,)	218 °C	425 °F Long Term Air
Eğilme Sıcaklığı (Deflection Temperature)	121 °C	250 °F ASTM D648 at 1.8 MPa
Tutuşabilirlik (Flammability, UL94)	V-0	V-0 1/8 inch

Cam elyaf katkılı Polifenilen Sülfid (PPS) malzemesi de compound üretim makinesi kullanılarak üretilmiştir. Ekstrüzyon makinesi MC 40 Werner Phelieder markadır ve ekstrüzyon sıcaklık aralığı 210°C ile 240°C aralığında ayarlanarak granül formda kompozit malzemeler üretilmiştir. Daha sonra granül formundaki cam elyaf katkılı kompozit malzemeler AYYILDIZ Plastik'ten TSP M&MS 130 marka enjeksiyon makinasında 200°C ve 240°C sıcaklık aralığında 5 mm çapında ve 40 mm uzunluğunda Şekil 3.1.'de gösterilen PPS polimeri ve cam elyaf katkılı PPS kompozitin kalıpları dairesel kesitli pim kalıp kullanılarak üretilmiştir. Şekil 3.2.'de ise kalıplama işleminden sonra ortaya çıkan PPS malzemelerinin son hali görülmektedir.



Şekil 3.1. PPS polimeri ve cam elyaf katkılı PPS kompozit kalıpları



Şekil 3.2. PPS polimeri ve PPS kompozit malzeme numuneleri

Karbon fiber katkılı PPS malzemesi ise Liaoyuan JISHENG Carbon Fibre Materials Co.Ltd. Çin firmasından 6 mm çapında 50 mm boyunda pim halinde temin edilerek satın alınmıştır. Deney şartları ve numunelerin özellikleri Tablo 3.2.'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Deney şartları ve numunelerin özellikleri

Numune Adı	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Yük (N)	Hız m/s	Sıcaklık (°C)	Nem (ortam) (%)
PPS	1,35			21±1	68±2
PPS+20GF	1,44			18±1	69±2
PPS+30GF	1,56	<b>50</b>	<b>1</b>	19±1	73±2
PPS+40GF	1,62	<b>100</b>	<b>2</b>	21±1	72±2
PPS+30CF	1,45	<b>200</b>	<b>3</b>	17±1	70±2
PPS+40CF	1,49			15±1	73±2
PPS+50CF	1,54			16±1	71±2

Deneyde kullanılacak her bir aşınma numunesi ve AISI 4140 çelik diskin yüzeyi deneyden önce metil alkol ile temizlenmiştir. Katkısız PPS ve cam elyaf/karbon fiber katkılı PPS kompozit malzemeler deneyden önce ve sonra TE214S Sartorius Talent marka 0,0001 gr hassasiyeti olan hassas terazi kullanılarak tartılmıştır. Deney öncesinde katkısız PPS polimeri 4,8742 gr, cam elyaf katkılı kompozitlerin ağırlığı 5.3660 gr ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin ağırlığı 6,8432 gr olarak ölçülmüştür.

PPS ve cam elyaf/karbon fiber katkılı kompozit malzemeler sırayla 50 N, 100 N ve 200 N' luk yüklerde ve 1,2 ve 3 m/s kayma hızlarında kuru ortam şartlarında aşınma

deneyine tabi tutulmuştur. Deneylerden önce numuneler 70°C’de 2 saat süreyle kurutma işlemine tabii tutulmuştur.

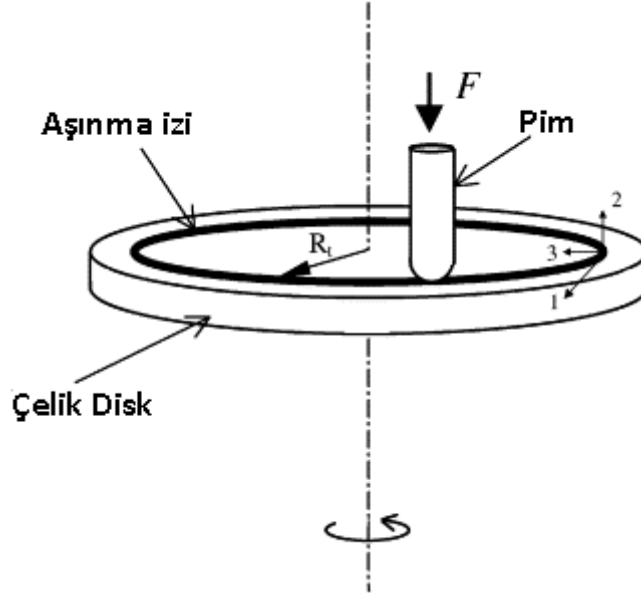
### 3.2.1 Aşınma deneyinin uygulanma yöntemi

Şekil 3.3.’de görülen pim-disk aşınma cihazında sabit devirli (544 dev/dk) motor kullanılmış ve cihaz çalıştırıldığı zaman plastik polimer malzemesinin devir değişmesinden etkilenmemesi için motor akımı devamlı pens ampermetre ile ölçülerek devir sabit tutulmuştur. Aşınma cihazının ana gövdesi üzerinde; elektrik motoru, yük kolu, karşı denge ağırlığı, yük hücresi ve bilgisayar gibi makine ekipmanları vardır.



Şekil 3.3. Pim disk aşınma cihazı

Katkısız PPS ve cam elyaf/karbon fiber katkılı PPS kompozit malzemeler aşınma deneyine başlamadan önce yüzeyleri 1300 nu'lu zımpara kullanılarak hazırlanmış, çelik disk ise doğru akım motoru tarafından döndürülmektedir. Şekil 3.4.'te aşınma testinin uygulanma şekli görülmektedir.



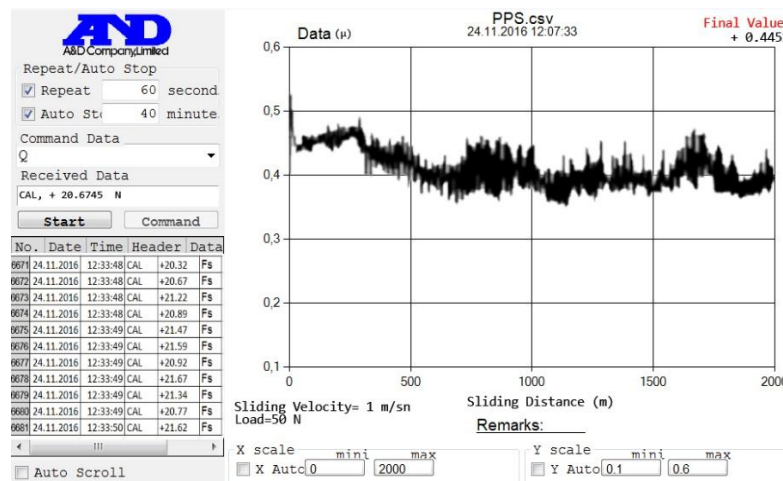
Şekil 3.4 Aşınma testinin uygulanma şekli

Sistemde elektrik motorunun tahriki ile dönen bir disk vardır. Bu diskin üzerine deneylerde kullanılacak olan aşındırıcı metal disk malzeme bir vida yardımıyla gövde üzerindeki sabit diske sabitlenir. Kol üzerinde olan bir mekanizma ile polimer malzeme numuneleri kola bağlanır. Aparata bağlanan pim numunesi diskin üzerine yavaşça bırakılır, pim numunesinin diske sürtünmesiyle pim numunesinin bağlı olduğu kol aparatı da diskin dönme yönüne hareket etmek istemektedir. Bu istek sonucunda kolda ileriye doğru bir hareket gerçekleşir. İleriye doğru olan hareket yanal kuvveti vermektedir. Yanal kuvvetin hesaplanması ile sürtünme kuvvetini ölçmek için sürtünme katsayısını belirlemek amacıyla bir yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresi ile sürtünme kuvvetinin okunması gerçekleştirilmiş olur. Her bir numune için tespit edilen sürtünme kuvvetinin, uygulanan yüke bölünmesiyle numunenin sürtünme katsayısı tespit edilir. Her bir deney **en az üç** defa yapılarak bulunan sonuçların ortalaması alınmış ve deney sonuçlarının hassas bir şekilde elde edilmesi amaçlanmıştır.

PPS ve cam elyaf/karbon fiber katkılı PPS kompozitleri 50 N, 100 N ve 200 N yük altında ve 1,2 ve 3 m/s hızlarda pim-disk aşınma mekanizmasında 100 mm çapında 5 mm kalınlığındaki AISI 4140 çeliğine karşı 2000 m kayma yolunda aşınmaya maruz bırakılmıştır. AISI 4140 çelik diskin ortalama yüzey pürüzlülüğü Surfrest SJ-400 Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı ile  $Ra=0,29 \mu\text{m}$  olarak, sertliği ise 58 HRC olarak ölçülmüştür. Aşınma deneylerinde hız sabit tutularak kayma süreleri 5-40 dk' dır. Deney esnasında 544 dev/dk ile devir sayısı sabit tutulmuştur.

### 3.2.2 Sürtünme ve aşınma deneyi

Sürtünme katsayısını belirlemek amacıyla sürtünme kuvvetini ölçmek için loadcell kullanılmıştır. 2000 m'lik kayma yolu süresince dakikada 240 veri ve deney sonunda toplamda her numune için yaklaşık 10000 veri alınmış, veriler bilgisayara otomatik olarak kaydedilmiştir. Pim numunesinin disk malzemeye temas ettirilmesiyle birlikte pimın bağlı olduğu kol, diskin dönüş yönüne göre hareket ettirilerek bu hareket yük hücresine iletilmiştir. Yük hücresi bu salınım hareketini bağlı bulunduğu kablolarla önce gerilim kuvvetlendirici cihaza, sonra gerilim farkı ölçülerek A/D çevirici entegreye buradan da Şekil 3.5.'te gösterilen A&D Company Limited Rs 5.20 programı üzerinden bilgisayara iletmiştir. Daha sonra sürtünme kuvveti değerleri uygulanan kuvvete bölünerek numunelerin sürtünme katsayıları hesaplanmıştır.



Şekil 3.5. Sürtünme katsayısı hesaplama görüntüsü

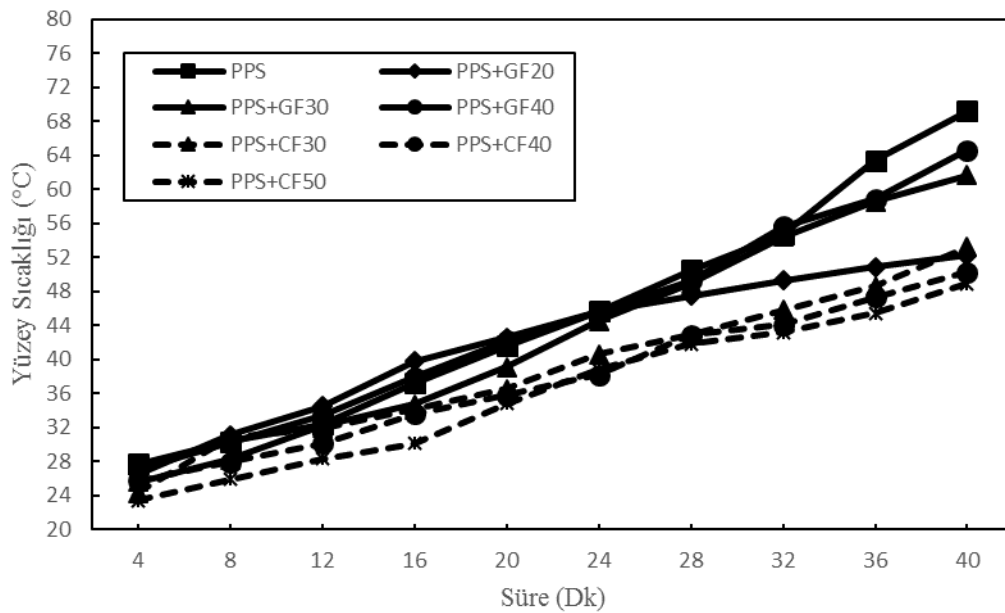
Deneysel süresince ortamın sıcaklığı ve nemi ölçülmüştür. Deneysel öncesi ve sonrası deneysel numuneleri hassas terazide tartılarak ağırlık farkları bulunmuştur. Bu ölçüm işlemleri, her bir numune için 3 kez tekrarlanmıştır. Numunelerin Aşınma oranı; Ağırlık kaybının, malzemenin yoğunluğu, kayma yolu ve uygulanan yüke bölünmesiyle Denklem 3.1'deki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_s = \frac{\Delta G}{F_n \cdot L \cdot \rho} \quad (3.1)$$

Burada  $W_s$ : Özgül Aşınma Hızı ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ ),  $\Delta G$ : Aşınma Miktarı (g),  $\rho$ : Yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $L$ : yol (m) ve  $F_n$ : Uygulanan normal yükü (N) ifade etmektedir.

#### - Yüzey Sıcaklık Ölçümü

Aşınma deneyleri boyunca malzemelerin yüzey sıcaklıkları, Fluke 561 çok amaçlı infrared termometre ile ölçülmüştür. Sıcaklık-zaman değişimleri kayıt altına alınmıştır. Bu süre zarfında malzemelerin maruz kaldığı kayma hızı - yük (1 m/s ve 50 N) dolayısıyla yüzey sıcaklıkları  $25-27^\circ\text{C}$  derece ile başlayıp uygulanan sürenin artması ile  $65-70^\circ\text{C}$  değere kadar artış göstermektedir.



Şekil 3.6. Deneysel malzemelerin yüzey sıcaklık-zaman verileri (1 m/sn 50 N)

Şekil 3.6.'da deney malzemelerinin yüzey sıcaklık-zaman verileri gösterilmiştir. Burada da görüldüğü gibi numune malzemeleri başlangıçta oda sıcaklığı değerlerinde olup testin gerçekleştiği süre boyunca bu sıcaklık değeri çelik disk üzerinde gerçekleşen sürtünmeden dolayı artış göstermiştir. Deney sonuna doğru aşınan numune malzemeleri çelik disk üzerine yapıştığından sıcaklık değerleri sabit değerlerde kalmıştır.

#### - Nem Ölçümü

Aşınma deneyleri boyunca deney ortamının nem oranları, DT 321 Nemölçer DT321 ile ölçülmüştür. Nem-zaman değişimleri her bir deney için kayıt altına alınmıştır. Tablo 3.3.'te deney ortamının nem-zaman verileri gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Deney ortamının nem-zaman verileri (1 m/sn 50 N)

	Süre(Dk.)	PPS	GF20	GF30	GF40	CF30	CF40	CF50
NEM (%)	4. dk.	69	71,5	74	72,2	68,8	70,4	74,8
	8. dk.	68,2	74,4	73,6	72,8	69,3	71	73,3
	12. dk.	68	73,3	75,5	71	67,7	71,8	72,6
	16. dk.	69,1	71	75,9	73,5	69,4	70,3	73,8
	20. dk.	68,8	71,1	74,4	72	68	69,8	74
	24. dk.	70,1	70,9	73	71,1	67,2	68,4	74,1
	28. dk.	69,9	69,8	75,9	72,4	66	69	72,9
	32. dk.	71,2	72,2	76,2	70,2	66,5	70,2	73
	36. dk.	70	71,8	76	70,8	67,4	71,1	73,9
	40. dk.	71,7	72,4	77,2	71,1	67,9	72,6	73,1

#### - Taramalı elektron mikroskopu (SEM)

Numunelerin aşınma testi sonucunda oluşan aşınan yüzeylerinin SEM mikrografları JEOL JSM 6060 Scanning Electron Microscope markalı taramalı elektron mikroskopu cihazı kullanılarak 500X büyütme oranında elde edilmiştir.

Sürtünme ve aşınma deneyleri 1, 2 ve 3 m/sn kayma hızlarında ve 50, 100 ve 200 N yükler altında gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.4.'te deney malzemelerinin bu şartlar altında aşınma miktarları verilmiştir.



Tablo 3.4. Deney numunelerinin aşınma miktarları

	YÜK		HIZ (m/sn.)		
	(N)	1	2	3	
<b>MALZEME</b>	<b>AŞINMA MİKTARI (g) ΔG</b>				
	50	0,0012	0,0018	0,0025	
<b>PPS</b>	100	0,0085	0,0122	0,0139	
	200	0,0266	0,0423	0,0687	
<b>PPS</b>	50	0,0011	0,0018	0,0022	
+	100	0,0054	0,0073	0,0098	
<b>Cam Elyaf %20</b>	200	0,017	0,038	0,0593	
<b>PPS</b>	50	0,001	0,0017	0,0022	
+	100	0,00329	0,00415	0,00576	
<b>Cam Elyaf %30</b>	200	0,0084	0,0144	0,0182	
<b>PPS</b>	50	0,0009	0,0016	0,0028	
+	100	0,0035	0,0064	0,0081	
<b>Cam Elyaf %40</b>	200	0,0165	0,0244	0,0282	
<b>PPS</b>	50	0,00101	0,00119	0,00148	
+	100	0,00293	0,00299	0,00355	
<b>Karbon Fiber %30</b>	200	0,0113	0,0138	0,01585	
<b>PPS</b>	50	0,00098	0,00112	0,00133	
+	100	0,00233	0,00281	0,0033	
<b>Karbon Fiber %40</b>	200	0,0109	0,0129	0,0147	
<b>PPS</b>	50	0,00096	0,00108	0,00127	
+	100	0,00216	0,00253	0,00311	
<b>Karbon Fiber %50</b>	200	0,0094	0,00996	0,0129	

## **BÖLÜM 4. SONUÇLAR VE SONUÇLARIN İRDELENMESİ**

### **4.1. Giriş**

Bu bölümde yapılan sürtünme ve aşınma deneylerinin sonuçları ortaya konulmuştur. Ayrıca PPS polimeri ve kompozitlerinin yapılan aşınma deneylerinden sonra SEM fotoğrafları çekilmiş olup bu malzemelerle ilgili yorumlar yapılmıştır.

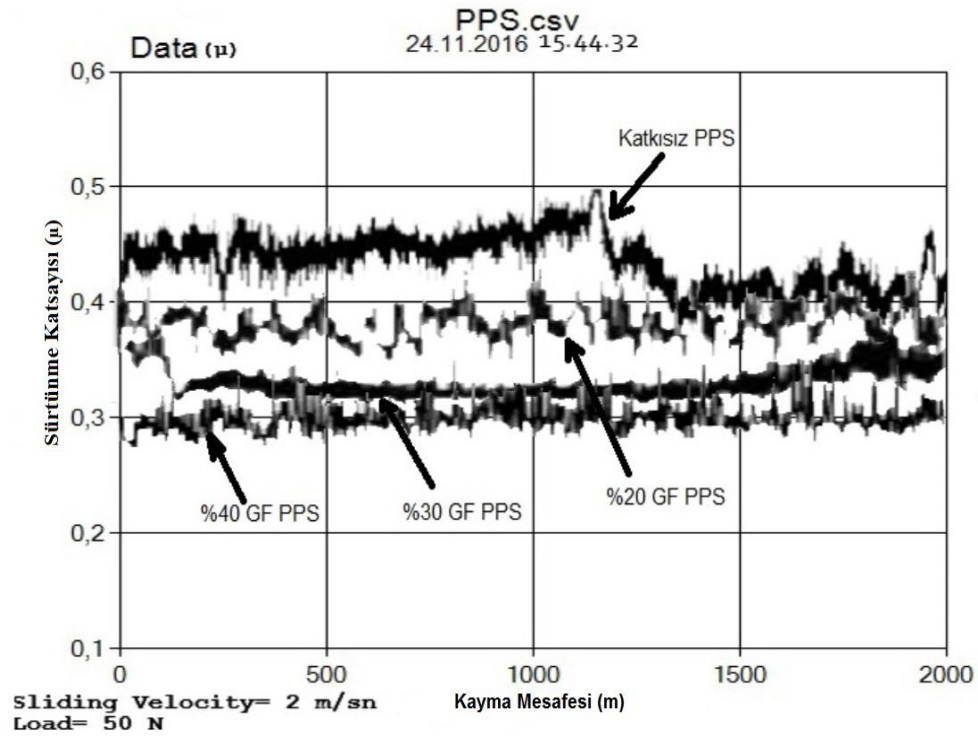
### **4.2. Sürtünme Sonuçları**

Deneysel çalışmalarda PPS polimeri ile cam elyaf katkılı ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin sürtünme katsayısının kayma mesafesi, yük, kayma hızı ve katkı oranı ile olan ilişkisi incelenmiştir.

#### **4.2.1. PPS cam elyaf katkılı kompozit**

Şekil 4.1.'de katkısız PPS ve %20, %30, %40 cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin 2 m/sn ve 50N yük altındaki şartlarda sürtünme katsayısı ve kayma mesafesi ilişkisi verilmiştir.

Katkısız PPS'in sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği incelendiğinde sürtünme katsayısının başlangıç hal aşamasında 1200 m'ye kadar hafif bir artış eğilimi içerisinde olduğu görülmektedir. Sürtünme katsayısı değeri 1200 m'ye kadar dalgalanmakla birlikte 0.46 civarındadır. 1200-1400 m arasında sürtünme katsayısı kararlı hal aşamasında sert bir düşüş göstermiştir. 1400-2000 m arasında ise sabit bir eğilim görülüp, ortalama değer 0.43'e kadar inmiştir. Deneyler diğer tüm katkı oranlarının hız ve yük durumları için yapılmış ve sonuçlar alınmıştır.



Şekil 4.1. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı–kayma mesafesi ilişkisi (Yük:50 N, Hız: 2 m/sn)

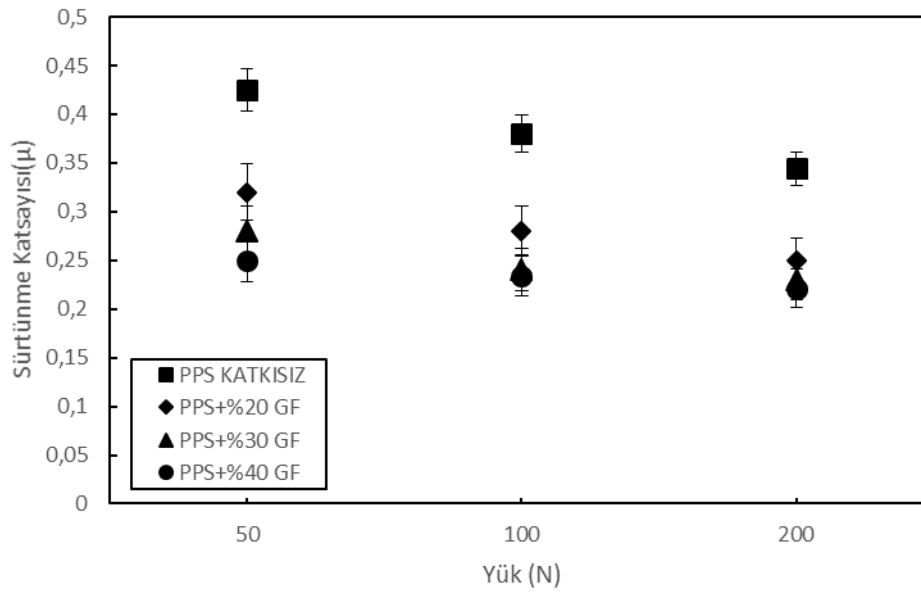
Katkısız PPS'in maksimum sürtünme katsayısının 50 N yük ve 3 m/s hız altında 0.482 olduğu görülmektedir. Hızın %100 artırıldığı zaman sürtünme katsayısındaki artış %5 civarında iken hızın %200 artırıldığı zaman sürtünme katsayısındaki artış %14 civarında olmuştur.

%20 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin 0-800 m arasındaki sürtünme katsayısı değeri başlangıç hal aşamasında 0.34'den 0.38'e çıkmıştır. Daha sonra 2000 m'ye kadar kararlı hal aşamasında sürtünme değerinde artış görülmemiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi başlangıçtaki sürtünme katsayılarındaki artışın düzenli olmadığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise, çelik disk ve polimer malzeme yüzeylerindeki pürüzlülükten kaynaklanmaktadır. Zaman içerisinde kayma yolu arttıkça disk yüzeyindeki girintiler çelik disk malzemeye göre daha yumuşak olan polimer malzeme ile dolacak ve bu durum çelik disk yüzeyinde ince bir film tabakası oluşturmaları ile açıklanacaktır.

%30 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin 0-250 m arasındaki sürtünme katsayısı değeri başlangıç hal aşamasında 0.36'dan 0.33'e inmiştir. Daha sonra kararlı hal aşamasında 2000 m'ye kadar sürtünme değerinde artış görülmemiş ve sürtünme katsayısı değeri 0.34 olarak sabit ilerlemiştir.

%40 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin 0-100 m arasındaki sürtünme katsayısı değeri başlangıç hal aşamasında 0.30'dan 0.28'e düşmüştür. Daha sonra 100-1000 m arasında önemli oranda dalgalanmalı artış göstermiştir. 1000-2000 m arasında kararlı hal aşamasında sürtünme değerinde artış görülmemiş ve sürtünme katsayısı değeri 0.29 olarak sabit ilerlemiştir.

Şekil 4.2.'de katkısız PPS ve %20, %30, %40 cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin 1 m/sn kayma hızında 50, 100 ve 200 N yükler altında sürtünme katsayısı ve yük ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.2. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi (1 m/sn)

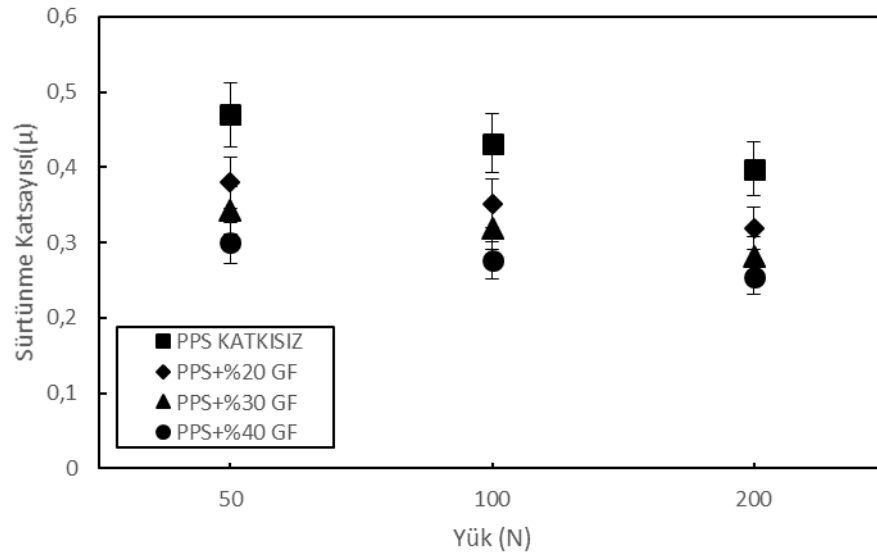
Katkısız PPS polimerinin; 1 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.45 olarak tespit edilmiştir. 1 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.42, 1 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.38 olarak gözlemlenmiştir.

%20 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin 1 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.34 olarak tespit edilmiştir. 1 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında, sürtünme katsayısı değeri 0.31, 1 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.29 olarak gözlemlenmiştir.

%30 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin 1 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.28 olarak tespit edilmiştir. 1 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında, sürtünme katsayısı değeri 0.26, 1 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.25 olarak gözlemlenmiştir.

%40 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin 1 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.24 olarak tespit edilmiştir. 1 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında, sürtünme katsayısı değeri 0.23, 1 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.22 olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.3.'de katkısız PPS ve %20, %30, %40 cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin 2 m/sn kayma hızında 50, 100 ve 200 N yükler altında sürtünme katsayısı ve yük ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.3. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı–yük ilişkisi (2 m/sn)

Katkısız PPS polimerinin; 2 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.44 olarak tespit edilmiştir. 2 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.41, 2 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.37 olarak gözlemlenmiştir.

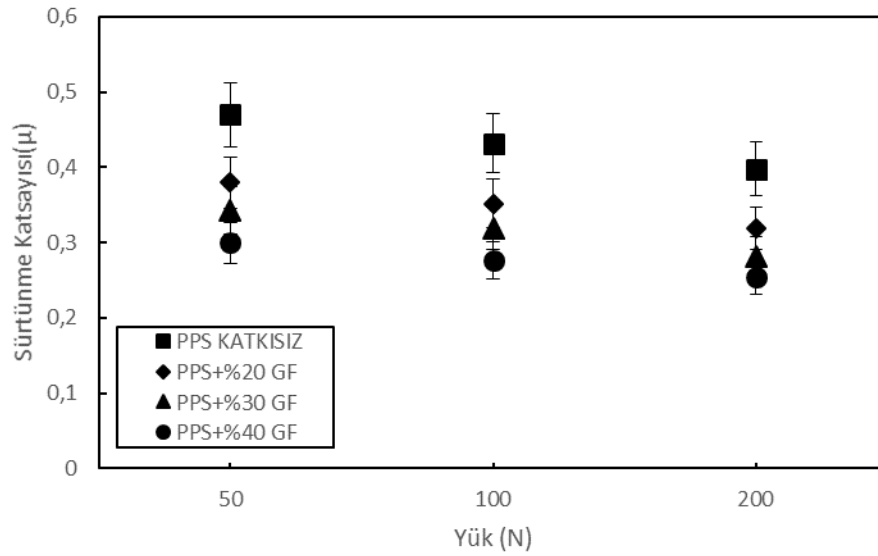
%20 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin 2 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.35 olarak tespit edilmiştir. 2 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında, sürtünme katsayısı değeri 0.31, 2 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.28 olarak gözlemlenmiştir.

%30 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin 2 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.32 olarak tespit edilmiştir. 2 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında, sürtünme katsayısı değeri 0.27, 2 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.25 olarak gözlemlenmiştir.

%40 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin 2 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.28 olarak tespit edilmiştir. 2 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında, sürtünme katsayısı değeri 0.25, 2 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.23 olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.4.'te katkısız PPS ve %20, %30, %40 cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin 3 m/sn kayma hızında 50, 100 ve 200 N yükler altında sürtünme katsayısı ve yük ilişkisi verilmiştir.

Katkısız PPS polimerinin; 3 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.47 olarak tespit edilmiştir. 3 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.43, 3 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.39 olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı–yük ilişkisi (3 m/sn)

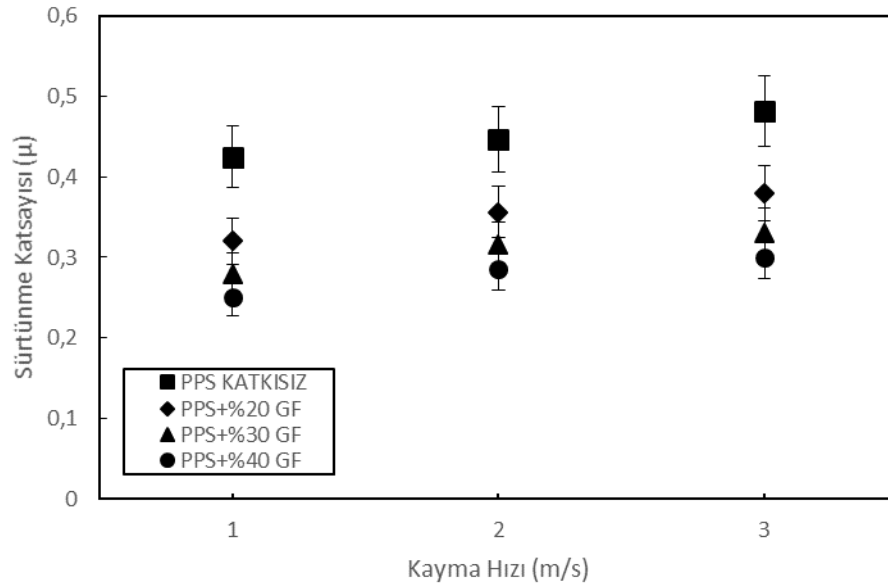
%20 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin 3 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.38 olarak tespit edilmiştir. 3 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında, sürtünme katsayısı değeri 0.35, 3 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.31 olarak gözlemlenmiştir.

%30 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin 3 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.34 olarak tespit edilmiştir. 3 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında, sürtünme katsayısı değeri 0.31, 3 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.28 olarak gözlemlenmiştir.

%40 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin 3 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.30 olarak tespit edilmiştir. 3 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında, sürtünme katsayısı değeri 0.27, 3 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.25 olarak belirlenmiştir.

Katkısız PPS polimeri ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinde sürtünme katsayısı, yükün artırılması ile birlikte azalmıştır.

Şekil 4.5.'te katkısız PPS ve %20, %30, %40 cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin 50 N yük altında 1,2 ve 3 m/s kayma hızlarında sürtünme katsayısı ve hız ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.5. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı-hız ilişkisi (50 N)

Katkısız PPS'in 1 m/s kayma hızı altında uygulanan 50 N yüke göre sürtünme katsayısı-kayma mesafesi değişim grafiği verilmiştir. Her üç kayma hızında da artan yük miktarı ile sürtünme katsayısı azalmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı verileri literatür sonuçları ile uyum içindedir [19].

Şekillerden de görüldüğü gibi kayma hızlarının artması ile birlikte sürtünme katsayılarında önemli bir oranda yükselme olduğu gözlemlenmiştir. Katkısız PPS'in sürtünme katsayısı değerleri 50 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.425, 2 m/s hızda 0.447 ve 3 m/s hızda 0.482 olmuştur.

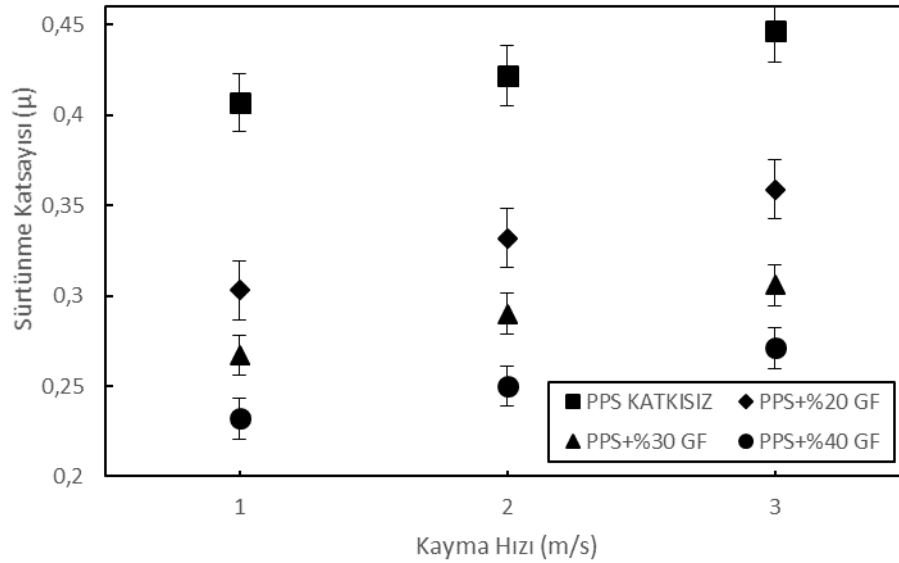
%20 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri 50 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.32, 2 m/s hızda 0.356 ve 3 m/s hızda 0.38 olmuştur.

%30 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri 50 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.28, 2 m/s hızda 0.316 ve 3 m/s hızda 0.31 olmuştur.



%40 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri 50 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.25, 2 m/s hızda 0.285 ve 3 m/s hızda 0.30 olmuştur.

Şekil 4.6.'da katkısız PPS ve %20, %30, %40 cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin 100 N yük altında 1,2 ve 3 m/s kayma hızlarında sürtünme katsayısı ve hız ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.6. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı-hız ilişkisi (100 N)

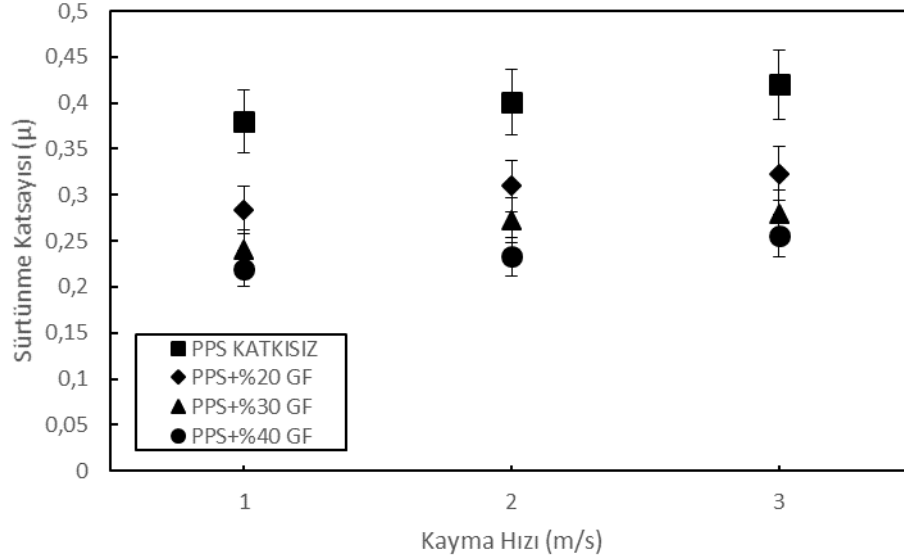
Şekillerden de görüldüğü gibi kayma hızlarının artması ile birlikte sürtünme katsayılarında önemli bir oranda yükselme olduğu gözlemlenmiştir. Katkısız PPS'in sürtünme katsayısı değerleri 100 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.4, 2 m/s hızda 0.42 ve 3 m/s hızda 0.44 olmuştur.

%20 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri 100 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.30, 2 m/s hızda 0.33 ve 3 m/s hızda 0.35 olmuştur.

%30 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri 100 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.26, 2 m/s hızda 0.29 ve 3 m/s hızda 0.30 olmuştur.

%40 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri 100 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.23, 2 m/s hızda 0.25 ve 3 m/s hızda 0.27 olmuştur.

Şekil 4.7.'de katkısız PPS ve %20, %30, %40 cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin 200 N yük altında 1,2 ve 3 m/s kayma hızlarında sürtünme katsayısı ve hız ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.7. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı-hız ilişkisi (200 N)

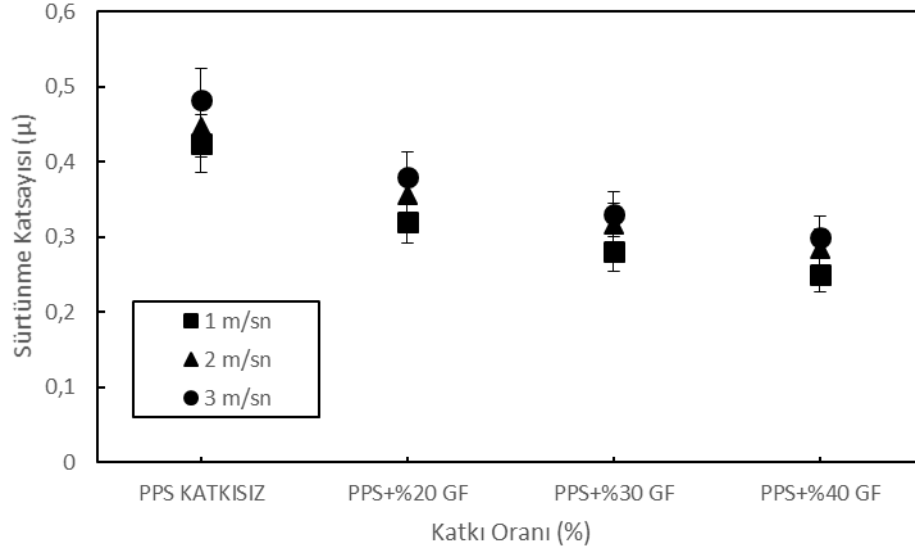
Şekillerden de görüldüğü gibi kayma hızlarının artması ile birlikte sürtünme katsayılarında önemli bir oranda yükselme olduğu gözlemlenmiştir. Katkısız PPS'in sürtünme katsayısı değerleri 200 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.38, 2 m/s hızda 0.40 ve 3 m/s hızda 0.42 olmuştur.

%20 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri 200 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.28, 2 m/s hızda 0.31 ve 3 m/s hızda 0.32 olmuştur.

%30 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri 200 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.24, 2 m/s hızda 0.27 ve 3 m/s hızda 0.28 olmuştur.

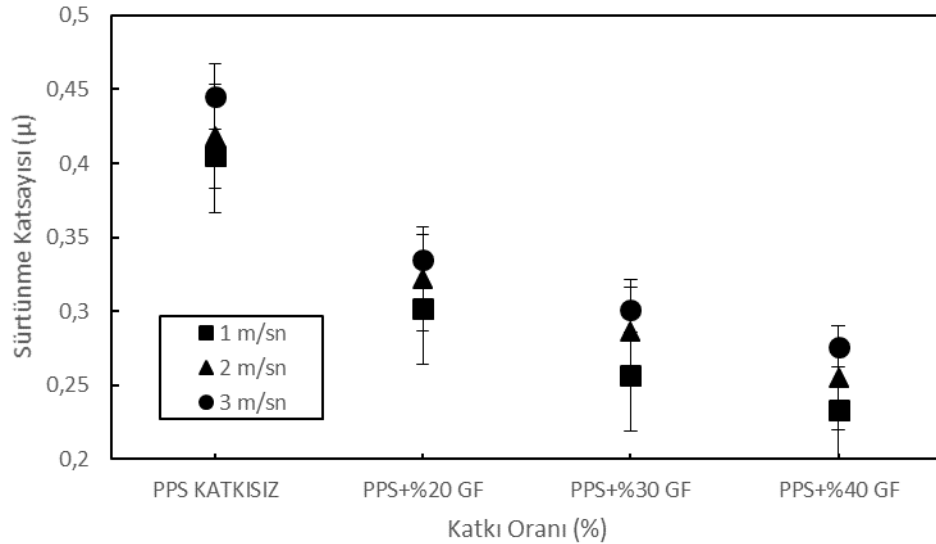
%40 cam elyaf katkılı PPS kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri 200 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.22, 2 m/s hızda 0.23 ve 3 m/s hızda 0.25 olmuştur.

Şekil 4.8.'de katkısız PPS ve %20, %30, %40 cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin 50 N yük altında 1, 2 ve 3 m/s hızlar altında sürtünme katsayısının katkı oranına göre değişim ilişkisi verilmiştir.



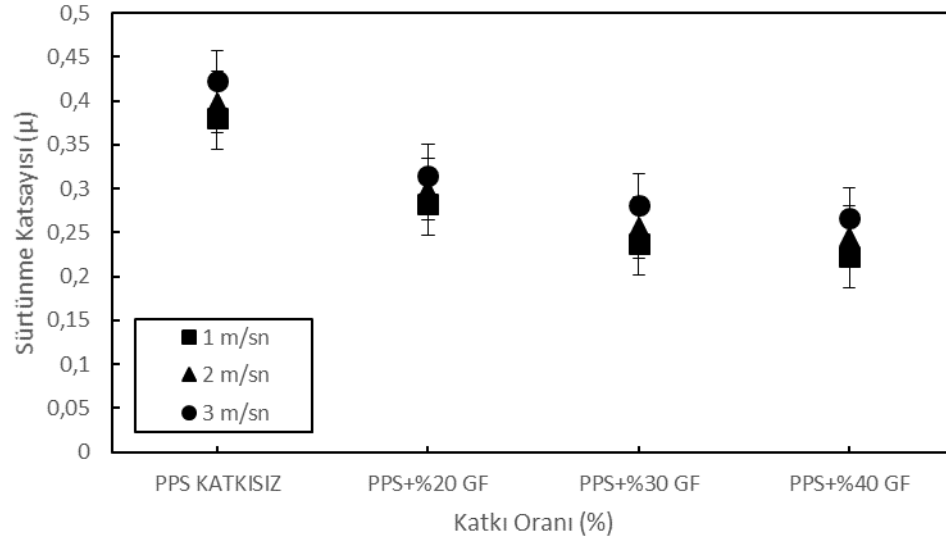
Şekil 4.8. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı- katkı oranı ilişkisi (50 N)

Şekil 4.9.'da katkısız PPS ve %20, %30, %40 cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin 100 N yük altında 1, 2 ve 3 m/s hızlar altında sürtünme katsayısının katkı oranına göre değişim ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.9. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı- katkı oranı ilişkisi (100 N)

Şekil 4.10.'da katkısız PPS ve %20, %30, %40 cam elyaf katkıli PPS kompozitlerinin 200 N yük altında 1, 2 ve 3 m/s hızlar altında sürtünme katsayısının katkı oranına göre değişim ilişkisi verilmiştir.

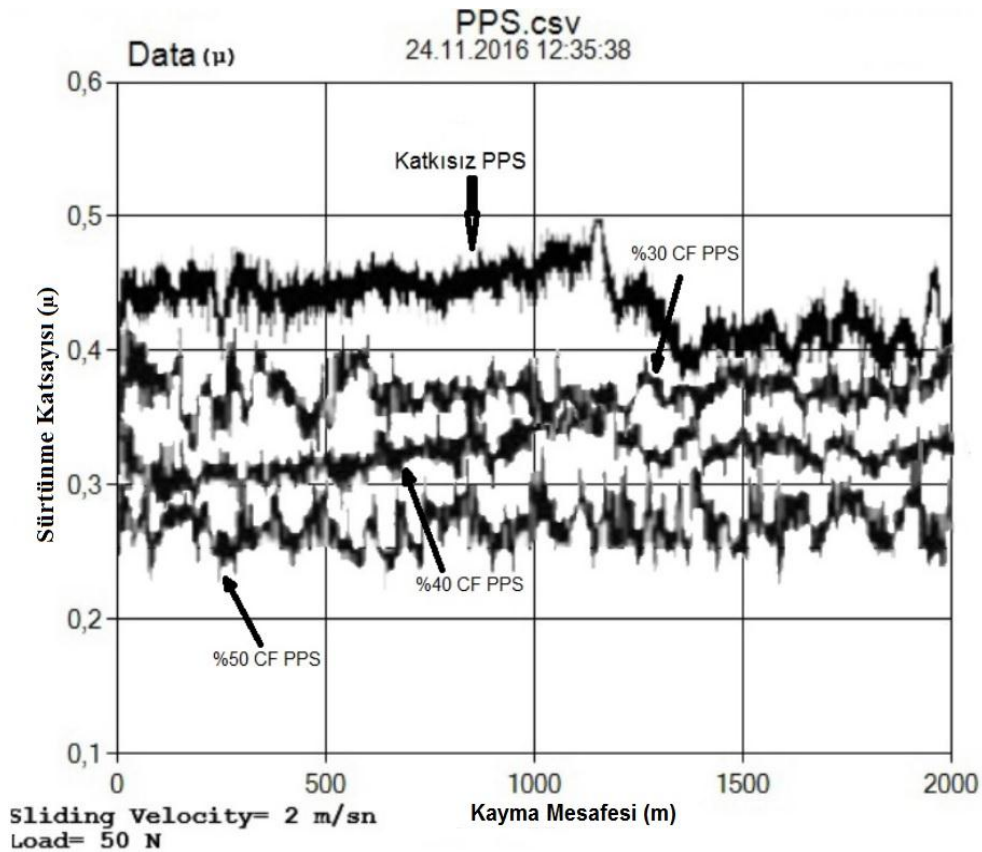


Şekil 4.10. Katkısız PPS ve cam elyaf katkıli PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı-katkı oranı ilişkisi (200 N)

Yapılan deneyler sonucunda katkısız PPS polimerinin sürtünme katsayısının diğer cam elyaf katkıli PPS kompozitlerin sürtünme katsayısına göre en yüksek değere sahip malzeme olduğu tespit edilmiştir. Ancak PPS polimerine cam elyaf katkı malzemesi ekledikçe sürtünme katsayısının düştüğü gözlemlenmiştir. Cam elyaf katkıli malzemeler arasında sürtünme katsayısı en yüksek olan %20 cam elyaf katkıli kompozit, en düşük sürtünme katsayısı ise %40 cam elyaf katkıli kompozit malzemedir.

#### 4.2.2. PPS karbon fiber katkıli kompozit

Şekil 4.11.'de katkısız PPS ve %30, %40, %50 karbon fiber katkıli PPS kompozitlerinin 2 m/sn ve 50N yük altındaki şartlarda sürtünme katsayısı ve kayma mesafesi ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.11. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı–kayma mesafesi ilişkisi (Yük:50 N, Hız: 2 m/sn)

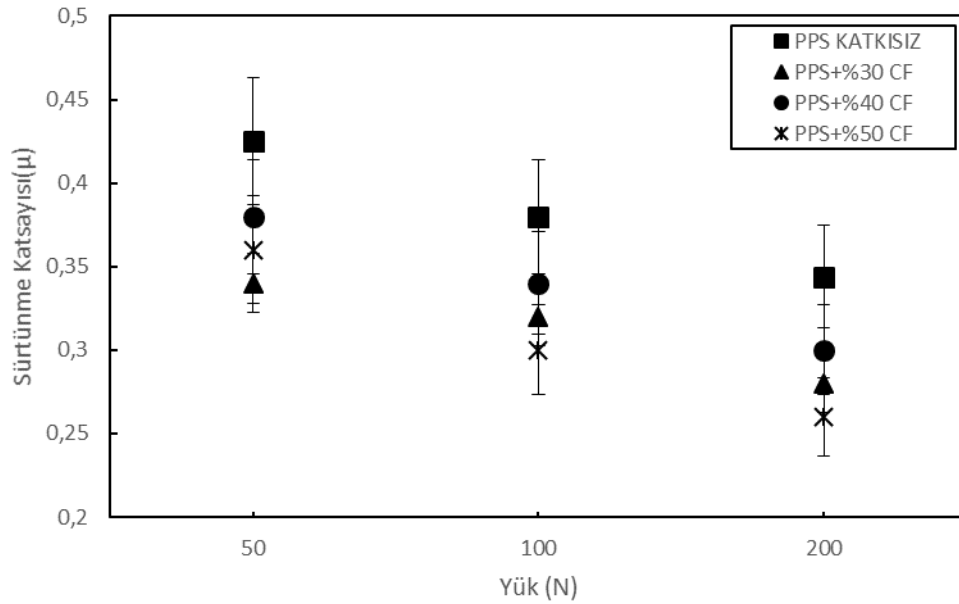
Katkısız PPS'in sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği incelendiğinde sürtünme katsayısının başlangıç hal aşamasında 1200 m'ye kadar hafif bir artış eğilimi içerisinde olduğu görülmektedir. Sürtünme katsayısı değeri 1200 m'ye kadar dalgalanmakla birlikte 0.46 civarındadır. 1200-1400 m arasında sürtünme katsayısı kararlı hal aşamasında sert bir düşüş göstermiştir. 1400-2000 m arasında ise sabit bir eğilim görülüp, ortalama değer 0.43'e kadar inmiştir. Deneyler diğer tüm katkı oranlarının hız ve yük durumları için yapılmış ve sonuçlar alınmıştır.

%30 karbon fiber katkılı PPS kompozitinin 0-250 m arasındaki sürtünme katsayısı değeri 0.38'den 0.35'e düşmüştür. Daha sonra başlangıç hal aşamasında 250-1200 m arasında sürtünme katsayısı değeri 0.35'den 0.38'e kadar yükselmiştir. 1200-2000 m arasında kararlı hal aşamasında sürtünme değerinde artış görülmemiş ve sürtünme katsayısı değeri 0.37 olarak sabit ilerlemiştir.

%40 karbon fiber katkıli PPS kompozitinin başlangıç hal aşamasında 0-250 m arasındaki sürtünme katsayısı değeri 0.35'den 0.31'e kadar düşmüştür. Daha sonra 250-1200 m arasında kararlı bir halde sürtünme katsayısı değerinde artış görülmüş ve sürtünme katsayısı değeri 0.38-0.39 arasında ilerlemiştir. 1200- 2000 m arasında 0.35 olarak devam etmiştir.

%50 karbon fiber katkıli PPS kompozitinin 0-2000 m arasındaki sürtünme katsayısı değeri dalgalanmalı bir şekilde artma eğiliminde sürmüştür. Daha sonra genel itibariyle kararlı hal gösteren kompozitin 0-2000 m arasında sürtünme katsayısı değerinde çok fazla miktarda artış görülmemiş ve sürtünme katsayısı değeri 0.28-0.29 arasında ilerlemiştir.

Şekil 4.12.'de katkısız PPS ve %30, %40, %50 karbon fiber katkıli PPS kompozitlerinin 1 m/sn kayma hızında 50, 100 ve 200 N yükler altında sürtünme katsayısı ve yük ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.12. Katkısız PPS ve karbon fiber PPS katkıli kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi (1 m/sn)

Katkısız PPS polimerinin; 1 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.45 olarak tespit edilmiştir. 1 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında sürtünme

katsayısı değeri 0.42, 1 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.38 olarak gözlemlenmiştir.

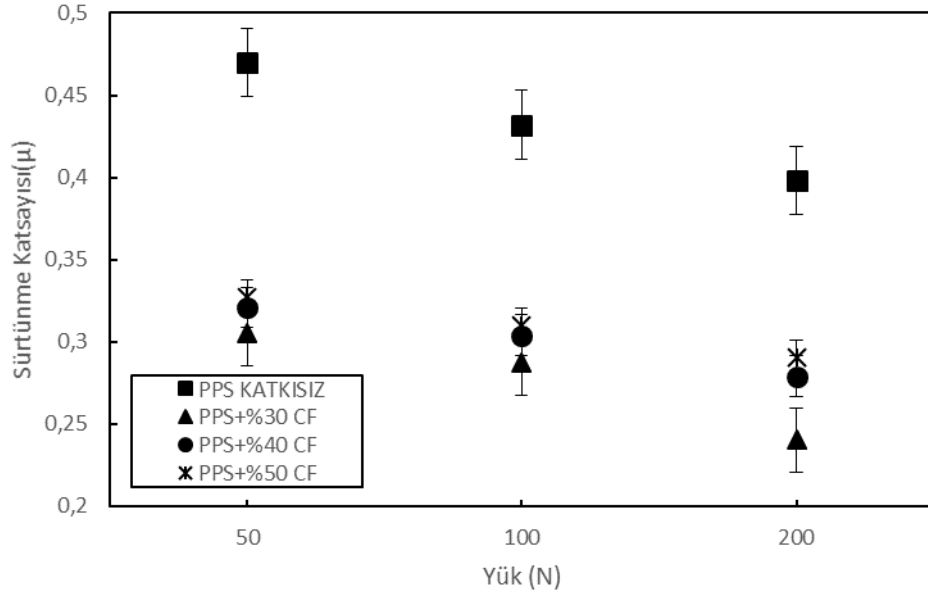
%30 karbon fiber katkılı PPS kompozitinin 1 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.34 olarak tespit edilmiştir. 1 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.33, 1 m/s kayma hızı ve 200N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.31 olarak gözlemlenmiştir.

%40 karbon fiber katkılı PPS kompozitinin 1 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.38 olarak tespit edilmiştir. 1 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.36, 1 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.33 olarak gözlemlenmiştir.

%50 karbon fiber katkılı PPS kompozitinin 1 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.36 olarak tespit edilmiştir. 1 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.30, 1 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.26 olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.13.'te katkısız PPS ve %30, %40, %50 karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin 2 m/sn kayma hızında 50, 100 ve 200 N yükler altında sürtünme katsayısı ve yük ilişkisi verilmiştir.

Katkısız PPS polimerinin; 2 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.44 olarak tespit edilmiştir. 2 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.41, 2 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.37 olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 4.13. Katkısız PPS ve karbon fiber PPS katkılı kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi (2 m/sn)

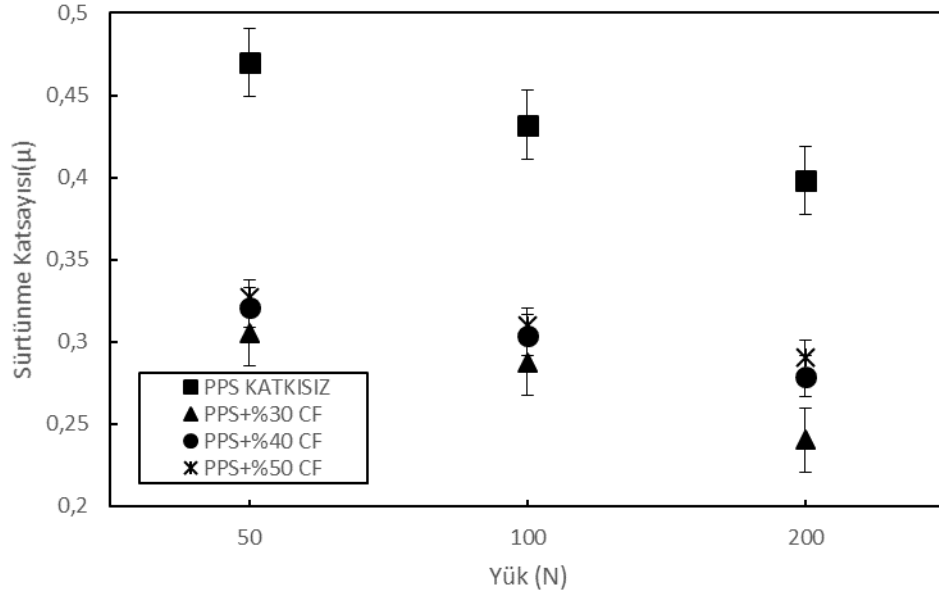
%30 karbon fiber katkılı PPS kompozitinin 2 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.32 olarak tespit edilmiştir. 2 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.30, 2 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.25 olarak gözlemlenmiştir.

%40 karbon fiber katkılı PPS kompozitinin 2 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.34 olarak tespit edilmiştir. 2 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.32, 2 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.28 olarak gözlemlenmiştir.

%50 karbon fiber katkılı PPS kompozitinin 2 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.34 olarak tespit edilmiştir. 2 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.31, 2 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.28 olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.14.'te katkısız PPS ve %30, %40, %50 karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin 3 m/sn kayma hızında 50, 100 ve 200 N yükler altında sürtünme katsayısı ve yük ilişkisi verilmiştir.





Şekil 4.14. Katkısız PPS ve karbon fiber PPS katkılı kompozitlerin sürtünme katsayısı–yük ilişkisi (3 m/sn)

Katkısız PPS polimerinin; 3 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.47 olarak tespit edilmiştir. 3 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.43, 3 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.39 olarak gözlemlenmiştir.

%30 karbon fiber katkılı PPS kompozitinin 3 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.30 olarak tespit edilmiştir. 3 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.28, 3 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.24 olarak gözlemlenmiştir.

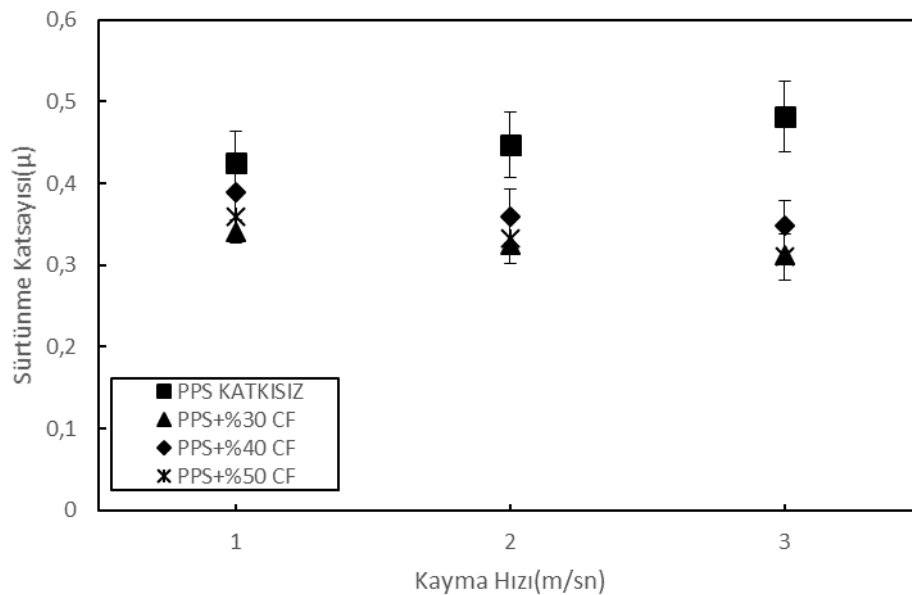
%40 karbon fiber katkılı PPS kompozitinin 3 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.32 olarak tespit edilmiştir. 3 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.30, 3 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.27 olarak gözlemlenmiştir.

%50 karbon fiber katkılı PPS kompozitinin 3 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.32 olarak tespit edilmiştir. 3 m/s kayma hızı ve 100 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.31, 3 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.29 olarak belirlenmiştir.

Katkısız PPS polimeri ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinde sürtünme katsayısı, yükün artırılması ile birlikte azalmıştır.

50 N yük altında, katkısız PPS polimerine göre karbon fiber katkı oranı artırıldığında (%30, %40, %50) sürtünme katsayısı değerleri sırası ile %20, %9 ve %15 oranında azalmıştır. En fazla sürtünme katsayısı karbon fiber katkılı kompozitler arasında 1 m/sn 50 N'da %40 karbon fiber katkılı PPS kompozit malzemesinde görülmüştür. En az sürtünme katsayısına sahip olan malzeme ise 1 m/sn 200 N yük altındaki %50 karbon fiber katkılı PPS kompozit malzemesidir.

Şekil 4.15.'te katkısız PPS ve %30, %40, %50 karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin 50 N yük altında 1,2 ve 3 m/s kayma hızlarında sürtünme katsayısı ve hız ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.15. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı-hız ilişkisi (50 N)

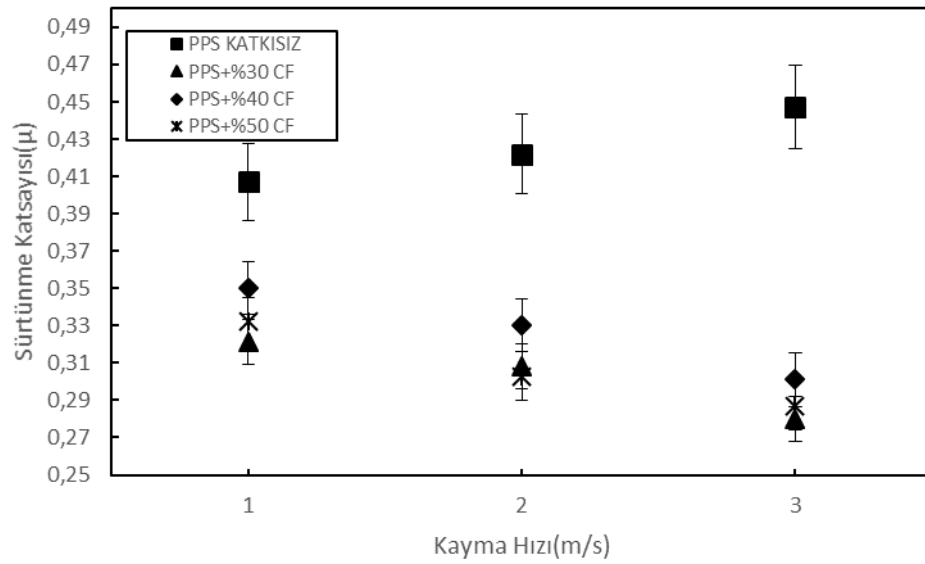
Şekillerden de görüldüğü gibi kayma hızlarının artması ile birlikte karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin sürtünme katsayılarında azalma eğilimi görülmektedir. Katkısız PPS'in sürtünme katsayısı değerleri 50 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.425, 2 m/s hızda 0.447 ve 3 m/s hızda 0.482 olmuştur.

%30 karbon fiber katkılı PPS kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri 50 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.34, 2 m/s hızda 0.325 ve 3 m/s hızda 0.313 olmuştur.

%40 karbon fiber katkılı PPS kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri 50 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.39, 2 m/s hızda 0.36 ve 3 m/s hızda 0.348 olmuştur.

%50 karbon fiber katkılı PPS kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri 50 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.36, 2 m/s hızda 0.332 ve 3 m/s hızda 0.31 olmuştur.

Şekil 4.16.'da katkısız PPS ve %30, %40, %50 karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin 100 N yük altında 1,2 ve 3 m/s kayma hızlarında sürtünme katsayısı ve hız ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.16. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı-hız ilişkisi (100 N)

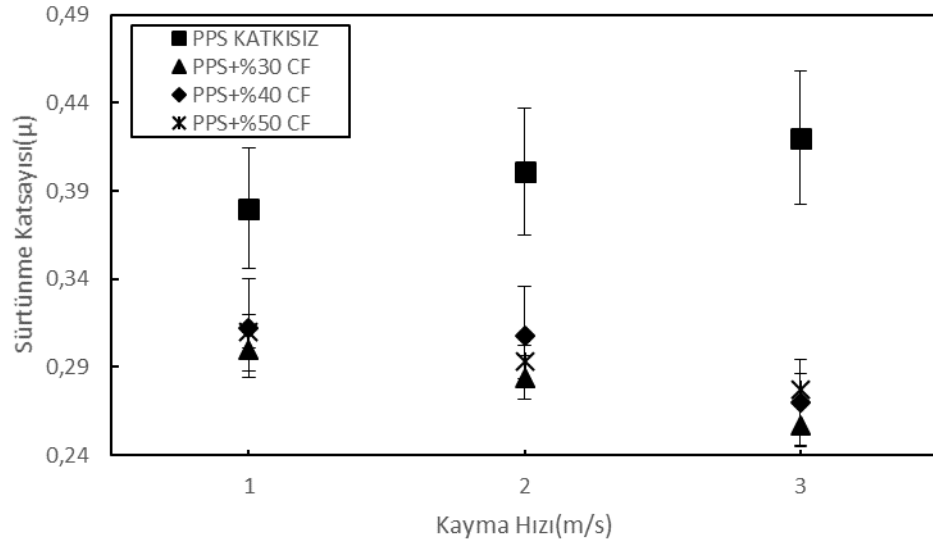
Katkısız PPS'in sürtünme katsayısı değerleri 100 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.4, 2 m/s hızda 0.42 ve 3 m/s hızda 0.44 olmuştur.

%30 karbon fiber katkılı PPS kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri 100 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.32, 2 m/s hızda 0.30 ve 3 m/s hızda 0.283 olmuştur.

%40 karbon fiber katkıli PPS kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri 100 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.35, 2 m/s hızda 0.33 ve 3 m/s hızda 0.30 olmuştur.

%50 karbon fiber katkıli PPS kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri 100 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.33, 2 m/s hızda 0.30 ve 3 m/s hızda 0.28 olmuştur.

Şekil 4.17.'de katkısız PPS ve %30, %40, %50 karbon fiber katkıli PPS kompozitlerin 200 N yük altında 1,2 ve 3 m/s kayma hızlarında sürtünme katsayısı ve hız ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.17. Katkısız PPS ve karbon fiber katkıli PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı-hız ilişkisi (200 N)

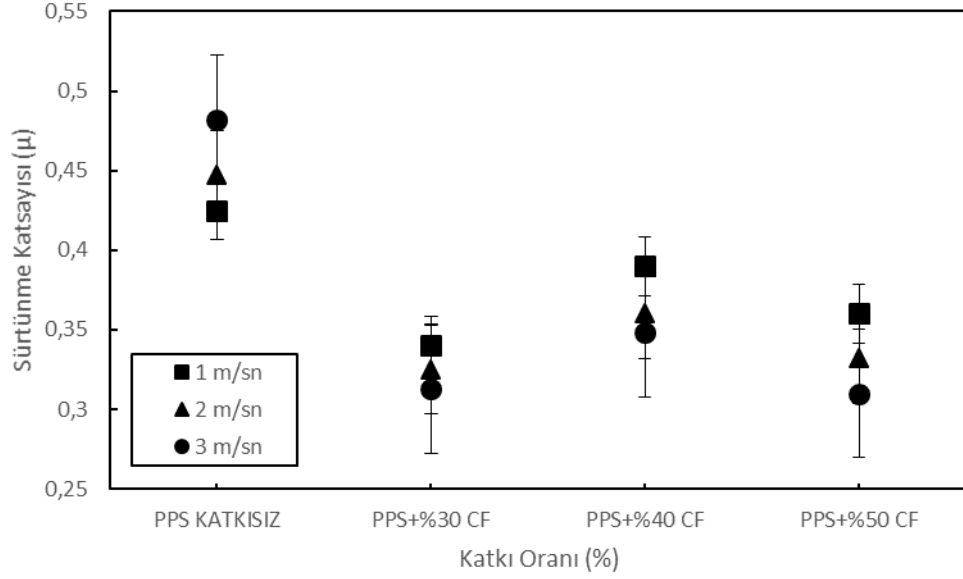
Katkısız PPS'in sürtünme katsayısı değerleri 200 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.38, 2 m/s hızda 0.40 ve 3 m/s hızda 0.42 olmuştur.

%30 karbon fiber katkıli PPS kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri 200 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.30, 2 m/s hızda 0.28 ve 3 m/s hızda 0.25 olmuştur.

%40 karbon fiber katkıli PPS kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri 200 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.31, 2 m/s hızda 0.30 ve 3 m/s hızda 0.27 olmuştur.

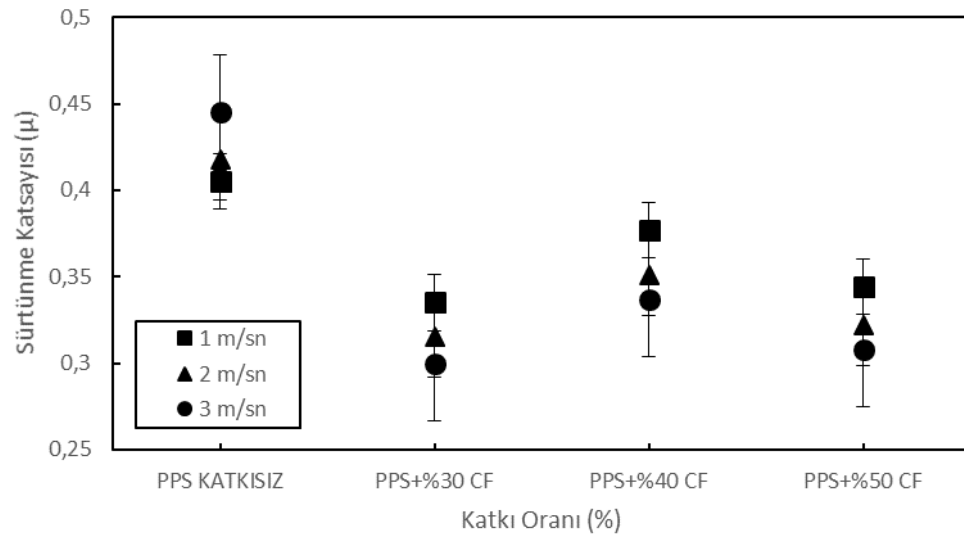
%50 karbon fiber katkıli PPS kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri 200 N'luk yüklerde sırasıyla 1 m/s hızda 0.31, 2 m/s hızda 0.29 ve 3 m/s hızda 0.27 olmuştur.

Şekil 4.18.'de katkısız PPS ve %30, %40, %50 karbon fiber katkıli PPS kompozitlerin 50 N yük altında 1, 2 ve 3 m/s hızlar altında sürtünme katsayısının katkı oranına göre değişimi ilişkisi verilmiştir.



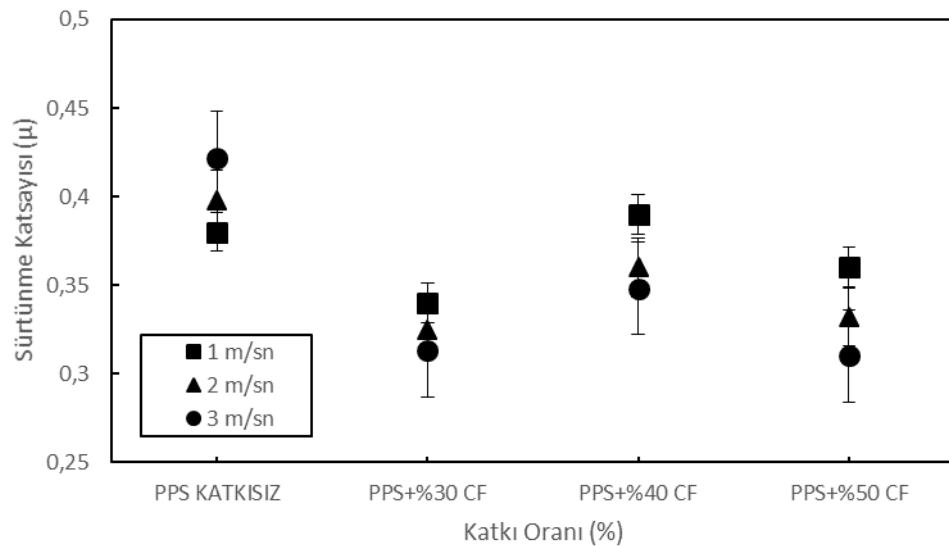
Şekil 4.18. Katkısız PPS ve karbon fiber katkıli PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı-katkı oranı ilişkisi (50 N)

Şekil 4.19.'da katkısız PPS ve %30, %40, %50 karbon fiber katkıli PPS kompozitlerin 100 N yük altında 1, 2 ve 3 m/s hızlar altında sürtünme katsayısının katkı oranına göre değişimi ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.19. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı-katkı oranı ilişkisi (100 N)

Şekil 4.20.'de katkısız PPS ve %30, %40, %50 karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin 100 N yük altında 1, 2 ve 3 m/s hızlar altında sürtünme katsayısının katkı oranına göre değişimi ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.20. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı-katkı oranı ilişkisi (200 N)

Yapılan deneyler sonucunda katkısız PPS polimerinin sürtünme katsayısının diğer katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısına göre en yüksek değere sahip

malzeme olduğu tespit edilmiştir. Ancak PPS polimerine karbon fiber katkı malzemesi eklendikçe sürtünme katsayısının düştüğü gözlemlenmiştir. Karbon fiber katkılı malzemeler arasında sürtünme katsayısı en yüksek olan %40 karbon fiber katkılı kompozit, en düşük sürtünme katsayısı ise %50 karbon fiber katkılı kompozit malzemedir.

Ortalama sürtünme katsayısı değerleri deneylerde kullanılan tüm yük ve hızlar için aşağıdaki şekilde;

Katkısız PPS için 0.34 – 0.48

%20 cam elyaf katkılı PPS için 0.34 – 0.38

%30 cam elyaf katkılı PPS için 0.31 – 0.36

%40 cam elyaf katkılı PPS için 0.28 – 0.30

%30 karbon fiber katkılı PPS için 0.34 – 0.38

%40 karbon fiber katkılı PPS için 0.32 – 0.40

%50 karbon fiber katkılı PPS için 0.25 – 0.29 tespit edilmiştir.

Yüksek yük ve hız koşullarında (200 N, 3 m/s) katkısız PPS polimerine göre katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayılarındaki değişimler sırasıyla;

Sürtünme katsayıları %20 cam elyaf katkılı PPS kompozitinde %20, %30 cam elyaf katkılı PPS kompozitinde %23, %40 cam elyaf katkılı PPS kompozitinde %27, %30 karbon fiber katkılı PPS kompozitinde %26, %40 karbon fiber katkılı PPS kompozitinde %22 ve %50 karbon fiber katkılı PPS kompozitinde %27 daha düşük değerlerde tespit edilmiştir.

Yükün artması ile birlikte en fazla sürtünme katsayısındaki artış katkısız PPS polimerinde olmuştur. Sürtünme katsayısının artmasının sebebi ise uygulanan yükün etkisi ile hem polimer pim malzeme hem de çelik disk birbirleri ile teması neticesinde ısınmakta bu sıcaklık Şekil 3.5.'te görüldüğü gibi yaklaşık olarak 70°C'ye kadar çıkmaktadır. Bu sıcaklık ise PPS polimerinin yumuşamasına sebep olmaktadır. Böylece polimerin disk ile temas yüzeyinden küçük partiküller kopmakta

ve plastik deformasyon meydana gelmektedir. Bunun sonucu olarak yüksek değerdeki yüklerde ve hızlarda sürtünme katsayısında artış gözlemlenmiştir.

PPS içerisindeki katkı miktarının artması ile birlikte yüke bağlı sürtünme katsayısında azalma olduğu görülmüştür. Literatürdeki bazı çalışmalar [11,12] benzer sonuçlar vermektedir. Genel anlamda sonuçlar literatür çalışması ile uyum içerisinde.

Katkılı kompozitlerde sürtünme katsayısının düşmesinin sebebi ise katkı maddelerinin moleküler yapısının doğal sonucudur. Polimer içindeki katkı maddelerinin birbirleri olan etkileşimi zayıf Vander Wals bağlar ile sağlanmaktadır. Dolayısıyla birbirleri üzerinde kolaylıkla kayarak film tabakası oluşturarak sürtünme katsayısının düşmesine sebep olur. Düşük yüklerde ve düşük hızlardaki (50 N, 1 m/s) sürtünme katsayılarının deneyde kullanılan katkısız PPS polimer ve farklı oranda katkılı PPS kompozit malzemeler için birbirine yakın olduğu görülmüştür.

50 N yük altında, katkısız PPS polimerine cam elyaf katkısı eklendiğinde (%20, %30, %40) sürtünme katsayısı değerleri sırası ile %20, %23 ve %27 oranında azalmıştır. En fazla sürtünme katsayısı 3 m/sn 50 N'da %20 cam elyaf katkılı PPS kompozit malzemesinde görülmüştür. En az sürtünme katsayısına sahip olan malzeme ise 1 m/sn ve 200 N yük altındaki %40 cam elyaf katkılı PPS kompozit malzemesi olarak tespit edilmiştir. Tüm kayma hızlarında uygulanan yükün artması ile sürtünme katsayısının azaldığı, tüm yüklerde ise kayma hızının artması ile sürtünme katsayısının arttığı tespit edilmiştir.

50 N yük altında, katkısız PPS polimerine karbon fiber katkısı eklendiğinde (%30, %40, %50) sürtünme katsayısı değerleri sırası ile %26, %22 ve %27 oranında azalmıştır. En fazla sürtünme katsayısı 1 m/sn 50 N'da %40 karbon fiber katkılı PPS kompozit malzemesinde görülmüştür. En az sürtünme katsayısına sahip olan malzeme ise 3 m/sn 200 N yük altındaki %50 karbon fiber katkılı PPS kompozit malzemesi olarak tespit edilmiştir. Tüm kayma hızlarında uygulanan yükün artması



ile sürtünme katsayısının azaldığı ve aynı şekilde tüm yüklerde ise kayma hızının artması ile sürtünme katsayısının azaldığı tespit edilmiştir.

Çalışmada kullanılan PPS polimer ve PPS kompozitlerinin sürtünme deneylerinde sürtünme katsayısı davranışı iki aşamalı olarak gerçekleşmiştir. Birinci aşama olan başlangıç aşamasında, sürtünme katsayıları hızlı bir şekilde artmıştır. İkinci aşama olan kararlı hal aşamasında ise sürtünme katsayısı sabit kalmıştır. Bunun sebebi, başlangıç aşamasında polimer malzemenin yüzeyindeki pürüzlü tepelerin şekillenmesi ve ikinci aşamada ise bu pürüzlü tepelerin kaybolması ve aşınma partiküllerinin yüzeyi örtmüş olmasıdır [9].

Deneyle sonunda PPS ve cam elyaf/karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin sürtünme katsayıları yüklerle ele alındığında uygulanan yükün artması ile sürtünme katsayısının azalmakta olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde uygulanan yükün artması ile birlikte sürtünme katsayısındaki azalmanın polimerlerin viskoelastik ve sıcaklık özelliklerinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. İki malzemenin teması sonucunda, pürüzlü yüzeylerde oluşan ısı ve bu iki malzeme arasındaki sürtünme yüzeylerinde artan sıcaklık malzemenin viskoelastik özelliklerini, yapışma ve transfer davranışlarını etkiler [7].

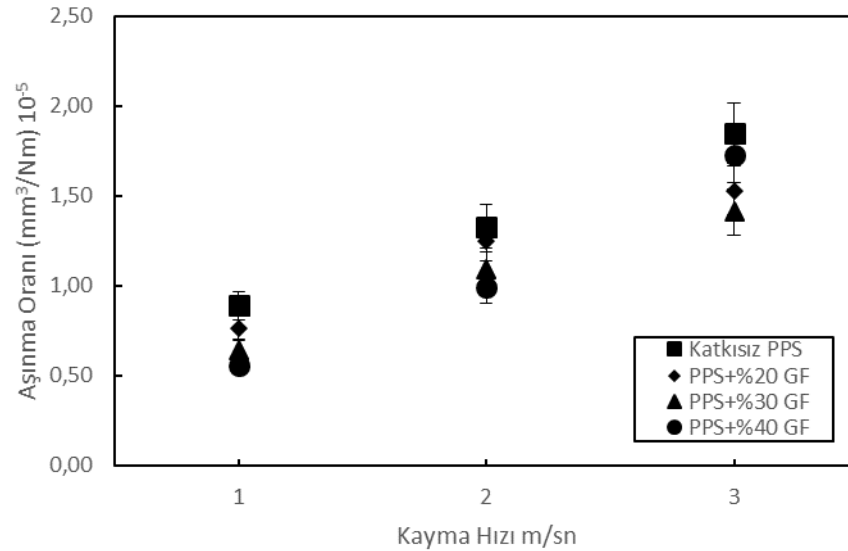
Sürtünme deneylerinde 50 N yük altında kayma hızı arttıkça; PPS polimeri ve cam elyafı PPS kompozitlerinin sürtünme katsayısı önemli oranda artış eğilimi göstermiştir. Karbon fiber katkılı PPS kompozitinde ise sürtünme katsayısının üzerinde kayma hızının etkisi çok belirgin bir faktör olmamıştır ve sürtünme katsayısı kayma hızının artmasıyla azalmıştır.

### **4.3. Aşınma Sonuçları**

Deneysel çalışmalarda PPS polimeri ve cam elyaf katkılı, karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin aşınma oranının yük, kayma hızı ve katkı oranı ile olan ilişkisi görülmektedir.

### 4.3.1. PPS cam elyaf katkılı kompozit

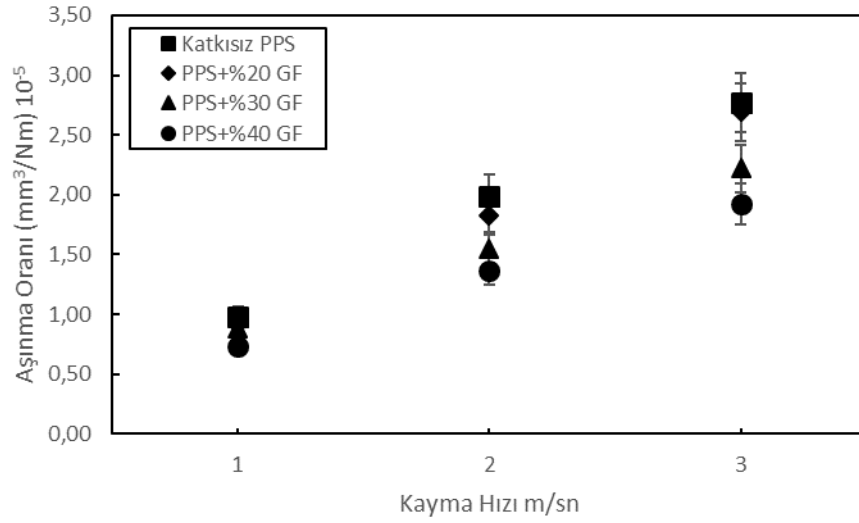
Şekil 4.21.'de katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin 50 N yük altında aşınma oranı ile hız ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.21. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-hız ilişkisi (50 N)

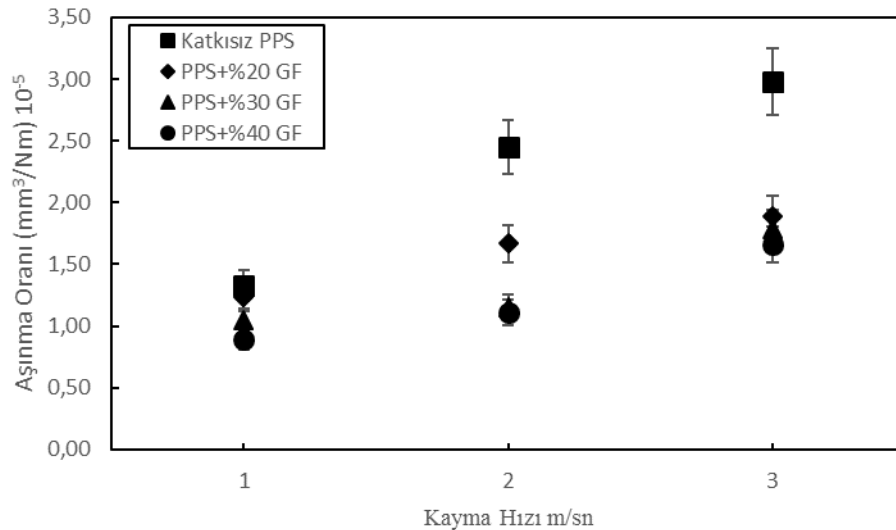
1 m/s kayma hızı altında uygulanan yüke göre en fazla aşınma oranı katkısız PPS polimerinde elde edilirken en az aşınma oranı ise %40 cam elyaf katkılı kompozitte tespit edilmiştir. Genel olarak katkısız PPS polimerinde aşınma oranı  $8.89 \times 10^{-6}$  ile  $1.27 \times 10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/Nm değerleri arasında elde edilmiştir. Uygulanan kayma hızı aralıklarında en yüksek aşınma oranı 3 m/sn kayma hızı altında  $1.27 \times 10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/Nm değerinde, en düşük aşınma oranı ise 1 m/sn kayma hızı altında  $5.56 \times 10^{-6}$  değeri olarak elde edilmiştir. Katkısız PPS polimerinin kayma hızları altında uygulanan yüke göre aşınma oranlarındaki değişim incelendiğinde 3 m/sn kayma hızı altındaki katkısız PPS polimerinin ve cam elyaf katkılarının aşınma oranı 1, 2 m/sn kayma hızları altındaki aşınma hızlarına göre daha yüksek elde edilmiştir.

Şekil 4.22.'de katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin 100 N yük altında aşınma oranı ile hız ilişkisi verilmiştir. Buradaki veriler incelendiğinde en fazla aşınma miktarının katkısız PPS'de olduğu tespit edilmiştir.



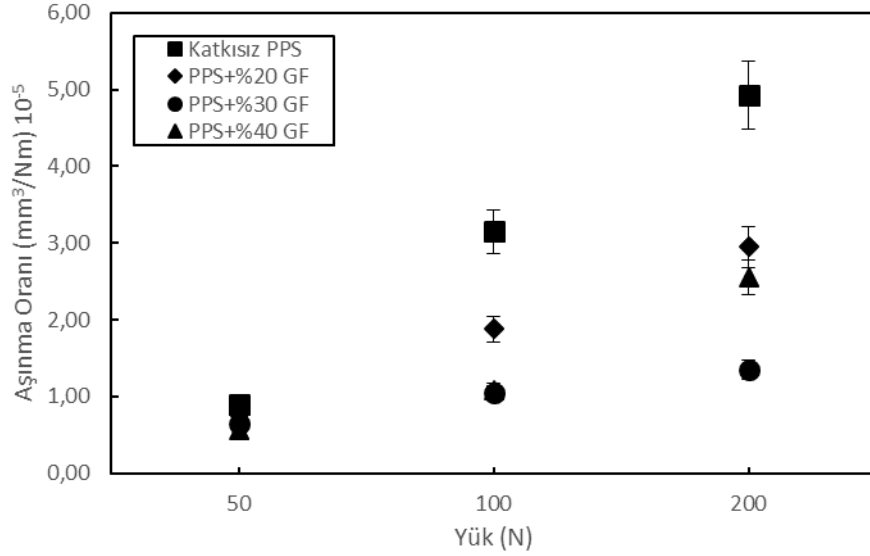
Şekil 4.22. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı–hız ilişkisi (100 N)

Şekil 4.23.'te katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin 200 N yük altında aşınma oranı ile hız ilişkisi verilmiştir. Buradaki değerlere baktığımızda en fazla aşınma miktarının katkısız PPS'de gözlemlendiği tespit edilmiştir. Uygulanan yük arttırıldığında aşınma oranının belirli oranda arttığı görülmüştür. Cam elyafli kompozitler arasında en fazla aşınan %20 cam elyaf katkılı kompozit, en az aşınma oranına sahip %40 cam elyaf katkılı kompozittir.



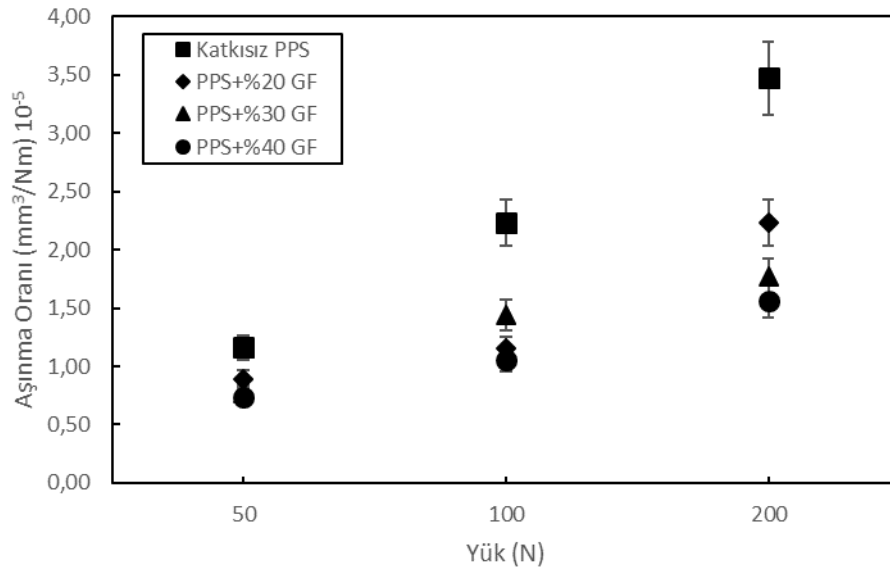
Şekil 4.23. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı–hız ilişkisi (200 N)

Tüm bu yapılan deneylerde kayma hızının artması ile aşınma oranının arttığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar bazı literatür sonuçları ile benzerlikler içermektedir [6,11]. Şekil 4.24.'te katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin 1 m/sn kayma hızı altında aşınma oranı ile yük ilişkisi verilmiştir.



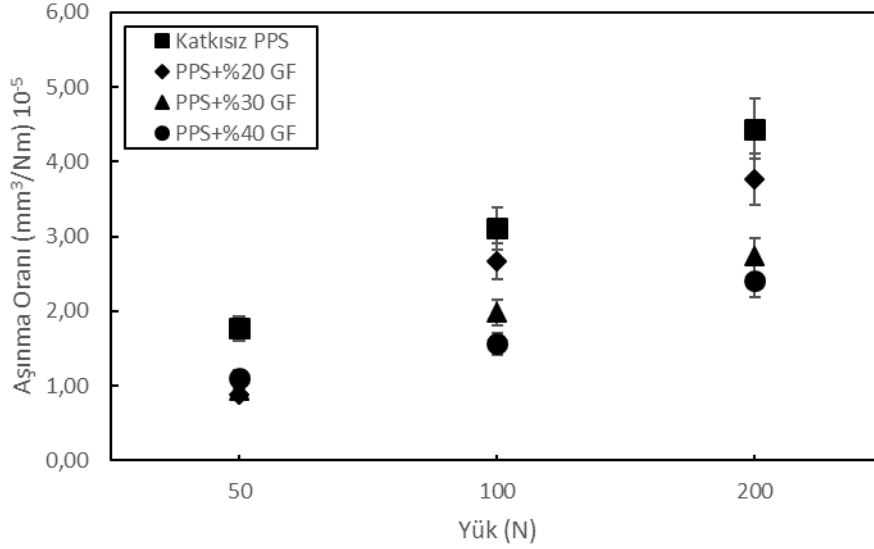
Şekil 4.24. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi (1 m/sn)

Şekil 4.25.'te katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin 2 m/sn kayma hızı altında aşınma oranı ile yük ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.25. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi (2 m/sn)

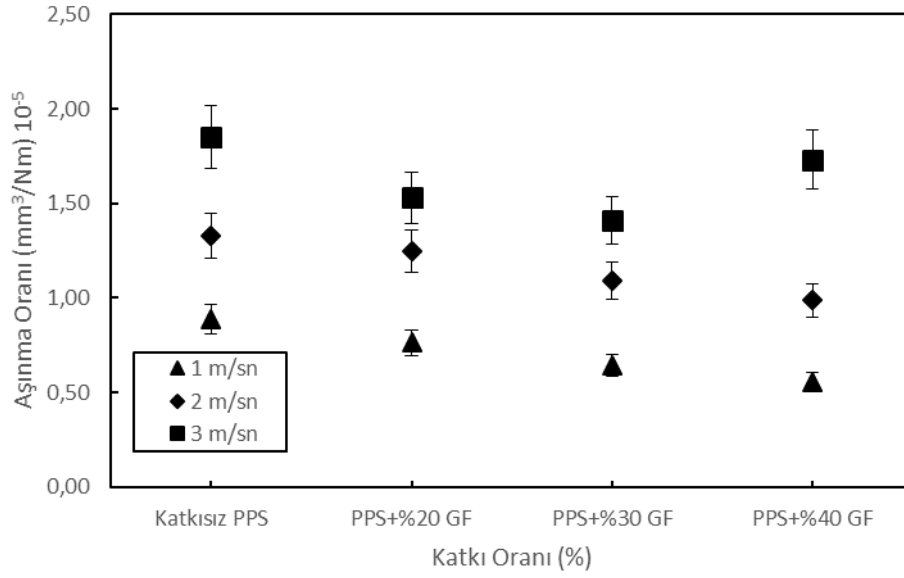
Şekil 4.26.'da katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin 3 m/sn kayma hızı altında aşınma oranı ile yük ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.26. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi (3 m/sn)

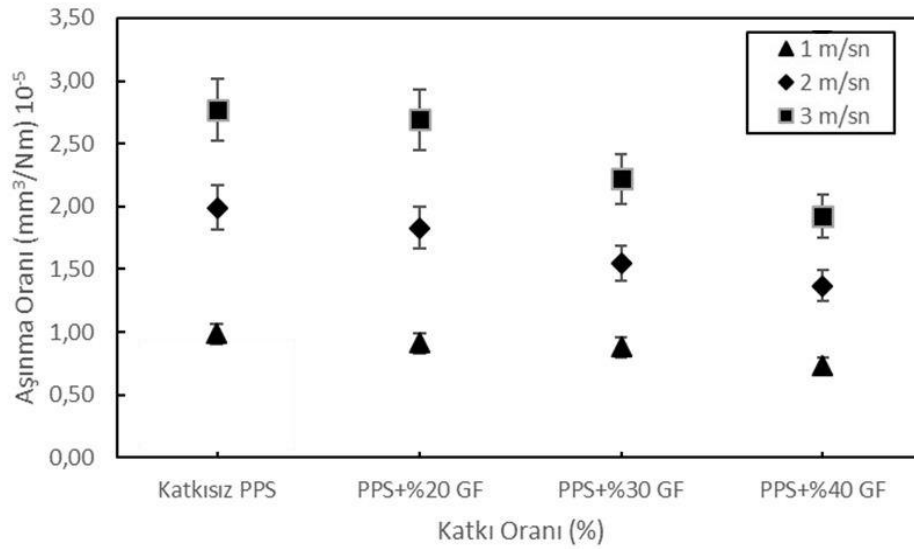
Yukarıdaki tabloları incelediğimizde; yük arttıkça aşınma oranındaki artış eğilimi kayma hızı etkisine göre daha düşük seviyededir. Kayma hızının artmasıyla aşınma oranındaki değişim belirgin bir şekilde göze çarpmaktadır. Cam elyafli kompozitlerde aşınma oranı en yüksek 200 N ve 3 m/sn kayma hızında görülmüştür.

Şekil 4.27.'de katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin 50 N yük altındaki aşınma oranı ile katkı oranı ilişkisi verilmiştir. Katkı oranı arttıkça aşınma oranının azaldığı değerlendirilmektedir. Bunun da sebebi Cam elyaf oranı arttıkça kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ve mukavemetinin artmasıdır.



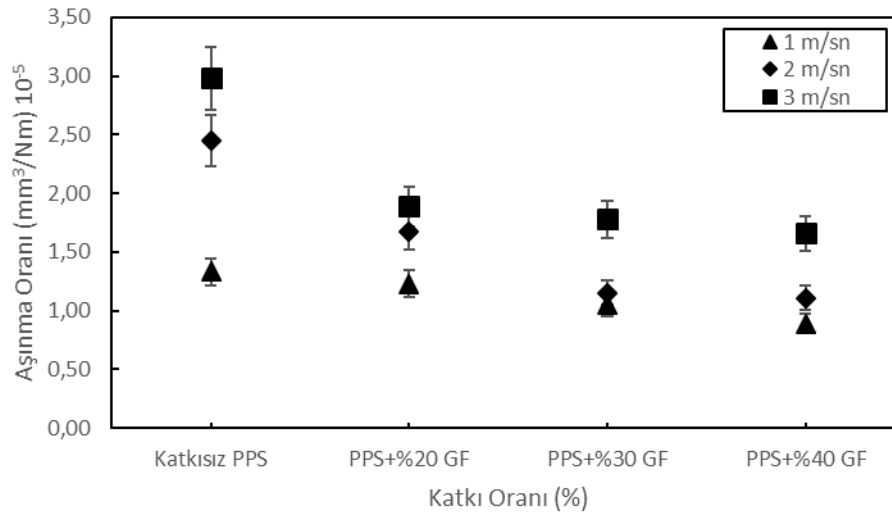
Şekil 4.27. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-katkı oranı ilişkisi (50 N)

Şekil 4.28.'de katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin 100 N yük altındaki aşınma oranı ile katkı oranı ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.28. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-katkı oranı ilişkisi (100 N)

Şekil 4.29.'da katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin 200 N yük altındaki aşınma oranı ile katkı oranı ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.29. Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı–katkı oranı ilişkisi (200 N)

Yük miktarı arttırıldığında aşınma sırasında polimer ana matris içindeki cam elyaf partiküllerinin kopması ile aşınmanın artması tespit edilmiştir. Sonuçlar literatür ile uyum göstermektedir [13,27]. Benzer şekilde en az aşınma oranı ise 50 ve 100 N yük altında %40 cam elyaf katkılı kompozitte gözlenmiştir. Ancak 200 N yük altında en aşınma oranları cam elyaf katkılı kompozitlerde birbirlerine çok yakın seyredilmiştir. Cam elyaf oranı arttıkça kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ve mukavemetinin arttığı tespit edilmiştir.

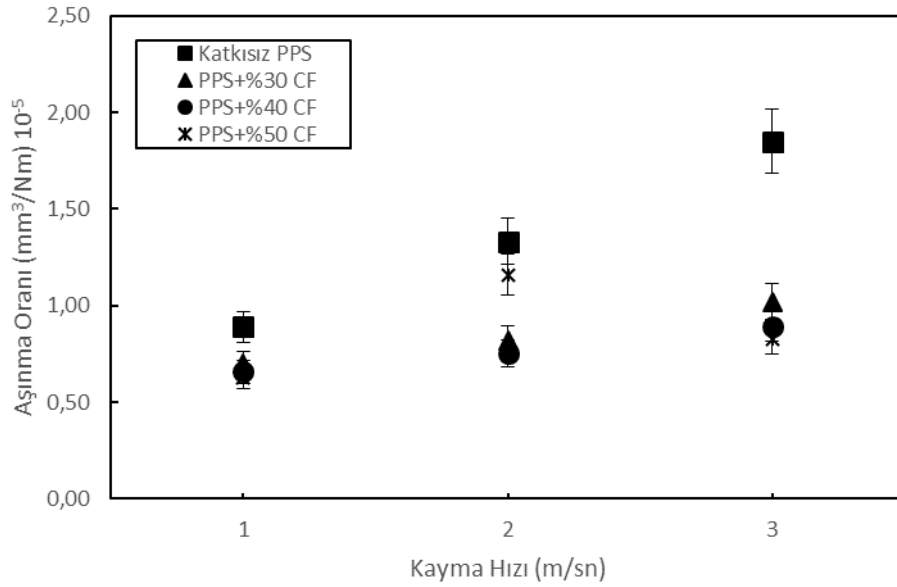
Uygulanan yük aralıklarında, cam elyaf katkılı kompozitlerde en yüksek aşınma oranı 200 N yük altında  $1.03 \times 10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/Nm değeri ile %20 cam elyaf katkılı kompozitinde en düşük aşınma oranı ise 50 N yük altında  $5.56 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm değeri ile PPS %40 cam elyaf katkılı kompozitinde elde edilmiştir. 50 N yük altında, PPS %40 cam elyaf katkılı kompozitin aşınma oranı katkısız PPS polimerine göre %37 daha düşüktür.

Genel olarak, katkısız PPS polimeri için aşınma oranı  $8.89 \times 10^{-6}$  ile  $1.27 \times 10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/Nm değerleri arasında elde edilirken, cam elyaf katkılı kompozitlerinde aynı şekilde aşınma oranı  $5.56 \times 10^{-6}$  ile  $1.03 \times 10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/Nm değerleri arasında elde edilmiştir. 3,0 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında, PPS+%20 cam elyaf katkılı kompozitin aşınma oranı katkısız PPS polimerine göre %19 daha düşüktür.

Uygulanan yükün %200 (50-200 N) artması ile PPS kompozitlerinin her üçünde de aşınma oranlarının artış gösterdiği görülmüştür.

#### 4.3.2. PPS karbon fiber katkıli kompozit

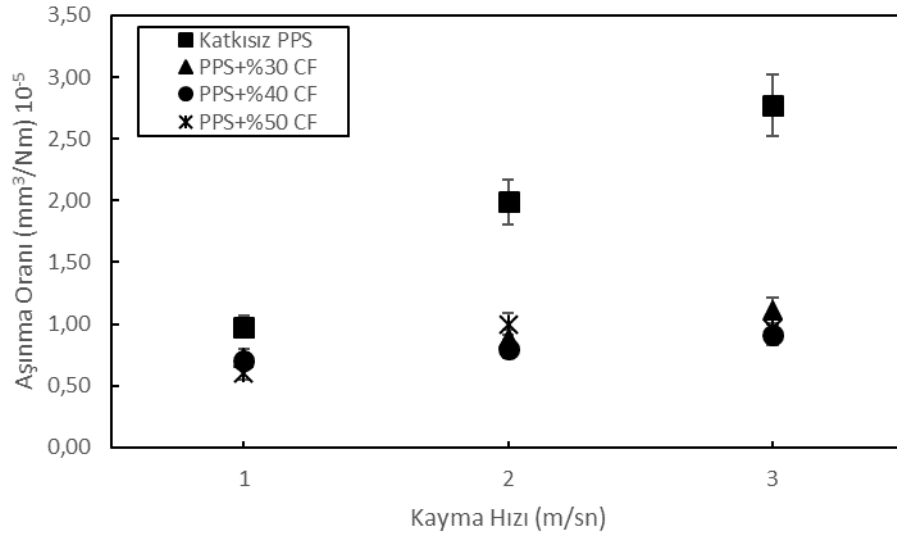
Şekil 4.30.'da katkısız PPS ve karbon fiber katkıli PPS kompozitlerinin 50 N yük altında aşınma oranı ile hız ilişkisi verilmiştir. Kayma hızı arttıkça aşınma oranı artış eğilimi göstermiştir. Buradaki verilerde karbon fiberlerde en fazla aşınan %30 karbon fiber katkıli PPS kompoziti iken 2 m/sn kayma hızında %50 katkıli kompozit en fazla aşınan malzeme olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.30. Katkısız PPS ve karbon fiber katkıli PPS kompozitlerin aşınma oranı-hız ilişkisi (50 N)

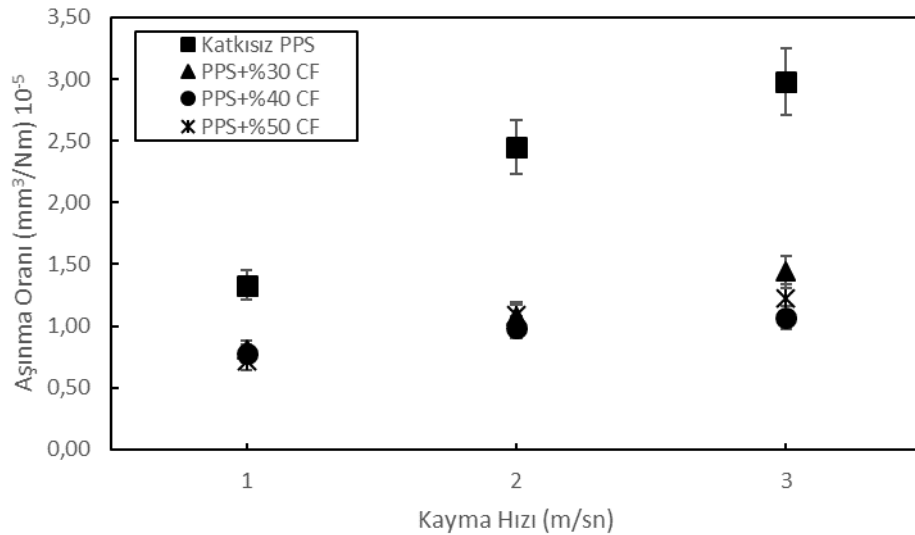
Şekil 4.31.'de katkısız PPS ve karbon fiber katkıli PPS kompozitlerinin 100 N yük altında aşınma oranı ile hız ilişkisi verilmiştir. Buradaki veriler de incelendiğinde yukarıdaki şekil ile paralel bir davranış sergilediği değerlendirilmektedir.





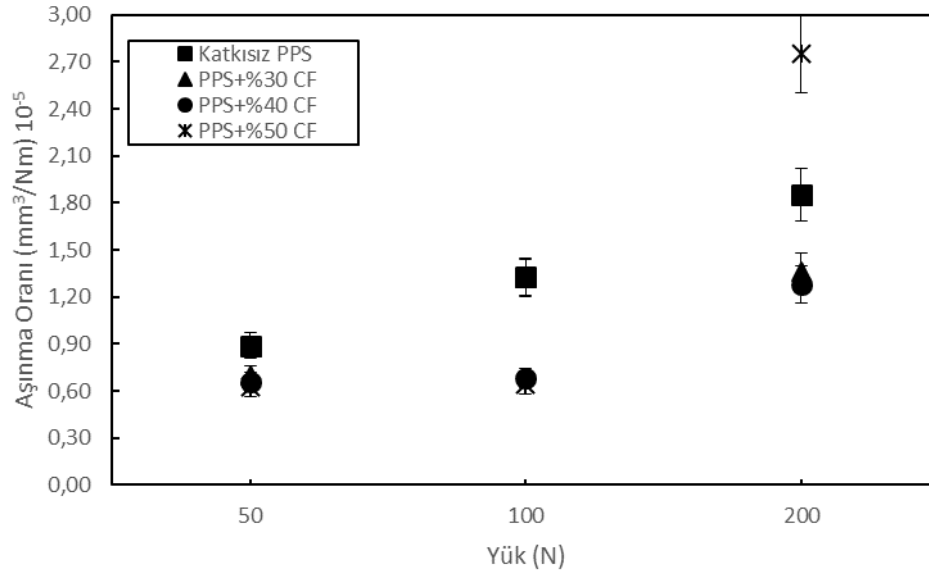
Şekil 4.31. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-hız ilişkisi (100 N)

Şekil 4.32.'de katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin 200 N yük altında aşınma oranı ile hız ilişkisi verilmiştir. Kompozit malzemeler arasında %50 karbon fiber katkılı malzeme diğer malzemelere göre farklı davranış özellikleri sergilemektedir. %50 katkılı malzeme 2 m/sn kayma hızında çok aşınan ve diğer kayma hızlarında ve yüklerinde en az aşınan malzeme olarak tespit edilmiştir.



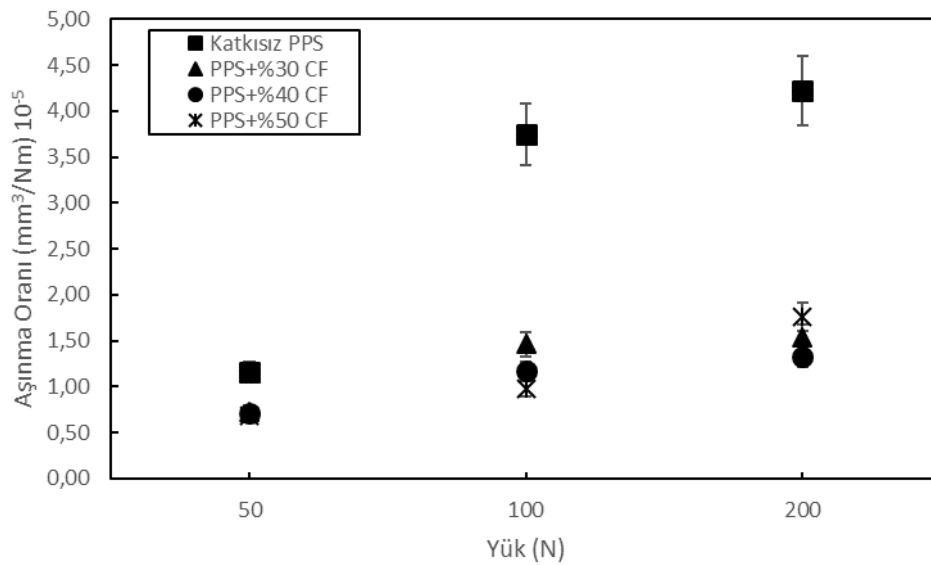
Şekil 4.32. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-hız ilişkisi (200 N)

Şekil 4.33.'te katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin 1 m/sn kayma hızı altında aşınma oranı ile yük ilişkisi verilmiştir. Yükün artması karbon fiber katkılı kompozitlerde çok belirgin davranışlara sebep olmamıştır. Cam elyaf katkılı kompozitlere nazaran daha az belirleyici rol üstlenmiştir.



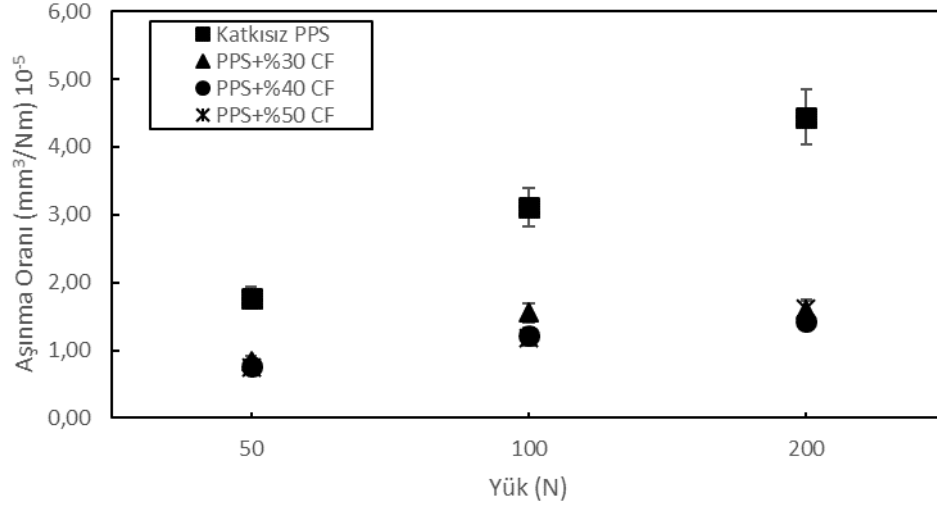
Şekil 4.33. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi (1 m/sn)

Şekil 4.34.'te katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin 2 m/sn kayma hızı altında aşınma oranı ile yük ilişkisi verilmiştir.



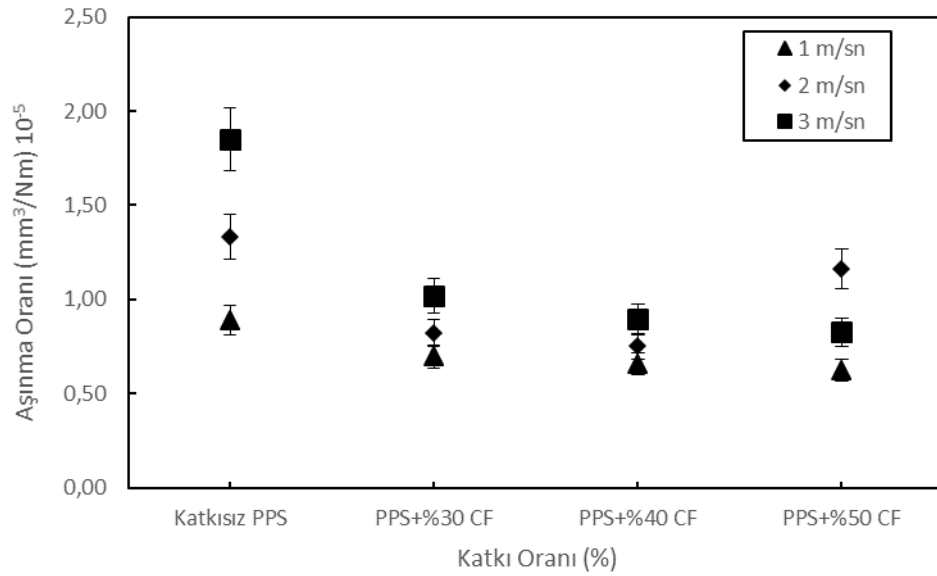
Şekil 4.34. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi (2 m/sn)

Şekil 4.35.'te katkısız PPS ve karbon fiber katkıli PPS kompozitlerinin 3 m/sn kayma hızı altında aşınma oranı ile yük ilişkisi verilmiştir. En az aşınan malzeme olarak %50 karbon fiber katkıli malzeme ortaya çıkmaktadır.



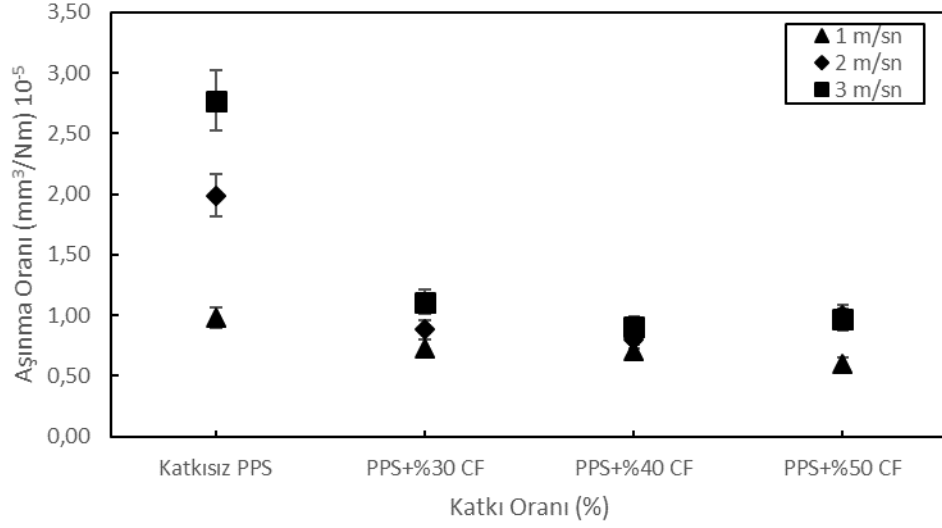
Şekil 4.35. Katkısız PPS ve karbon fiber katkıli PPS kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi (3 m/sn)

Şekil 4.36.'da katkısız PPS ve karbon fiber katkıli PPS kompozitlerinin 50 N yük altında aşınma oranı ile yük ilişkisi verilmiştir. Katkı oranının artması genel anlamda aşınma direncini kırmış olsa da yükün artmasıyla aşınma oranı değerleri birbirine yakın seyretmiştir.



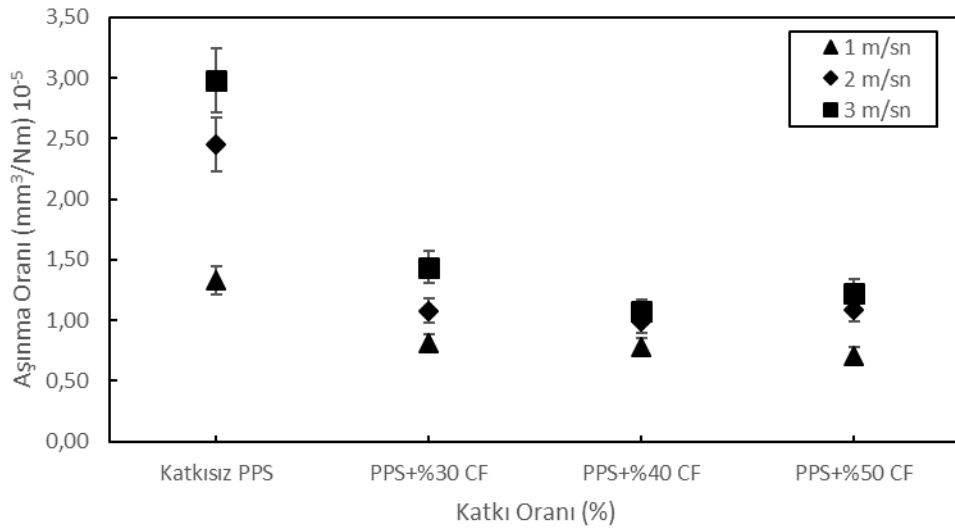
Şekil 4.36. Katkısız PPS ve karbon fiber katkıli PPS kompozitlerin aşınma oranı-katkı oranı ilişkisi (50 N)

Şekil 4.37.'de katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin 100 N yük altında aşınma oranı ile yük ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.37. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı–katkı oranı ilişkisi (100 N)

Şekil 4.38.'de katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin 200 N yük altında aşınma oranı ile yük ilişkisi verilmiştir. En fazla aşınan katkısız PPS polimeri iken en az aşınan %50 karbon fiber katkılı kompozittir.



Şekil 4.38. Katkısız PPS ve karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin aşınma oranı–katkı oranı ilişkisi (200 N)

1 m/s kayma hızı altında uygulanan yüke göre en fazla aşınma oranı katkısız PPS polimerinde elde edilirken en az aşınma oranı ise %50 karbon fiber katkılı kompozitte tespit edilmiştir. Genel olarak katkısız PPS polimerinde aşınma oranı  $8.89 \times 10^{-6}$  ile  $1.27 \times 10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/Nm değerleri arasında elde edilmiştir. Uygulanan kayma hızı aralıklarında en yüksek aşınma oranı 3 m/sn kayma hızı altında  $1.27 \times 10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/Nm değerinde, en düşük aşınma oranı ise 1 m/sn kayma hızı altında  $6.23 \times 10^{-6}$  değeri olarak elde edilmiştir. Karbon fiber katkılı kompozitlerin kayma hızlarına göre aşınma hızlarındaki değişim incelendiğinde farklılıkların görüldüğü tespit edilmiştir. Karbon fiber katkılarının aşınma oranında en yüksek değer 1 ve 3 m/sn kayma hızları altındaki aşınma oranlarında %30 karbon fiber katkılı kompozitte, 2 m/sn kayma hızı altındaki aşınma oranında %50 karbon fiber katkılı kompozitte elde edilmiştir.

Burada en az aşınma oranı ise 50 ve 100 N yük altında %50 karbon fiber katkılı kompozitte gözlemlenmiştir. Ancak 200 N yük altında en düşük aşınma oranı %40 karbon fiber katkılı kompozitte görülürken, en yüksek aşınma oranı %50 karbon fiber katkılı kompozitte tespit edilmiştir.

Uygulanan yük aralıklarında, karbon fiber katkılı kompozitlerde en yüksek aşınma oranı 200 N yük altında  $2.75 \times 10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/Nm değeri ile %50 karbon fiber katkılı kompozitinde en düşük aşınma oranı ise 50 N yük altında  $8.25 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm değeri ile %50 karbon fiber katkılı PPS kompozitte elde edilmiştir. 50 N yük altında, %50 karbon fiber katkılı PPS kompozitin aşınma oranı katkısız PPS polimerine göre %19 daha düşüktür.

Genel olarak, katkısız PPS polimeri için aşınma oranı  $8.89 \times 10^{-6}$  ile  $1.27 \times 10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/Nm değerleri arasında elde edilirken, karbon fiber katkılı kompozitlerinde aynı şekilde aşınma oranı  $8.21 \times 10^{-6}$  ile  $2.75 \times 10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/Nm değerleri arasında elde edilmiştir. 3 m/s kayma hızı ve 200 N yük altında, PPS+%30 karbon fiber katkılı kompozitin aşınma oranı katkısız PPS polimerine göre %16 daha düşüktür. Uygulanan yükün %200 (50-200 N) artması ile karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin aşınma oranlarında farklı davranışlar sergilediği görülmüştür.

Uygulanan yükün artması ile birlikte aşınma oranının çok fazla artmadığı yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir. Uygulanan yüke bağlı olarak aşınma oranındaki azalma ve artma yönündeki değişimlerin karşı diskte oluşan film tabakası ve bu film tabakasının kalınlığı ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Oluşan film tabakası, polimer ve karşı disk yüzey arasında yağlayıcı görevi görerek iki malzemenin sürtünmesini ve dolayısıyla aşınma miktarını etkilemiş olabileceği düşünülmektedir.

Düşük yüklerde ve düşük hızlardaki aşınma yüzeylerinde belirgin bir adhezif aşınma türü görülmezken, yükün ve hızın artması ile diskin ve polimer yüzeylerinin sıcaklıklarının artması ile plastik deformasyon oluştuğu görülmektedir. Ancak katkı maddelerinin oranının artması plastik deformasyon oluşumunu azaltmaktadır.

Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin aşınma oranı uygulanan yükün artması ile çok fazla miktarda artarken, karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin aşınma oranında ise belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir. Kayma hızının artması ile cam elyaf malzemeler için önemli bir oranda artış görülürken karbon fiberli kompozitlerde artış eğilimi çok düşük seviyede tespit edilmiştir.

Öncelikle katkısız PPS malzemesinin aşınmasını incelediğimizde aşınma oranı uygulanan yük 50 N'dan 100 N'a çıktığında %120 oranında ve 50 N'dan 200 N'a çıktığında %177 oranında artmıştır. Cam elyaf katkılı PPS kompozitinin aşınması katkısız PPS polimerine göre %50 daha azdır. Cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinden en çok aşınmaya maruz kalan kompozit 3 m/sn ve 200 N yük altındaki %20 cam elyaf katkılı kompozittir. Cam elyaf katkılı kompozitlerin yükü %100 arttırıldığında aşınma oranı %102 artarken, yük %300 arttırıldığında aşınma oranı %152 artmaktadır.

Karbon katkılı PPS numuneleri cam elyafli kompozitlere göre daha az aşınmaya maruz kalmaktadır. %50 karbon katkılı PPS malzemelerinin 3 m/sn 200 N yük altında uzun süre çalışması uygun görülmemektedir. Kayma hızı arttıkça aşınma oranının çok fazla artmadığı ancak aşınma oranı artışının %10-15 arasında olduğu

gözlemlenmiştir. Bu yüzden karbon katkılı PPS numunelerin aşınmasında kayma hızının etkisinin çok fazla olmadığı gözlemlenmiştir.

Katkısız PPS malzemesinin aşınmasını incelediğimizde aşınma oranı, uygulanan yük 50 N'dan 100 N'a çıktığında %120 oranında ve 50 N'dan 200 N'a çıktığında %177 oranında artmıştır. Karbon fiber katkılı PPS kompozitinin aşınması katkısız PPS polimerine göre %65 daha azdır. Karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinden en çok aşınmaya maruz kalan kompozit 1 m/sn ve 200 N yük altındaki %30 karbon fiber katkılı kompozittir. Karbon fiber katkılı kompozitlerin yükü %100 arttırıldığında aşınma oranı %89 artarken, yük %300 arttırıldığında aşınma oranı %97 artmaktadır.

Katkısız PPS ve kompozitlerinin adheziv, abrazif ve deformasyona maruz kaldığı görülmüştür. Bunun nedeni ise malzemelerin bünyesinde bulunan cam elyaf ve karbon fiber katkılarının uygulanan yük ve hıza bağlı olarak bünyeden ayrılarak oluşan ısı ile karşı disk üzerinde film tabakası oluşturmasıdır.

Cam elyaflar aşınma esnasında yüzey ısını arttırmaktadır. Cam elyaflar aşınma esnasında yüzey sıcaklığının artmasına ve yüzeyin yumuşamasına sebep olmaktadır. Artan yüzey sıcaklığında ve yüzeyin yumuşadığı durumda matristen ayrılmaktadır ve aşınmayı arttırmaktadır.

Katkısız PPS ve cam elyaf katkılı kompozitler 50 N ve 200 N yükler aralığında ve 1-3 m/sn kayma hızları arasında başarı ile çalışabilmiştir.

%40 ve %50 karbon fiber katkılı PPS kompozitleri 1 m/sn ve 2 m/sn kayma hızlarında 50-100 N yük altında çalışabilmiştir. Ancak 3 m/sn kayma hızlarında ve 200 N yük altında kompozit malzemelerde meydana gelen deformasyon dolayısıyla uzun süre çalışamamıştır.

Uygulanan yükün %300 oranında arttırılmasıyla katkısız PPS, %20, %30 ve %40 cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin aşınma oranında artış tespit edilirken, %30,

%40 ve %50 karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin aşınma oranında önemli düzeyde bir değişim tespit edilememiştir.

#### 4.4. PPS Polimerinin ve Çelik Diskin Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

Kompozit malzemeler onları daha klasik mühendislik malzemelerinden farklı kılacak birçok karakteristik özelliğe sahiptir. Kompozit malzemelerde kullanılan elyafların fiziksel biçimleri, oluşturulan yeni malzemenin özellikleri üzerinde çok önemli bir faktördür. Takviyeler temel olarak 3 farklı biçimde bulunmaktadır; parçacıklar, süreksiz ve sürekli elyaflar. Parçacık genelde küresel bir biçimde olmamasına rağmen her yönde yaklaşık olarak eşit boyutlardadır. Süreksiz elyaflar (doğranmış elyaflar, öğütülmüş elyaflar veya whiskers) birkaç milimetreden birkaç santimetreye kadar değişen ölçülerde olabilmektedir. Sürekli elyaflar ise tel sarma yöntemi gibi yöntemlerde kesilmeden ip şeklinde kullanılmaktadır. Elyaflar en yüksek mekanik özelliklerini enlerinden daha çok boylarına gösterirler. Bu özellikler kompozit malzemelerin metallere rastlanmayan aşırı anizotropik malzeme özelliği göstermelerine neden olur. Bu nedenle deney aşamasında elyafların polimer içindeki yerleşimleri ve geometrilerini göz önünde bulundurmamak çok önemlidir. Malzemenin anizotropik özelliği tasarım aşamasında ürünün uygun yerinde kullanılarak avantaja dönüşebilir [75].

Çoğu yaygın mühendislik malzemeleri homojen ve izotropiktir. Yapılar ile sıcaklık bağımlı izotropik malzeme özellikleri, bir sıcaklık değişimine maruz bırakıldığında homojen değildir. Fakat hala izotropiktir. Kompozit malzemeler sık sık hem heterojendir hem de anizotropiktir. Karbon elyaflarının takviye elemanı olarak kullanılması grafit kristalinin karakteristik özelliğinden dolayıdır. Karbon grafit kristali altıgen hegzagonal katlı bir yapıda olup, her köşedeki karbon atomları birbirlerine kovalent bağlarla bağlanmıştır. Katlar ise birbirlerine Vander Waals bağlarıyla bağlanmıştır. Grafit kristali anizotropik yapıya sahiptir [75].

Bazı kompozit malzemeler çok basit örneğin, yaprak şekilli cam elyaflı yapı, üç tabakaya sahiptir ve bunların her biri homojen ve izotropiktir. Cam elyaflarının diğer

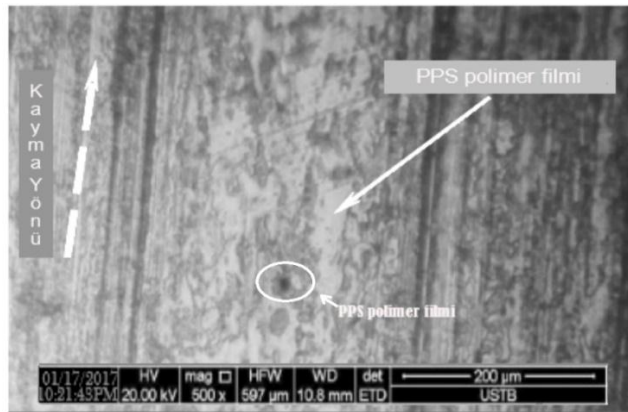


takviye liflerinden farklı olarak izotropik yapıya sahiptirler. Çünkü camın yapısında üç boyutlu network bir yapı bulunur. Cam elyafları birbirlerine sürtünme ile zarar verebilirler. Cam liflerini bu hasardan koruyabilmek için üzerlerini haşıl tipi bir maddeyle kaplamak gerekir.

Elyaf takviyeli kompozitlerde genelde elyaf yönlendiği için elde edilen yeni malzeme anizotropiktir. Sürekli elyaflar yönlendirme özelliklerinden dolayı diğer takviye elemanlarına göre daha üstün özelliklere sahiptirler. Tek yönde çekme zorlanmasına maruz kalan bölgelerde yönlendirilmiş uzun elyaflar nedeniyle maksimum dayanım özellikleri sergilenir. Ancak elyaf eksenine dik doğrultuda düşük özellikler elde edilir. Çünkü elyaf eksenine dik doğrultuda çekme zorlanmasına karşı direnç gösteren ve yükü taşıyan matris malzemesidir. Bu sorunu gidermek için hem elyaf eksenine dik hem de elyaf eksenine paralel doğrultuda kuvvet uygulandığında mekanik özellikleri iyileştirmek için ise değişik açılarda takviyelendirme yapılmak suretiyle bu doğrultularda daha yüksek özelliklerin elde edilmesi mümkün olabilmektedir [75].

Tüm polimer ve kompozit malzemelerin deneyler sonucunda taramalı elektron mikroskopunda (SEM) çekilen aşınma yüzey görüntülerinde elyafların yönü, boyu ve uğramış olduğu deformasyonlar görülmektedir.

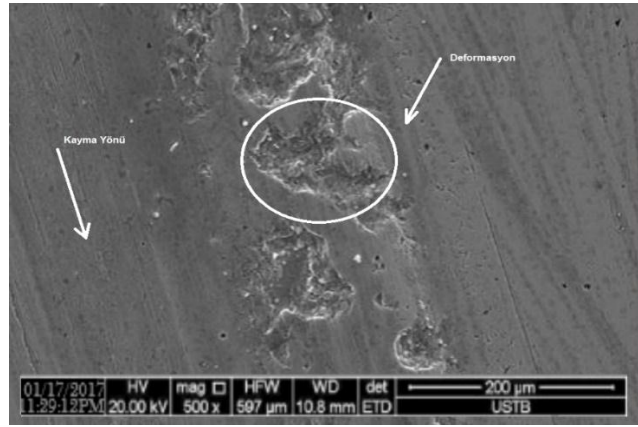
Şekil 4.39.'da çelik disk malzemesinin 100 N yük ve 1 m/s kayma hızında taramalı elektron mikroskopunda çekilen aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir.



Şekil 4.39. Çelik disk üzerindeki aşınmanın SEM görüntüsü (500X)

Şekil 4.39. incelendiğinde katkısız PPS polimerin aşınma deney sonucunda çelik disk malzemesi üzerindeki transfer film tabakası tespit edilmiştir. Aşınmış polimer parçacıklarının disk üzerinde en fazla bir araya toplanmış olduğu malzeme katkısız PPS polimeridir. Çelik yüzeyinin pürüzlü olması durumu ise katkısız PPS'nin sürtünme katsayısını belirgin bir şekilde artırırken, PPS içindeki cam elyaf katkısı artırıldığı zaman ise sürtünme katsayısı yağlayıcılık özelliğinden dolayı azalmaktadır.

Şekil 4.40.'da katkısız PPS polimerinin 100 N yükte ve 1 m/s kayma hızı altında gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınmış pim numunesinin taramalı elektron mikroskobunda aşınma yüzeyi görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.40. Katkısız PPS polimer aşınmasının SEM görüntüsü (500X)

Katkısız PPS polimeri en fazla aşınma oranına sahip polimerdir. Bu durum Şekil 4.40.'da görüldüğü gibi malzeme yüzeyinde oluşan mikro kazıma izlerinin diğer kompozit malzemelere göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. SEM resimleri incelendiğinde derin çiziklerin yanı sıra matrisin tam olarak nüfuz edememesi sonucu bazı bölgelerde kısmi dökülmelerin gerçekleştiği görülmüştür. Katkısız PPS polimerinin aşınma sırasında çelik disk üzerinde oluşturduğu film tabakasının düşük oranda olmasından dolayı, daha yüksek aşınma oranı meydana gelmiştir.

Deneyde kullanılan malzemelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde katkısız PPS polimerinde aşınma sırasında yük ve hızın artması ile disk sıcaklığı artmıştır. Böylece sıcaklıktan etkilenen polifenilen sülfidin yumuşaması ile temas yüzeyinden kopan partiküllerin tekrar polifenilen sülfidin

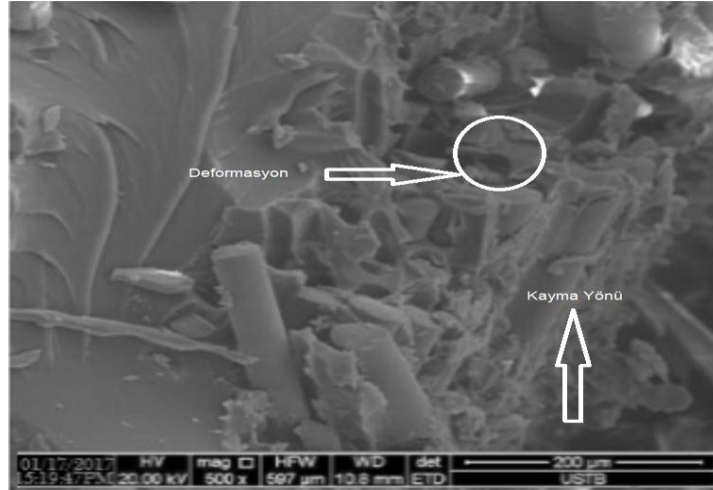
kendi yüzeyine yapıştığı, bu yapışmadan dolayı sürtünme katsayısının arttığı görülmektedir.

Düşük yüklerde ve düşük hızlardaki aşınma yüzeylerinde belirgin bir adhezif aşınma türü görülmezken, yükün ve hızın artması ile diskin ve polimer yüzeylerinin sıcaklıklarının artması ile plastik deformasyon oluştuğu görülmektedir.

PPS ve değişik oranlarda cam elyaf/karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin sürtünme katsayısı uygulanan yükün ve kayma hızının artması ile artmıştır. Bunun sebebi ise uygulanan yükün artması ile çelik disk ve polimer numuneler arasındaki sürtünme sonucunda sıcaklık artmaktadır. Bu sıcaklık ölçümü Şekil 3.6.'da görüldüğü üzere yaklaşık 50-70°C civarındadır. Bu sıcaklık aralığında özellikle katkısız PPS polimer malzemesi yumuşamakta ve daha fazla aşınmaktadır. Aşınan partiküller yine çelik diskin üzerine yapışarak çelik diskin yüzeyini pürüzlü hale getirmektedir. Çelik diskin yüzeyinin pürüzlü hale gelmesi bu mikro yapı fotoğrafı ile ispatlanmıştır. Çelik yüzeyinin pürüzlü olması durumu ise katkısız PPS'nin sürtünme katsayısını belirgin bir şekilde artırırken, PPS içindeki cam elyaf/karbon fiber katkıları artırıldığı zaman ise sürtünme katsayısı yağlayıcılık özelliğinden dolayı azalmaktadır.

#### **4.5. PPS Kompozitlerinin Aşınma Yüzeylerinin incelenmesi**

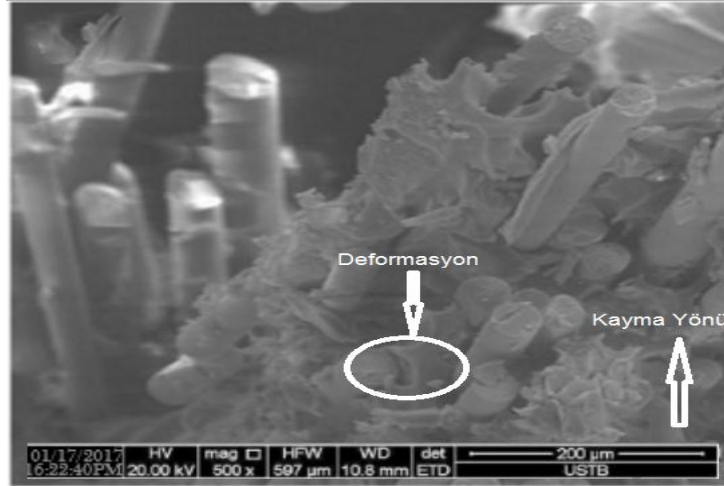
Şekil 4.41.'de %20 cam elyaf katkılı PPS kompozit malzemesinin 100 N yükte ve 1 m/s kayma hızında taramalı elektron mikroskobunda pim aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir.



Şekil 4.41. %20 Cam elyafı PPS kompozit aşınmasının SEM görüntüsü (500X)

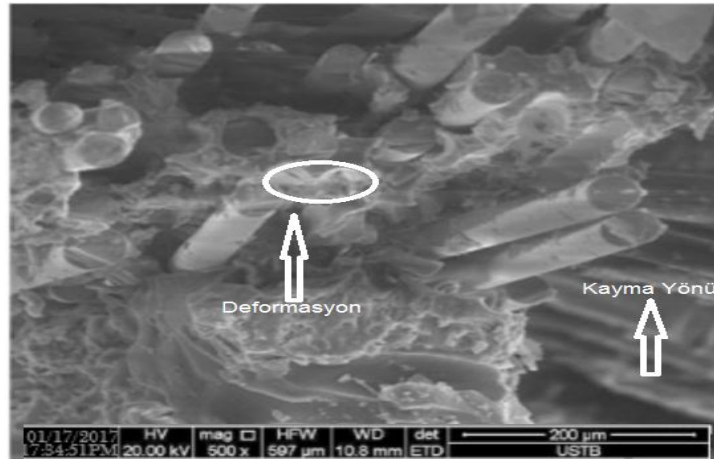
Şekil 4.41.'de %20 cam elyaf katkılı PPS kompozit numunelerin 100 N yükte ve 1 m/s kayma hızında taramalı elektron mikroskopta pim aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir. Çelik disk malzemesi yüzeyinde en fazla transfer film tabakasının bulunduğu SEM görüntüsü Şekil 4.41.'de tespit edilmiştir. Bunun sebebi deneyin yapılış sırasında disk malzeme ısısının artması sonucunda polimer malzemesi erimesi ile disk malzeme yüzeyinde film tabakası oluşumuna neden olmuştur. Disk yüzeyinde fazla derin ve geniş olmayan transfer film tabakası sürtünme katsayısının düşük seviyede olmasından kaynaklanmakta ve bu da Şekil 4.1.'de sürtünme katsayısının dalgalanmalı şekilde artış gösterdiği görülmektedir. Disk yüzeyinde aşınma sırasında malzemeden kopan parçacıklar olduğu görülmüştür. Transfer film tabakası düzenli olmayıp, yer yer çizgiler halinde olduğu görülmektedir. Bu özelliğinden dolayı %40 cam elyaf katkılı PPS kompozit malzemesinin aşınma oranının diğerlerine göre daha düşük miktarda olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.42.'de %30 cam elyaf katkılı PPS kompozit malzemesinin 100 N yükte ve 1 m/s kayma hızında taramalı elektron mikroskobunda pim aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir.



Şekil 4.42. %30 Cam elyafı PPS kompozit aşınmasının SEM görüntüsü (500X)

Şekil 4.43.'de %40 cam elyaf katkı PPS kompozit malzemesinin 100 N yükte ve 1 m/s kayma hızında taramalı elektron mikroskobunda pim aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir.



Şekil 4.43. %40 Cam elyafı PPS kompozit aşınmasının SEM görüntüsü (500X)

Şekil 4.43.'e bakıldığında %40 cam elyaf katkı malzemesinin polimer içerisindeki oranının artması sonucunda pim malzeme yüzeyinde çizgi derinliklerinin ve boyutlarının azaldığı görülmüştür. En az aşınma çizgisine sahip olan %40 cam elyaf katkı PPS kompozit malzemesidir.

Cam elyaf katkı PPS kompozitleri yük ve kayma etkisiyle yüzey sıcaklığındaki artış, yüzeyde cam elyafın varlığı nedeniyle daha düşük olmuştur. Aşınmanın erken

evresinde, yüzey sıcaklığının ( $50^{\circ}\text{C}$ 'nin altında) düşük olduğu durumda, çok hafif dalgalar şeklinde, kayma yönünde eğrisel plastik deformasyon izleri görülmektedir.

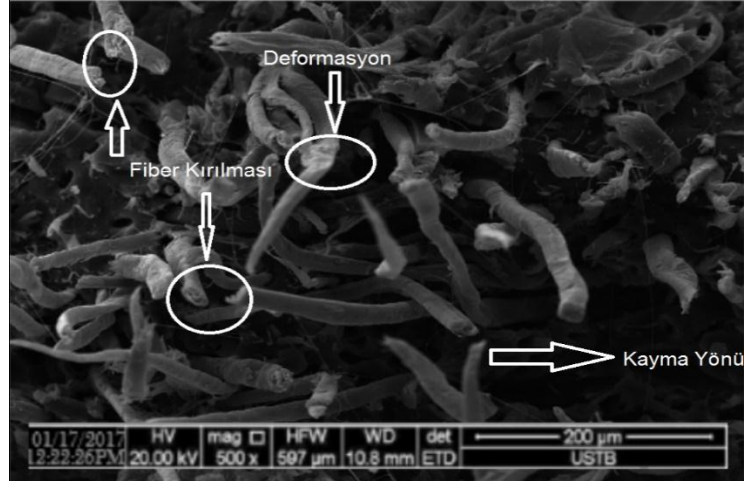
Şekillerde verilen SEM görüntüleri aşınma yüzeyi boyunca malzemelerin plastik deformasyona uğradığını göstermektedir. Malzeme yüzeyinde birbiri üzerine binmiş tabakaların bulunması yoğun plastik deformasyon ve malzeme kaybının meydana geldiğini gösterir.

Cam elyaf mukavemet artırıcı katkıları, kompozitin sertliğini artırmakta ve alt ve üst yüzeyler birbirlerine temas ederek polimer ana matrisin aşınmasını azaltmaktadır.

Kayma süresinin artmasıyla, sürtünmenin etkisiyle yüzey sıcaklığı artmaktadır ( $60^{\circ}\text{C}$  civarı). Bunların etkisiyle yüzeydeki yumuşama (sertlik değerindeki azalma) neticesinde, plastik deformasyon izleri daha belirgin hale gelmiştir. Kenar aşınmasının kayma süresiyle orantılı olarak geliştiği görülmektedir.

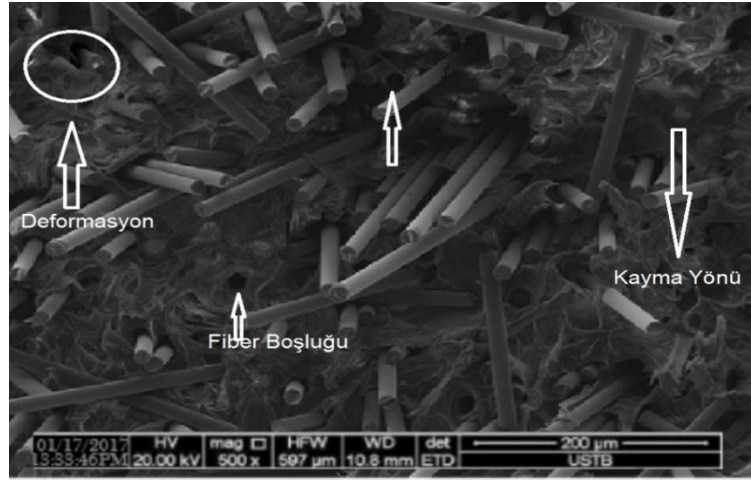
Düşük yüklerde ve düşük hızlardaki aşınma yüzeylerinde belirgin bir abrasif veya adhezif aşınma türü net bir biçimde görülmezken, yükün ve hızın artması ile diskin ve polimer yüzeylerinin sıcaklıklarının artması ile plastik deformasyon olduğu görülmektedir. Ancak cam elyaf oranının artması plastik deformasyon oluşumunu azaltmaktadır.

Şekil 4.44.'de %30 karbon fiber katkıli PPS kompozit malzemesinin 100 N yükte ve 1 m/s kayma hızında taramalı elektron mikroskopunda pim aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir.



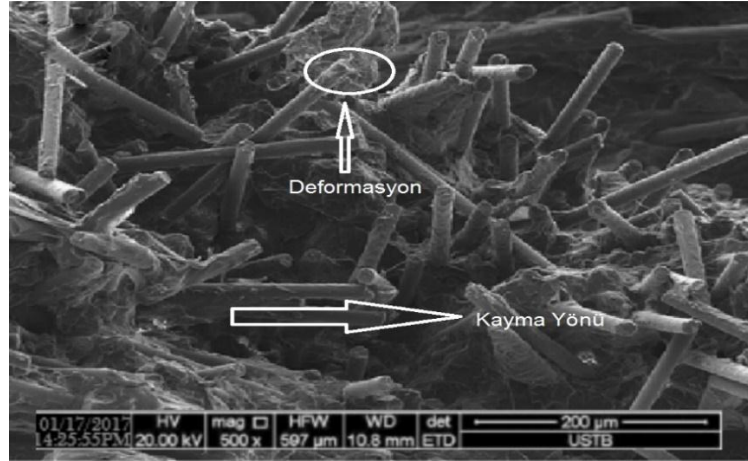
Şekil 4.44. %30 Karbon fiberli PPS kompozit aşınmasının SEM görüntüsü (500X)

Şekil 4.45.'te %40 karbon fiber katkılı PPS kompozit malzemesinin 100 N yükte ve 1 m/s kayma hızında taramalı elektron mikroskopunda pim aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir.



Şekil 4.45. %40 Karbon fiberli PPS kompozit aşınmasının SEM görüntüsü (500X)

Şekil 4.46.'de %50 karbon fiber katkılı PPS kompozit malzemesinin 100 N yükte ve 1 m/s kayma hızında taramalı elektron mikroskopunda pim aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir.



Şekil 4.46. %50 Karbon fiberli PPS kompozit aşınmasının SEM görüntüsü (500X)

Şekil 4.34.'e bakıldığında karbon fiber katkı malzemesinin polimer içerisindeki oranının artması sonucunda pim malzeme yüzeyinde çizgi çatlakların ve boyutlarının arttığı görülmüştür.

En fazla aşınma kaybına sahip olan %40 karbon fiber katkılı PPS kompozit malzemesidir. Bunun sebebi deneyin yapılış sırasında disk malzeme ısısının çok fazla artmaması sonucunda polimer malzeme yeterli düzeyde eriyememiş ve film tabakası oluşmamıştır. Karbon fiberde aşınma sırasında kopan parçacıklar olduğu görülmüştür. Transfer film tabakası düzenli olmayıp, yer yer çizgiler halinde olduğu Şekil 4.11.'de görülen eğrilerle de ilişkilendirilebilir. Bu arada karbon fiber yüzdesi arttıkça disk üzerinde daha az erimektedir. %50 karbon fiber katkılı PPS malzemesinin aşınma oranının diğerlerine göre daha düşük miktarda olduğu belirlenmiştir.

Aşınmanın başlangıç kısmında, yüzey sıcaklığının (60°C civarı) olduğu durumda, süreksiz çok hafif plastik deformasyon dalgaları ve fiber kırılmaları görülmektedir. Plastik deformasyon izleri kayma yönünde dairesel, kılcal çatlaklar kayma yönüne dik ve bir kısmı da kenara yönelmiş durumdadır. Yumuşayan ve plastik deformasyona uğrayan yüzey tabakası, daha az olmakla beraber karşı malzemenin sıkıştırması ile kenara doğru sürüklenmektedir.



Kayma süresinin artmasıyla, sürtünmenin etkisiyle yüzey sıcaklığı artmaktadır (yaklaşık 70°C). Bunların etkisiyle yüzeydeki yumuşama neticesinde, çatlaklar daha belirgin hale gelmiştir. Şekil 4.46.'de yüzeydeki bozunum, yırtılmalar ve kısmi ergimelerin hem boyut hem de miktar olarak arttığı açıkça görülmektedir.

Karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinde oluşan aşınma mekanizması PPS'den farklıdır. Yüzeydeki gerilimlerden kaynaklanan aşınma izleri oluşmuştur. Fiber kaymaya karşı direnç göstermektedir.

Literatürde bazı araştırmacıların [9,12] yapmış olduğu çalışmada da yükün artması ile birlikte aşınmanın arttığı, aynı malzemeye grafit ilavesi ile de aşınmanın azaldığını gözlemlemişlerdir.

Özellikle kaymaya dik doğrultuda çatlaklar uzamış ve yoğunlaşmıştır. Bazı bölgelerde bu dikey ve yatay çatlaklar aşınma partikülüne dönüşmektedir.

Ayrıca ilerleyen aşınma sürecinde fiberler daha net seçilmektedir. Aşınmanın erken evresinde, yüzey sıcaklığının yaklaşık 45°C olduğu durumda, plastik deformasyon izi belirsizdir ve beyaz kılcak çatlak izlerinin baskın olduğu görülmektedir. Bu izlerin kayma yönünde, kayma yönüne dik ve bir kısmı da kenara yönelmiş durumdadır.

Kayma süresinin artmasıyla, sürtünmenin etkisiyle yüzey sıcaklığı artmaktadır (70°C üzerinde). Bunun neticesinde matriste kısmen ergime bölgeleri görülmektedir. Yüzeyde görülen dikey kılcak çatlaklar belirgin hale gelmiştir. Kayma doğrultusundaki izler fiberleri işaret etmektedir. Şekil 4.41.'de fiberlerin matristen ayrıldığı ve kırıldığı seçilmektedir. Bazı bölgelerde bu dikey ve yatay çatlaklar aşınma partikülüne dönüşmektedir. Ayrıca fiberlerin matristen ayrıldığı, kırıldığı ve yapı içinde sürüklendiği açık biçimde görülmektedir.

Özellikle şekil 4.42. ve 4.43.'deki görüntüler incelendiğinde PPS matrisinin belli bölgelerinde, uygulanan yük sonucu kopmadan önce liflerin matristen ayrıldığı ve bu sırada plastik deformasyon oluştuğu görülmektedir.

Bunun yanı sıra SEM görüntülerinde matristen ayrılan liflerin etrafında siyah halkalar olduğu göze çarpmaktadır. Bu siyah halkalar elyaf matristen ayrılırken elyaf çevresini saran matrisin lokal deformasyona uğramasından dolayı oluşmaktadır ve karbon elyaf ile matris arasındaki bu boşlukta bir farklılık gözlenmemiştir.

## **BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

### **5.1. Giriş**

Bölümün en son kısmında yapılan deneysel çalışmalar ışığında elde edilen sonuçlar ve yapılması gereken çalışmalar kısmı ele alınmıştır. Ayrıca bu bölümde deneyler sonucunda elde edilen somut sonuçlar belirtilmiş ve öneriler ortaya konulmuştur.

### **5.2. Sonuçlar**

Yapılan aşınma ve sürtünme deneyleri sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1. Uygulanan yükün 50 N dan 200 N'a çıkarılması sonucunda katkısız Polifenilen Sülfid (PPS) polimeri ile %20 cam elyaf, %30 cam elyaf ve %40 cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin, %30 karbon fiber, %40 karbon fiber ve %50 karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin sürtünme katsayılarında azalma tespit edilmiştir.
2. Kayma hızının 1 m/sn'den 3 m/sn'ye çıkarılması sonucunda katkısız PPS polimeri ve %20 cam elyaf, %30 cam elyaf ve %40 cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinin sürtünme katsayısında artış tespit edilmiştir. %30 karbon fiber, %40 karbon fiber ve %50 karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin sürtünme katsayılarında azalma tespit edilmiştir.
3. %20 cam elyaf, %30 cam elyaf ve %40 cam elyaf katkılı PPS kompozitleri ile %30 karbon fiber, %40 karbon fiber ve %50 karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin sürtünme katsayısı, katkı malzemesinin arttırılması ile azalmaktadır. Katkı malzemesinin ilavesinden sonra, kayma mesafesi sonuna doğru kompozitlerin sürtünme katsayısı değeri sabit bir hal almaktadır.

4. Uygulanan kayma hızının artışı ile katkısız PPS ve cam elyaf katkılı PPS kompozitlerin ortalama sürtünme katsayısı artarken karbon fiber katkılı PPS kompozitlerin azalmaktadır.
5. Yapılan sürtünme deneylerinde en yüksek sürtünme katsayısı PPS polimerinde, en düşük sürtünme katsayısı ise %50 karbon fiber katkılı kompozitte görülmüştür.
6. Deneyde kullanılan tüm malzemelerde genel olarak hızın artması ile birlikte aşınma oranının da arttığı gözlemlenmiştir. Deneyde kullanılan tüm malzemeler için; aşınma oranı aralığının  $10^{-4}$  ile  $10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm değerleri arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Hızın artması ile aşınma oranındaki artış en çok katkısız PPS polimerinde görülmektedir. Cam elyaf katkılı PPS kompozitlerinde aşınma oranı miktarları sırasıyla %20 cam elyaf katkılı PPS, %30 cam elyaf katkılı PPS ve %40 cam elyaf katkılı PPS kompoziti şeklinde tespit edilmiştir. Karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinde ise artış çok belirgin değildir. Buradan hareketle malzemenin içindeki karbon fiber oranını artması ile birlikte, kayma hızındaki değişimin aşınmayı daha az etkilediği söylenebilir.
7. Uygulanan yükün artması ile birlikte aşınmanın da arttığı görülmektedir. Yükün artması ile birlikte en fazla aşınma oranındaki artışın katkısız PPS polimerinde meydana geldiği tespit edilmiştir. Diğer kompozit malzemelerde ise katkı maddesinin artması ile birlikte aşınma oranı değerinde azalma meydana geldiği görülmektedir.
8. Deneyler sırasında uygulanan kayma hızlarında yükün artması ile birlikte %30 karbon fiber, %40 karbon fiber ve %50 karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinin aşınma oranında belirgin bir artış eğilimi gözlemlenmemiştir.
9. Yapılan aşınma deneylerinde en yüksek aşınma oranı katkısız PPS polimerinde ( $1.27 \times 10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/Nm), en düşük aşınma oranı ise %50 karbon fiber katkılı kompozitte ( $8.25 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm) görülmüştür.
10. Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde katkısız PPS polimerinde aşınma sırasında yük ve hızın artması ile, disk sıcaklığı artmıştır. Böylece sıcaklıktan etkilenen PPS polimerinin yumuşaması ile

temas yüzeyinden kopan partiküllerin tekrar polifenilen sülfidin kendi yüzeyine yapıştığı, bu yapışmadan dolayı sürtünme katsayısının arttığı görülmektedir. Cam elyaf ve karbon fiber katkılı PPS kompozit malzemelerin SEM görüntülerine bakıldığında yapışmanın olmadığı tespit edilmiştir. Bunun sebebinin ise malzemelerde ilave edilen cam elyaf/karbon fiber katkısının yüzeyde film tabakası olusturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Böylece aşınma ile meydana gelen malzeme kaybının PPS polimerine göre daha düşük seviyede olduğu görülmüştür.

11. SEM görüntülerine bakıldığında malzemelerde görülen aşınma mekanizmaları; Yükün etkisi altında, pürüzlülük seviyesinde oluşan küçük temas alanlarında, çok büyük basınçlar meydana gelir ve bazı temas alanlarında kaynak bağları oluşmaktadır. İzafi hareket sırasında bu bağlar kopar. Bağların kopmasında meydana gelen malzeme kaybı ile adhesiv aşınma ortaya çıkmaktadır. Ayrıca numuneden bir parça koparması, yerinden çıkarması sonucu abrazif aşınma meydana gelir. Böylece çalışma koşullarına bağlı plastik deformasyonlar da görülmektedir.

### 5.3. Öneriler

1. Yüksek performanslı mühendislik polimerlerine bu çalışmada kullanılan en yüksek kayma hızı 3 m/s olarak uygulanmıştır. Bu hız ve kayma mesafesi arttırılarak sürtünme deneyleri yapılabilir.
2. Yüksek performanslı polimerlerin aşınma ve sürtünme deneyleri oda sıcaklığı koşullarında yapılmıştır. Bu deneyler ileriki çalışmalarda daha yüksek sıcaklıklarda yapılabilir.
3. Deneylerde kullanılan yükler 50, 100 ve 200 N olarak seçilmiştir. Yüklerin daha fazla arttırılmasıyla yüksek performanslı mühendislik polimerlerin yüke karşı dayanım çizelgesi çıkartılabilir.
4. Aşındırıcı disk olarak AISI 4140 çeliği kullanılmıştır. Farklı disk malzemeler (çelik/polimer/seramik kaplama) kullanılarak mühendislik polimerlerinin aşınma ve sürtünme deneyleri yapılabilir.

5. Denev ortamının nem oranı değiştirilerek deneyler tekrarlatılabilir. Bu şekilde malzemenin değişik nem oranlarındaki aşınma davranışlarında meydana gelen farklılıklar tespit edilebilir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan malzemelerin sulu ve yağlı ortamlardaki aşınma deneyleri yapılarak malzemenin değişik çalışma şartlarındaki aşınma davranışları incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Marancı, S., Metal plastik birleştirmelerde ara yüzey incelemesi., Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [2] Lhymn, C., Friction and wear of fiber reinforced PPS composites, *Advances in polymer technology*, Vol. 7, No. 4, 451-461, 1987.
- [3] Mens, J., De Jee, A., Friction and wear behavior of 18 polymers in contact with steel in environments of air and water. *Wear* 149, 255-268, 1991.
- [4] Cho, M.H., The role of transfer film and back transfer behavior on the tribological performance of polyphenilen sulfide in sliding, *Journal of mechanical science and technology* 23, 2291-2298, 2009.
- [5] Chen, Z., Liu, X., Li, T., Friction and wear mechanisms of PA6/PPS blend reinforced with carbon fiber, *Journal of applied polymer science*, Vol. 105, 602-608, 2007.
- [6] Ünal, H., Şen, U., Mimaroglu, A., Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers against steel counterface, *Tribology International* 37, 727-732, 2004.
- [7] Ünal, H., Poyraz, B., Saylan, T., Cam fiber takviyeli naylon kompozitlerin tribolojik davranışlarının incelenmesi, III. Ege kompozit malzemeler sempozyumu, 72-81, Kuşadası, 2015.
- [8] Yılmaz, S., Pomza tozu ve karbon elyaf takviyeli polifenilen sülfid (pps) kompozitlerin adhezif aşınma davranışının incelenmesi, III. Ege kompozit malzemeler sempozyumu, 34-36, Kuşadası, 2015.
- [9] Sumer, M., Unal, H., Mimaroglu, A., Evaluation of tribological behaviour of peek composite under dry sliding and water lubricated conditions, *Wear*, 10-16, 2008.
- [10] Yousif, B., F., Yap., T., C., An investigation on worn surfaces of chopped glass fibre reinforced polyester through SEM observations, *Tribology International*, 41, 331-340, 2008.

- [11] Fındık, F., Unal, H., Yetgin, H., Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE) implant malzemesinin kuru ve sulu ortamlardaki sürtünme ve aşınma davranışları, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 1-10, Karabük, 2009.
- [12] Mimaroglu, A., Ünal, H., Arda, T., Abrasive wear behaviour of polymeric materials, *Materials and Design*, Cilt 26, 705-710, 2005.
- [13] Mimaroglu, A., Ünal, H., Arda, T., Friction and wear performance of some thermoplastic polymer and polymer composites against unsaturated polyester, *Applied surface science*, Cilt 252, 8139-8146, 2006.
- [14] Jia, B., Cong, P.H., Tribological behaviors of several polymer-polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions, *Wear*, Cilt 262, Sayfa 1353-1359, 2007.
- [15] Quintelier, J., Samyn, P., Wear behavior of carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide., *Polymer composites*, 27 (1), 92-98, 2006.
- [16] Guo, L., Zhu, H., and Sun, Y., Friction and wear studies on polyphenylene sulfide filled with a complex mixture., *Applied Mechanics and Materials* vol. 184-185, 1400-1403, 2012.
- [17] Besnea, A., Trufasu, D., Deleanu, L. and Andrei, G., Wear behaviour of poly (phenylene sulfide) composites during dry sliding tests. *Mechanical testing and diagnosis vol 2*, 15-20, 2012.
- [18] Jiang, Z., Schlarb, A., Friedrich, K. and Zhang, Z., Study on friction and wear behavior of PPS composites reinforced by short carbon fibers. *Article in composites science and technology* 68, 124, 2009.
- [19] Kurt, M., Yüksek performanslı endüstriyel termoplastiklerin yüksek sıcaklıklardaki tribolojik davranışları, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [20] Hanmin, Z., Friction and wear of poly (phenylene sulphide) and its carbon fibre composites: I Unlubricated, *Wear*, Cilt 116, 59-68, 1987.
- [21] Myshkin, N.K., *Polymer Tribology: Current State and Applications*, *Tribology in Industry*, Vol. 37, No. 3, 284-290, 2015.
- [22] Zhou, S., Effect of carbon fiber reinforcement on the mechanical and tribological properties of polyamide6/polyphenylene sulfide composites, *Materials and Design*, Vol 44, 493-499, 2013.



- [23] Zhao, Q., Bahadur, S., The mechanism of filler action and the criterion of filler selection for reducing wear., *Wear*, Vol 225, 660-668, 1999.
- [24] Sinha, K., *Tribology of Polymers and Their Composites-Environmental Effects.*, Indian Institute of Technology Kanpur, 24-28, 2016.
- [25] Yılmaz, M., Kompozitlerin kuru kaymadaki aşınma davranışlarının deneysel olarak araştırılması., Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
- [26] Mihiu, G., Comparative study regarding friction coefficient for three epoxy resins., *Materials Science and Engineering*, 174-179, 2017.
- [27] Şahin, Y., Tribological behaviour of unidirectional carbon fibre reinforced epoxy composites., *Materials Science and Engineering*, 1-5, 2017.
- [28] Kulkarni, M., Tribological behaviours of ABS and PA6 polymer metal sliding combinations under dry friction, water absorbed and electroplated conditions., *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 11, 68-84, 2016.
- [29] Sun, L., Yang, Z., Li, X., Study on the friction and wear behavior of POM/glassfibre nanocomposites, *Wear* 264, 693-700, 2008.
- [30] Briscoe, B. J., Sinha, S. K., Tribology of polymeric solids and their composites., *Wear, Materials-Mechanism and Practice*, pp. 223-267, 2005.
- [31] Bolvari, A., Glenn, S., Jansen, R., Ellis, C., Wear and friction of aramid fiber and polytetrafluoroethylene filled composites, *Wear*, 203-204, 697-702, 1997.
- [32] Voss, A., Friedrich, K., On the wear behaviour of short-fibre-reinforced PEEK composites, *Wear*, 116, 1-18, 1987.
- [33] Cai, C., Evaluation of the friction and wear properties of PEI composites filled with glass and carbon fiber, *Advanced Materials Research Vols. 300*, 21-24, 2011.
- [34] Rajesh, J., Bijwe, J., Tewari, U.S., Tribology of natural fiber polymer composites, *Journal Materials Science*, 36 (2), 351, 2001.
- [35] Reinicke, R., Friedrich, K., Beier, W., Liebald, C., Tribological properties of SiC and G-fiber reinforced glass matrix composites, *Wear*, 225-229, 1315-1321, 1999.

- [36] U.S. Tewari, J. Bijwe, Tribological behavior of polyimides, polyimides: Fundamentals and Applications, M.K. Ghosh and K.L. Mittal, Ed., Marcel Dekker Inc., 533-586, 1996.
- [37] Friedrich, K., Voss, A., Sliding and abrasive wear of short glass fibre reinforced PTFE composites, Journal of materials science letters, 5, 1111-1114, 1986.
- [38] Metals Handbook, Mechanical Testing, Asm Handbook Committee, Vol. 8, Ninth Edition, Printed in U.S.A., April 1989.
- [39] Yılmaz, F., Sürtünme ve Aşınma, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 229-247, İstanbul, Türkiye, 1997.
- [40] Zumgahr, K.H., Microstructure and wear of materials, Tribology series, Vol.10, Elsevier, 560, 1987.
- [41] Odabaş, D., TOPAL, E.S., 100CR6 çeliğinin iki cisimli abrasif aşınma davranışının kuru veya sıvı sürtünme şartlarında deneysel araştırılması, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, 396-405, 12-14 Nisan 1995.
- [42] Soydan, Y., Ulukan, L., Sürtünme ve aşınma direnci ölçme yöntemleri, 8. Uluslararası makine tasarım ve imalat kongresi, ODTÜ, 581-588, 1988.
- [43] Odabaş, D., Otektoid altı çeliklerin kayma sürtünmesi aşınmasında adhesiv aşınma katsayısının araştırılması., Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 1987.
- [44] Eyre, T.S., Friction and wear control in industry, Surface Engineering, Vol. 7, 143-148, 1991.
- [45] Ezdeşir, A., Erbay, E., Taşkıran, İ., Yağci, M.A., Cöbek, M. ve BİLGİÇ, T., Polimerler I, Pagev yayınları, II. Baskı, 231-237, İstanbul, 2001.
- [46] Biron, M., Thermoplastics and thermoplastic composites, Series in Materials Science and Engineering, Volume 1, Cap. 1, 1-19, 2013.
- [47] Sevim, İ., Çeliklerin abrazif aşınmasında aşındırıcı tane büyüklüğünün aşınma direncine etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Doktora Tezi, İstanbul, 1996.
- [48] Ulutan, M., AISI 4140 çeliğinin yüzey sertleştirme işlemleri ve kaplama yöntemleri sonrası mekanik davranışlarının araştırılması, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2007.

- [49] Ludema, C. K., Friction, wear and lubrication a textbook in tribology, 107-108, 1996.
- [50] Kılınç, Y., Yağlı sürtünme şartlarında çelik ince zırh yataklarında üretim tekniklerinin aşınma etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 1-25, 1993.
- [51] Korkut, M.H., Sürtünmeye maruz metalik disklerin aşınma bölgelerinde dolgu kaynak işleminden sonra aşınma özelliklerinin değişiminin deneysel araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 1-25, 1991.
- [52] Kökden, M.U., GGG 50 ve GGG 80 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin abrazif aşınma davranışına östemperleme işleminin etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 92-121 1998.
- [53] Rabinowicz, E., Friction and wear of materials, Second Edition, Aaviley-Interscience Publication, Printed in The Usa., 1995.
- [54] Kato, K., Adachi, K., Wear mechanisms, Modern Tribology Handbook: Principles of Tribology. CRC Press, Volume 1, Cap. 7, 2001.
- [55] Oğuz, B., Aşınma sorunları ve dolgu kaynakları, Oerlikon Yayını, İstanbul, 1993.
- [56] Özsoy, N., Polimer esaslı fiber takviyeli kompozit malzemelerin tribolojik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 25-29, 2015.
- [57] Renard, B. J., Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials, Series in Materials Science and Engineering, Volume 1 Cap. 2, 19-60, 2005.
- [58] <http://www.ain-plastics.com/h.performanceplastics>, Erişim Tarihi: 17.09.2016.
- [59] <http://www.businesswire.com/news/home>, Erişim Tarihi: 11.05.2016.
- [60] Bora, M.Ö., Polimer kompozitlerin tekrarlı darbe yüklemeleri altındaki davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 7-9, 2007.
- [61] Mazumdar, S.K., Composites Manufacturing Materials, Product and Process Engineering. CRC Press, USA, ISBN 0-8493-0585-3, 2002.
- [62] <http://tr.wikipedia.org/wiki/Termoplastikler>, Erişim Tarihi: 18.06.2016.

- [63] Demirkesen E., Kompozit Malzemeler. İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya Metalurji Fakültesi yayını, Yayın no: 3, 1991.
- [64] Chang, R., Mori, H., Yang, W., Polyphenylene sulfide (pps) market study, Sri consulting, California. 2010.
- [65] Mccrum, N.G., Buckley, C., Bucknall, C.B., Principles of polymer engineering, Oxford University, Press 1997.
- [66] <https://www.obitet.gazi.edu.tr/-/obitet/malzemebilgisi/kompozit%20malzeme.pdf>, Erişim Tarihi: 03.04.2016.
- [67] Braun, D., Cherdron, H., Ritter, H., Braun, D., Cherdron, H., Polymer synthesis theory and practice fundamentals, methods, experiments, Springer, 2005.
- [68] Odian, G.G., Principles of polymerization, Wiley-Interscience, 2004.
- [69] Chanda, M., Roy, S.K., Plastics fundamentals, Properties and Testing, CRC Press, 2010.
- [70] Ebnesajjad, S., Khaladkar, P.R., Fluoro polymer applications in the chemical processing industries, The Definitive User's Guide and Databook, William Andrew, 2004.
- [71] <https://www.google.com.tr>, Fortron® Polyphenylene Sulphide (Pps), Erişim Tarihi: 03.02.2016.
- [72] Long, A.C., Composites forming technologies, Woodhead Publishing Limited, 2007.
- [73] Sinha, S.K., Tribology of polymers and their composites-environmental effects, Indian Institute of Technology Kanpur, India, 2009.
- [74] Cuppoletti, J., Nanocomposites and polymers with analytical methods, Intech Press, Volume 1 Cap. 11, 261-285, 2011.
- [75] Sahin, Y., Kompozit malzemelere giriş, Gazi Kitabevi, 1-88, Ankara, 2000.

## ÖZGEÇMİŞ

Levent ESATOĞLU, 23.06.1988'de Hatay'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Antakya'da tamamladı. 2006 yılında Hüseyin Özbuğday Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2006-2008 yılları arasında Deniz Astsubay Meslek Yüksek Okulu Gemi Makineleri bölümünden mezun oldu. 2008 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği (İ.Ö.) Bölümü'nden 2012 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2013 yılında başladığı, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine devam etmektedir. Aynı zamanda 2006-2014 yılları arasında Deniz Kuvvetleri Komutanlığı'nda Astsubay statüsünde görev yapmış, 2014-2016 yılları arasında Deniz Kuvvetleri Komutanlığı'nda Subay statüsünde görev yapmıştır. Bu süre içerisinde kuvvet adına Gemi Makineleri ve İşletimi ile ilgili bölümlerde muhtelif gemilerde makine subayı olarak aktif rol almıştır. Şu anda İstanbul/Ataşehir'de bulunan Quality Line Yönetim ve Eğitim Danışmanlığı şirketinde Yönetim Danışmanı/Eğitmen olarak görev yapmaktadır.