

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİMERLERİN AŞINMASINDA KARŞI YÜZEY
PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN ETKİSİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Murat AKSULU**

Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Programı : KONSTRÜKSİYON

MAYIS 2007

**POLİMERLERİN AŞINMASINDA KARŞI YÜZEY
PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Murat AKSULU
(503932022)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 3 Temmuz 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 4 Mayıs 2007

Tez Danışmanı : Y.Doç.Dr. İ. Mehmet PALABIYIK
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Fatih Cengiz BABALIK (U.Ü.)
Prof.Dr. Atilla BOZACI (Y.T.Ü.)
Doç.Dr. Sait YÜCENUR (İ.T.Ü.)
Y.Doç.Dr. Vedat TEMİZ (İ.T.Ü.)

MAYIS 2007

ÖNSÖZ

Polimer malzemeler endüstriyel uygulamalarda makina elemanı olarak giderek çok yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu sebeple polimer makina elemanlarının aşınma özelliklerinin araştırılmasına gerek duyulmuştur. Polimerlerin metal karşı yüzeyle eş çalışmasında, aşınmayı etkileyen en önemli faktörlerden biri karşı yüzeyin pürüzlülüğüdür. Takdim edilen bu çalışmanın amacı, polimerlerin aşınmasında karşı yüzey pürüzlülüğünün etkisinin araştırılması konusundaki çalışmalara katkı yapmaktır.

Çalışmalarımda bana destek olan hocam sayın Prof. Dr. Mustafa Gediktaş'ı rahmetle anarken, danışmanım sayın Y.Doç.Dr. Mehmet Palabıyık'a, taşlama işlemlerini sabır ve titizlikle gerçekleştiren Şahin Taşlama'ya ve İTÜ Makine Fakültesi Konstrüksiyon Anabilimdalı sayın öğretim üyelerine teşekkürlerimi sunarım. Madden ve manen desteklerini esirgemeyen aileme ve Tübitak UME Boyutsal Laboratuvarı çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Mayıs 2007

Murat Aksulu

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür araştırması	2
2. POLİMER MALZEMELER	11
2.1. Polimerlerin Tanımı ve Sınıflandırılması	11
2.2. Çalışmada Kullanılan Polimer Malzemeler	13
3. POLİMERLERİN SÜRTÜNME ve AŞINMA ÖZELLİKLERİ	16
3.1. Sürtünme Mekanizmaları	16
3.2. Polimerlerin Aşınma Mekanizmaları	18
3.3. Transfer Filmi	22
3.4. Aşınma Minimumu	23
3.5. Polimerlerin Yorulma Aşınması	23
3.6. Çalışmada Kullanılan Polimer Yorulma Aşınması Modeli	30
3.7. Polimerlerin Abrazif Aşınmasını İzah İçin Bir Model	31
4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN ÖLÇÜLMESİ, ÖLÇÜM CİHAZLARI ve PÜRÜZLÜLÜK PARAMETRELERİ	33
4.1. Pürüzlülüğün Ölçülmesi ve Pürüzlülük Ölçüm Cihazları	33
4.1.1. İğne	33
4.1.2. Pikap	34
4.1.3. Filtre	35
4.2. Pürüzlülük Parametreleri	39
4.3. Ortalama Tepe Yuvarlak Yarıçapı R_{av} 'nin Hesaplanması	43
4.3.1. Otokorelasyon analizi ile R_{av} 'nin hesabı	43
4.3.2. Sayısal analiz ile R_{av} 'nin hesabı	44
5. DİSK YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN OLUŞTURULMASI	46
5.1. İki Punta Arası Silindirik Taşlama	46
5.2. Deneyleerde Kullanılan Disklerin Taşlanması	47
5.3. Deneyleerde Kullanılan Disklerin Parlatılması	53
5.4. Taşlama ve Parlatma İşlemleriyle Elde Edilen Disk Yüzeylerinin Eksenel R_a ve Eksenel R_{av} Değerleri Arasındaki İlişki	54
6. DENEYLER	56
6.1. Deneyle Tesisatı	56

6.2. Polimer Numuneler	58
6.3. Deneyleerde Kullanılan Diskler ve Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi	59
6.4. Deneyleerin Yapılışı	62
6.5. Sürtünme Kuvveti Kalibrasyonu	64
6.6. Disk Yüzey Sıcaklığının Ölçülmesi	65
6.7. Deney Parametrelerinin Tanımlanması	65
7. BELİRSİZLİK HESAPLARI	68
7.1. Belirsizlik Hesapları	68
7.1.1. A tipi belirsizlik	68
7.1.2. B tipi belirsizlik	68
7.1.3. Güvenlik düzeyi	69
7.1.4. Olasılık dağılımları	69
7.2. Aşınma Hızının Belirsizliği	69
7.2.1. Numune ağırlığının bulunmasındaki belirsizlik	70
7.2.1.1. Terazi belirsizliği	70
7.2.1.2. Numunelerin nem almasından kaynaklanan belirsizlik	70
7.2.2. Aşınma hacmi, kayma mesafesi ve normal kuvvetin belirsizliği	72
7.2.3. Aşınma-kayma mesafesi eğrisine uydurulan en küçük kareler doğrusunun eğiminin belirsizliği	72
7.2.4. Aşınma hızı için toplam belirsizlik	74
7.3. Sürtünme Katsayısının Belirsizliği	75
7.4. Pürüzlülük Parametreleri R_a , R_z , R_{max} 'ın Belirsizliği	76
7.5. R_{av} Parametresinin Belirsizliği	80
8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	83
8.1. Deney Sonuçlarının Grafiklerle İfade Edilmesi	83
8.1.1. Ekstrüzyon PA-6'nın aşınma ve sürtünme durumu	84
8.1.2. Döküm PA-6'nın aşınma ve sürtünme durumu	86
8.1.3. Polietilen tereftalat (PET)'ın aşınma ve sürtünme durumu	89
8.1.4. Polioksümetilen (POM)'ın aşınma ve sürtünme durumu	91
8.1.5. Polipropilenin (PP) aşınma ve sürtünme durumu	93
8.2. Deney Sonuçlarının Tablolar Halinde Verilmesi	96
8.3. Yorulma Aşınması Sonuçlarının Kıyaslanması	97
8.4. Aşınma Hızının $(1+4\mu^2)^{1/2}/\sigma$ Parametresiyle Değişimi	98
8.5. Deney Esnasında Disk Pürüzlülüğünün Değişmesi	99
8.6. Eksenel R_a ve Çevresel R_a Parametreleri Arasındaki İlişki	100
8.7. Değerlendirme	100
KAYNAKLAR	105
EK A. AŞINMA-KAYMA MESAFESİ VE SÜRTÜNME KATSAYISI-KAYMA MESAFESİ GRAFİKLERİ	109
EK B. DİSK YÜZEYLERİNİN DENEY ÖNCESİ VE SONRASI OPTİK MİKROFOTOĞRAFLARI	119
EK C. DİSK YÜZEYİNDE TRANSFER FİLM OLUŞUM SAFHALARI	132
EK D. AŞINMIŞ PİM YÜZEYLERİNİN SEM MİKROFOTOĞRAFLARI	138

EK E. PÜRÜZLÜLÜK CİHAZININ ÖLÇÜM ÇIKTISI	148
EK F. PÜRÜZLÜLÜK PARAMETRELERİNİN KAYDEDİLMESİ	149
EK G. ORTALAMA TEPE YUVARLAKLIK YARIÇAPI (R_{av}) HESAPLAYAN VBASIC PROGRAMI	150
EK H. AŞINMA HIZININ BELİRSİZLİĞİNİ HESAPLAYAN VBASIC PROGRAMI	153
EK I. DENEYLERDE DİSK YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞİŞMESİ	155
ÖZGEÇMİŞ	157

KISALTMALAR

PA	: Poliamid
POM	: Polioksimetilen
PTFE	: Politetraflor etilen
PET	: Polietilen tereftalat
PBT	: Polibutilen tereftalat
PP	: Polipropilen
PE	: Polietilen
PMMA	: Polimetil metakrilat
HDPE	:Yüksek yoğunluklu polietilen
PVC	: Polivinilklorid
UHMWPE	: Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen
PEEK	: Polietereter keton
PEK	: Polieter keton
PCTFE	: Polimonokloro triflor etilen
PAI	: Poliamid imid
APC2	: Karbon elyafı katkılı Polietereter keton
PPS	: Polifenilen sülfid
SEM	: Tarayıcı elektron mikroskobu
TEM	: Geçirimli elektron mikroskobu
SiC	: Silikon karbid
TiN	: Titanyum nitrit
TiC	: Titanyum karbid
CH₂	: Metilen
CONH	: Amid

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Aşınma deneylerinde elde edilen t_w değerleri.....	27
Tablo 3.2. Klasik yorulma deneylerinden alınan t değerleri.....	27
Tablo 3.3. Disklere ait R_q , R_{av} ve W değerleri.....	29
Tablo 6.1. PLINT aşınma cihazı teknik özellikleri.....	57
Tablo 6.2. Deneylerde kullanılan polimerlerin özellikleri.....	59
Tablo 6.3. MAHR pürüzlülük ölçüm cihazının teknik özellikleri.....	61
Tablo 6.4. Pürüzlülük ölçümlerinde geçerli olan ölçüm şartları.....	62
Tablo 6.5. Aşınma deneylerinde pim numunelerin ölçüm noktaları.....	63
Tablo 7.1. Polimer numunelerin nem alma miktarları.....	71
Tablo 7.2. Tüm diskler için çevresel ve eksenel tekrarlanabilirlik değerleri.....	78
Tablo 7.3. Çevresel ölçümlerde R_a , R_z ve R_{max} 'ın izafi belirsizliği.....	79
Tablo 7.4. Eksenel ölçümlerde R_a , R_z ve R_{max} 'ın izafi belirsizliği.....	80
Tablo 7.5. Tüm disklerde R_{av} için çevresel ve eksenel tekrarlanabilirlik değerleri.....	81
Tablo 8.1. Ekstrüzyon PA6'nın aşınma ve sürtünme durumu.....	96
Tablo 8.2. Döküm PA6'nın aşınma ve sürtünme durumu.....	96
Tablo 8.3. PET'in aşınma ve sürtünme durumu.....	96
Tablo 8.4. POM'un aşınma ve sürtünme durumu.....	97
Tablo 8.5. PP'nin aşınma ve sürtünme durumu.....	97
Tablo 8.6. Deneyden önce ve deneyden sonra disk pürüzlülüğü.....	100
Tablo A.1. Ekstrüzyon PA 6 ile çalışmış disklerin pürüzlülük parametreleri....	109
Tablo A.2. Döküm PA 6 ile çalışmış disklerin pürüzlülük parametreleri.....	111
Tablo A.3. PET ile çalışmış disklerin pürüzlülük parametreleri.....	113
Tablo A.4. POM ile çalışmış disklerin pürüzlülük parametreleri.....	115
Tablo A.5. PP ile çalışmış disklerin pürüzlülük parametreleri.....	117

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1 : Sıcaklık ve kayma hızının polimerlerin sürtünmesindeki tipik etkileri.....	16
Şekil 3.2 : Sert bir pürüzün polimer yüzey üzerindeki kayma hareketinde sürtünmenin kaynakları.....	17
Şekil 3.3 : Farklı tipteki model testleri.....	19
Şekil 3.4 : Adeziv aşınmaya neden olabilecek tribosistemler.....	20
Şekil 3.5 : Abrasiv aşınmaya neden olabilecek tribosistemler.....	21
Şekil 3.6 : Yorulma aşınmasına neden olabilecek tribosistemler.....	21
Şekil 3.7 : Polimer aşınmasının şematik gösterimi.....	22
Şekil 3.8 : Deney sonuçlarına Eşitlik 3.8 formunda bir fonksiyonun uydurulması.....	26
Şekil 3.9 : t ve t_w 'nun, çeşitli polimer ve grafitlerin elastisite modülüyle değişimi.....	28
Şekil 3.10 : R_{av} -W grafiği.....	30
Şekil 3.11 : R_q -W grafiği.....	30
Şekil 4.1 : Yüzey profilinin elde edilmesi.....	33
Şekil 4.2 : İğne ucu.....	34
Şekil 4.3 : Kritik yüzeylerin profili bozulmaya uğramış olarak kaydedilebilir	34
Şekil 4.4 : Papuçsuz pikaplar.....	35
Şekil 4.5 : Papuçlu pikaplar.....	35
Şekil 4.6 : Filtre çeşitleri.....	36
Şekil 4.7 : Geçirgenlik - dalga boyu grafiği.....	37
Şekil 4.8 : Pürüzlülük filtresine ait karakteristikler.....	37
Şekil 4.9 : Değişik filtrelerin profile etkisi.....	38
Şekil 4.10 : Dalgalılık filtresine ait karakteristikler.....	38
Şekil 4.11 : İncelenecek yüzey profilinin seçimi.....	39
Şekil 4.12 : Ortalama çizgi, numune uzunluğu ve değerlendirme uzunluğu.....	40
Şekil 4.13 : Max profil yüksekliği R_{zi}	40
Şekil 4.14 : Profil elemanlarının genişliği.....	42
Şekil 4.15 : Ham profile en küçük kareler doğrusunun uydurulması.....	44
Şekil 4.16 : Profilin yatay hale getirilmesi ve yerel tepelerin yuvarlaklık yarıçaplarının hesabı.....	45
Şekil 5.1 : İki punta arası dış silindirik taşlama.....	46
Şekil 5.2 : Çalışmada gerçekleştirilen taşlama işlemleri.....	48
Şekil 5.3 : “36 kum” taş ile taşlama.....	49
Şekil 5.4 : “46 kum” taş ile taşlama.....	49
Şekil 5.5 : “60 kum” taş ile taşlama.....	50
Şekil 5.6 : “120 kum” taş ile taşlama.....	50
Şekil 5.7 : “36 kum” taş ile taşlamada disk yüzeyinin homojenliği.....	52
Şekil 5.8 : “46 kum” taş ile taşlamada disk yüzeyinin homojenliği.....	52
Şekil 5.9 : “60 kum” taş ile taşlamada disk yüzeyinin homojenliği.....	53
Şekil 5.10 : “120 kum” taş ile taşlamada disk yüzeyinin homojenliği.....	53
Şekil 5.11 : Tüm taşlama ve parlatma işlemleri için eksenel R_a ve eksenel R_{av} parametreleri arasındaki ilişki.....	55

Şekil 6.1	: PLINT marka papuç-disk aşınma cihazı prensip şeması.....	56
Şekil 6.2	: Aşınma cihazı genel görünüş.....	57
Şekil 6.3	: Aşınma cihazı kontrol ünitesi.....	57
Şekil 6.4	: Aşınma cihazının önemli kısımları.....	58
Şekil 6.5	: Polimer pimler.....	58
Şekil 6.6	: Diskin şematik görünümü, çevresel ve eksenel ölçümler.....	60
Şekil 6.7	: Pürüzlülük ölçüm cihazının genel görünümü.....	60
Şekil 6.8	: Disklerin pürüzlülüğünün ölçülmesi.....	61
Şekil 6.9	: Mettler mekanik terazi.....	63
Şekil 6.10	: Disk yüzeylerinin optik mikroskopla incelenmesi.....	63
Şekil 6.11	: Sürtünme kuvveti kalibrasyon eğrisi.....	65
Şekil 6.12	: Aşınma miktarı ve kayma mesafesi arasındaki karakteristik eğriler...	66
Şekil 6.13	: Aşınma-kayma mesafesi eğrisinin daimi rejim bölgesine doğru uydurulması.....	67
Şekil 8.1	: Ekstrüzyon PA6'nın aşınma hızının diskin eksenel R_a değeriyle değişimi.....	84
Şekil 8.2	: Ekstrüzyon PA6'nın sürtünme katsayısının diskin eksenel R_a değeriyle değişimi.....	84
Şekil 8.3	: Ekstrüzyon PA6 aşınma hızı - disk eksenel R_{av} değeri dağılımı.....	85
Şekil 8.4	: Ekstrüzyon PA6 için yorulma aşınması modelinin uygulanması.....	85
Şekil 8.5	: Döküm PA6'nın aşınma hızının diskin eksenel R_a değeriyle değişimi.....	87
Şekil 8.6	: Döküm PA6'nın sürtünme katsayısının diskin eksenel R_a değeriyle değişimi.....	87
Şekil 8.7	: Döküm PA6 aşınma hızı - disk eksenel R_{av} değeri dağılımı.....	88
Şekil 8.8	: Döküm PA6 için yorulma aşınması modelinin uygulanması.....	88
Şekil 8.9	: PET'in aşınma hızının diskin eksenel R_a değeriyle değişimi.....	89
Şekil 8.10	: PET'in sürtünme katsayısının diskin eksenel R_a değeriyle değişimi...	89
Şekil 8.11	: PET aşınma hızı - disk eksenel R_{av} değeri dağılımı.....	90
Şekil 8.12	: PET için yorulma aşınması modelinin uygulanması.....	90
Şekil 8.13	: POM'un aşınma hızının eksenel R_a değeriyle değişimi.....	91
Şekil 8.14	: POM'un sürtünme katsayısının eksenel R_a değeriyle değişimi.....	92
Şekil 8.15	: POM aşınma hızı - disk eksenel R_{av} değeri dağılımı.....	92
Şekil 8.16	: POM için yorulma aşınması modelinin uygulanması.....	93
Şekil 8.17	: PP'nin aşınma hızının diskin eksenel R_a değeriyle değişimi.....	94
Şekil 8.18	: PP'nin sürtünme katsayısının diskin eksenel R_a değeriyle değişimi...	94
Şekil 8.19	: PP aşınma hızı - disk eksenel R_{av} değeri dağılımı.....	95
Şekil 8.20	: PP için yorulma aşınması modelinin uygulanması.....	95
Şekil 8.21	: Çalışmada elde edilen t_w değerlerinin Şekil 3.9'da verilen diğer çalışmalarla kıyaslanması.....	98
Şekil 8.22	: Deneylerde kullanılan polimerler için aşınma hızının $(1+4\mu^2)^{1/2}/\sigma$ parametresiyle değişimi.....	99
Şekil 8.23	: Deneylerde kullanılan disklerin eksenel R_a ve çevresel R_a parametreleri arasındaki ilişki.....	101
Şekil A.1	: Ekstrüzyon PA 6 için Aşınma – Kayma mesafesi grafikleri.....	109
Şekil A.2	: Ekstrüzyon PA 6 için Sürtünme katsayısı–Kayma mesafesi grafikleri	110
Şekil A.3	: Döküm PA 6 için Aşınma – Kayma mesafesi grafikleri.....	111
Şekil A.4	: Döküm PA 6 için Sürtünme katsayısı – Kayma mesafesi grafikleri...	112
Şekil A.5	: PET için Aşınma – Kayma mesafesi grafikleri.....	113
Şekil A.6	: PET için Sürtünme katsayısı – Kayma mesafesi grafikleri.....	114
Şekil A.7	: POM için Aşınma – Kayma mesafesi grafikleri.....	115
Şekil A.8	: POM için Sürtünme katsayısı – Kayma mesafesi grafikleri.....	116
Şekil A.9	: PP için Aşınma – Kayma mesafesi grafikleri.....	117
Şekil A.10	: PP için Sürtünme katsayısı – Kayma mesafesi grafikleri.....	118

Şekil B.1	: Ekstrüzyon PA6 aksel $R_a = 0.12 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	119
Şekil B.2	: Ekstrüzyon PA6, aksel $R_a = 0.60 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	119
Şekil B.3	: Ekstrüzyon PA6, aksel $R_a = 1.00 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	120
Şekil B.4	: Ekstrüzyon PA6, aksel $R_a = 1.37 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	120
Şekil B.5	: Ekstrüzyon PA6, aksel $R_a = 2.25 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	121
Şekil B.6	: Ekstrüzyon PA6, aksel $R_a = 2.94 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	121
Şekil B.7	: Döküm PA6, aksel $R_a = 0.1 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	122
Şekil B.8	: Döküm PA6, aksel $R_a = 0.4 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	122
Şekil B.9	: Döküm PA6, aksel $R_a = 1.25 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	123
Şekil B.10	: Döküm PA6, aksel $R_a = 1.75 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	123
Şekil B.11	: Döküm PA6, aksel $R_a = 2.12 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	124
Şekil B.12	: Döküm PA6, aksel $R_a = 3.0 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	124
Şekil B.13	: PET, aksel $R_a = 0.1 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	125
Şekil B.14	: PET, aksel $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	125
Şekil B.15	: PET, aksel $R_a = 1 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	126
Şekil B.16	: PET, aksel $R_a = 2.86 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	126
Şekil B.17	: POM, aksel $R_a = 0.30 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	127
Şekil B.18	: POM, aksel $R_a = 0.70 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	127
Şekil B.19	: POM, aksel $R_a = 1.40 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	128
Şekil B.20	: POM, aksel $R_a = 2.26 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	128
Şekil B.21	: POM, aksel $R_a = 3.14 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	129
Şekil B.22	: PP, aksel $R_a = 2.39 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	130
Şekil B.23	: PP, aksel $R_a = 3.35 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	130
Şekil B.24	: a) PET ile çalışmış aksel R_a değeri $0.7 \mu\text{m}$ olan disk yüzeyinde, deney sonrası aşınma döküntülerinin optik mikro fotoğrafı b) PP ile çalışmış aksel R_a değeri $0.3 \mu\text{m}$ olan disk yüzeyinde, deney sonrası aşınma döküntülerinin optik mikro fotoğrafı	131

Şekil C.1	: Ekstrüzyon PA6, eksenel $R_a=0.63 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a), 2.6 km kayma mesafesi sonundaki (b), 5.1 km kayma mesafesi sonundaki (c) 7.7 km kayma mesafesi sonundaki (d), 12.8 km kayma mesafesi sonundaki (e), 17.9 km kayma mesafesi sonundaki (f), 23.1 km kayma mesafesi sonundaki (g) ve 28.2 km kayma mesafesi sonundaki (h) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	132
Şekil C.2	: Döküm PA6, eksenel $R_a=1.24 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a), 2.6 km kayma mesafesi sonundaki (b), 5.1 km kayma mesafesi sonundaki (c) 7.7 km kayma mesafesi sonundaki (d) 12.8 km kayma mesafesi sonundaki (e), 17.9 km kayma mesafesi sonundaki (f), 23.1 km kayma mesafesi sonundaki (g) ve 28.2 km kayma mesafesi sonundaki (h) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı.....	134
Şekil C.3	: PET, eksenel $R_a=1.01 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a), 2.6 km kayma mesafesi sonundaki (b), 7.7 km kayma mesafesi sonundaki (c) 12.8 km kayma mesafesi sonundaki (d), 17.9 km kayma mesafesi sonundaki (e), 23.1 km kayma mesafesi sonundaki (f), 28.2 km kayma mesafesi sonundaki (g) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı...	136
Şekil D.1	: Eksenel $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ için ekstrüzyon PA 6 SEM mikro fotoğrafları. (a) X 100 (b) X 500 (c) X 2000 (d) X 5000 büyütme.....	138
Şekil D.2	: Eksenel $R_a = 3 \mu\text{m}$ için ekstrüzyon PA 6 SEM mikro fotoğrafları. (a) X 100 (b) X 500 (c) X 2000 (d) X 5000 büyütme.....	139
Şekil D.3	: Eksenel $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ için döküm PA 6 SEM mikro fotoğrafları. (a) X 100 (b) X 500 (c) X 1000 (d) X 5000 büyütme.....	140
Şekil D.4	: Eksenel $R_a = 3 \mu\text{m}$ için döküm PA 6 SEM mikro fotoğrafları. (a) X 100 (b) X 500 (c) X 1000 (d) X 5000 büyütme.....	141
Şekil D.5	: Eksenel $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ için PET SEM mikro fotoğrafları. (a) X 100 (b) X 1000 (c) X 5000 büyütme.....	142
Şekil D.6	: Eksenel $R_a = 3 \mu\text{m}$ için PET SEM mikro fotoğrafları. (a) X 100 (b) X 500 (c) X 1000 (d) X 5000 büyütme.....	143
Şekil D.7	: Eksenel $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ için POM SEM mikro fotoğrafları. (a) X 100 (b) X 1000 (c) X 5000 (d) 7500 büyütme.....	144
Şekil D.8	: Eksenel $R_a = 3 \mu\text{m}$ için POM SEM mikro fotoğrafları. (a) X 100 (b) X 500 (c) X 1000 (d) X 5000 büyütme.....	145
Şekil D.9	: Eksenel $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ için döküm PP SEM mikro fotoğrafları. (a) X 500 (b) X 1500 (c) X 5000 büyütme.....	146
Şekil D.10	: Eksenel $R_a = 3 \mu\text{m}$ için PP SEM mikro fotoğrafları. (a) X 100 (b) X 500 (c) X 2000 (d) X 5000 büyütme.....	147
Şekil I.1	: F2 diskinin deney öncesi ve sonrası yüzey profilleri.....	155
Şekil I.2	: G2 diskinin deney öncesi ve sonrası yüzey profilleri.....	155
Şekil I.3	: I7 diskinin deney öncesi ve sonrası yüzey profilleri.....	156
Şekil I.4	: I13 diskinin deney öncesi ve sonrası yüzey profilleri.....	156
Şekil I.5	: J3 diskinin deney öncesi ve sonrası yüzey profilleri.....	156

SEMBOL LİSTESİ

A_r	: Gerçek temas alanı
β	: Otokorelasyon fonksiyonunda x'e verilen artım
β^*	: Korelasyon mesafesi
C_p	: Eğrilik
$C(\beta)$: Otokorelasyon fonksiyonu
ζ	: Çözünürlük
D	: Disk çapı
E	: Elastiklik modülü
F	: Sürtünme kuvveti göstergesinde okunan ortalama değer
F_N	: Normal yük
F_s	: Sürtünme kuvveti
F_{sg}	: Sürtünme kuvvetinin gösterge değeri
H	: Sertlik
k	: Aşınma parçacıklarının oluşma ihtimali
l	: Profilin ardışık iki noktası arasındaki mesafe
L	: Kayma mesafesi
l_e	: Numune uzunluğu
L_p	: Otokorelasyon fonksiyonunda profil uzunluğu
m	: Bir deneyin herhangi bir periyodu sonundaki numune ağırlığı,
m_0	: Deneyin başlangıcındaki numune ağırlığı
n	: Dinamik zorlanmada kırılmanın gerçekleştiği yük tekrar sayısı
N	: Polimerizasyon derecesi
n_k	: Toplam devir sayısı
λ_c	: Sınır dalga boyu
P_a	: Primer profilde, profil sapmalarının aritmetik ortalaması
P_N	: Normal yöndeki basınç
P_t	: Primer profilde, bir değerlendirme uzunluğu içinde profilin en yüksek ve en alçak noktaları arasındaki yükseklik farkı
$P\Delta q$: Primer profilde, profil eğimi
R	: Pürüzlülük motiflerinin ortalama derinliği
R_a	: Profil sapmalarının aritmetik ortalaması
R_{av}	: Ortalama tepe yuvarlaklık yarıçapı
R_{ku}	: Pürüzlülük profilinde, profil sapmalarının dördüncü kuvvetleri ortalaması
R_p	: Pürüzlülük profilinde, bir numune uzunluğu içinde profilin ortalama çizgiden en yüksek noktasının yüksekliği
R_{Sk}	: Pürüzlülük profilinde, profil sapmalarının küpleri ortalaması
RS_m	: Profil elemanlarının ortalama uzunluğu
R_t	: Pürüzlülük profilinde, bir değerlendirme uzunluğu içinde profilin en yüksek ve en alçak noktaları arasındaki yükseklik farkı
R_q	: Profil sapmalarının kareleri ortalamasının karekökü

R_v	: Pürüzlülük profilinde, bir numune uzunluğu içinde profilin en derin noktasının derinliği
R_z	: Maksimum profil yüksekliği
R_{zg}	: Yüzeyin gerçek geometrik sapması
$R\Delta q$: Profil eğimi
R_{3z}	: Pürüzlülük profilinde, üçüncü nokta yüksekliği
S	: Dinamik zorlanmada gerilme genliği
S_0	: Statik zorlanmada kopma mukavemeti
t	: Klasik yorulma deneylerinde yorulma eğrisi üssü
t_w	: Aşınma deneylerinden elde edilen yorulma eğrisi üssü
u	: Belirsizlik
V	: Aşınma hacmi
$y(x)$: Profilin bir x mesafesindeki yüksekliği
$y(x+\beta)$: Profilin komşu $x+\beta$ mesafesindeki yüksekliği
W	: Aşınma hızı
δ_{ref}	: Referans pürüzlülük standardının değerinin tam bilinmemesinin getirdiği bozucu etki
δ_n	: Pürüzlülük cihazında elektriksel ve mekanik gürültünün ölçüme getirdiği bozucu etki
δ_{nem}	: Polimer numunenin nem kapma miktarı
ρ	: Yoğunluk
μ	: Sürtünme katsayısı
σ	: Polimerin kopma gerilmesi
σ_h	: Profil yüksekliklerinin standart sapması
σ_0	: Ara yüzeydeki eşdeğer gerilme,
τ_F	: Polimer-metal ara yüzeyindeki kayma gerilmesi
Ψ	: Plastiklik indeksi

SEMBOL LİSTESİ

A_r	: Gerçek temas alanı
β	: Otokorelasyon fonksiyonunda x'e verilen artım
β^*	: Korelasyon mesafesi
C_p	: Eğrilik
$C(\beta)$: Otokorelasyon fonksiyonu
ζ	: Çözünürlük
D	: Disk çapı
E	: Elastiklik modülü
F	: Sürtünme kuvveti göstergesinde okunan ortalama değer
F_N	: Normal yük
F_s	: Sürtünme kuvveti
F_{sg}	: Sürtünme kuvvetinin gösterge değeri
H	: Sertlik
k	: Aşınma parçacıklarının oluşma ihtimali
l	: Profilin ardışık iki noktası arasındaki mesafe
L	: Kayma mesafesi
l_e	: Numune uzunluğu
L_p	: Otokorelasyon fonksiyonunda profil uzunluğu
m	: Bir deneyin herhangi bir periyodu sonundaki numune ağırlığı,
m_0	: Deneyin başlangıcındaki numune ağırlığı
n	: Dinamik zorlanmada kırılmanın gerçekleştiği yük tekrar sayısı
N	: Polimerizasyon derecesi
n_k	: Toplam devir sayısı
λ_c	: Sınır dalga boyu
P_a	: Primer profilde, profil sapmalarının aritmetik ortalaması
P_N	: Normal yöndeki basınç
P_t	: Primer profilde, bir değerlendirme uzunluğu içinde profilin en yüksek ve en alçak noktaları arasındaki yükseklik farkı
$P\Delta q$: Primer profilde, profil eğimi
R	: Pürüzlülük motiflerinin ortalama derinliği
R_a	: Profil sapmalarının aritmetik ortalaması
R_{av}	: Ortalama tepe yuvarlaklık yarıçapı
R_{ku}	: Pürüzlülük profilinde, profil sapmalarının dördüncü kuvvetleri ortalaması
R_p	: Pürüzlülük profilinde, bir numune uzunluğu içinde profilin ortalama çizgiden en yüksek noktasının yüksekliği
R_{Sk}	: Pürüzlülük profilinde, profil sapmalarının küpleri ortalaması
RS_m	: Profil elemanlarının ortalama uzunluğu
R_t	: Pürüzlülük profilinde, bir değerlendirme uzunluğu içinde profilin en yüksek ve en alçak noktaları arasındaki yükseklik farkı
R_q	: Profil sapmalarının kareleri ortalamasının karekökü

R_v	: Pürüzlülük profilinde, bir numune uzunluğu içinde profilin en derin noktasının derinliği
R_z	: Maksimum profil yüksekliği
R_{zg}	: Yüzeyin gerçek geometrik sapması
$R\Delta q$: Profil eğimi
R_{3z}	: Pürüzlülük profilinde, üçüncü nokta yüksekliği
S	: Dinamik zorlanmada gerilme genliği
S_0	: Statik zorlanmada kopma mukavemeti
t	: Klasik yorulma deneylerinde yorulma eğrisi üssü
t_w	: Aşınma deneylerinden elde edilen yorulma eğrisi üssü
u	: Belirsizlik
V	: Aşınma hacmi
$y(x)$: Profilin bir x mesafesindeki yüksekliği
$y(x+\beta)$: Profilin komşu $x+\beta$ mesafesindeki yüksekliği
W	: Aşınma hızı
δ_{ref}	: Referans pürüzlülük standardının değerinin tam bilinmemesinin getirdiği bozucu etki
δ_n	: Pürüzlülük cihazında elektriksel ve mekanik gürültünün ölçüme getirdiği bozucu etki
δ_{nem}	: Polimer numunenin nem kapma miktarı
ρ	: Yoğunluk
μ	: Sürtünme katsayısı
σ	: Polimerin kopma gerilmesi
σ_h	: Profil yüksekliklerinin standart sapması
σ_0	: Ara yüzeydeki eşdeğer gerilme,
τ_F	: Polimer-metal ara yüzeyindeki kayma gerilmesi
Ψ	: Plastiklik indeksi

POLİMERLERİN AŞINMASINDA KARŞI YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN ETKİSİ

ÖZET

Bu çalışmada çeşitli polimerlerin, paslanmaz çelikten disklerle kuru sürtünmesinde, karşı yüzeyin pürüzlülüğünün polimerlerin aşınmasına etkisi incelenmektedir. Papuç disk aşınma cihazında, beş değişik polimer, farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip paslanmaz çelikten disklerle aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Disk malzemesi AISI 416 C paslanmaz çeliktir (% 0.15 C, % 1.25 Mn, % 1 Si, % 13 Cr, % 0.04 P, % 0.03 S). Disklerin sertliği 52 HRC'dir. 60 mm çapındaki disklerin silindirik yan yüzeyleri aşındırıcı yüzey olarak kullanılmıştır. Polimer malzemeler ise 10 mm çaplı silindirik pim şeklinde imal edilmiştir. Pimlerin alın yüzeylerinden biri, diskin silindirik yan yüzeyiyle aynı yarıçapta işlenmiştir. Çalışmada kullanılan polimerler: ekstrüzyon poliamid 6 (PA 6), döküm poliamid 6, polietilen tereftalat (PET), polioksimetilen (POM), polipropilen (PP)'dir.

Tüm deneylerde normal yük ve kayma hızı sabit tutulmuştur. Değişken parametre ise diskin yüzey pürüzlülüğüdür. Pürüzlülük silindirik taşlamayla oluşturulmuştur. Çok küçük pürüzlülük değerleri ise (profil sapmalarının aritmetik ortalaması $R_a \leq 0.15 \mu\text{m}$) taşlamanın ardından 280-320 numaralı SiC zımpara kağıdı kullanılarak elde edilmiştir. Disklerin eksenel yöndeki R_a değeri yaklaşık olarak $0.08 \mu\text{m}$ 'den $3 \mu\text{m}$ 'ye kadar değişmektedir.

Kullanılan aşınma cihazında normal kuvvet, asılan ölü ağırlıklarla temin edilmektedir. Sürtünme kuvveti pim tutucusuna bağlı bir kuvvet dönüştürücü ile ölçülmektedir. Ayrıca cihazda dönme hızı takometreyle ölçülmekte ve katedilen toplam devir sayılmaktadır. Aşınma miktarı pimlerin hassas bir şekilde tartımıyla tespit edilmektedir. Disk yüzey sıcaklığı deney periyodlarının sonunda temaslı termometreyle ölçülmektedir.

Disklerin pürüzlülüğü hem eksenel yönde (işleme çizgilerine dik), hem de çevresel yönde (işleme çizgilerine paralel) ölçülerek R_a parametresi elde edilmiştir.

Pürüzlülük ölçüm cihazları, ortalama tepe yuvarlaklık yarıçapı R_{av} parametresini hesaplamamaktadır. Bu nedenle, pürüzlülük ölçümleriyle elde edilen ham yüzey profillerinden, sayısal analizle R_{av} hesaplanmıştır. Bu maksatla bir Visual Basic programı hazırlanmıştır.

Aşınma hızı ve sürtünme katsayısının karşı yüzey pürüzlülüğüyle değişimini ifade etmek için eksenel yöndeki ölçümler esas alınmıştır.

Disk yüzeyleri optik mikroskopla incelenerek transfer filmi araştırılmıştır. Yüzeylerin optik mikrofotoğrafları çekilmiştir. Tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) ile aşınma mekanizmalarının araştırılması için, aşınmış pim yüzeyleri incelenmiştir. Eksenel R_a değeri $0.3 \mu\text{m}$ ve $3 \mu\text{m}$ olan karşı yüzeylerle eş çalışmış polimer pimlerin, çeşitli büyütme oranlarında yüzey SEM mikrofotoğrafları alınmıştır.

Aşınma hızı, sürtünme katsayısı ve pürüzlülük parametrelerinin belirsizlikleri hesaplanmıştır. Aşınma hızının belirsizliğinde, aşınma hacmi-kayma mesafesi eğrisine uydurulan doğrunun eğiminin belirsizliği hesaba katılmıştır. Ayrıca, deneylerde polimer numunenin tartımı esnasında nem kapmasının getirdiği belirsizlik tespit edilmiş ve aşınma hızının belirsizlik bütçesine katılmıştır.

Optik mikrofotoğraflardan, ekstrüzyon PA 6 ve döküm PA 6'nın karşı yüzeyde sürekli bir transfer filmi oluşturduğu gözlenmiştir. PET ise karşı yüzeyde çok seyrek bir transfer filmi oluşturmaktadır. PP ve POM karşı yüzeyde transfer filmi oluşturmamıştır.

SEM mikrofotoğraflarından, POM aşınma yüzeyinde eksenel $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ için yorulma çatlakları görülmüştür. Eksenel $R_a = 3 \mu\text{m}$ 'da tüm polimerler için abrazif aşınmanın belirtisi olan derin izler, yırtıklar ve şekilsiz parçacıklar halinde aşınma döküntüleri görülmüştür. Ayrıca ekstrüzyon ve döküm PA 6 aşınma yüzeylerinde, yüksek sürtünme katsayısından kaynaklanan yerel erime izleri tespit edilmiştir.

Deneyler sonunda hesaplanan aşınma hızı ile R_{av} arasındaki bağıntının, Hollander ve Lancaster'in yorulma aşınması modeline uyup uymadığı incelenmiştir. Bu incelemede disk yüzeyindeki pürüz tepelerinin yarı silindir şeklinde olduğu kabul edilmiş ve silindir yarıçapı olarak eksenel pürüzlülük profillerinden hesaplanan R_{av} değeri alınmıştır. PP ve POM'un yaklaşık eksenel $R_a = 0.1 - 1 \mu\text{m}$ aralığında bu modele uygun sonuçlar verdiği görülmüştür. Ekstrüzyon PA 6 ve döküm PA 6 için elde edilen sonuçlar ise, karşı yüzeyde sürekli bir transfer filmi oluşması sebebiyle bu modele uygun değildir. PET için elde edilen sonuçların ise ne yakın ne uzak olduğu söylenebilir.

Abraziv aşınma için bir model sunulmuştur. Bu modelde ara yüzeydeki gerilme, sürtünme katsayısı ve polimerin kopma gerilmesi ile aşınma hızı arasında basit bir bağıntı kurulmaktadır. Deneylerde, abraziv aşınmanın etkili olduğu yüksek pürüzlülük değerlerinde (eksenel $R_a > 1 \mu\text{m}$), aşınma hızının $(1+4\mu^2)^{1/2}/\sigma$ parametresiyle artıp artmadığı incelenmiştir. POM'a ait deneysel veriler hariç tutulduğunda, genel olarak aşınma hızının bu parametrenin artmasıyla arttığı görülmüştür.

Deneyler sonucunda PET, POM ve PP'nin daimi rejimdeki aşınma hızının, disk yüzey pürüzlülüğüyle arttığı görülmüştür. Ancak ekstrüzyon PA 6 ve döküm PA 6 için eksenel $R_a = 0 - 1.5 \mu\text{m}$ aralığında aşınma hızı artmakta, $1.5 - 3 \mu\text{m}$ aralığında ise aşınma hızı azalmaktadır. Bu azalmanın, disk yüzeyinde sürekli bir transfer filmi oluşmasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

PET dışında tüm polimerlerde karşı yüzey pürüzlülüğü arttıkça sürtünme katsayısı azalmıştır. Ekstrüzyon PA 6 ve döküm PA 6 için bu azalma kullanılan diğer polimerlerden çok daha yavaştır.

EFFECT OF COUNTERFACE ROUGHNESS ON THE WEAR OF POLYMERS

SUMMARY

In this study, effect of counterface roughness on the wear of polymers is investigated in dry sliding of some polymers against stainless steel discs. In a pad on disc wear machine, five different polymers were tested against stainless steel discs which had various roughness values. Disc material is AISI 416 C stainless steel (% 0.15 C, % 1.25 Mn, % 1 Si, % 13 Cr, % 0.04 P, % 0.03 S). Hardness is 52 HRC. Cylindrical surfaces of discs in 60 mm diameter were used as wearing surfaces. Polymer specimens were produced as cylindrical pins in 10 mm diameter. One of end faces of each pin was formed in the same radius with the discs. The polymers which were used in this study are polyamide 6 (PA6) extruded, cast polyamide 6, polyethylene terephthalate (PET), polyoximethylene (POM), polypropylene (PP).

In all experiments, normal force and sliding speed is constant. The variable parameter is the surface roughness of the discs. Roughness of the discs was produced by cylindrical grinding. Very low roughness values (mean of profile deviations $R_a < 0.15 \mu\text{m}$) were produced by using SiC emery paper (number 280-320) after grinding. R_a values of discs in axial direction are varying from almost $0.08 - 3 \mu\text{m}$.

In wear machine used, normal force is obtained by dead weights. Friction force is measured by a force transducer which attached to the pin holder. Rotational speed is measured by a tachometer and the number of revolution is counted by the test machine. Wearing mass is obtained by weighing the specimen pins precisely. Surface temperature of the discs is measured by a contact thermometer at the end of each experiment period.

Surface roughness of the discs was measured both in axial (perpendicular to grinding traces) and circumferential direction (parallel to grinding traces) and R_a parameter was calculated.

Roughness instruments don't compute R_{av} parameter which is the average radius of curvature of the asperities. So R_{av} was calculated by numerical analysis by using raw surface profile data obtained from roughness measurements. A VBasic program was prepared to compute R_{av} .

In order to illustrate the variation of wear rate and coefficient of friction with counterface roughness, axial roughness measurements were chosen.

Transfer films were investigated by observing the disc surfaces with optical microscope. Optical microphotographs were taken. Worn polymer pin surfaces were examined by a Scanning electron microscope (SEM) to investigate wear mechanisms. SEM microphotographs of the pins which worked against counterfaces with an axial roughness $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ and $R_a = 3 \mu\text{m}$ were taken with various magnification ratios.

Uncertainties of wear rate, coefficient of friction roughness parameters were calculated. In the uncertainty budget of wear rate, the uncertainty of the slope of the regression line which was fitted to the wear volume-sliding distance curve, was added. In addition, the uncertainty of taking moisture of polymer pins while weighing was determined, and it was added to the uncertainty budget.

Extruded PA 6 and cast PA 6 were observed to form a continuous transfer film on the counterface, as seen from optical microphotographs. PET was observed to form a discontinuous transfer film. PP and POM were observed to form no transfer film on the counterface.

According to the SEM microphotographs, for axial $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ some fatigue cracks were observed on the wear surface of the POM pins. For axial $R_a = 3 \mu\text{m}$, for all polymers, traces which were evident of abrasive wear, tearing and wear debris which was irregularly shaped particles were observed. Additionally, some evidents of local melting were observed on the wear surface of the extruded and cast PA 6 pins caused by high friction coefficients.

It was investigated whether the relationship between wear rate and R_{av} obtained from the experiments, conforms to the “fatigue wear model” of Hollander and Lancaster. In this investigation, asperities on the disc surfaces were assumed to have hemi-cylindrical shape and the radius of the hemi-cylinder is taken as R_{av} calculated from axial roughness profiles. It was seen that the results obtained for PP and POM for axial $R_a = 0.1-1 \mu\text{m}$, conform the fatigue wear model. The results obtained for extruded PA 6 and cast PA 6 do not conform to the fatigue wear model because of the transfer film formation on the counterfaces. The result obtained for PET can't be said that it conforms or not.

A model was given for abrasive wear. According to the model, a simple relation is formed among interfacial stress, coefficient of friction, the yield stress and wear rate. In the experiments, for high roughness values that abrasive wear is effective ($R_a > 1 \mu\text{m}$) it was investigated whether wear rate increases with the parameter $(1+4\mu^2)^{1/2}/\sigma$ or not. If the experimental data of POM is left off, it was generally seen that wear rate increases with this parameter.

According to the results of experiments it was seen that steady state wear rates of PET, POM and PP increase with increasing surface roughness of the discs. But for extruded PA 6 and cast PA 6, wear rates increase in the range of axial $R_a = 0 - 1.5 \mu\text{m}$ and decrease in the range of $1.5 - 3 \mu\text{m}$. It is estimated that the decrease in wear rate is caused by the continuous transfer film formation on the counterface.

For all polymers except PET, when counterface roughness increases coefficient of friction decreases. The coefficients of friction of extruded PA6 and cast PA6 decrease much more slowly than others.

1. GİRİŞ

Polimer malzemeler günümüzde makina elemanı olarak yaygın kullanıma sahiptir. Aşırı yüklerin söz konusu olmadığı dişli çarklar, kaymalı yataklar, takım tezgahı kızak kaplamaları, eklem protezlerinin yatakları ve imalat sanayinde rastlanan birçok sürtünme elemanı polimerlerden yapılmaktadır. Bu sebeple polimer makina elemanlarının aşınma özelliklerinin araştırılması gerekli olmuştur. Polimerlerin metal karşı yüzeyle eş çalışmasında, aşınmayı etkileyen en önemli faktörlerden biri karşı yüzeyin pürüzlülüğüdür.

Bu çalışmada, uygulamada sıkça kullanılan 5 adet saf polimerin paslanmaz çelik karşı yüzeyle kuru sürtünmesinde, karşı yüzeyin pürüzlülüğünün aşınmaya etkisi incelenmektedir. Polimerler ekstrüzyon poliamid (PA 6), döküm poliamid, polietilen tereftalat (PET), polioksimetilen (POM), polipropilen (PP)'dir. Deneyler için PLINT marka çok amaçlı papuç-disk aşınma cihazı kullanılmıştır. Bu cihazda aşındırma 60 mm çaplı paslanmaz çelik disklerin silindirik yan yüzeyinde yapılmaktadır. 10 mm çaplı silindir şeklinde hazırlanan polimer pimlerin alın yüzeyi, disk ile uyumlu olması için 60 mm çapında işlenmiştir.

Takdim edilen tez çalışmasının amacı, polimerlerin aşınmasında karşı yüzey pürüzlülüğünün etkisinin araştırılması konusundaki çalışmalara katkı yapmaktır. Tez çalışmasının bu konudaki diğer çalışmalardan farklılığı şöyle özetlenebilir:

- 1) Hız ve basınç değerlerinin farklı olması. Bu çalışmada kayma hızı 0.7 m/s, nominal basınç 0.46 MPa'dır.
- 2) Deney düzeneğinin farklılığı. Bu çalışmada deney tertibatı papuç-disk sistemidir. Bu konuda yapılan çoğu çalışmada pim-disk tertibatı kullanılmıştır.
- 3) Seçilen karşı yüzey pürüzlülüğü aralığı yaklaşık $R_a = 0.08 - 3 \mu\text{m}$, $R_z = 0.6 - 19 \mu\text{m}$ gibi geniş bir aralıktır.

- 4) Yüzey pürüzlülüğü daima en büyük değeri verecek yönde ölçülür (işleme izlerine dik) ve yüzey bu değerle anılır. Bu çalışmada ise, hem işleme izlerine paralel hem dik yöndeki pürüzlülük ölçülmüştür.
- 5) Literatürde aşınmanın yorulma modeliyle açıklandığı çalışmalarda yüzeyde işleme çizgileri rastgele yönlerde dir. Bu tez çalışmasında ise işleme izleri hep çevresel yöndedir ve yüzey rastgele değil “yönlenmiş” pürüzlülüğe sahiptir.
- 6) Aşınmanın, yorulma modeliyle izah edildiği diğer çalışmalarda karşı yüzey tepelerinin “yarıküre” olduğu kabul edilmiştir. Bu çalışmada ise pürüzlülük yönlenmiş olduğundan, tepeler ince uzun sıradağ şeklindedir. Bu nedenle “yarı silindir” tepe kabulü yapılmıştır. Ayrıca sözkonusu çalışmalarda ortalama tepe yuvarlaklık yarıçapı R_{av} istatistiksel metodla hesaplanmıştır. Bu çalışmada ise sayısal analiz ile hesaplanmıştır.
- 7) Aşınma hızı ve sürtünme katsayısının belirsizliğinin hesabı için bir yöntem önerilmiştir. Bu hesaplamada, pek çok deney parametresinin belirsizliğinin yanında, polimer numunelerin tartım esnasında havadan nem alması ve aşınma miktarı-kayma mesafesi eğrisinin eğiminin belirsizliği de bir belirsizlik bileşeni olarak kullanılmıştır.

1.1 Literatür Araştırması

Polimerlerin sürtünmeyle aşınmasında metal karşı yüzeyin pürüzlülüğünün etkisini, transfer filminin oluşumunu ve etkisini araştıran çalışmalar mevcuttur. Aşağıda bu çalışmalar özetlenmektedir:

Rhee ve Ludema [1] polimerlerin transfer film oluşumunun mekanizmasını incelemişlerdir. Polimerlerin aşınmasının azaltılmasında transfer film oluşumunun etkisini tartışmışlardır. Pürüzlü yüzeylerde transfer film oluşumunun daha kolay olduğunu göstermişlerdir.

Hollander ve Lancaster [2] bir grup polimerle çalışarak, polimerlerin aşınma hızının karşı yüzey tepelerinin ortalama yuvarlaklık yarıçapıyla (R_{av}) ters orantılı olarak değiştiğini göstermişlerdir. R_{av} - Aşınma hızı değişiminin “yorulma aşınması” teorisine uyduğunu ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar karşı yüzeyin deney esnasında değişime uğrama ihtimalini ortadan kaldırmak için, polimer numuneyi

karşı yüzeyin aynı noktasından sadece bir kere geçirmişlerdir. Ayrıca karşı yüzeyin deney esnasındaki modifikasyonunun aşınma hızına etkisini incelemişlerdir.

Ovaert ve Cheng [3] PEEK ve PEEK+karbon elyafı kompozitinin farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip yumuşak çelikten karşı yüzeylerle aşındırılmasını incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün belli bir değerinde arayüzey film oluşumu (interfacial film formation) sebebiyle bir aşınma hızı minimumunun oluştuğunu göstermişlerdir. Ayrıca aşınma hızı ile ortalama tepe yuvarlaklık yarıçapı (R_{av}) arasındaki ilişkinin Hollander ve Lancaster'in yorulma aşınması modeline uygun olduğunu göstermişlerdir. Bu ilişkinin yorulmayla izahının, karşı yüzeyde ileri derecede modifikasyon olana kadar geçerli olduğunu göstermişlerdir.

Jain ve Bahadur [4] sürtünen iki yüzeydeki tepelerin etkileşimi sonucu, yorulma olayına dayanan bir aşınma denklemi elde etmiştir. Araştırmacılar, yüzeyde normal ve teğetsel gerilmeler altında oluşan 3 asal gerilmeden birinin çekme gerilmesi olduğu ve bu gerilmenin, yorulma çatlaklarının oluşmasından ve ilerlemesinden sorumlu olduğunu düşünerek bir denklem elde etmişlerdir. Bu denkleme göre aşınma hızının, zayıf malzemenin yorulma özellikleri, normal yük, kayma hızı, sürtünme katsayısı, her iki yüzeyin elastisite modülü, tepe ihtimal yoğunluğu, tepe yuvarlaklık yarıçapı, tepe yüksekliklerinin standart sapması ve tepe yüksekliklerinin dağılımına bağlı olduğunu göstermişlerdir. Araştırmacılar denkleme, aşınma hızının bu parametrelerle değişiminin deneysel sonuçlara uyduğunu göstermişlerdir.

Bellow ve Viswanath [5] bir Pim-disk cihazında aşınan polimer hacmini çalışma şartları, polimer özellikleri ve karşı yüzey pürüzlülüğü cinsinden ifade edecek bir eşitliği boyutsal analiz yaparak geliştirmişlerdir. Bu eşitlikte aşınma hacminin diğer değişkenlerle lineer ve lineer olmayan ilişkisi hesaba katılmış, lineer olmayan ilişkinin değişkenler arasında daha iyi bir korelasyon sağladığını tespit etmişlerdir.

Warren ve Eiss [6] PVC, PCTFE ve PA 6.6'nın, yumuşak çelikten taşlanmış karşı yüzeyle eş çalışması esnasında oluşan polimer aşınmasını incelemişlerdir. Karşı yüzey tepelerinin polimer yüzeyine tam batması hali için, her polimerin karşı yüzey tepelerine belli bir açıyla sıvandığını ve bu açının, deneyde kullanılan polimerlerin kesilme enerjisiyle orantılı olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca kısmi batma hali için, polimer aşınmasının batma derinliğiyle ayrıklaştırılabileceğini bulmuşlardır.

Araştırmacılar batma derinliğinin, polimer akma gerilimi ve karşı yzeyin ‘‘taşıma alanı eğrisinin’’ bir fonksiyonu olduğunu gstermişlerdir.

Friedrich, Karger-Kocsic ve Lu [7], elik karşı yzey pürüzlülüğü ve sıcaklığın değişmesiyle, PEEK, PEK ve PEEK kompozitlerinin aşınma ve srtünme özelliklerinin nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Karşı yzey pürüzlülüğünün katkısız PEEK’de, katkılıya oranla daha çok etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Denenen polimerler için deney sıcaklığının artmasının, aşınma hızının artmasına ve srtünme katsayısının azalmasına sebep olduğunu bulmuşlardır. Araştırmacılar denenen polimerler için, aşınma ve srtünme performansı açısından, karbon elyafı katkının cam elyafı katkıdan, daha faydalı olduğunu belirtmişlerdir. Saf PEEK için, kayma yönünün işleme izlerine dik olduğu durumda aşınma hızının, pürüzlülüğün artmasıyla kayda değer bir değişim göstermediğini; kayma yönünün işleme izlerine paralel olduğu durumda ise, artan pürüzlülükle birlikte aşınma hızının büyük miktarda arttığını ve işleme izlerine dik kayma halindeki çok üstüne çıktığını gstermişlerdir. Bunun sebebinin özellikle transfer filmi oluşumu olduğunu belirtmişlerdir.

Barrett, Stachowiak ve Batchelor [8], çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE)’in paslanmaz çelikten karşı yzeyele aşındırılmasını incelemişlerdir. Deneylerde kayma hızını 1.25 - 10 m/s arasında değiştirirken, karşı yzeyin pürüzlülüğünü $R_a = 0.07 - 0.53 \mu\text{m}$ arasında değişirmişlerdir. Srtünmeden kaynaklanan ısınmayı hava jetiyle kontrol etmişlerdir ve yzey sıcaklığını kızılötesi sıcaklıköler ile ölçmüşlerdir. UHMWPE’nin aşınmasının sıcaklıkla değiştiği ve kritik bir sıcaklık değerinden sonra, polimer tabakalarının yumuşama sebebiyle aniden ayrıldığını belirtmişlerdir. Aşınmanın aynı zamanda yzey pürüzlülüğüyle de değiştiğini ve genelde R_a arttıça aşınma hızının arttığını gstermişlerdir. Araştırmacılar aşınma minimumunun, düşük ve orta kayma hızında görüldüğünü ve yüksek kayma hızlarında ise yzey pürüzlülüğünün aşınmaya etkisinin küçük olduğunu bulmuşlardır. Aşınmış pimlerin ve disk yzeyinin SEM mikrofotoğraflarının, yüksek kayma hızında polimerin eridiğini ve yüksek pürüzlülük değerlerinde de abrazif aşınma olduğunu ortaya koyduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca temas sıcaklığının artması, ister kayma hızının artmasından oluşsun, ister diskin ısıtılmasından oluşsun, aşınma hızının hemen hemen aynı değere ulaştığını gstermişlerdir. Erimenin olduğu yüksek sıcaklıklarda, artan pürüzlülükle

birlikte sürtünme katsayısının da biraz artma eğilimine girdiğini göstermişlerdir. Bunun tahmini sebebini “sivri pürüz tepelerinin erimiş polimer tabakasının daha viskoz olan alt kısımlarına saplanması” şeklinde yorumlamışlardır. Aşınma minimumunu, ağırlıklı olarak, iki yüzey arasında oluşan “3. cisime” bağlayarak izah etmişlerdir.

Birkett ve Lancaster [9] PTFE ve cam elyafı katkılı fenolik reçineden oluşan polimer yatak elemanının, farklı yüzey pürüzlülüğü değerleri için çeşitli karşı yüzey malzemeleriyle aşınmasını incelemişlerdir. Deneylerde yumuşak ve sertleştirilmiş paslanmaz çelik; bakır ve kadmiyum ile kaplanmış çelik; azot, bakır ve kadmiyumla iyon ekme işlemi (implanted) görmüş çelik; vakumda TiN ve TiC kaplanmış çelik; nitrojen, boron sülfür, Sn-Cu ve Sn-Sb ile işlem görmüş çelik; ve seramikle kaplanmış çelik yüzeyler kullanılmıştır. Araştırmacılar polimerin aşınmasını etkileyen en önemli karşı yüzey özelliğinin sertlik ve pürüzlülük olduğunu, yüzey malzemesinin çok önemli olmadığını göstermişlerdir. Yumuşak karşı yüzeylerin, hemen çizilip pürüzlülüğünün arttığını, bu sebeple polimerin aşınma hızının yükseldiğini bulmuşlardır. Sert ve pürüzsüz karşı yüzeylerin ise en düşük polimer aşınma hızını verdiğini göstermişlerdir.

Ovaert ve Ramachandra [10] özel bir yüzey çizme cihazı kullanarak sertleştirilmiş çelik disklerde kontrollü yüzey topoğrafyası elde etmişlerdir. Bunları düşey pim disk cihazında PAI ve HDPE pimlerin aşındırılmasında kullanmışlardır. Deneylerde, yüzey pürüzlülüğü arttıkça aşınma hızının arttığını ve yüzeydeki işleme izleri (oluklar) arasındaki mesafenin aşınma hızına anlamlı bir etkisinin olmadığını saptamışlardır. Ayrıca düşük pürüzlülük değerlerinde kararlı ve yüzeye iyi yapışmış bir transfer filmi oluşurken, yüksek pürüzlülük değerlerinde kararsız ve yüzeye zayıfça yapışmış transfer filmlerinin oluştuğunu bulmuşlardır.

Ramachandra ve Ovaert [11] kontrollü yüzey pürüzlülüğüne sahip diskleri, pim disk makinasında PEEK'nin aşındırılmasında kullanmışlardır. Bu deneylerde yüzeydeki işleme izlerinin kayma doğrultusuyla yaptığı açıyla, aşınma hızı arasında kayda değer bir bağlantı bulamamışlardır. Aşınma hızının oluklar arası mesafeye (oluk dalga boyu) bağlı olup olmadığı ise bu deneylerle anlaşılamamıştır. Deneylerde karşı yüzeyde PEEK birikintilerinin çapının 400 µm'yi geçmediğini göstermişlerdir. Bu boyutu geçmemesinin sebebi için iki tahmin yapmışlardır: Birincisi PEEK ile karşı yüzey arasındaki adezyon kuvvetlerinin zayıf olması, ikincisi yüzey topoğrafyasının

özellikleriyle aşınma döküntülerinin şekil ve boyutları arasındaki bağlantıdır. Araştırmacılar deneylerde artan pürüzlülükle aşınma hızının da arttığını göstermişlerdir. Kayma doğrultusuna dik oluk hali için elde edilen aşınma hızının, kayma doğrultusuna paralel oluk için elde edilen aşınma hızından genellikle daha fazla olduğunu bulmuşlardır.

Elliot, Fisher ve Clark [12] saf ve katkılı PEEK'nun aşınma ve sürtünmesini, karşı yüzeyin pürüzlülüğü ve pürüzlülükteki değişime bağlayarak incelemiştir. Deneyde, 100P ve 450G olmak üzere iki tip saf PEEK kullanmışlardır. 450G'nin molekül ağırlığı 100P'den daha fazladır. Deneyde APC2 ismiyle anılan karbon fiber örgülü katkılı PEEK de kullanmışlardır. Karşı yüzey olarak taşlanmış ve parlatılmış paslanmaz çelikten diskler hazırlamışlardır. 100P için taşlanmış yüzeyin aşındırma hızının, parlatılmış yüzeyinkinden 5 kat fazla, sürtünme katsayısının ise parlatılmıştan daha az olduğunu bulmuşlardır. 450G'nin aşınma hızının 100P'den daha az olduğunu, aşınma hızı ve sürtünmenin pürüzlülüğünden bağımsız olduğunu göstermişlerdir. APC2'nin aşınma hızını ise grafitin oluşturduğu yağlama sebebiyle 100P ve 450G'den daha düşük olarak bulmuşlardır. Ayrıca araştırmacılar APC2 pimde, taşlanmış yüzeyin aşındırma hızının parlatılmış diskten %50 fazla olduğunu, tüm parlatılmış disklerde oluşan esas çiziklerin ilk 15 km'lik kayma sırasında oluştuğunu ve bu esnada pürüzlülüğün çok az arttığını göstermişlerdir. Araştırmacılar, APC2 deneylerinde (taşlanmış hal için) deney sonunda dahi, çizilme sebebiyle pürüzlülükte önemli bir artma görmemişlerdir. Ancak disk yüzeylerini mikroskopla incelediklerinde, taşlama tepelerinin kayma başlangıcına oranla törpülenerek yumuşatıldığını görmüşlerdir. Araştırmacılar bunun sebebinin karbon olduğu tahmininde bulunmuşlardır. Diğer polimerler için böyle bir şey saptamamışlardır.

Wen-Ruey Chang [13], hangi yüzey pürüzlülük parametrelerinin dinamik sürtünme katsayısını daha çok etkilediğini bulmak için, iki değişik ayakkabı malzemesi (Neolit ve Four S lastiği) ve dört değişik kontaminantın (4 değişik gliserol oranı), porselen kaplama malzemesi üzerinde kaymasını incelemiştir. Araştırmacı deneylerde, porselen üzerinde 22 farklı yüzey pürüzlülük parametresini ölçmüştür. Araştırmacı Neolit ile yapılan deneylerde dinamik sürtünme katsayısıyla en büyük korelasyona sahip parametrenin yüzey eğimlerinin aritmetik ortalaması Δ_a olduğunu göstermiştir. Four S ile yapılan deneylerde ise dinamik sürtünme katsayısıyla en büyük korelasyona sahip parametrelerin % 30 gliserol oranı için karşı yüzey tepeleri

arasındaki boşluğu ifade eden parametreler olduğunu; % 70 ve 80 gliserol oranı için yüzey eğimiyle ilgili parametreler olduğunu; % 99 gliserol oranı için tepe-çukur mesafesiyle ilgili parametreler olduğunu bulmuştur.

Wen-Ruey Chang [14], ayakkabı tabanı malzemesi olan neolitin, taş zemin kaplama malzemesi üzerinde kaymasını pim-disk cihazında incelemiştir. Araştırmacı deneyler sonunda R_{pm} ve Δ_a pürüzlülük parametrelerinin sürtünmeyle en büyük korelasyona sahip parametreler olduğunu tespit etmiştir.

Czichos [15] polimer-metal çiftinin kuru sürtünmesinde abrazyon aşınma için, arayüzeydeki bileşke gerilme, sürtünme katsayısı ve polimerin kopma gerilmesi ile aşınma hızı arasında basit bir teorik bağıntı kurmuştur. Araştırmacı $R_z = 1 \mu\text{m}$ metal yüzey pürüzlülüğü için deneysel sonuçların bu teorik yaklaşımla çok uyumlu olduğunu bulmuştur.

Franklin ve Kraker [16] ticari POM-%20 PTFE kompozitini, sertleştirilmiş takım çeliğinden karşı yüzeyle, ileri geri hareketli pim-levha aşınma cihazı kullanarak, aşınma deneylerine tabi tutmuşlardır. Karşı yüzeyde oluşan transfer filminin tipi ve bileşiminin karşı yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğunu bulmuşlardır. Araştırmacılar polimerin daimi rejimdeki aşınma hızının, hem karşı yüzey pürüzlülüğüne, hem de alıştırma sonrası transfer tabakasının özelliklerine bağlı olduğunu tespit etmiştir. Araştırmacılar ayrıca, kayma yönüne dik doğrultuda taşlanmış karşı yüzey için, $R_a = 0.085-0.095 \mu\text{m}$ civarında daimi rejim aşınma hızında bir minimum bulmuşlardır.

Mens ve Gee [17] 6 saf polimeri (PA 66, POM, PET, PEEK, PPS, Polieterimid) ve bu polimerlerin PTFE ve/veya cam elyafı katkılı hallerini hava ve suda çelik karşı yüzey ile aşınma testine tabi tutmuşlardır. Araştırmacılar PTFE katkısının havadaki deneylerde genellikle aşınmayı azalttığını, sudaki deneylerde ise bir faydasının olmadığını bulmuşlardır. Cam elyafı katkısının ise havada ve suda yapılan deneylerde aşınmayı azaltmadığı, hatta bazen artırdığını göstermişlerdir.

Clarke ve Allen [18] 5 polimeri (UHMWPE, PA6/MoS₂, PAI, PETP ve POM) su içinde paslanmaz çelik karşı yüzey ile aşınma testine tabi tutmuşlardır. Tüm polimerlerin aşınma hızlarının, R_a 'nın artmasıyla önce hızlı bir şekilde arttığı, $R_a = 0.6 \mu\text{m}$ değerinden sonra ise çok daha yavaş bir şekilde arttığını tespit etmişlerdir.

Marcus ve arkadaşları [19] UHMWPE'i paslanmaz çelik karşı yüzeyle, ileri geri hareketli pim-levha aşınma cihazında, suyla yağlama şartları altında aşınma deneyine

tabi tutmuşlardır. Deneylede hem kayma yönüne paralel taşlanmış, hem kayma yönüne dik taşlanmış karşı yüzeyler kullanmışlardır. Araştırmacılar, her iki taşlama yönü için, UHMWPE'nin daimi rejimdeki aşınma hızının hemen hemen aynı mertebede olduğunu bulmuşlardır. Kayma yönüne dik taşlama hali için aşınma hızının daha yüksek olmamasının sebebinin, Ra değerinin deney esnasında azalması ve bu hal için oluşan transfer filminin karşı yüzeye iyi yapışmış ve sürekli bir film olması olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, kayma yönüne paralel taşlama halinde oluşan transfer filminin süreksiz (parçalı) ve yüzeye zayıf yapışmış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Bellow ve Viswanath [20] Delrin, HDPE, PVC, Rulon ve Teflon'u Pim-disk cihazında çelik yüzey ile aşınma deneyine tabi tutmuşlardır. Araştırmacılar, bu polimerler için uygulanan deney şartlarında aşınma ve sürtünme arasında bağlantı olmadığını tespit etmişlerdir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün polimerlerin aşınma davranışını etkilediğini göstermişlerdir.

Bahadur ve Gong [21] CuS katkı oranının poliamidin aşınmasını nasıl etkilediğini, karşı yüzey pürüzlülüğü ve malzemesinin saf poliamid ve poliamid+CuS kompozitinin aşınmasına nasıl etki yaptığını incelemişlerdir. Çalışmada bu etkileri, transfer filminin incelenmesi yoluyla araştırmışlardır. Saf poliamidin aşınma hızının, R_a 'nın $0.04 \mu\text{m}$ 'den $0.30 \mu\text{m}$ 'ye kadar artmasıyla arttığını, ancak kompozitin aşınma hızının, R_a $0.04 \mu\text{m}$ 'dan $0.11 \mu\text{m}$ 'a kadar arttığında yaklaşık aynı kaldığını bulmuşlardır. Karşı yüzeyin takım çeliği yerine cam olması durumunda hem saf hem katkıli poliamidin aşınma hızının önemli miktarda arttığını belirlemişlerdir. Deneylede hem katkıli hem katkısız poliamid için transfer filmi oluştuğunu, ancak $R_a = 0.06-0.11 \mu\text{m}$ mertebesindeki pürüzlülük için transfer filminin üniform iken $R_a = 0.30 \mu\text{m}$ gibi daha kaba pürüzlülüklerde transfer filminin parçalı olduğunu tespit etmişlerdir. Yüksek pürüzlülükte saf poliamid için parçalı transfer filminin metal tepelerini iyice sivrileştirerek abrazif aşınmayı artırdığını, kompozitte ise ekstra bir çıkıntı oluşturmadığını, ancak tepeleri örtmeye de yetmediğini göstermişlerdir. Araştırmacılar, saf ve katkıli poliamidde, yüksek pürüzlülükte transfer filminin daha geç oluştuğunu bulmuşlardır. Ayrıca, CuS katkısının, transfer filminin çeliğe iyice tutunmasını sağlamasına rağmen, cama tutunmasında bir etkisinin olmadığını tespit etmişlerdir.

Bahadur ve Gong [22, 23] yaptıkları çalışmalarda PEEK'nin transfer film ve aşınma özelliklerine bakır bileşimlerinin dolgu olarak etkilerini incelemiştir. CuO, CuS ve CuF₂ gibi inorganik dolguların PEEK'un aşınmasını büyük ölçüde azalttığı fakat sürtünme katsayısını arttırdığı sonucuna varmışlardır.

Bahadur [24] PEEK, PA 11 ve katkı PA 11'in aşınma deneyi sonuçlarını kullanarak transfer filminin oluşumu ve etkilerini incelemiştir. Polimerin, karşı yüzeye yapışma yoluyla ve karşı yüzey tepeleri arasına sıkışması yoluyla tutunarak transfer filmini oluşturduğunu belirtmiştir. Araştırmacı, çözünen ve karşı yüzeye yapışmayı artırıcı reaksiyon ürünleri çıkaran inorganik katkıların polimer aşınmasını azalttığını, transfer filminde süreksizlik oluşturan katkıların ise aşınmayı artırdığını tespit etmiştir. Ayrıca transfer filmi içindeki polimer tabakaları arasındaki kohezyonun ve transfer filminin polimer ve karşı yüzeyin arasını ayırma kabiliyetinin aşınmayı etkilediğini tespit etmiştir. Araştırmacı, aşınma olayının ya polimer kütleden doğrudan malzeme kaybı, ya da karşı yüzeyden filmin soyulması şeklinde gerçekleştiğini belirtmiştir.

Aşağıda aşınma mekanizmalarının incelenmesiyle ilgili çalışmalar özetlenmektedir:

Kar ve Bahadur [25] PTFE, yüksek yoğunluklu polietilen HDPE ve polioksimetilen (POM)'un çelik karşı yüzeyde aşınmasında, aşınmanın mikromekanizmalarını SEM, TEM (geçirimsiz elektron mikroskobu) ve diferansiyel termal analiz cihazlarıyla incelemiştir. Araştırmacılar düşük hızlarda erimeye rastlamazken yüksek hızlarda PTFE dışındaki polimerlerde yumuşama veya erime görmüşlerdir. Çok düşük hızlarda tüm polimerler için, kayma yüzeyini kaplayan ince filmler tespit etmişlerdir. Araştırmacılar "polimer katmanlarının birbirinden ayrılması (interlamellar shear)" mekanizmasıyla aşınmanın olduğu tahmininde bulunmuşlardır.

Jain ve Bahadur [26] polimetilmetakrilat (PMMA), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve polivinilklorid (PVC)'yi leplenmiş çelik bir diskle aşınma deneyine tabi tutmuşlar ve polimer yüzeyindeki aşınma ve yorulma izlerini SEM ve TEM cihazlarıyla incelemiştir. Araştırmacılar, bir aşınma parçacığının yüzeyden ayrılma mekanizmasının, yorulma olaylarında rastlanan "hasar birikmesinden" ibaret olduğunu göstermişlerdir.

Clerico ve Patierno [27] yarı kristal polimer kompozitlerinin aşınma mekanizmasının metallerdeki tabakalar halinde aşınma (delamination wear) mekanizmasına benzediğini göstermişlerdir.

Rajesh ve arkadaşları [28] çeşitli poliamidleri silikon karbit karşı yüzey ile aşınma deneyine tabi tutmuşlardır. Araştırmacılar, $CH_2/CONH$ oranının, polimerin pek çok mekanik özelliğini, dolayısıyla abraziv aşınma direncini etkilediğini gözlemişlerdir.

Yüzey pürüzlülüğü karakterizasyonu ile ilgili kaynaklar ise aşağıda özetlenmiştir:

Thomas [29] bu çalışmada çeşitli yüzey pürüzlülüğü parametrelerini özetlemiştir. Parametrelerin kullanımı, ölçüm ve değerlendirme şartlarının farklılığının getirdiği problemlerden de bahsetmiştir. Deneylerimizde, ortalama tepe yuvarlaklık yarıçapını ifade eden R_{av} parametresinin yüzey profili verilerinden sayısal analiz yoluyla hesaplanması, bu çalışmadan alınarak uygulanmıştır.

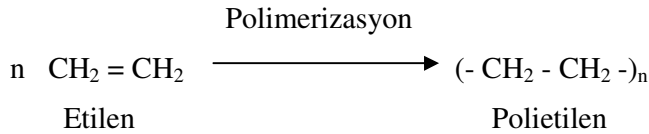
Whitehouse [30] pürüzlülük profillerinde ortalama yuvarlaklık yarıçapı hesabının tam formül ve yaklaşık formül ile yapılabileceğini belirtmiştir. Ayrıca taşlama işleminde yüzey pürüzlülüğüne etki eden faktörleri açıklamıştır.

2. POLİMER MALZEMELER

2.1 Polimerlerin Tanımı ve Sınıflandırılması

Polimerler, çok sayıda aynı veya farklı atomik grupların kimyasal bağlarla bağlanarak oluşturduğu uzun zincirli, başka bir ifadeyle yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir.

Sentetik polimerler genellikle, çok sayıda tekrarlanan “monomer” denilen basit birimlerden oluşur. En basit sentetik polimer olan polietilen üzerinde bu tanım açıklanabilir:



Yukarıda görüldüğü gibi etilen monomerinin polimerizasyonu ile bu monomeri çok sayıda içeren polietilen elde edilmektedir. Burada “n” polimerizasyon derecesi olup, bir polimer zincirindeki monomer sayısını gösterir. n, 10000 hatta çok daha büyük değerlere çıkabilir. Bir polimerin yeterli fiziksel özelliklere sahip olabilmesi için molekül ağırlığının 10^4 'ün üzerinde olması gerekir. Molekül ağırlığı arttıkça polimerin elastisite modülü ve kopma gerilmesi yükselir.

I) Polimerler doğal veya sentetik olarak ikiye ayrılabilir. Doğal polimerlerin modifiye edilmesi ile elde edilen polimerlere de yarı sentetik polimerler denir.

II) Polimerler doğal veya sentetik olmasına bakılmaksızın kimyasal bileşimlerine göre de sınıflandırılabilir. Eğer bir polimer zinciri üzerinde dizili atomların hepsi aynı ise bu polimere “homozincir” polimer, farklı ise “heterozincir” polimer adı verilir.

III) Polimerler organik ve inorganik olarak da sınıflandırılabilir. Organik polimerler yapılarında karbon, hidrojen, oksijen,azot ve halojen atomlarını içerir (polieter, poliester, poliamid gibi). İnorganik polimerlerde ise karbon atomu yerine periyodik

çetveldeki IV-VI grup elementleri yer alır (örneğin alumina silikat). İnorganik polimerlerde ana zincirde bağ enerjileri genellikle organiklerden yüksektir. Dolayısıyla organik polimerlerden daha yüksek ısı ve mekanik dayanıklılık gösterirler.

IV) Polimerler yapılarına göre şöyle sınıflandırılabilir: Homopolimerler ve kopolimerler. Homopolimerler tek bir monomerin tekrarlanmasıyla oluşur (örneğin etilen). Kopolimerler ise iki monomerin tekrarından oluşur.

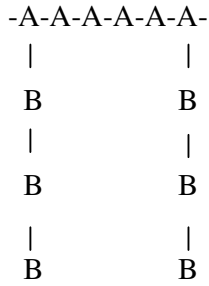
Kopolimerler ardışık, blok ve gelişigüzel yapıda olabilir:

a) Ardışık -A-B-A-B-A-

b) Blok -A-B-B-B-A-

c) Gelişigüzel -A-A-B-A-B-

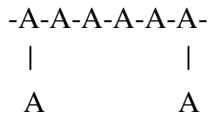
Eğer bir polimerde ana zincire başka bir monomerin tekrarlandığı yan gruplar takılmışsa bu bir “graft kopolimerdir”:



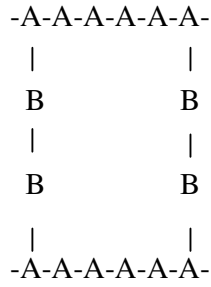
V) Polimerler bağ çeşitlerine göre şöyle sınıflandırılır: doğrusal, dallanmış ve çapraz bağlı.

a) Doğrusal -A-A-A-A-A-A-

b) Dallanmış



c) Çapraz bağlı



VI) Polimerler ısıya ve/veya çözücülere karşı gösterdikleri davranışa göre termoplastikler ve termosetler olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Termoplastikler ısı ve basınç altında yumuşar, akar ve böylece çeşitli formlarda şekillendirilebilir. Bağ şekli doğrusaldır. Tekrar tekrar eritilip şekillendirilebilirler. Ayrıca uygun çözücülerde çözünebilirler ve böylece çeşitli formlara dönüştürülebilirler. Termosetler ise çapraz bağlı, dolayısıyla erimez ve çözünmez polimerlerdir. Bir kere şekillendikten sonra tekrar çözmek ve eritmekle şekillendirilemezler.

VII) Polimerler fiziksel durumlarına göre amorf, kristalin ve yarı kristalin olarak sınıflandırılabilir. Amorf polimerlerde zincirler gelişigüzel şekilde birbirinin içine girmiş yün yumakları şeklindedir. Kristalin polimerlerde zincirlerin tamamı belli bir düzene girmiş veya kristallenmiştir. Yarı kristalin polimerlerde ise polimerik yapının bazı bölümleri kristalin, diğer bölümleri amorf yapıdadır [31].

2.2 Çalışmada Kullanılan Polimer Malzemeler

Deneylerimizde 5 farklı termoplastik kullanılmıştır. Aşağıda bu malzemelerin dahil olduğu polimer gruplarının özellikleri açıklanmaktadır [32].

Poliamid (PA):

Kristalin bir termoplastik olan poliamid, kalıplama, ekstrüzyon, çözelti, kaplama ve döküm olarak kullanılır. Tüm poliamid çeşitleri elyaf ve takviye malzemelerle kuvvetlendirilebilir. Poliamid 6 en düşük kristalinite derecesine sahiptir ve poliamid çeşitleri arasında en kolay işlenebilenidir.

Önemli bir poliamid çeşidi döküm poliamididir. Bir çok polimer atmosfer basıncında ısıtılınca döküm kalıbının tam şeklini alamaz, bu nedenle yüksek basınç kullanılır (ekstrüzyon veya enjeksiyon). Ancak aralarında poliamidin de bulunduğu bazı

polimerler atmosfer basıncında ısıtıldığında dökülebilen sıvı kıvamında bulunabilirler. İşte döküm poliamid, poliamid 6 monomerlerinden elde edilir. Bu monomerlerden çok karmaşık şekilli ve ağırlığı yüzlerce kilogramı bulan parçalar dökülebilir.

Poliamidin en büyük mahsuru su emme özelliğinin yüksek olmasıdır. Çok kullanılan poliamid çeşitlerinden biri olan PA 6'nın % 50 izafi nemde % 2.5'tan fazla su emme özelliği vardır.

Poliamidin özellikleri çeşitlerine bağlı olarak çok geniştir. Genelde çok iyi yorulma mukavemeti, iyi sürünme mukavemeti ve oldukça iyi darbe mukavemeti (kristalinite derecesine bağlı) vardır. Kimyasal dirençleri ve elektriksel özellikleri iyi düzeydedir. Polimerizasyon esnasında kontrol edilebilen kristalinite derecesi poliamidin rijitliğini, mukavemetini ve ısıya karşı dayanıklılığını etkiler. Genelde düşük kristalinite derecesi tokluğu, uzamayı ve darbe mukavemetini yükseltir, fakat çekme mukavemeti ve rijitliği azaltır.

İyi mekanik özelliklere ve katkılı halde iyi tribolojik özelliklere sahip olan poliamid, dişli çark, kam, kaymalı yatak, rulman kafesleri, kızak gibi elemanların imalatında kullanılır. Ayrıca aşınmaya karşı takım tezgahlarının kızaklarında kaplama olarak kullanılır.

Polipropilen (PP):

Alçak yoğunluklu bir polimerdir. Tabii olarak yarı saydam ve süt beyaz rengindedir. Çok iyi boyanma kabiliyeti vardır. Polipropilenin ısıl, kimyasal ve elektriksel özellikleri sınırlı düzeydedir. Orta derecede mukavemete sahiptir. Bu nedenle cam elyafı ile takviye edilebilir. Polipropilenden yapılmış parçaların ömrü 120°C'de 5 sene, 110°C'de 10 senedir. Pratikte saf, cam elyafı takviyeli, darbe mukavemeti artırılmış ve köpük çeşitleri vardır. Polipropilen parçaların imalinde genelde enjeksiyon, ekstrüzyon ve üfleme gibi yöntemler kullanılır.

Asetal homopolimeri (POM):

Asetal homopolimeri formaldehitin polimerizasyonu ile üretilir. Yüksek kristalinite derecesine sahiptir. Ergime sıcaklığı yüksektir. Yüksek çekme mukavemeti, rijitlik, rezilyans ve darbelere karşı orta tokluğa sahiptirler. Genellikle düşük uzamada diğer polimerlere göre daha yüksek çekme ve eğilme mukavemetleri vardır. Asetal

homopolimerleri tüm takviyesiz termoplastikler içinde en yüksek yorulma mukavemetine sahip olanıdır. Ayrıca sürünme özellikleri fevkalade iyidir; nem, yağlayıcı ve çözücüler bu özelliğini etkilemez. Sürtünme özellikleri iyi düzeydedir. Sürtünme ve aşınma özelliklerini iyileştirmek için PTFE elyafları ile takviye edilirler. Mekanik özelliklerinin yanında düşük nem emme kabiliyetine, organik çözücülere karşı yüksek mukavemete ve çok iyi boyut kararlılığına sahiptir. Asetal homopolimerleri piyasada, ekstrüzyon çubukları şeklinde bulunmaktadır. Bu ürünlerden, pirinç takımlar kullanılarak talaş kaldırma yoluyla çeşitli parçalar üretilebilir. Yukarıda sayılan bu özelliklerine bağlı olarak asetal homopolimerleri dişli çark, kam, yatak gibi yüksek zorlanmalara maruz makina elemanlarının imalinde kullanılmaktadır. Bu polimerler farklı viskozitede üretilebilmektedir. Örneğin ekstrüzyon için yüksek viskozite, enjeksiyon kalıplama için alçak viskozitede üretilmektedirler.

Polietilen tereftalat (PET):

Polietilen tereftalat, termoplastik bir poliesterdir. Bu polimer kristalin, yüksek molekül ağırlıklı ve mekanik özellikleri ile işlenme kabiliyetleri arasında çok iyi denge oluşturan bir malzemedir. Çok çabuk kristalleşebildiği ve akabildiği için kalıplama zamanı çok kısadır. PET'in iyi çekme, sürünme ve kimyasal mukavemeti; düşük su emme kabiliyeti ve buna bağlı olarak iyi boyut kararlılığı vardır. Kuvvetli asit ve bazların dışındaki kimyasal maddelere karşı çok dayanıklıdır. Çok iyi elektriksel özellikleri vardır. PET, cam elyafı ile kuvvetlendirilerek rijitliği ve sürünme mukavemeti iyileştirilebilir. Saf halde tokluğu çok iyi olan bir malzemedir, ancak çentiğe karşı hassastır. PET genellikle mukavemeti ve bilhassa darbe mukavemeti yüksek olması istenen parçaların imalinde kullanılır.

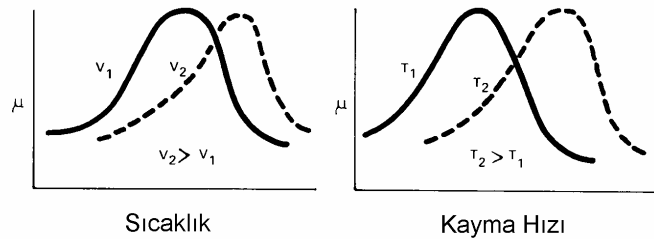
3. POLİMERLERİN SÜRTÜNME ve AŞINMA ÖZELLİKLERİ

3.1 Sürtünme Mekanizmaları

Polimerlerin sürtünme özellikleri elastik temas bölgesinden dolayı metal malzemelerden farklıdır. ψ plastiklik indeksi

$$\psi = \frac{E}{H} \left(\frac{\sigma_h}{R_{av}} \right)^{1/2} \quad (3.1)$$

E elastiklik modülü, H sertlik, σ_h pürüz yükseklikleri dağılımın standart sapması, R_{av} pürüz tepeliklerinin eşdeğer eğrilik yarıçapı ve $(\sigma_h/R_{av})^{1/2}$ yaklaşık olarak pürüzlerin ortalama eğimi olmak üzere yazılabilir. E/H oranı temas bölgesinde plastiklik boyutunu belirler, tabii yüzey özellikleri de önemlidir. Polimer malzemelerde E/H oranı 10 civarında, metaller için genellikle 100 ve daha büyüktür. ψ plastiklik indeksi polimerlerde metallerin yaklaşık onda biridir, temas çok pürüzlü yüzeyler hariç hemen hemen bütünüyle elastiktir [33]. Polimerlerin sürtünme katsayıları polimer veya metal temas durumunda kayma hareketi sırasında 0.1 ile 0.5 arasında değişir, bu aralığın dışında da değerler görülebilir. Sürtünme katsayısı normal yük, kayma hızı ve sıcaklıkla belirli bir miktar değişir. Şekil 3.1' deki grafikler polimerlerin sürtünme katsayıları üzerinde sıcaklık ve kayma hızının etkisini göstermektedir [34].



Şekil 3.1: Sıcaklık ve kayma hızının polimerlerin sürtünmesindeki tipik etkileri.

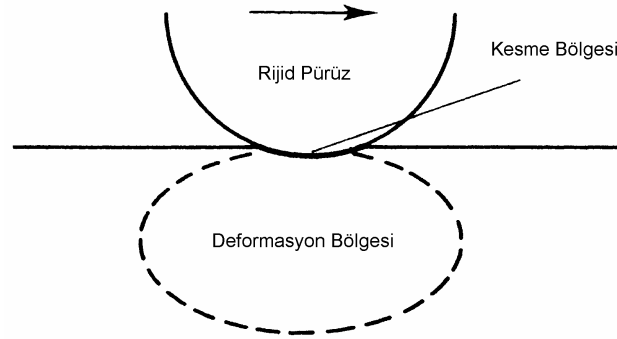
Polimerlerin birbirlerine göre izafi hareket halinde bulunan kuru yüzeyleri arasındaki sürtünmeyi, metallerde olduğu gibi, iki temel faktör etkiler. Birincisi, polimer ve karşı yüzeyin gerçek temas bölgesinde ortaya çıkan adezyon, ikincisi ise deformasyondur. Şekil 3.2’de sürtünmeye sebep olan iki bölge şematik olarak gösterilmiştir. Eğer bu iki faktörün birbirini etkilemediği farz edilirse sürtünme kuvvetinin iki farklı bileşenden oluştuğu varsayılarak aşağıdaki bağıntı yazılabilir:

$$F_s = F_{\text{adezyon}} + F_{\text{deformasyon}} \quad (3.2)$$

Burada F_s sürtünme kuvvetidir. Eşitlik 3.2 etkiyen normal kuvvete bölünürse, μ sürtünme katsayısını göstermek üzere

$$\mu = \mu_A + \mu_D \quad (3.3)$$

elde edilir. A ve D indeksleri sırası ile adezyon ve deformasyon terimlerini temsil etmektedir.



Şekil 3.2: Sert bir pürüzün polimer yüzey üzerindeki kayma hareketinde sürtünmenin kaynakları.

Deney koşullarını dikkatlice oluşturarak adezyon ve deformasyondan kaynaklanan sürtünme dirençlerini büyük bir yaklaşıklıkla ayırmak mümkündür. Optik seviyede düz yüzeylerin elde edilmesi ile pürüzlülük özelliği minimuma indirilebilir bu takdirde deformasyon teriminin sürtünme katsayısına etkisi ihmal edilebilir. Bu durumda ölçülen sürtünme katsayısı büyük ölçüde adezyondan kaynaklanacaktır. Bunun tersi olarak, birbirine göre izafi hareket eden iki yüzey arasına bir yağlayıcı madde konursa bu da adezyon teriminin etkisini pratik olarak ortadan kaldırır. Bu durumda ölçülen sürtünme katsayısı ise yaklaşık olarak deformasyondan kaynaklanan sürtünme katsayısıdır.

Adezyon ve deformasyon terimlerini oluşturan fiziksel mekanizma metaller ve polimerler için oldukça farklıdır. Polimer malzemelerin sürtünme mekanizması için ise polimerin türüne, moleküler yapısına, kristalin derecesine, sıcaklığa bağlı olarak kesin bir ayırım yapmak pek mümkün değildir.

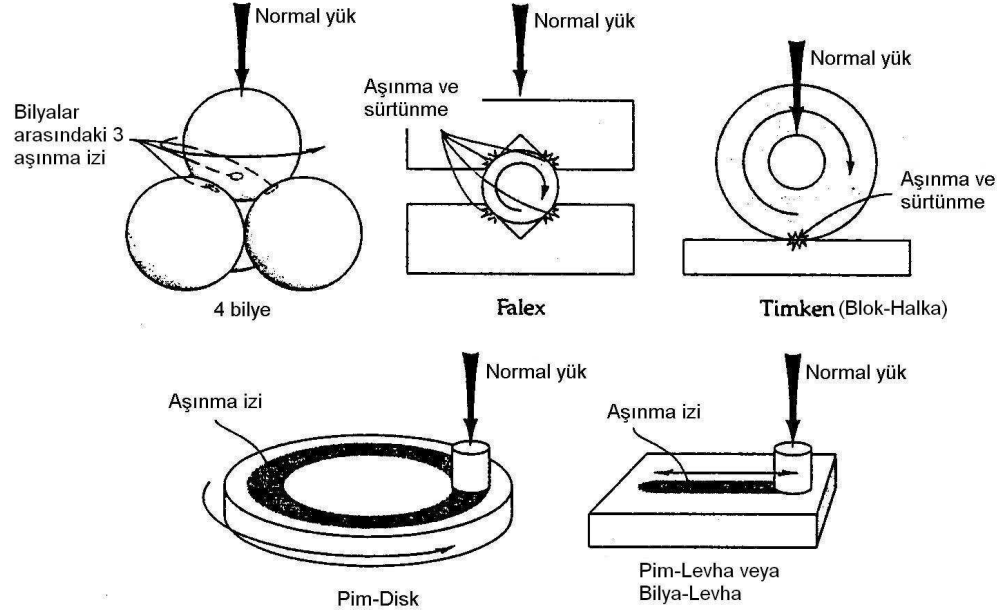
3.2 Polimerlerin Aşınma Mekanizmaları

Bir makina elemanının kullanılamaz hale gelmesi plastik deformasyon, çatlakların ilerlemesi, korozyon ve aşınma hasarlarından dolayı meydana gelebilir. Aşınma mekanizmaları esasen elemanların yüzeylerine hasar verir. Sürtünme ve aşınma titreşim, gürültü, ısınma, boyutsal değişimler ve aşınma ürünlerine sebep olabilir. Bu ise elemanın istenen fonksiyonunu kaybetmesi ve tekrar kullanılamayacak derecede hasara uğramasıyla sonuçlanabilir.

Sürtünme, aşınma, yağlama konularını ve bunlara bağlı olayları inceleyen bilim dalına triboloji veya triboteknik adı verilir. Dünya çapında yapılmış olan istatistiklere göre makina elemanlarının %70'inin işe yaramaz hale gelmesinin nedeni aşınmadır. Ayrıca sürtünme sonucu meydana gelen enerji kayıpları da büyük değerlere ulaşmaktadır. Almanya'da yayınlanan bir rapora göre sürtünme ve aşınma kayıpları gayri safi milli hasılanın yaklaşık % 4.5'ine ulaşmıştır. Aşınmanın neden olduğu ekonomik kayıplar iyi bir organizasyon, uygun konstrüksiyon, üretim, montaj ve makinaların ömrünün optimizasyonuna bağlı olarak azaltılabilir.

Sürtünme ve aşınma kendine özgü malzeme özellikleri değildir, mühendislik sisteminin (tribosistem) karakteristikleridir. Tribosistemin parametrelerine bağlı olarak farklı aşınma mekanizmaları meydana gelebilir Mekanik testlerin aksine aşınma testleri için genel standartlara ulaşamamıştır, fakat laboratuvarlarda belirli sayıdaki teknikler geniş uygulama alanı bulmuştur. Belli başlı tribolojik testler şöyle sıralanabilir:

1. Makina veya elemanın normal çalışma şartlarında test edilmesi
2. Makina veya elemanın kontrollü şartlar altında laboratuvarında test edilmesi
3. Makina veya elemanın alt sistemlerinin test edilmesi
4. Makina veya elemanın parçalarının test edilmesi
5. Basitleştirilmiş parça testi
6. Model testi (Örneğin pim-disk aşınma testi)



Şekil 3.3: Farklı tipteki model testleri

Şekil 3.3'te model testlerinin tipleri gösterilmiştir [35]. Çok sayıda test tekniğinin oluşu pratikte çok çeşitli aşınma sistemlerinin bulunmasındandır. Benzer teknikler kullanılsa bile, farklı laboratuvarlarda farklı araştırmacıların elde ettiği sonuçları niteliksel bir yol ile karşılaştırmak en iyi çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Hemen hemen her zaman karşılaştığımız farklı sonuçlar deney metodlarındaki deney numunelerinin boyut ve geometri farkları, çevre şartlarının değişik olması gibi parametrelerdendir. Bu yüzden deney sonuçları verilirken deney koşullarının mümkün olduğu kadar net olarak belirtilmesi çok önemlidir. Laboratuvardaki test sonuçlarının uygulamada kullanılabilmesi için seçilen koşulların pratikteki şartlarla benzerlik göstermesi gereklidir.

Pim-disk ve papuç-disk (veya blok-halka) tipi aşınma cihazlarının avantajı temas alanı ve kayma hızının sürekli olarak sabit tutulabilmesidir [35]. Dezavantajı ise normal yükün tam kontrol edilememesidir. Zira genellikle normal yük asılı kütlelerle uygulanmaktadır. Titreşimli sürtünme şartlarında normal yük sabit kalmayıp değişim gösterir. Bu nedenle, deney şartlarının tamamen sabit kalması için normal yük, asılı kütleler yerine yay kuvveti veya hidrolik kuvvetle sağlanmalıdır.

Bir tribosistem genellikle dört elemandan meydana gelmektedir.

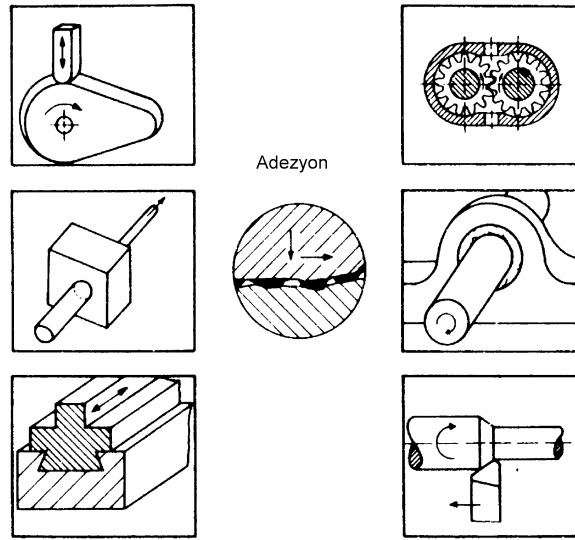
1. Ana cisim
2. Karşı cisim

3.Ara yüzey

4.Çevre

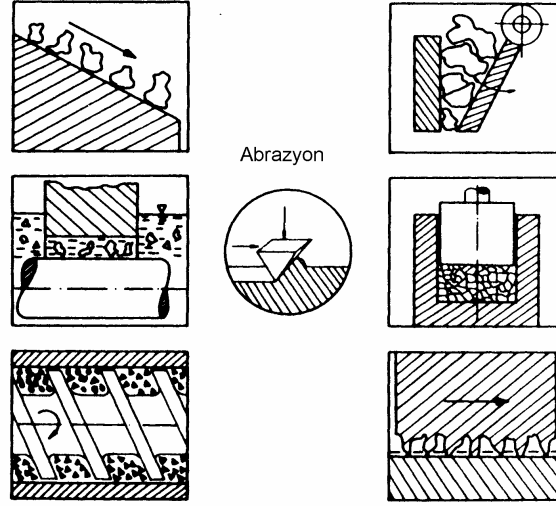
Aşınma, birbirine nazaran hareket eden temas halindeki yüzeylerde ilerleyen malzeme kaybı ve yüzeylerin bozulması ile meydana gelir. Aşınma türlerini tanımlamak için literatürde çok farklı terimler kullanılmaktadır. En genel olarak aşınma türleri:

1. Adheziv ve transfer aşınma (kayma aşınması): Yüzeyler arasında temas bölgesinde hiçbir aşındırıcının bulunmadığı durumda meydana gelen aşınmadır (Şekil 3.4).

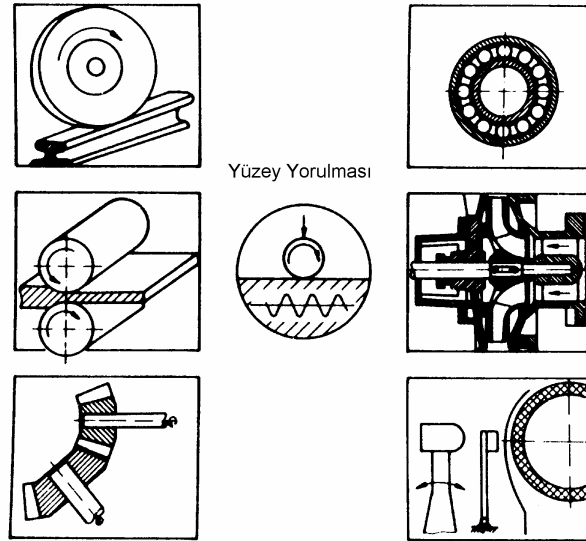


Şekil 3.4: Adheziv aşınmaya neden olabilecek tribosistemler.

2. Abraziv yada kesme aşınması: Polimerin temasta bulunduğu sert karşı yüzeyde sivri pürüz tepeliklerinin bulunması polimerin abrazyona uğramasına ve yırtılarak kopmasına sebep olur (Şekil 3.5).
3. Yorulma aşınması: Eğer karşı yüzeyde sivri pürüz tepelikleri yerine dalgalı bir yüzey yapısı hakimse polimer yüzeyi tekrar eden deformasyonlara maruz kalır ve bunun sonucunda yorulma hasarı oluşur. (Şekil 3.6).
4. Termal aşınma
5. Korozyon aşınması
6. Diğerleri

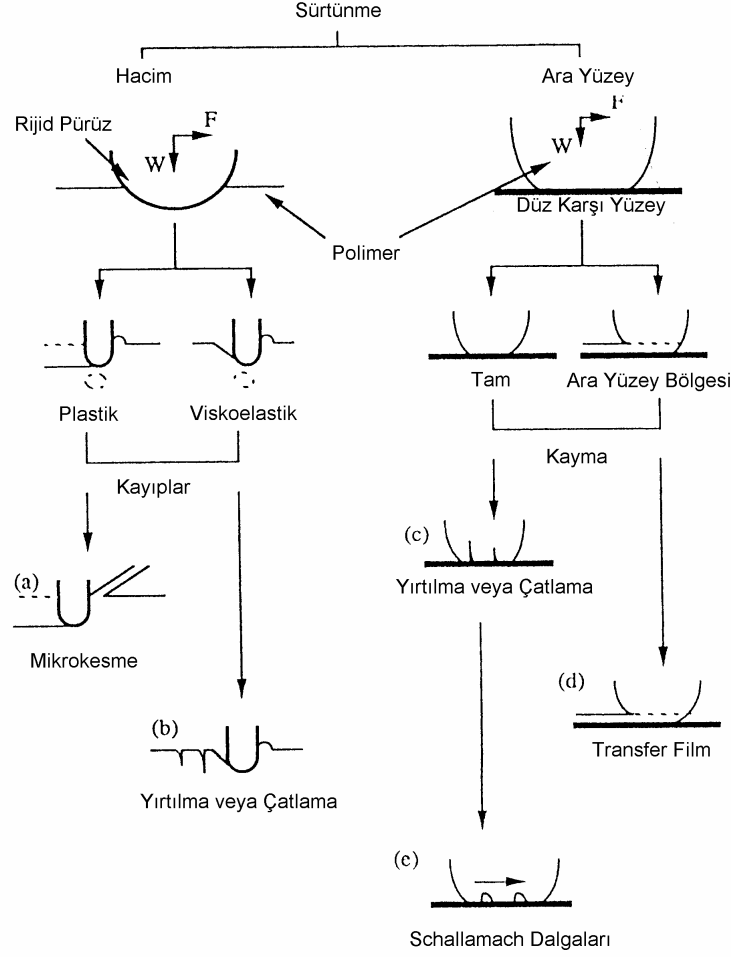


Şekil 3.5: Abrayiv aşınmaya neden olabilecek tribosistemler.



Şekil 3.6: Yorulma aşınmasına neden olabilecek tribosistemler.

Son yıllarda polimerlerin aşınması koheziv ve ara yüzey aşınması olmak üzere iki sınıfa ayrılarak ta incelenmiştir [36]. Koheziv aşınma ara yüzeydeki nispeten büyük hacim hareketlerinden meydana gelmektedir. Polimerlerin koheziv mukavemet değerleri ile kontrol edilen abrazyv ve yorulma aşınması bu gruba girer. Ara yüzey aşınması daha ince bölgelerde meydana gelir, klasik adheziv aşınması da bu gruba girer. Şekil 3.7’de polimer aşınması bu yeni modele göre şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Polimer aşınmasının şematik gösterimi.

Genel olarak aşınma, dış etkiler altında, temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişimlerin sonucudur. Polimer malzemelerde, dış etkilerin, fiziksel ve kimyasal değişikliklerin çokluğu nedeniyle, pratikte bir aşınma hali değil birçok aşınma hali söz konusudur yani çoğu zaman aşınma mekanizmaları üst üste gelir. Polimerlerin belirli bir aşınma durumundaki tepkileri fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerine bağlı ve çok dinamiktir. Aşınmayı etkileyen temel parametreler kayma hızı, yüzey basıncı, sürtünme katsayısı, yüzeyin yapısı, ergime noktası, ısıl iletkenlik, elastisite modülü, malzemenin mukavemeti ve yorulma dayanımı, verilen bir tribolojik durumda plastiğin olası davranışı hakkında bir ize sahiptir [37].

3.3 Transfer Filmi

Kuru sürtünmeli polimer esaslı malzemelerin kayma hareketi sırasında aşınma mekanizması, karşı yüzeyin pratik olarak çok düzgün ve kayma hızlarının düşük

olması halinde adeziv karakterdedir. Polimer ve karşı yüzey arasında bir yağlayıcının bulunması durumunda, aşınma miktarında kuru hale göre gözlenen çok büyük miktardaki azalmalar bu görüşü doğrulamaktadır. Polimer malzemenin, çelik karşı yüzeye sıvanması POM, PTFE ve Poliamid gibi saf polimerlerde çok karşılaşılan bir durumdur.

Polimer esaslı malzemelerde aşınma miktarı, kayma hızı, uygulanan kuvvet ve sıcaklık ile oldukça önemli miktarda değişir. Polimer-metal teması durumunda polimer, metal karşı yüzeye monomoleküler bir film oluşturarak sıvanır. Bunun sebebi polimer malzemedeki molekülleri bir arada tutan koheziv bağların temas bölgesindeki adeziv bağdan daha zayıf olmasıdır. Polimer malzemenin karşı yüzeye sıvanmasından sonra polimer/çelik teması yerine polimer/polimer temas durumu ortaya çıkmaktadır. Bu, hareketin devamında kinetik sürtünme katsayısında meydana gelen azalmayı da açıklamaktadır. Polimer malzeme ile temas halinde bulunan rijit karşı yüzeyin pürüzlülüğü arttırılırsa pürüzlülüğün belli bir sınır değerden büyük olması durumunda abraziv aşınma etkili olmaya başlar. Bu sınır değer farklı polimer malzemeler için bir çok parametreye bağlı olarak değişir. Polioksimetilen, poliamid 6, poliamid 66, politetrafloetilen ve yüksek yoğunluklu polietilen gibi malzemelerde yapılan çalışmalar sonucu 0,8...1 µm maksimum pürüz yüksekliği değerinden sonra abraziv aşınmanın etken olduğu gözlenmiştir. [15, 38].

3.4 Aşınma Minimumu

PE ve PTFE gibi yumuşak omurgalı polimerler, belli karşı yüzey pürüzlülük değerlerinde aşınma minimumu oluştururlar. Bu polimerlerde ince ve yönlenmiş bir transfer filmi karşı yüzeye deney boyunca daimi olarak yapışmıştır [11].

Bu güne dek yapılan çeşitli polimer aşınma deneylerinde bazı polimerler için, daimi rejimde karşı yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak bir aşınma minimumunun olduğu rapor edilmiştir [16]. Bu polimerler PTFE, UHMWPE, PA 6, PA 66, POM'dur.

3.5 Polimerlerin Yorulma Aşınması

Düşük pürüzlülüğe sahip çelik karşı yüzeyle aşındırılan polimerlerde, aşınmanın genellikle "yorulma" yoluyla olduğu görülmektedir [39]. Hollander ve Lancaster

polimerlerin yorulma aşınması için bir model önermişlerdir [2]. Bir malzemenin yorulma özellikleri Wöhler eğrisiyle gösterilir:

$$n = \left(\frac{S_0}{S} \right)^t \quad (3.4)$$

Burada,

n: Dinamik zorlanmada kırılmanın gerçekleştiği tekrar sayısı

S₀: Statik zorlanmada kopma mukavemeti

S: Dinamik zorlanmada gerilme genliği

t: Yorulma eğrisi üssü (bir sabit)

Karşı yüzey üzerindeki tepelerin polimerin üzerinden tekrarlı geçişinin, yorulmaya sebep olduğunu kabul edelim. Bu durumda S, polimerin içine batan bir tepenin uyguladığı gerilmedir. Aşınma hızı W, n ile ters orantılıdır:

$$W \propto \frac{1}{n} \quad (3.5)$$

$$W \propto S_0^{-t} S^t \quad (3.6)$$

Uygulanan S gerilmesi ise tepenin formuna, dolayısıyla karşı yüzey topoğrafyasına bağlıdır. Rastgele pürüzlendirilmiş bir karşı yüzeyde tepelerin yarıküre şeklinde olduğu kabulü yapılabilir. Bu durumda r yarıçaplı bir yarıkürenin, düzlem polimer yüzeyiyle temasında oluşan gerilmeyi elastisite teorisi:

$$S \propto r^{-\frac{2}{3}} \quad (3.7)$$

olarak verir. Aşınma hızı ise,

$$W \propto S_0^{-t} r^{\frac{2t}{3}} \quad (3.8)$$

şeklindedir. Burada, tüm tepelerin r yarıçaplı yarıkürelerden oluştuğu ve normal kuvvetin eşit paylaşıldığı kabul edilmektedir.

Polimerlerin yorulması metallere farklıdır [2, 4, 31]. Metallerde yorulma kırılması, “çatlak ilerlemesi” yoluyla olur. Polimerlerde ise ya çatlak ilerlemesi, ya da “termal yumuşama” veya ikisinin kombinasyonu şeklinde gerçekleşir. Polimerlerin ısı iletim katsayısı düşük ve sönümlenme etkisi yüksek olduğundan, dinamik zorlanmaya maruz kaldığında önemli bir sıcaklık artışı görülür. Bu sebeple, çatlak ilerlemesi olmadan, bir termal yumuşama meydana gelebilir ve bu kırılmayla son bulur. Bu çeşit bir kırılma metallere görülmez. Bir polimerde yorulma kırılması, çatlak ilerlemesi sebebiyle oluşuyorsa, yorulma eğrisi üssü “t” çok daha düşük değerlere inme eğilimindedir.

Yorulma deneylerinde, yorulma özellikleri yukarıda belirtildiği gibi numunedeki ısı birikimine bağlıdır. Bu nedenle uygulanan değişken yükün frekansı ve formu çok önem taşır. Örneğin frekansın şekli (sinüzoidal, kare, vb.), deformasyon biçimi (tek eksenli, burulma vb.) ve malzemenin boyut ve geometrisi önemlidir. Ayrıca sıcaklık ve nem gibi çevre şartları da deneyi etkiler.

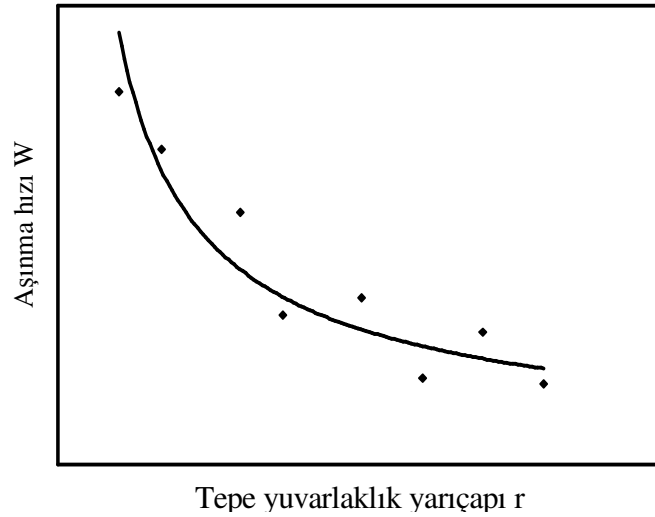
Aşağıda modelin uygulandığı iki deneysel çalışma sunulmaktadır:

Hollander ve Lancaster, bir grup polimer için, rastgele pürüzlülüğe sahip karşı yüzey kullanarak yaptıkları aşınma deneylerinde, yorulma aşınmasının izahında yarıküre modelini uygulamışlardır. Bu deneylerde karşı yüzey, yumuşak çelikten imal edilmiş silindiridir. Silindirin yüzeyi değişik numaralarda silikon karbid (SiC) zımpara kağıdıyla rastgele bir şekilde zımparalanmıştır. Böylece farklı pürüzlülük değerlerinde yüzeyler elde edilmiştir. Polimer numuneler ise silindir şeklindedir. Deneylerde polimer numunelerin, dönen karşı yüzey üzerinde helisel bir yol çizmesi sağlanmıştır. Böylece polimer, karşı yüzeyin aynı noktasından sadece bir defa geçmektedir. Bu sayede karşı yüzeyde film oluşumu veya yüzeyin hasar görmesi gibi yüzey pürüzlülüğünü deney esnasında değiştirebilecek etkenler bertaraf edilmiştir. Araştırmacılar, hesaplamalarında r yarıçapı olarak, ortalama tepe yuvarlaklık yarıçapı R_{av} 'yi kullanmışlardır. Araştırmacılar R_{av} değerini, yüzeyde yapılan pürüzlülük ölçümlerinden yararlanarak “otokorelasyon analizi” denilen ve Whitehouse ve Archard [40] tarafından geliştirilmiş istatistiksel bir yöntemle bulmuşlardır (Bakınız Bölüm 4.3.1). R_{av} hesaplanırken, mümkün olduğunca küçük ölçekteki yüzey yapısını dikkate almış olmak için Bölüm 4'te Eşitlik 4.7 kullanılmıştır. Pürüzlülük ölçüm cihazının elde ettiği ham profillerde iki nokta arası mesafe (numune alma aralığı) $0.75 \mu\text{m}$ 'dir ve ölçüm uzunluğu 2.5 mm 'dir.

Araştırmacılar deney sonunda elde edilen Aşınma hızı – R_{av} grafiğine, eşitlik 3.8 formunda bir eğri uydurmuştur. Eğri,

$$W = ar^{-\frac{2}{3}t_w} \quad (3.9)$$

şeklindedir. Burada a bir sabittir. t_w ise “aşınma deneylerinden elde edilen yorulma eğrisi üssü” olarak isimlendirilir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8: Deney sonuçlarına Eşitlik 3.8 formunda bir eğrinin uydurulması

Araştırmacılar klasik yorulma deneylerinden elde edilen t değeri ile kuru sürtünme ve sınır yağlama hali için bulunan t_w değerlerini kıyaslamıştır (Tablo 3.1 ve 3.2). Deneyde kullandığı polimerlerin çoğunun t değeri literatürde bulunmadığından, literatürde t değeri mevcut olan yakın özellikteki polimerlerin değerlerini alarak kıyaslama yapmışlardır. t ve t_w 'nin yaklaşık olarak aynı mertebede olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca hem t, hem t_w elastisite modülünün artmasıyla artmaktadır, artış eğilimleri de benzerdir (Şekil 3.9).

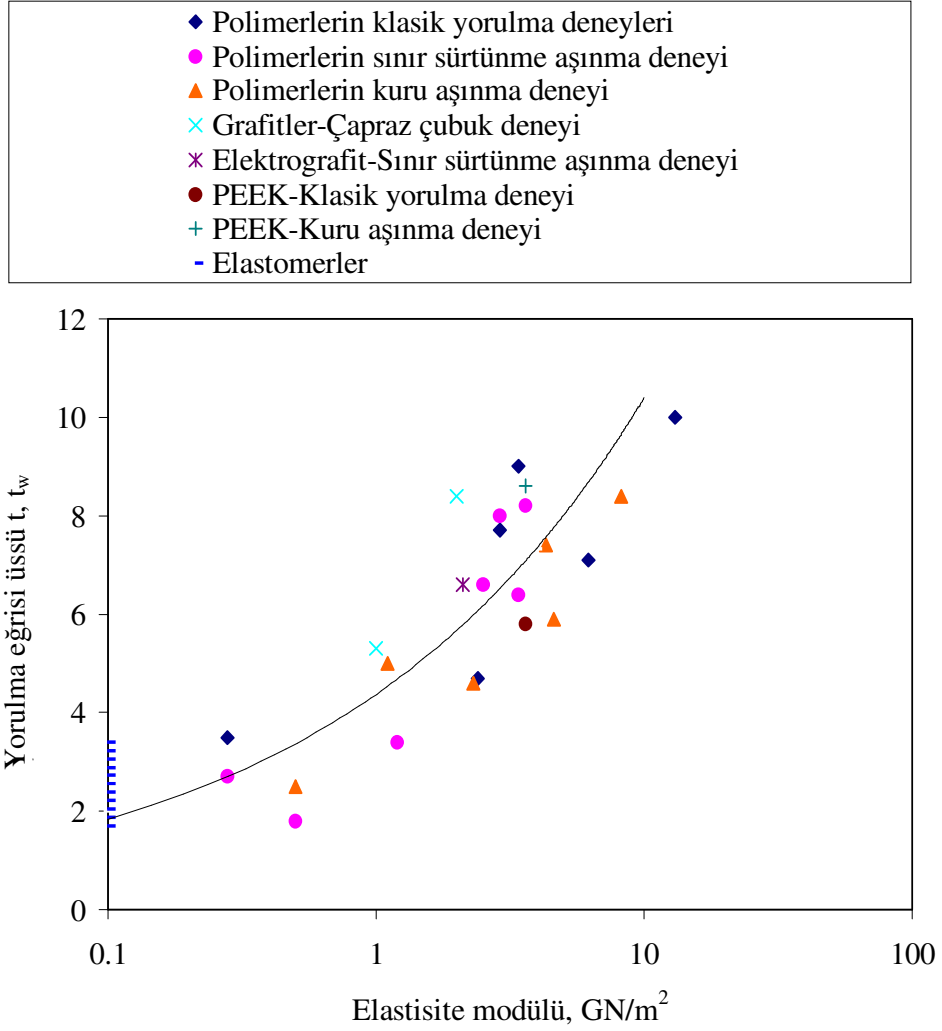
Bu konuda benzer bir çalışma Ovaert ve Cheng [3] tarafından yapılmıştır. Ovaert ve Cheng, PEEK'nun yumuşak çelik karşı yüzeyle aşınmasını izah etmek için Hollander ve Lancaster'in yukarıda anlatılan yorulma aşınması modelini uygulamışlardır. Deneylerinde pim disk aşınma cihazı kullanmışlardır. Karşı yüzey 41 HRB sertlikte yumuşak çeliktir. $R_q = 0.02 - 1 \mu m$ aralığında rastgele pürüzlendirmeye yüzeyler elde etmişlerdir. Düşük pürüzlülükteki diskleri parlatmışlar, diğerlerini alüminyum oksit zımpara kağıdıyla kuru olarak zımparalamışlardır.

Tablo 3.1: Aşınma deneylerinde elde edilen t_w değerleri [2]

Adı	Aşınma deneyi (kuru sürtünme) t_w	Aşınma deneyi (sınır sürtünme) t_w
PTFE	2.5	1.8
PTFE+%25 Tip1 Karbon elyafı	5	-
LDPE	-	2.7
PP	-	3.4
Polistren	-	6.4
Poliamid 6.6	4.6	6.6
Poliamid 6.6+%25 Tip1 Karbon elyafı	5.9	-
Polyester	7.4	-
Polyester+%25 Tip1 Karbon elyafı	8.4	-
Asetal kopolimer	-	8
Polimetil metakrilat	-	8.2
Elektrografit 1	-	6.6
PEEK [3]	8.6	-

Tablo 3.2: Klasik yorulma deneylerinden alınan t değerleri [2]

Adı	Klasik yorulma deneyleri t
Elastomerler	1.7 - 3.4
LDPE	3.5
Poliamid 6.6	4.7
Poliamid 6.6+Cam elyafı	7.1
Asetal kopolimer	7.7
Polimetil metakrilat	9
Poliester+Cam elyafı	10
Elektrografit 1	8.3
Doğal grafit	5.3
PEEK [3]	5.8



Şekil 3.9: t ve t_w 'nin, çeşitli polimer ve grafitlerin elastisite modülüyle değişimi [2]

Bu deneyin Hollander ve Lancaster'in deneyinden farkı:

- 1) Karşı yüzeyin düzlem olması
- 2) Polimerin her devirde karşı yüzeyin aynı noktasından geçmesidir. Böylece karşı yüzeyde transfer filmi oluşmasına izin verilmiştir.

Disklerin pürüzlülüğünü 5 μm uçlu iğneye sahip bir pürüzlülük ölçüm cihazıyla ölçmüşlerdir. Ham profile iki nokta arası mesafe (numune alma aralığı) 1.4 μm 'dir. Ham profili Hirst ve Hollander tarafından ortaya atılan hareketli ortalama tekniğiyle filtrelemişlerdir. Pürüzlülük parametrelerinin değerlendirilmesinde numune uzunluğu 5.5 mm'dir.

Araştırmacılar deney sonunda elde edilen Aşınma hızı - R_{av} grafiğine, eşitlik 3.8 formunda bir eğri uydurmuşlardır. Sonuç olarak bu aşınma deneyinde $t_w = 8.6$

bulunmuştur. PEEK için klasik yorulma deneylerinden yorulma eğrisi üssü $t = 5.8$ 'dir. Araştırmacılar iki değer yaklaşık aynı mertebede olduğunu söyleyebileceğini belirtmişlerdir. Çünkü Şekil 3.9'dan görüldüğü gibi, belli bir elastisite değerine karşılık gelen yorulma eğrisi üssü için kesin bir değer vermek mümkün değildir, ancak geniş bir aralık verilebilir.

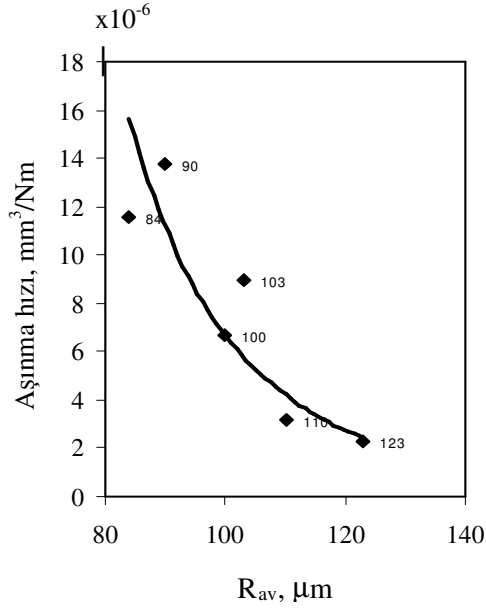
Tablo 3.3'de yüzeylerin yaklaşık R_q , R_{av} değerleri ve aşınma hızları görülmüyor. Bu deneyde, $R_q = 0.76 \mu\text{m}$ gibi yüksek pürüzlülük değerlerinde karşı yüzeyde önemli bir transfer filmi oluştuğu görülmüştür. Bu pürüzlülük değerindeki aşınma hızı, Aşınma hızı - R_{av} grafiğine uydurulan eğriden en büyük sapmayı vermektedir (Şekil 3.10'da $R_{av} = 84 \mu\text{m}$ olarak belirtilen nokta). Ayrıca Şekil 3.11'de $R_q = 0.76 \mu\text{m}$ için, transfer filmi nedeniyle aşınma hızının azaldığı açık olarak görülmektedir. Sonuç olarak, karşı yüzeyin topoğrafyasının değişime uğraması sebebiyle modelin uygulanabilirliği, bu pürüzlülük değerlerinde kısıtlanmaya başlamıştır.

Klasik yorulma eğrisi üssü " t " ile aşınma deneylerinden bulunan t_w değeri arasındaki farkın çeşitli sebepleri vardır. Aşağıda polimerin, karşı yüzeyin aynı noktasından sadece bir defa geçtiği hal için bu farklılığın sebepleri sıralanmaktadır [2]:

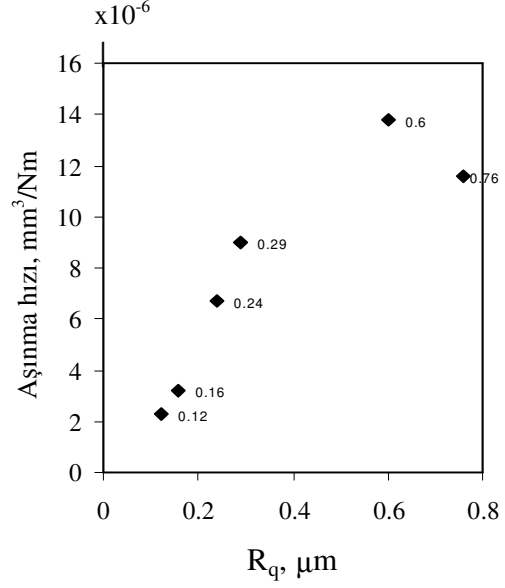
1) Aşınma deneyinde, polimer numunenin yüzeyindeki tabakanın yorulma özellikleri önemli derecede değişime uğrayabilir. Örneğin zincir kesilmesi veya oksidasyon oluşabilir. Eğer deneye bazı sıvılar karışıyorsa sıvıların absorpsiyonu veya plastikleşmesi gerçekleşebilir.

Tablo 3.3: Disklere ait R_q , R_{av} ve W değerleri

R_q (μm)	R_{av} (μm)	W (mm^3/Nm)
0.12	123	2.25E-06
0.16	110	3.20E-06
0.24	100	6.70E-06
0.29	103	9.00E-06
0.6	90	1.38E-05
0.76	84	1.16E-05



Şekil 3.10: R_{av}-W grafiği



Şekil 3.11: R_q-W grafiği

2) Klasik yorulma deneylerinin karmaşıklığından kaynaklanan belirsizlikler oluşabilir. Örneğin yorulma kırılmasının çatlak ilerlemesiyle mi, termal yumuşamayla mı olduğu, t değerine çok etki eder.

3) Daha karmaşık bir durum da şöyle oluşabilmektedir: Bazı polimerlerde, çalışılan pürüzlülük aralığının bütününde aynı yorulma mekanizması geçerli olmayabilir. Pürüzlülük arttıkça yerel gerilmeler elastik limiti aşabilir ve bunun sonucunda kayma, mikro kesilmeden kaynaklanan aşınma bileşenleri oluşabilir.

Karşı yüzeyin aynı noktasından polimerin tekrarlı geçişi söz konusu ise, bu sebeplere, karşı yüzeyin değişime uğraması hususunu da eklemek gerekir. Transfer filmi oluşumu ve/veya yüzeyin deforme olması sebebiyle modelin uygulanabilirliği sınırlanmaktadır.

3.6 Çalışmada Kullanılan Polimer Yorulma Aşınması Modeli

Deneylerimizde karşı yüzey olarak, 60 mm çapında ve 16 mm kalınlıkta paslanmaz çelikten diskler kullanılmıştır. Aşındırıcı yüzey silindirik yan yüzeydir ve silindirik taşlamayla pürüzlendirilmiştir. Dolayısıyla yüzey rastgele değildir, yönlendirilmiş pürüzlülüğe sahiptir. Diskin çevresel yöndeki ortalama tepe yuvarlaklık yarıçapı R_{av}, aksel yöndeki genelde 10 katından fazladır. Bu sebeple karşı yüzeyin yarı-

silindir şeklindeki tepelerden oluştuğu kabul edilebilir. ‘r’ yarıçaplı bir silindirin, düzlem polimer yüzeyiyle temasında oluşan gerilmeyi elastisite teorisi [39]:

$$S \propto r^{-\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

olarak verir. Bu gerilmeyi eşitlik 3.6’da yerine yazarsak aşınma hızı:

$$W \propto S O^{-t} r^{-\frac{t}{2}} \quad (3.11)$$

olur. Denklemden r yarıçapı olarak, eksenel yönde ölçülen ortalama tepe yuvarlaklık yarıçapı R_{av} kullanılabilir. Yüzey, rastgele değil yönlenmiş pürüzlülüğe sahip olduğundan R_{av} otokorelasyon analiziyle hesaplanamaz. R_{av} değerleri pürüzlülük ölçümleriyle elde edilen ham profil verilerinden nümerik olarak hesaplanmaktadır (Bakınız Bölüm 4.3.2). Ham profilde hiçbir filtre uygulanmamıştır.

3.7 Polimerlerin Abrazif Aşınmasını İzah İçin Bir Model

Deneylerimizde elde ettiğimiz aşınma hızı verileriyle, kullanılan polimerlerin özellikleri arasında bir bağlantı olup olmadığını araştırmak için aşağıdaki basit yaklaşım kullanılmaktadır [15]. Buna göre, bir polimerin çelik karşı yüzeye eş çalışması esnasında aşınan polimer hacmi,

$$V = k A_r L \quad (3.12)$$

eşitliği ile verilir. Burada A_r gerçek temas alanı, L kayma mesafesi ve k aşınma parçacıklarının oluşma ihtimalidir. k için şu kabul yapılmaktadır,

$$k \propto \frac{\sigma_0}{\sigma} \quad (3.13)$$

Burada σ_0 ara yüzeydeki eşdeğer gerilme, σ polimerin kopma gerilmesidir. Maksimum kayma gerilmesi hipotezine göre,

$$\sigma_0 = \sqrt{P_N^2 + 4\tau_F^2} \quad (3.14)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada P_N normal yöndeki basınç, τ_F ise polimer-metal arayüzeyindeki kayma gerilmesidir. P_N ve τ_F için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir,

$$P_N = \frac{F_N}{A_r} \quad (3.15)$$

$$\tau_F = \frac{F_s}{A_r} \quad (3.16)$$

Burada F_N normal yük, F_s sürtünme kuvvetidir. Sürtünme katsayısı ise,

$$\mu = \frac{F_s}{F_N} \quad (3.17)$$

Yukarıdaki eşitlikler eşitlik 3.12’de yerine yazılırsa,

$$V \propto \frac{\sqrt{1+4\mu^2}}{\sigma} F_N L \quad (3.18)$$

elde edilir. Aşınma hızı ise,

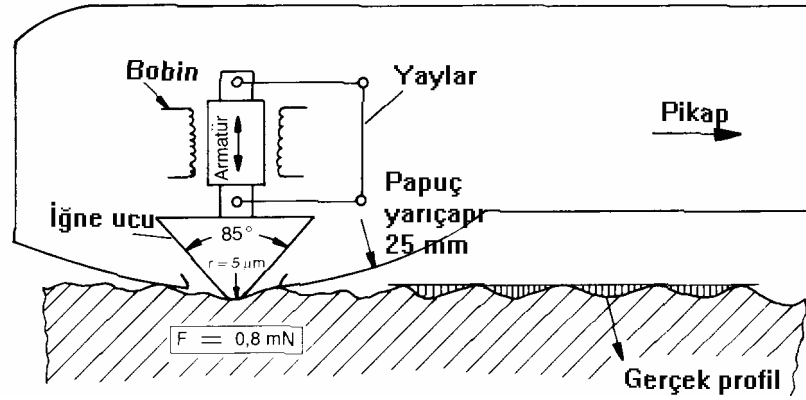
$$W \propto \frac{\sqrt{1+4\mu^2}}{\sigma} \quad (3.19)$$

şeklindedir. Sonuç olarak, bu yaklaşıma göre, aşınma hızı $(1+4\mu^2)^{1/2}/\sigma$ parametresiyle artmalıdır. Bu yaklaşım özellikle, deney esnasında karşı yüzey değişimine izin verilmeyen “tek geçişli” aşınma deneyleriyle uyum içindedir. Transfer filmi oluşumu, yüzeyde basınç durumunu ve sürtünme katsayısını önemli miktarda değiştirmektedir; bu da bu yaklaşımın uygulamasını sınırlandırmaktadır.

4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN ÖLÇÜLMESİ, ÖLÇÜM CİHAZLARI ve PÜRÜZLÜLÜK PARAMETRELERİ:

4.1 Pürüzlülüğün Ölçülmesi ve Pürüzlülük Ölçüm Cihazları

Pürüzlülük ölçümleri klasik pürüzlülük ölçüm cihazıyla yapılmaktadır [41]. Bu cihazlarda yüzeyi tarayan elmas uçlu bir iğnenin düşey hareketleri indüktif olarak elektrik sinyallerine dönüştürülür ve ham yüzey profili olarak kaydedilir (Şekil 4.1).

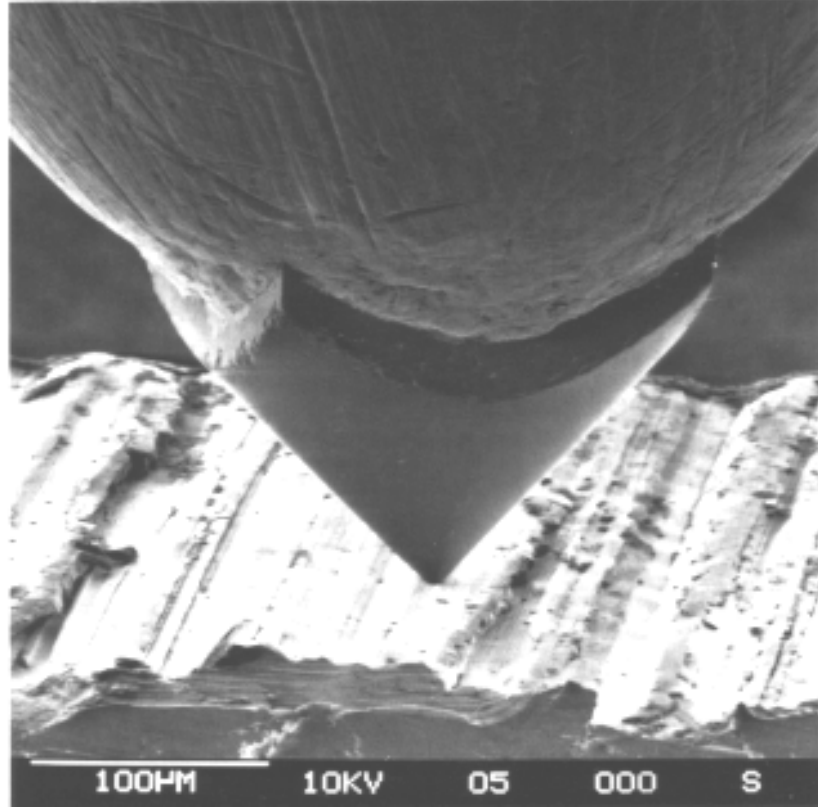


Şekil 4.1: Yüzey profilinin elde edilmesi

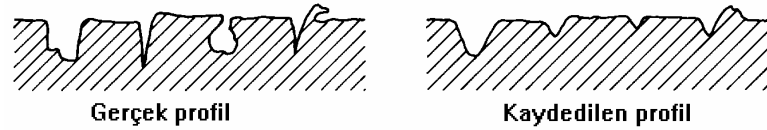
Pürüzlülük ölçüm cihazının başlıca parçaları iğne, pikap ve filtredir.

4.1.1 İğne

Cihazın yüzeye temas eden kısmıdır. Şekil 4.2’de iğne ucunun büyütülmüş resmi görülüyor. İğnenin yatağındaki sürtünme kuvveti çok düşüktür. Şekli ve boyutları çok önemlidir. İğneler koni ve piramit olmak üzere iki tipte imal edilmektedir. Tepe açıları 60 veya 90°’dir. İğnenin yüzeye sürekli temas etmesi için belli bir kuvvet uygulanmaktadır. İğne kuvveti gerekenden az ise zayıf titreşimler dahi iğnenin yüzeyden kalkmasına yol açabilir. Genel uygulamalarda iğne uç yuvarlatma yarıçapı 2 - 5 µm arasında, iğne tepe açısı 90 derece ve iğne kuvveti 0.8 mN olarak tavsiye edilir. Bazı kritik profillerde (derin vadiler, gözenekler vs..) en ince uçlu iğneler bile yetersiz kalır (Şekil 4.3).



Şekil 4.2: İğne ucu

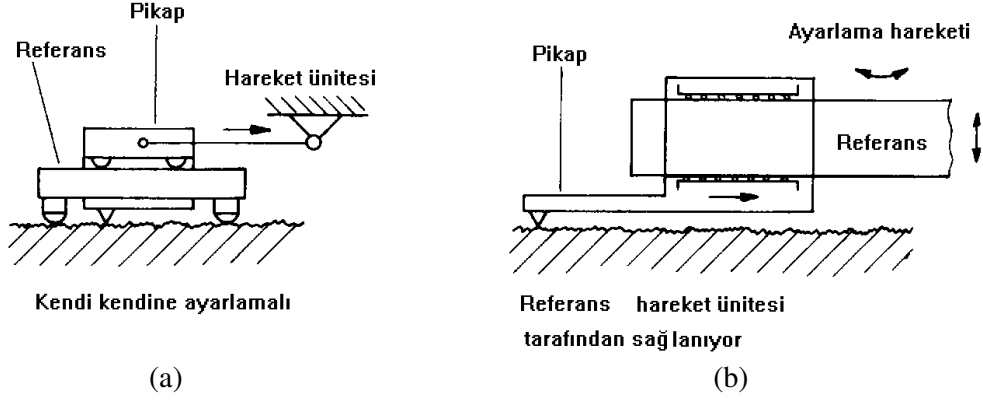


Şekil 4.3: Kritik yüzeylerin profili bozulmaya uğramış olarak kaydedilebilir

4.1.2 Pikap

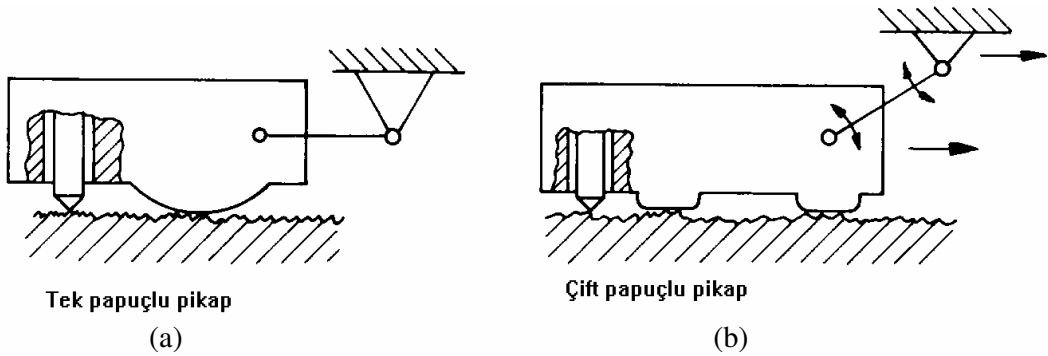
Bir pikabın prensip şeması Şekil 4.1’de görülmektedir. Pikaplar ikiye ayrılır: Papuçlu pikaplar ve papuçsuz pikaplar.

a) Papuçsuz sistemde pikap, hemen hemen geometrik olarak ideal bir referans düzlemde hareket eder. İki tipi vardır (Şekil 4.4 a ve b). Papuçsuz ölçümde iğnenin referans düzleme göre hareketi ölçülmektedir. Pürüzlülük, dalgalılık ve form sapmalarının tümü tespit edilir. Yüzey profili değişikliğe uğramadan elde edilir. Papuçsuz ölçümlerin yüzey metrolojisinde artan bir önemi vardır. Ayrıca geniş bir uygulama alanına sahiptir. Ancak çevreden gelen titreşimlere çok duyarlıdır. Cihaz referans düzlemi ile yüzeyin paralel hale getirilmesi için eğim ayarı yapılmalıdır. Bu nedenle ölçüm süresi uzundur.



Şekil 4.4: Papuqsuz pikaplar

b) Papuçlu sistemde pikabın üzerinde bir veya iki papuç bulunur. İğnenin papuca göre izafi hareketi ölçülmektedir (Şekil 4.5 a ve b). Papucun yüzeye uyguladığı kuvvet 0.5 N 'u geçmemelidir. Papucun yuvarlaklık yarıçapı, sınır dalga boyu λ_c 'nin en az 50 katı olmalıdır. Çünkü papuç "mekanik filtre" vazifesi görüp form sapmalarını elemektedir. Eğer papucun yuvarlaklık yarıçapı yeterince küçükse, dalgalılık dahi elimine edilebilir. Papuçlu pikaplar çevreden gelen titreşimlerin izole edilmesini sağlar. Eğim ayarı gerekmediğinden hızlı ölçüm alınır. Ancak papuçlu ölçümde, hakiki profil biraz deforme edilerek kaydedilmiş olabilir.



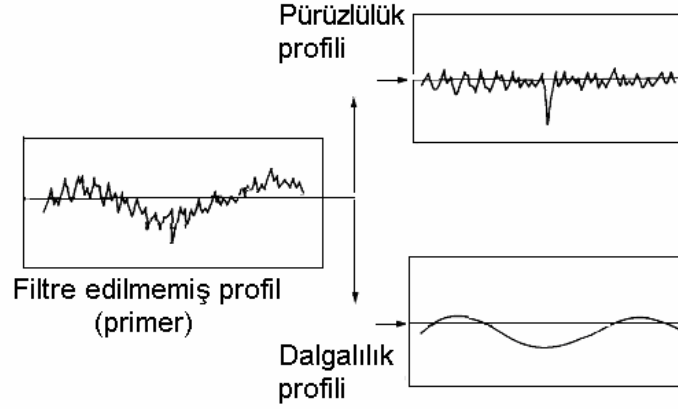
Şekil 4.5: Papuçlu pikaplar

4.1.3 Filtre

Ham profil, değişik dalga boylarında yüzey sapmalarını içermektedir. Örneğin geniş tepe veya çukurlar uzun dalga boylu, bu tepe ve çukurların üzerindeki küçük tepe ve çukurlar ise kısa dalga boylu yüzey sapmalarıdır. Farklı dalga boyundaki sapmalar genelde yüzeyin farklı fiziksel özellikleriyle ilgili olduğundan, bu sapmaların birbirinden ayrılması istenir. Filtreler yardımıyla ham profil dalga boylarına göre

ayrılmaktadır. Filtreler, sınır dalga boyu (cut off) ismi verilen ve λ_c ile gösterilen büyüklük ile belirlenir.

Pürüzlülük cihazlarında genelde iki tip elektriksel filtre mevcuttur; pürüzlülük filtresi (high-pass) ve dalgalılık filtresi (low-pass) (Şekil 4.6). Pürüzlülük filtresi, sınır dalga boyu λ_c 'den küçük dalga boyuna sahip sapsmaları geçirir (pürüzlülük), dalgalılık filtresi ise λ_c 'den büyük dalga boyuna sahip sapsmaları geçirir (dalgalılık ve form).



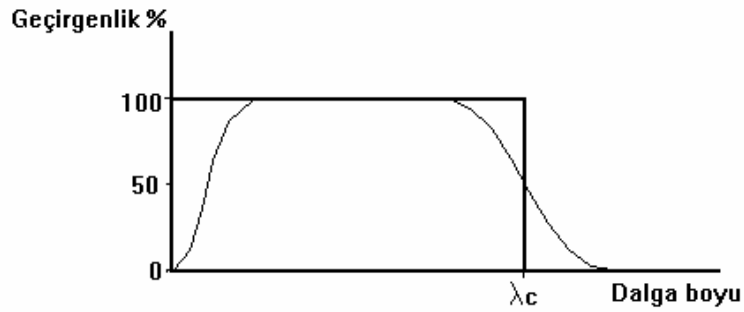
Şekil 4.6: Filtre çeşitleri

Pürüzlülük filtresi kabaca, dalga boyu λ_c 'ye kadar olan tüm sapsmaları geçiren, bundan büyükleri ise hiç geçirmeyen bir elektrik devresidir. Yani, geçirgenliğin, sapsmaların dalga boyuyla değişimini gösteren grafik, basamak fonksiyonu tarzında olacaktır. Ancak gerçekte Şekil 4.7'nin sağında ince çizgiyle belirtilen durum oluşur. Şekil 4.7'in sağında, λ_c 'den biraz büyük ve biraz küçük dalga boyuna sahip sapsmaların, genlikleri azaltılarak geçirildiği ve pürüzlülüğe katıldığı görülmektedir. DIN 4777'ye göre faz düzeltmeli filtrelerde λ_c dalga boyundaki sapsmaların genlikleri %50 azaltılmış olarak geçirilmektedir. Bu noktada sınır dalga boyunun tanımını şöyle yapabiliriz: “ λ_c , genliği % 50 oranında geçirilen sinüs dalgasının dalga boyudur”. Dalgalılığının dalgaboyu 0.8 mm olan bir yüzeyde $\lambda_c = 0.8$ mm seçilmesi en uygun durumdur. Ancak aynı yüzeyde $\lambda_c = 0.25$ mm seçilirse 0.8 mm dalga boyundaki sinüs dalgasının genliğinin sadece % 6'sı geçirilecektir. Seçilen λ_c 'nin profile etkisi şekil 4.9'da görülmektedir.

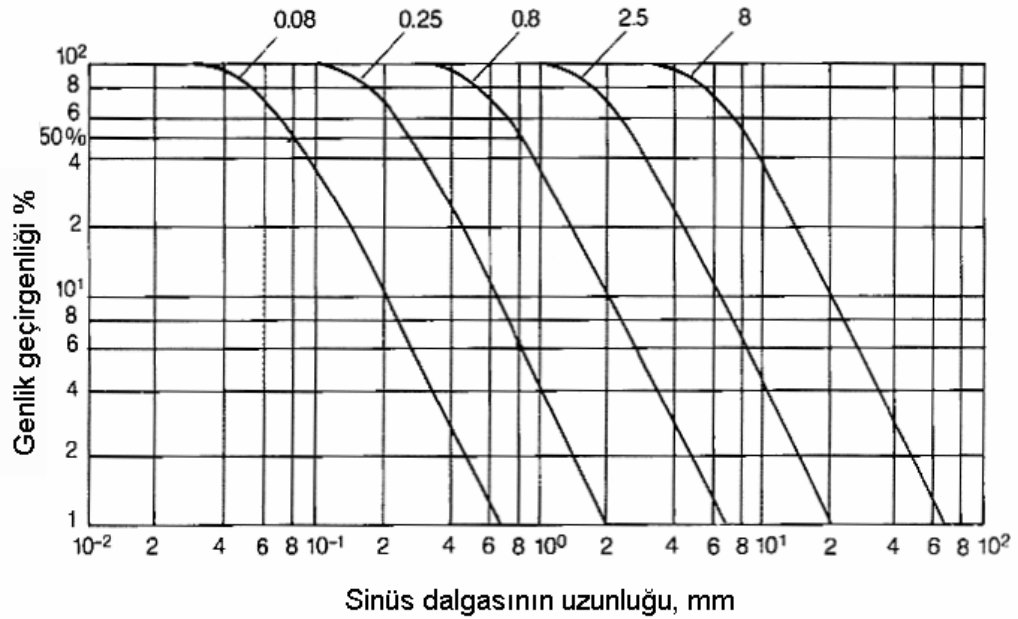
λ_c 'yi küçük seçmek suretiyle dalgalılık ve form iyice elimine edilebilir. Ancak λ_c çok küçük seçilirse, incelemek istediğimiz pürüzlülük, dalgalılık kabul edilip atılacaktır. Ayrıca geçirgenliğin basamak fonksiyonu olmaması sebebiyle pürüzlülük

genlikleri fazladan azaltılacaktır. Tüm bunlar yüzeyi yanlış algılamamıza yol açabilir. Bu sebeple λ_c seçiminde tavsiyelere uyulmalıdır. ISO 4288'e göre [42] 5 tane standart λ_c vardır. Bu standarda göre periyodik profillerde (tornalanmış, planyalanmış gibi) ortalama dalga boyu uzunluğuna göre, rastgele profillerde (lepleme, taşlama) ise pürüz derinliğine göre λ_c seçilebilir.

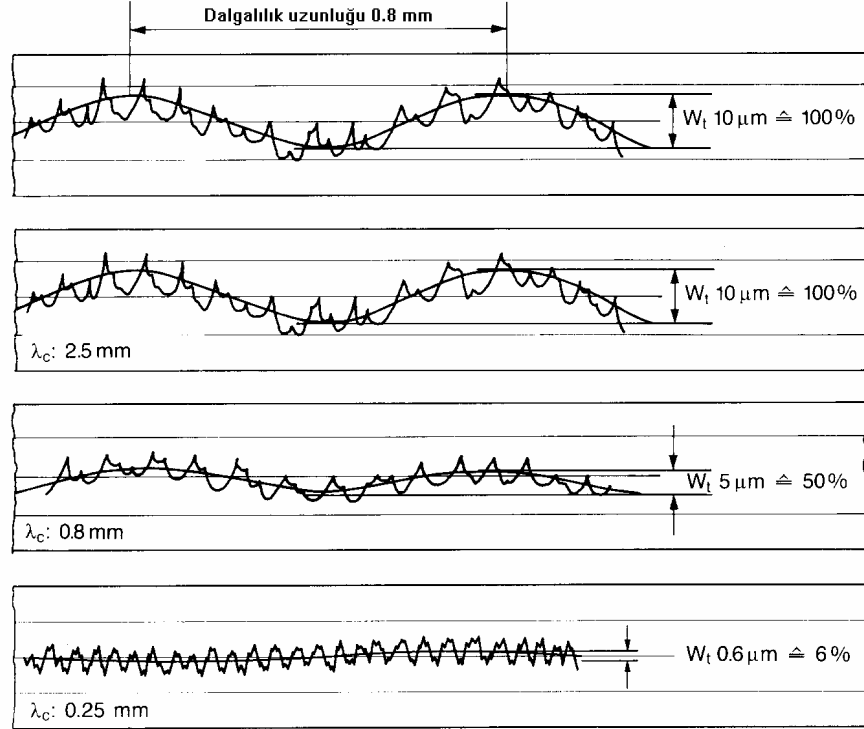
Şekil 4.7'nin sol tarafında ise, iğne boyutlarının sonlu olması sebebiyle, çok küçük dalga boyundaki sapmaların da genlikleri azaltılarak geçirildiği görülmektedir.



Şekil 4.7: Geçirgenlik - dalga boyu grafiği

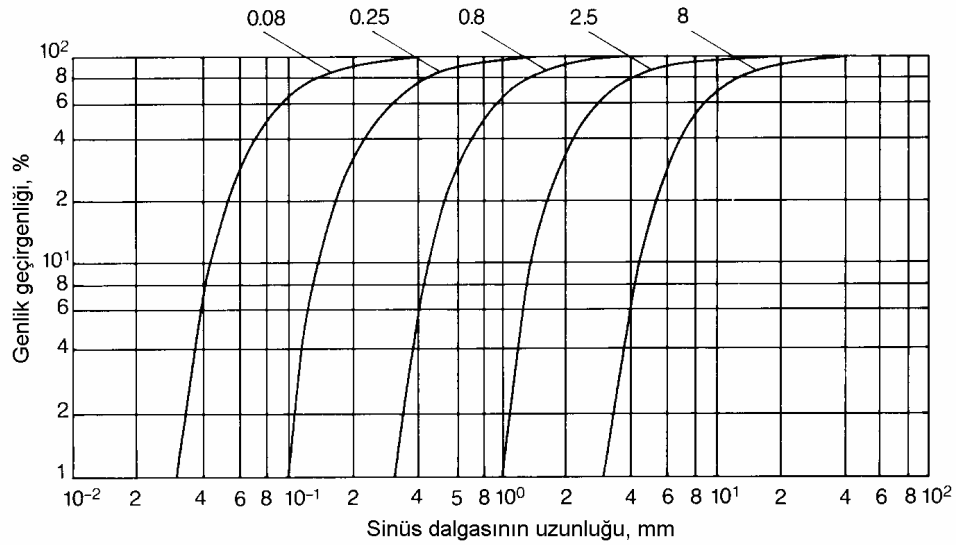


Şekil 4.8: Pürüzlülük filtresine ait karakteristikler



Şekil 4.9: Değişik filtrelerin profile etkisi

Dalgalılık filtresinde pürüzlülük süzülmekte, dalgalılık sapmaları geçirilmektedir. Pürüzlülük filtresindeki gibi burada da, dalgalılık dalgaboyu λ_c olan sapmanın genliği % 50 azaltılarak geçirilmektedir (Şekil 4.10).



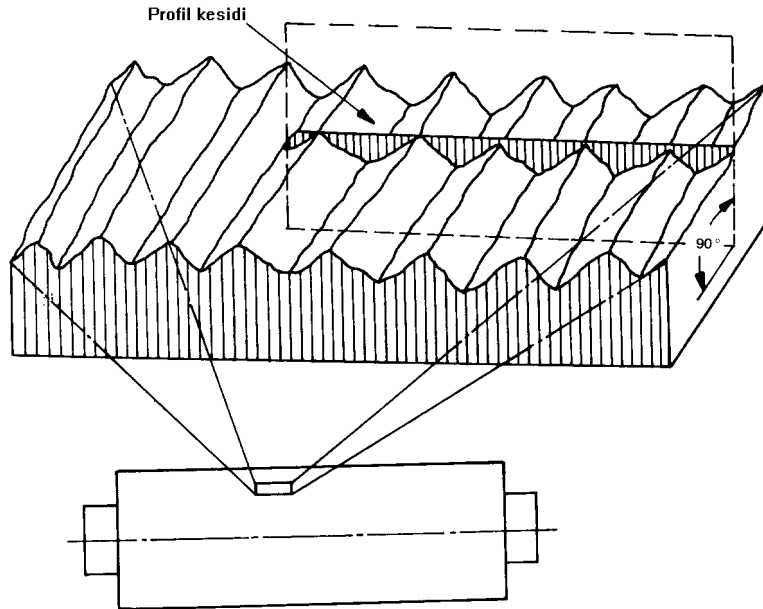
Şekil 4.10: Dalgalılık filtresine ait karakteristikler

Ham profilin filtrelenmesi eskiden elektriksel olarak gerçekleştirilirdi. Bunlar RC, 2RC ve faz düzeltmeli 2RC isimleriyle bilinen elektronik devrelerdir. Günümüzde ham profil verileri bilgisayarda işlenerek, uzun ve kısa dalga boylu sapmalar birbirinden ayrılmaktadır. Örneğin günümüzde çok yaygın kullanılan Gauss filtresinde ham profil ordinatları, bir ağırlık fonksiyonu ile çarpılıp integre edilerek profile ait ortalama ordinat değerleri hesaplanmaktadır. Bu ortalama ordinat değerlerinin birleştirilmesiyle “ortalama çizgi” elde edilir. Ham profil ordinatlarından ortalama çizgi ordinatları çıkarıldığında pürüzlülük profili bulunmaktadır. Bu filtrede ağırlık fonksiyonu Gauss eğrisidir [43]. Gauss filtresi faz düzeltmeli filtrelerin gerektirdiği özellikleri sağlamaktadır.

Sonuçta her iki yöntemle de birbirine çok benzeyen geçirgenlik karakteristikleri elde edilmektedir.

4.2 Pürüzlülük Parametreleri

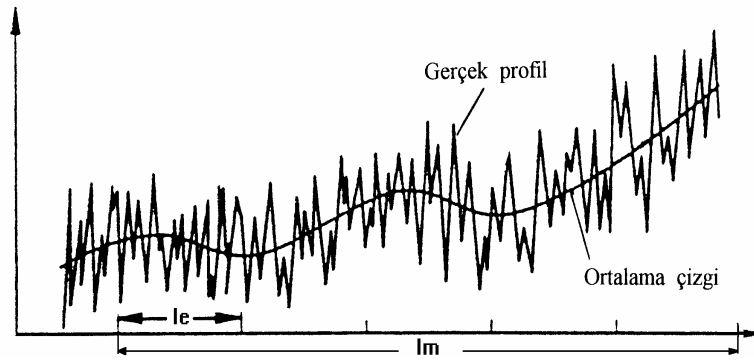
Yüzey yapısı değerlendirmesi genellikle iki boyutta yapılır. Şekil 4.11’de görüldüğü gibi, yüzeyde en büyük sapma değerlerini verecek doğrultusunda bir profil çıkarılır [44]. Genellikle profil yüzeye diktir.



Şekil 4.11: İncelenecek yüzey profilinin seçimi

Aşağıda, pürüzlülük ölçüm cihazlarının yazılımlarında bulunan bazı standart parametreler kısaca tanıtılmaktadır.

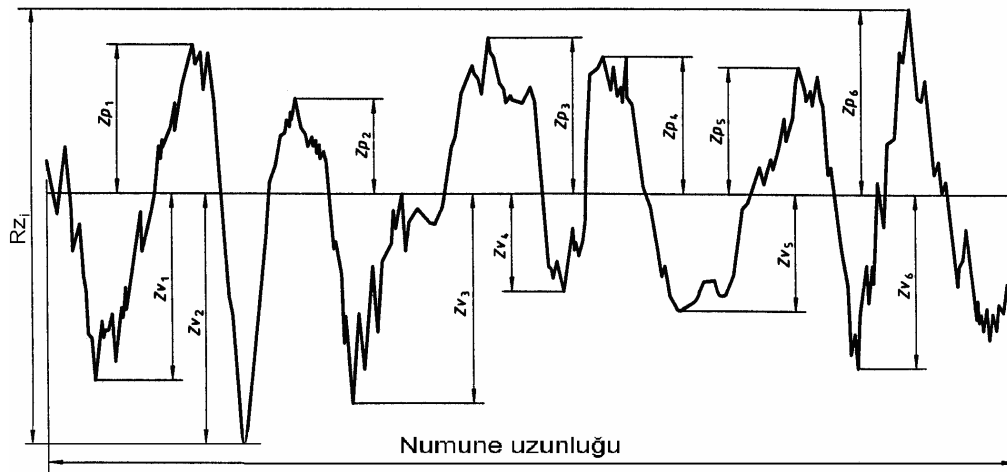
Ham profile tanımlanan parametreler “P” harfiyle, pürüzlülük profilinde tanımlanan parametreler ise “R” harfiyle başlamaktadır, örneğin P_t , R_a , R_z , R_{max} , ... gibi. Standart bir pürüzlülük ölçümü, ardışık 5 “numune uzunluğundaki” bir bölgenin ölçümünden oluşur (Şekil 4.12). Numune uzunluğu “ l_e ” ile gösterilir ve genelde sınır dalga boyu λ_c 'ye eşit olarak seçilir. 5 numune uzunluğundaki bölgeye değerlendirme uzunluğu” denir ve l_m ile gösterilir.



Şekil 4.12: Ortalama çizgi, numune uzunluğu ve değerlendirme uzunluğu

R_z : Maksimum profil yüksekliği. Her numune uzunluğu içindeki en yüksek ve en alçak nokta arasındaki yükseklik farkları tespit edilir (R_{zi}). Beş ayrı numune uzunluğunda bulunan beş yükseklik farkının ortalaması R_z 'dir (Şekil 4.13).

R_{max} : Maksimum pürüz derinliği. Beş tane numune uzunluğundaki R_{zi} değerlerinin en büyüğüdür.



Şekil 4.13: Maksimum profil yüksekliği R_{zi}

R_a : Profil sapmalarının aritmetik ortalaması. R_a en çok kullanılan parametredir. Yüzey hakkında genel bir fikir verir. Ancak, çok farklı yapıdaki iki yüzey aynı R_a değerine sahip olabilir. R_a 'nın diğer isimleri CLA ve AA'dır. Tanımı,

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx \quad (4.1)$$

R_q : Profil sapmalarının kareleri ortalamasının karekökü,

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l z(x)^2 dx} \quad (4.2)$$

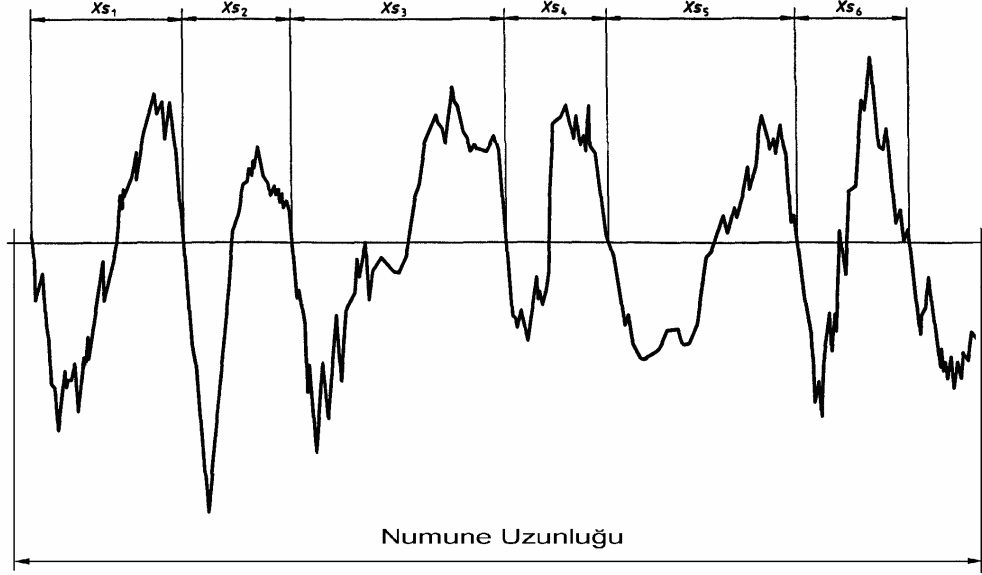
R_q genellikle R_a 'dan %25 daha büyüktür. Diğer ismi RMS'dir. R_a değeri aynı olan iki yüzeyin R_q değerleri farklı olabilir. R_q parametresi ortalamadan sapmanın bir ölçüsüdür. Bir sinüs dalgasında $R_a = R_q / 1.11$ formülü geçerlidir. Diğer tipteki dalgalar için bir formül bulunmamaktadır.

RS_m : Profil elemanlarının ortalama uzunluğu. Ardışık olarak, profilin tamamen negatif ve tamamen pozitif bölgede bulunan kısmına "profil elemanı" denir (Şekil 4.14). Profil elemanlarının uzunluklarının ortalaması:

$$RS_m = \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m X_{si} \right) \quad (4.3)$$

Profil elemanının tanımlı olabilmesi için yüksekliğinin en az %10 R_z kadar ve numune uzunluğu l_e 'nin en az %1'i olması lazımdır.

R_{3z} : Her numune uzunluğu içindeki en büyük üçüncü pürüzler seçilir ve değerlendirme uzunluğu boyunca bunların ortalaması hesaplanırsa R_{3z} elde edilir. İstisnai bir pürüzün etkisi R_z üzerinde %20 görülürken R_{3z} hiç etkilenmeyebilir. Bu yüzden R_z 'ye göre daha kararlıdır. Aynı sebepten dolayı tekrarlanabilirliği de R_z 'ye göre daha yüksektir. Bu parametre, çekirdek pürüz derinliğiyle alakalıdır. Aşınmaya maruz yüzeylerde (silindir gömleği vs.), belli bir süre sonra oluşacak pürüz yüksekliğini tahmin etmemize yardımcı olur. Ancak R_{3z} uluslararası standartlarda tanımlanmamıştır.



Şekil 4.14: Profil elemanlarının genişliği

$R\Delta q$: Profil eğimi. Yerel profil eğimlerinin kareleri ortalamasının kareköküdür. Bir numune uzunluğunda tanımlanır. Bir yüzeyde $R\Delta q$ büyüdükçe sürtünme ve aşınma artar, yük altında deformasyon ihtimali artar ve yüzeyin yansıtma özelliği azalır.

$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 dx} \quad (4.4)$$

Çalışmada, pürüzlülük ölçümlerinde kaydedilip saklanan diğer bazı parametrelerin sadece tanımları aşağıda verilmektedir:

R_p : Pürüzlülük profilinde, bir numune uzunluğu içinde profilin ortalama çizgiden en yüksek noktasının yüksekliği

R_t : Pürüzlülük profilinde, bir değerlendirme uzunluğu içinde profilin en yüksek ve en alçak noktaları arasındaki yükseklik farkı

R_{3z} : Pürüzlülük profilinde, üçüncü nokta yüksekliği

R_{Sk} : Pürüzlülük profilinde, profil sapmalarının küpleri ortalaması

R_{ku} : Pürüzlülük profilinde, profil sapmalarının dördüncü kuvvetleri ortalaması

R_v : Pürüzlülük profilinde, bir numune uzunluğu içinde profilin en derin noktasının derinliği

P_i: Primer profilde, bir değerlendirme uzunluğu içinde profilin en yüksek ve en alçak noktaları arasındaki yükseklik farkı.

P_a: Primer profilde, profil sapmalarının aritmetik ortalaması

PΔq: Primer profilde, profil eğimi (Profil sapmalarının kareleri ortalamasının karekökü kullanılarak)

R: Fransız CNOMO standardına göre, pürüzlülük motiflerinin ortalama derinliği

4.3 Ortalama Tepe Yuvarlaklık Yarıçapı R_{av}'nin Hesaplanması

R_{av} parametresi, standartlara geçmemiş bir parametredir. Bu nedenle pürüzlülük ölçüm cihazlarının yazılımında yer almamaktadır. Ortalama tepe yuvarlaklık yarıçapı R_{av}'nin hesaplanması için 2 yöntem mevcuttur:

4.3.1 Otokorelasyon analizi ile R_{av}'nin hesabı

Rastgele pürüzlülüğe sahip yüzeylerde uygulanabilen istatistiksel bir metottur [2, 40]. Profil yüksekliklerinin Gauss dağılımına sahip olduğu ve otokorelasyon fonksiyonunun eksponansiyel olduğu kabul edilmektedir. Bu durumda yüzeydeki ortalama değerler aşağıdaki iki parametreyle tamamen tanımlanabilir: Profil yüksekliklerinin standart sapması σ_h (yükseklik dağılımının kareler ortalamasının karekökü değeri) ve korelasyon mesafesi β*. Otokorelasyon fonksiyonu:

$$C(\beta) = \lim_{L_p \rightarrow \infty} \frac{1}{L_p} \int_{-L_p/2}^{+L_p/2} y(x)y(x + \beta)dx \quad (4.5)$$

olarak tanımlanır. Burada,

y(x): Profilin bir x mesafesindeki yüksekliği

y(x+β): Profilin komşu x+β mesafesindeki yüksekliği

β: x'e verilen artım miktarı

L_p: Profilin uzunluğu

Teoriye göre otokorelasyon fonksiyonu eksponansiyel olmalıdır:

$$C(\beta) = e^{-\frac{\beta}{\beta^*}} \quad (4.6)$$

β^* değeri için eksponansiyel otokorelasyon fonksiyonu $1/e$ değerine iner. Ortalama tepe yuvarlaklık yarıçapları ise aşağıdaki bağıntılarla hesaplanır. İnce pürüzlülük bileşeni için:

$$R_{av} = 0.05 \frac{\beta^{*2}}{\sigma_h} \quad (4.7)$$

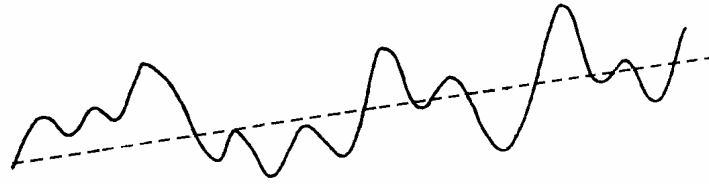
Kaba pürüzlülük bileşeni için:

$$R_{av} = 2.2 \frac{\beta^{*2}}{\sigma_h} \quad (4.8)$$

4.3.2 Sayısal analiz ile R_{av} 'nin hesabı

Çalışmada R_{av} sayısal analiz ile ham profil verilerinden hesaplanmaktadır [29, 30]. Bu maksatla bir Vbasic programı hazırlanmıştır.

Pürüzlülük ölçümlerinden ham profil verileri elde edilmektedir. Profilin iki noktası arasındaki mesafe (sampling length) $l = 0.7 \mu\text{m}$ 'dir. Profilin değerlendirme uzunluğu 4 mm olup 5760 noktadan oluşmaktadır. Elde edilen ham profiller genellikle tam yatay olmayıp, $1/1000$ 'e yakın eğimlidir. Öncelikle ham profilin, en küçük kareler doğrusu hesaplanmakta (Şekil 4.15) ve bu doğruya göre profil yatay hale getirilmektedir (Şekil 4.16). Sonra profil, değerlendirme uzunluğunun başından sonuna kadar, ardışık 3 nokta incelenerek taranmaktadır.

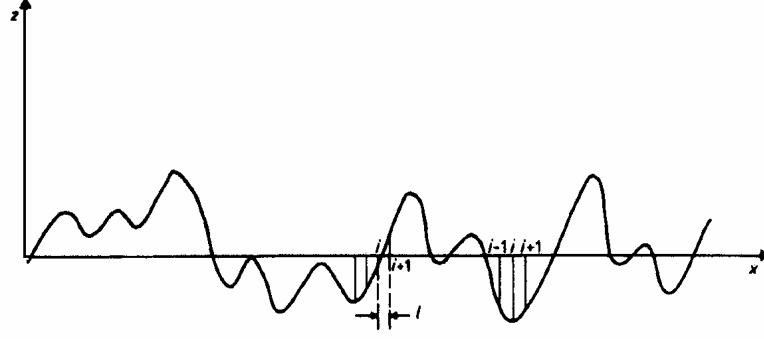


Şekil 4.15: Ham profile en küçük kareler doğrusunun uydurulması

Noktalar z_{j-1} , z_j ve z_{j+1} olarak gösterilebilir. Eğer bu üç noktadan ortadaki, sağındaki ve solundaki komşu noktadan daha yüksekse, bu üç nokta bir yerel tepe oluşturuyor demektir. Yani,

$$z_{j-1} < z_j > z_{j+1} \quad (4.9)$$

olmalıdır.



Şekil 4.16: Profilin yatay hale getirilmesi ve yerel tepelerin yuvarlaklık yarıçaplarının hesabı

Bu yerel tepe için eğrilik:

$$C_p = \frac{d^2 z}{dx^2} \quad (4.10)$$

olarak verilir. Sayısal hesaplamada eşitlik 4.10 aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$C_{pj} = \frac{2z_j - z_{j-1} - z_{j+1}}{l^2} \quad (4.11)$$

Tepe yuvarlaklık yarıçapı ise:

$$r = \frac{1}{C_p} \quad (4.12)$$

şeklindedir. Ortalama tepe yuvarlaklık yarıçapı:

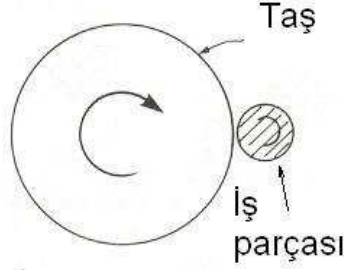
$$R_{av} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{C_{p_j}} \quad (4.13)$$

olarak hesaplanır. Burada n, profildeki yerel tepelerin sayısıdır.

Bir disk için ortalama çevresel R_{av} ve ortalama aksenal R_{av} 'yi hesaplayan bir Visual Basic programı hazırlanmıştır (EK G).

5. DİSK YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN OLUŞTURULMASI

Bu çalışmada aşındırıcı karşı yüzey olarak paslanmaz çelik diskler kullanılmaktadır. Disklerin silindirik yüzeyinde farklı yüzey pürüzlülüğü değerleri elde etmek için iki yöntem kullanılmıştır. Eksenel yöndeki R_a parametresinin 0.2 – 3 μm arasında olduğu pürüzlülük değerleri, punta arası dış silindirik taşlama yöntemiyle üretilmiştir (Şekil 5.1). Eksenel yöndeki R_a 'nın 0.08 – 0.15 μm arasında olduğu pürüzlülük değerleri ise, düşük pürüzlülüğe sahip taşlanmış disklerin 280 numara ila 320 numara arasındaki SiC zımpara kağıdı ile torna tezgahında elle parlatılmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 5.1: İki punta arası dış silindirik taşlama şematik gösterimi

5.1 İki Punta Arası Silindirik Taşlama

Disklerin taşlanması, mümkün olan en küçük talaş kaldırma derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Böylece disklerin tekrar tekrar taşlanması dış çapın azalmasının önüne geçilmiştir.

Taşlama işleminde yüzey pürüzlülüğüne etkiyen faktörler şunlardır [30]:

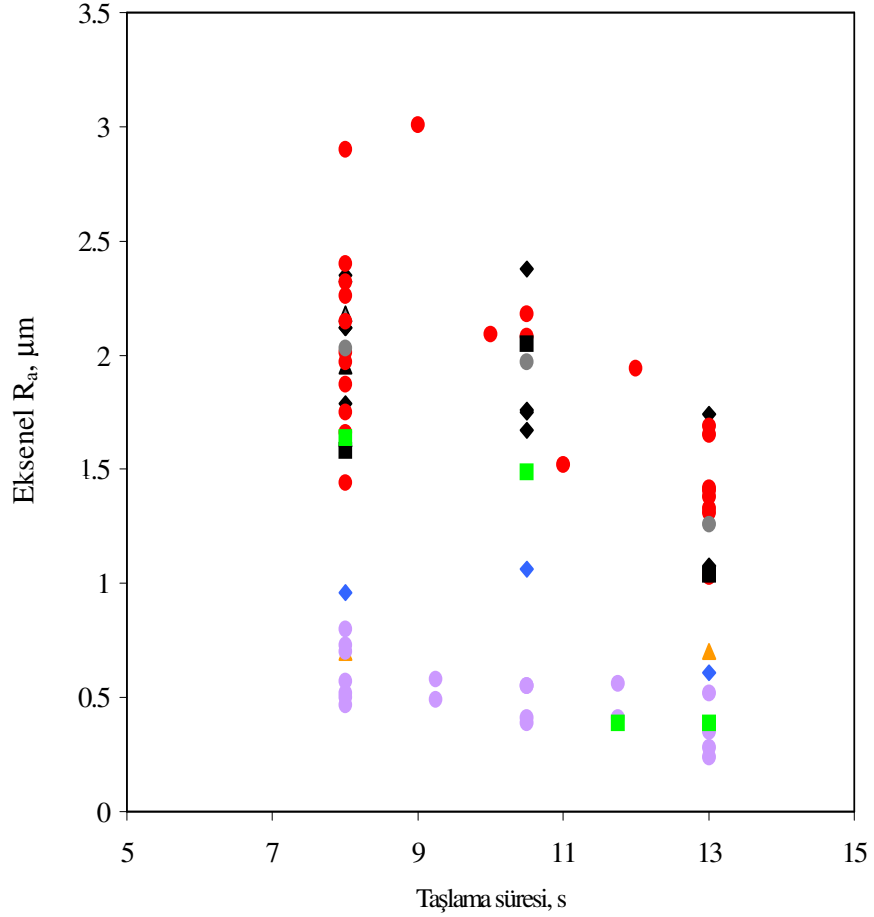
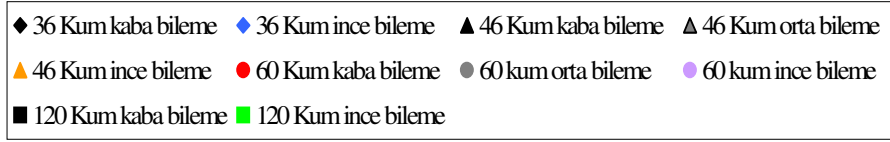
1. Taşın özellikleri
 - a. Taşın çapı
 - b. Tane tipi
 - c. Taneler arasındaki mesafe
 - d. Tane boyutu

- e. Taşın sınıfı ve elastisite modülü
 - f. Bağlayıcı çeşidi
 - g. Taşın bilenme şekli
 - h. Taşın balansı
2. İşlenen parçanın özellikleri
- a. Parça çapı
 - b. Parçanın elastisite modülü
3. Taşlama tezgahının özellikleri: Taşı döndüren tablanın rijitliği, titreşim sönüm özellikleri ve titreşim izolasyonu
4. Çalışma şartları
- a. Taşın çevresel hızı
 - b. İşlenen parçanın çevresel hızı
 - c. Taşın talaş kaldırma derinliği
 - d. Taşlama süresi

5.2 Deneylerde Kullanılan Disklerin Taşlanması

Bu çalışmada farklı pürüzlülük değerleri elde etmek için aşağıdaki faktörler değiştirilmiştir:

a. Taşın tane boyutu: 36 kum, 46 kum, 60 kum ve 120 kum olmak üzere dört farklı taş kullanılmıştır. Şekil 5.2'den tane boyutu küçüldükçe (kum sayısı arttıkça) pürüzlülüğün genel olarak azaldığı görülmektedir. Ancak taşlama işlemi rastgele etkilerin yüksek oranda görüldüğü bir işlemdir. Her taş ile aynı sayıda taşlama yapılamamış olması, aynı taş için her taşlamada aynı taş dış çapı değerinin (dolayısıyla çevresel hızının) temin edilememesi, taşların bilenmesinde tam olarak aynı şartlara sadık kalınmaması ve operatöre bağlı sebeplerden dolayı, tane boyutu ile pürüzlülük arasında kesin bir bağlantı kurmak mümkün değildir. Sadece genel eğilimlerden bahsedilebilir.



Şekil 5.2: Çalışmada gerçekleştirilen taşlama işlemleri

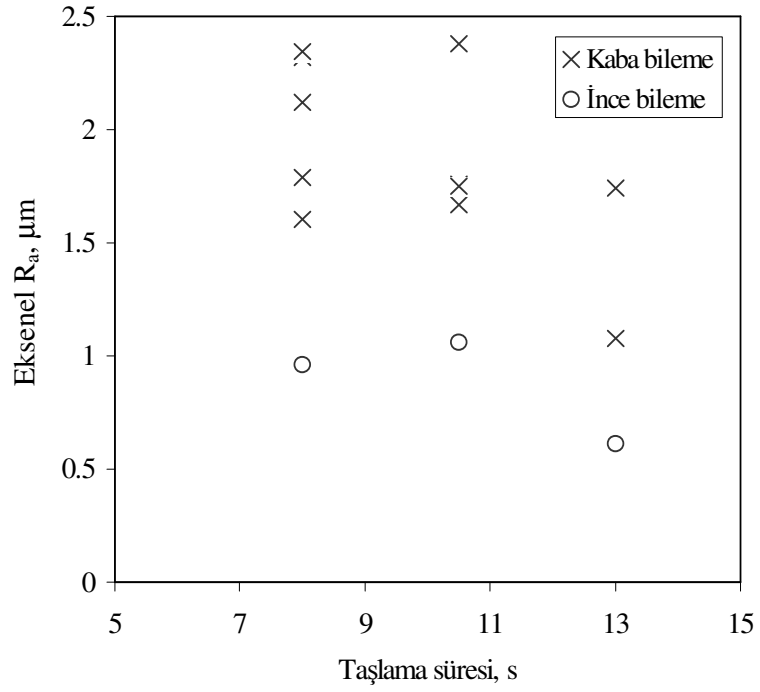
b. Taşın bileme hızı: Bileme için elmas, taş üzerinden hızlı geçirilirse taş yüzeyi kaba, yavaş geçirilirse ince yapılı olmaktadır. Çalışmada taş üç farklı hızda bilenmiş ve oluşan taş yüzeyi “kaba, orta ve ince” olarak isimlendirilmiştir. Bileme hızları şöyledir:

$$\text{Kaba bileme hızı} = 70 \text{ mm/s}$$

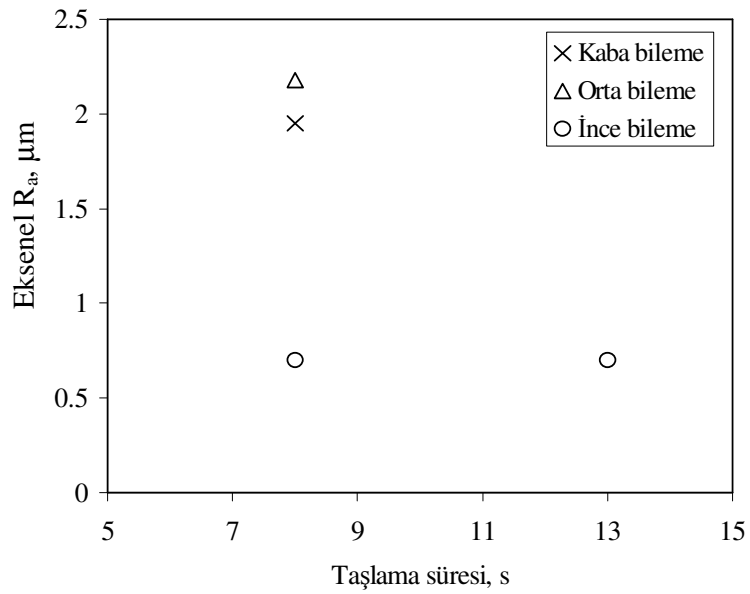
$$\text{Orta bileme hızı} = 39 \text{ mm/s}$$

$$\text{İnce bileme hızı} = 7.7 \text{ mm/s}$$

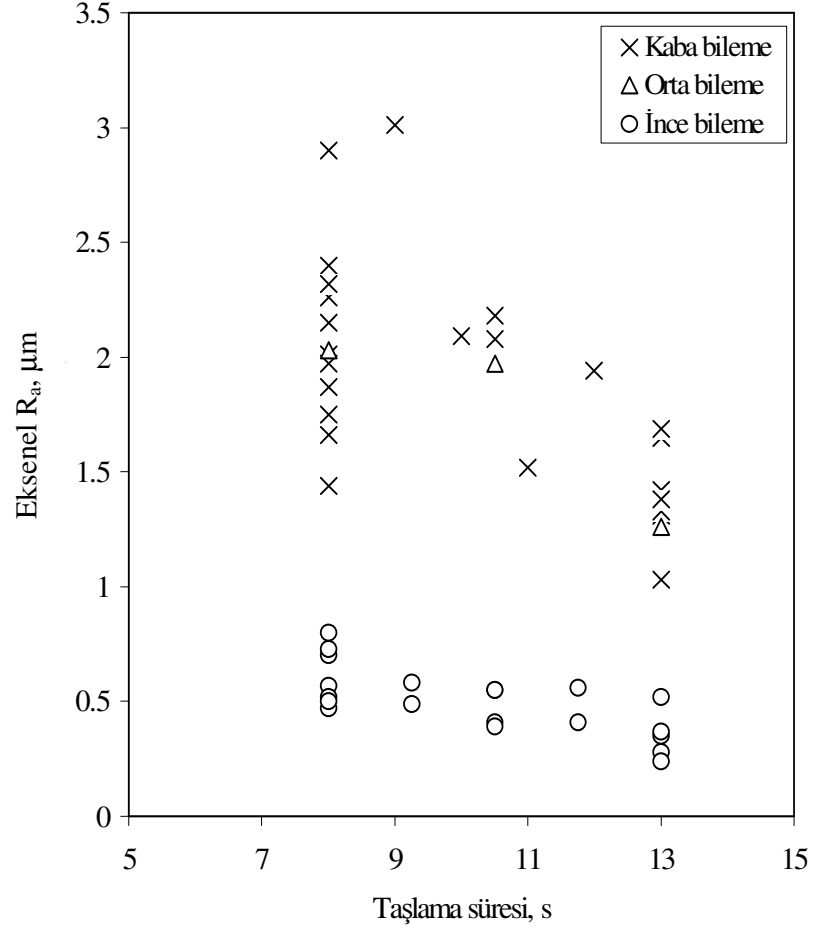
Şekil 5.3, 5.4, 5.5 ve 5.6'dan bileme ne kadar ince ise pürüzlülüğün o kadar azaldığı açıkça görülmektedir.



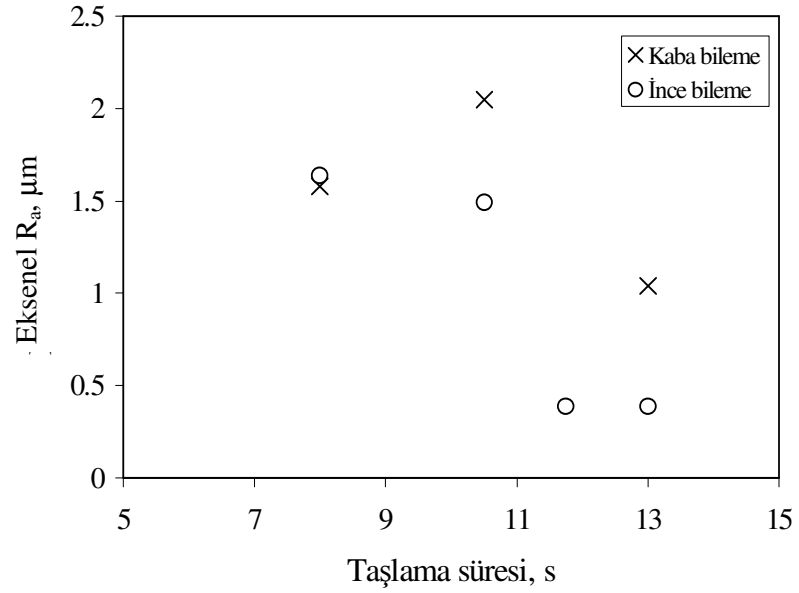
Şekil 5.3: “36 kum” taş ile taşlama



Şekil 5.4: “46 kum” taş ile taşlama



Şekil 5.5: "60 kum" taş ile taşlama



Şekil 5.6: "120 kum" taş ile taşlama

c. Taşlama süresi: Genellikle taş ince bilemek ve taşlama süresini artırmak pürüzlülüğü azaltmakta ve yüzeyin homojenliğini artırmaktadır. Taşı kaba bilemek ve taşlama süresini kısaltmak ise pürüzlülüğü artırmakta ve homojenliği azaltmaktadır. Taşlama süreleri şöyledir:

En az bekleme süresi = 8 ± 2 s

En çok bekleme süresi = 13 ± 3 s

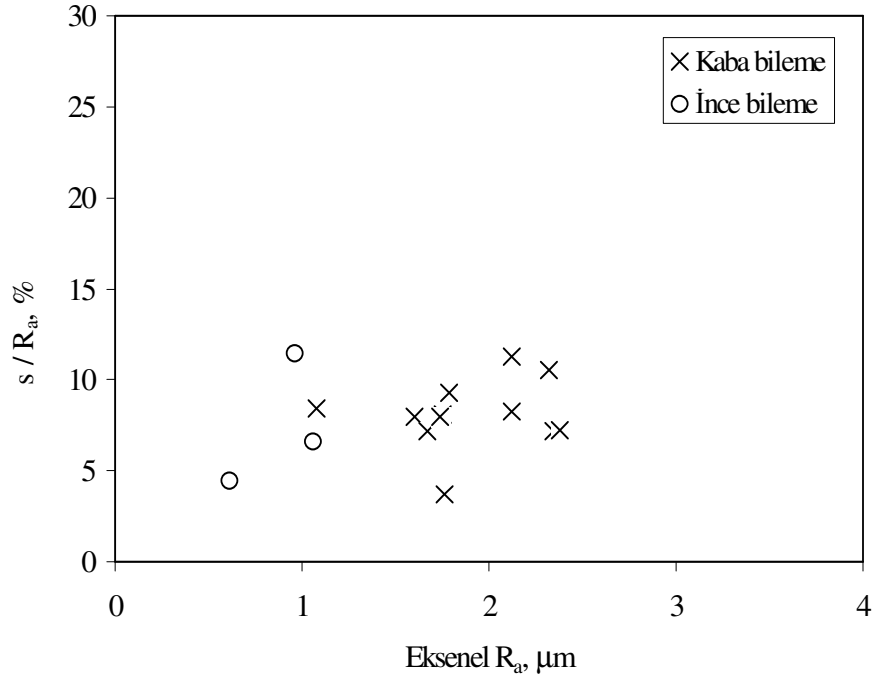
Ancak bu parametreler aynı tutulsa da her zaman aynı pürüzlülük değerleri elde edilememiştir. Şekil 5.3, 5.4, 5.5 ve 5.6'dan taşlama süresi uzadıkça pürüzlülüğün azaldığı açıkça görülmektedir.

d. Taşın çevresel hızı: Çalışmamızda kullandığımız taşlama tezgahında taş dönme hızı sabittir, hızı değiştirme imkanı yoktur. Ancak kullanım ömrünü tamamlamak üzere olan ve dolayısıyla çapı azalmış taşlar kullanılarak düşük çevre hızı elde edilebilir. Düşük çevre hızı, yüksek hızda taşlamaya oranla parçanın pürüzlülüğünde bir miktar artışa sebep olmaktadır. Özellikle aksenal $R_a = 3 \mu\text{m}$ gibi yüksek pürüzlülük değerlerinin elde edilmesinde bu yöntem kullanılmıştır.

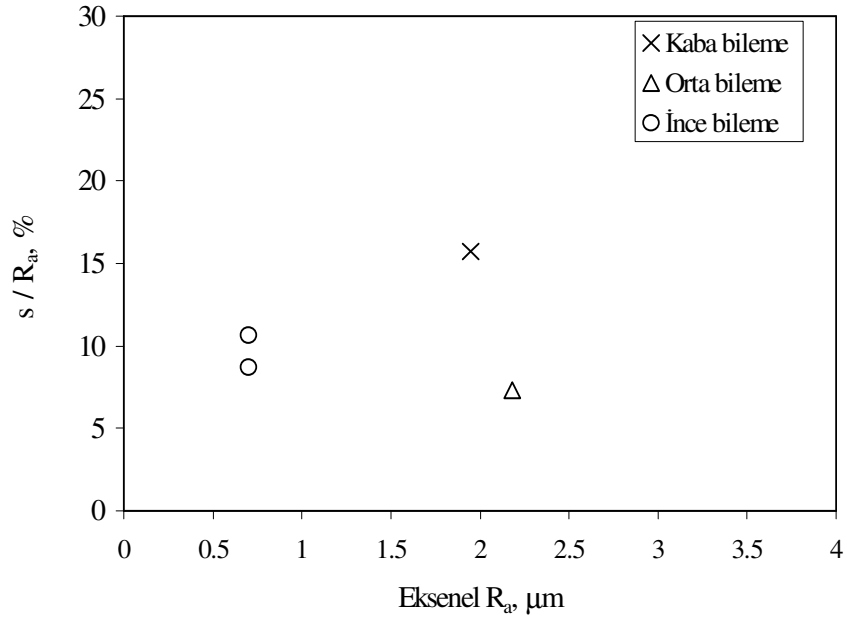
CNC taşlama tezgahlarında taş hızının değiştirilmesi mümkündür. Ayrıca, çalışmada kullandığımız tipte klasik taşlama tezgahlarında, tezgaha eklenecek bir redüktör sistemiyle çevresel hızı değiştirme imkanı bulunabilmektedir. Bu sayede çevresel hızın pürüzlülüğe etkisi daha geniş şekilde incelenebilir.

Şekil 5.7, 5.8, 5.9 ve 5.10'da disk yüzeylerinde elde edilen ortalama aksenal R_a değerlerine karşılık izafi standart sapma s/R_a 'nın (homojenlik) nasıl değiştiği görülmektedir. Tüm tane büyüklüğü, bileme şekli ve taşlama süreleri için, izafi standart sapmanın kabaca % 10 mertebesinde olduğu söylenebilir. Ayrıca aksenal R_a nın artmasıyla izafi standart sapma hafifçe artmaktadır.

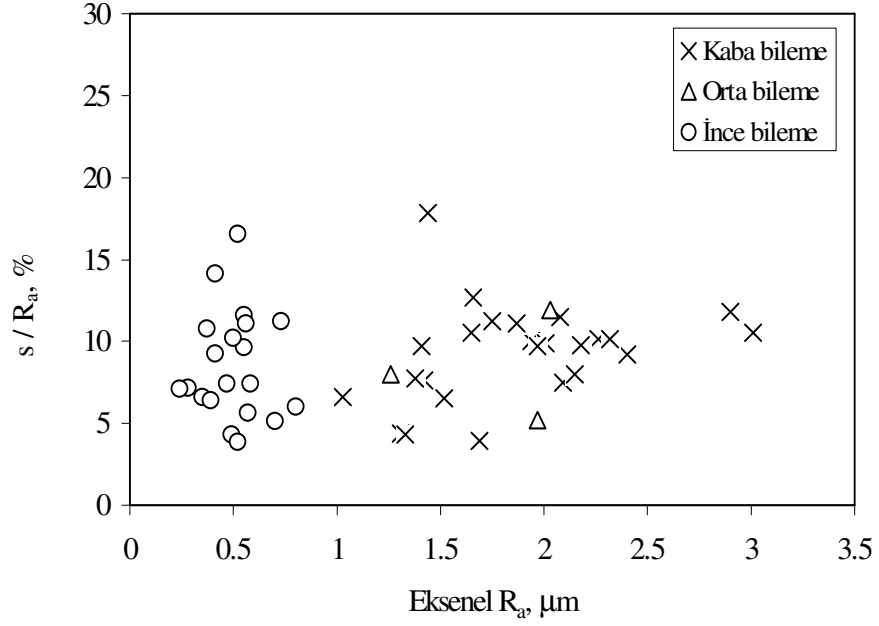
Bu çalışmada ayrıca, çok yüksek pürüzlülük değerleri elde edilebileceği düşüncesiyle, özel olarak üretilen 16 kum tane boyutunda bir taş ile de denemeler yapılmıştır. Ancak daha ilk taşlama denemelerinde, bu taş ile yüksek pürüzlülük elde edilemeyeceği anlaşılmıştır. Ayrıca taşlama işlemi esnasında bu taş, diğerlerine oranla çok daha hızlı bir şekilde tükenmektedir. Bu sebeple 16 kum taş için elde edilen sonuçlar çalışmada sunulmamıştır.



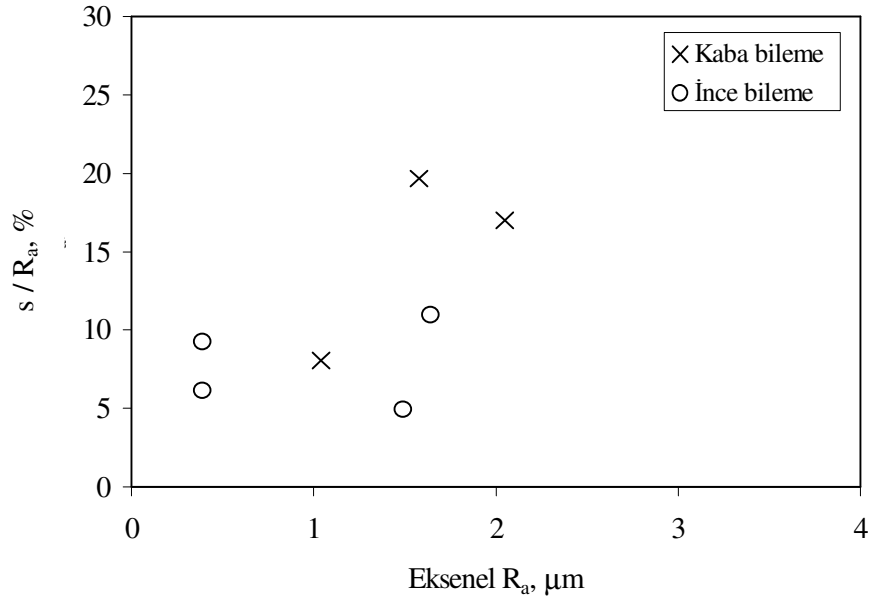
Şekil 5.7: "36 kum" taş ile taşlamada disk yüzeyinin homojenliği



Şekil 5.8: "46 kum" taş ile taşlamada disk yüzeyinin homojenliği



Şekil 5.9: “60 kum” taş ile taşlamada disk yüzeyinin homojenliği



Şekil 5.10: “120 kum” taş ile taşlamada disk yüzeyinin homojenliği

5.3 Deneylerde Kullanılan Disklerin Parlatılması

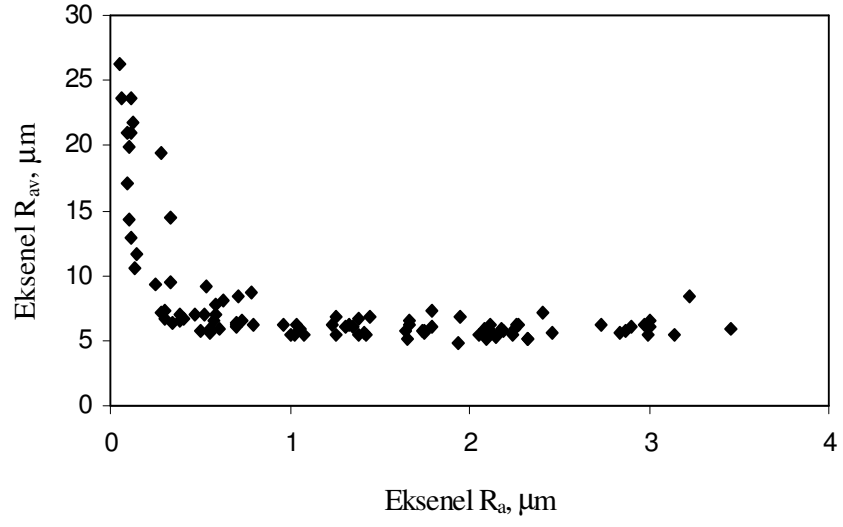
Taşlamayla inilebilecek en küçük pürüzlülük değeri eksenel $R_a = 0.1 \mu\text{m}$ 'dir [45]. Daha küçük değerlere inmek için lepleme veya zımparalama işlemi uygulanabilir. Zımparalama ile yüzeyin sadece pürüzlülüğü azaltılabilirken, lepleme işlemiyle hem pürüzlülüğün hem de yuvarlaklık değerinin azaltılması mümkündür. Bu çalışmada

zımpara kağıdı kullanılmıştır. SiC Zımpara kağıdı 280 veya 320 numaradır. Diskler bir torna tezgahına bağlanıp döndürülmüş ve zımpara kağıdı elle uygulanmıştır. Taşlamadaki gibi yönlendirilmiş yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Zımpara kağıdının sürekli olarak aşınmamış kısmının diske temas etmesi için, zımparanın taze yüzeyi 5-6 s süreyle bastırılmış, sonra diğer bir bölgesi uygulanmıştır. Bu şekilde zımparanın kullanılmamış bölgelerinde uygulama yapılmıştır. Böylece homojen bir yüzey elde edilmektedir. Zımpara kağıdıyla fazla talaş kaldırmak mümkün olmadığından, diskin parlatma işlemi öncesi pürüzlülüğü mümkün olduğunca küçük olmalıdır. Parlatma işleminde parmakla uygulanan kuvvete ve işlemin süresine bağlı olarak eksenel R_a değerinin 0.08 – 0.15 μm arasında değiştiği görülmüştür.

5.4 Taşlama ve Parlatma İşlemleriyle Elde Edilen Disk Yüzeylerinin Eksenel R_a ve Eksenel R_{av} Değerleri Arasındaki İlişki

Şekil 5.11’de görüldüğü gibi eksenel R_a ’nın 0 – 0.4 μm aralığında eksenel R_{av} hızla azalmakta ve sonra hemen hemen sabit kalmaktadır. Buradan, eksenel R_a ’nın 0.4 μm değerinden itibaren tepe yuvarlaklık yarıçapı yaklaşık 7 μm olarak sabit kalırken, pürüz vadilerinin derinleşmeye devam ettiği anlaşılmaktadır. Çalışmada rastlanan en küçük tepe yuvarlaklık yarıçapı 4.8 μm ’dir.

Bu olayın sebebi için iki tahmin yapılabilir: Birincisi disk malzemesi ile taş arasındaki etkileşimler sonucu, tepe yuvarlaklık yarıçapının fiziksel olarak bu değer altına inmemesidir. İkincisi ise pürüzlülük ölçüm cihazı uç yarıçapının sonlu değerde olmasıdır. Cihazda kullanılan ucun yarıçapı 2 μm olduğundan, tepe yuvarlaklık yarıçapının gerçek değerden 2 μm kadar fazla ölçülmüş olması mümkündür. Ancak ucun formunun ideal bir küre olup olmadığı hususu da ölçülen yarıçap değerini etkileyebilir.

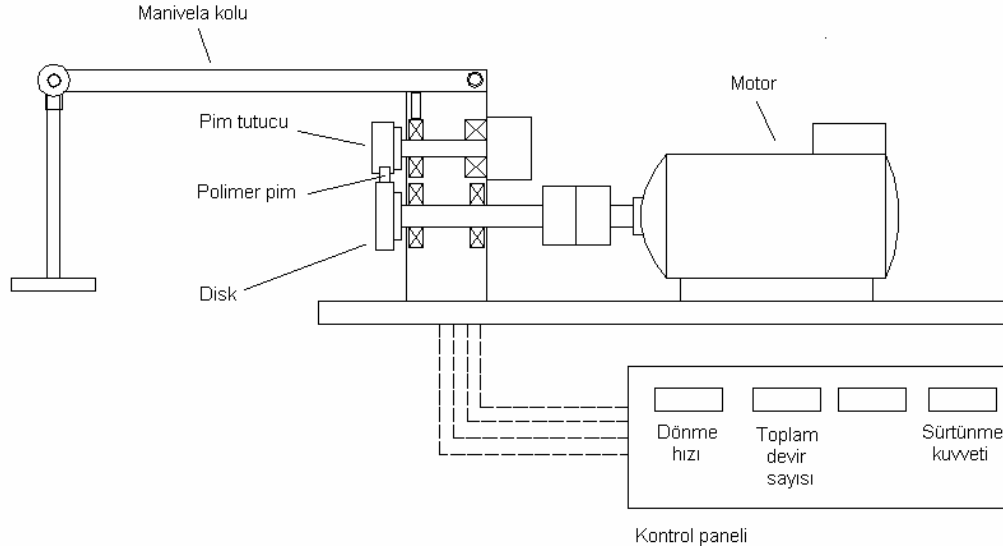


Şekil 5.11: Tüm taşlama ve parlatma işlemleri için eksenel R_a ve eksenel R_{av} parametreleri arasındaki ilişki

6. DENEYLER

6.1 Deney Tesisatı

Aşınma deneyleri İTÜ Makina Fakültesi Makina Elemanları laboratuvarında bulunan PLINT marka papuç-disk aşınma cihazında yapılmıştır (Şekil 6.1). Bu cihaz, sabit hızla dönen bir diskin yan yüzeyinde, pim şeklindeki bir numuneyi belli bir normal kuvvetle bastırarak aşındırmaktadır. Pim tutucuya bağlı bir kuvvet dönüştürücü sürtünme kuvvetini ölçmektedir. Diskin dönme hızı ayarlanabilmektedir. Toplam devir sayısı tespit edilmektedir. Normal yük bir manivela kolu yardımıyla pime uygulanmaktadır. Manivela koluna istenen ağırlıklar asılabilmektedir.

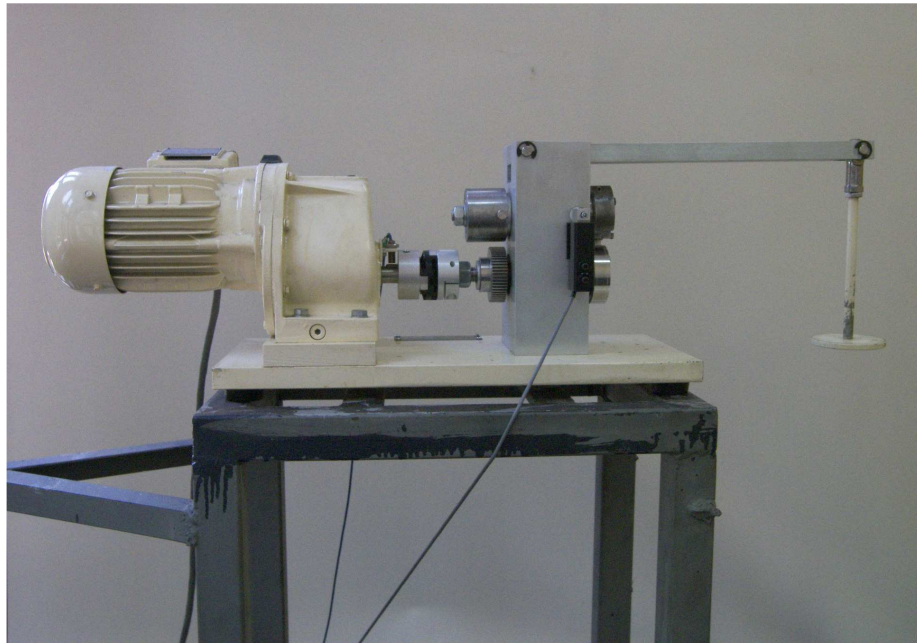


Şekil 6.1: PLINT marka papuç-disk aşınma cihazı prensip şeması

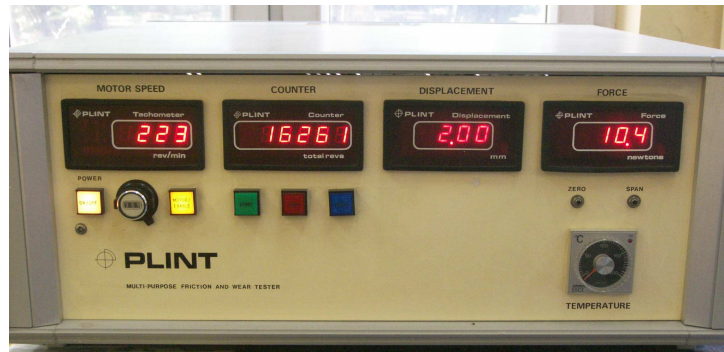
Aşınma cihazının teknik özellikleri Tablo 6.1’de verilmiştir. Cihazın genel görünüş fotoğrafı Şekil 6.2’de, önemli kısımlarının fotoğrafları Şekil 6.3 ve 6.4’te görülmektedir.

Tablo 6.1: PLINT aşınma cihazı teknik özellikleri

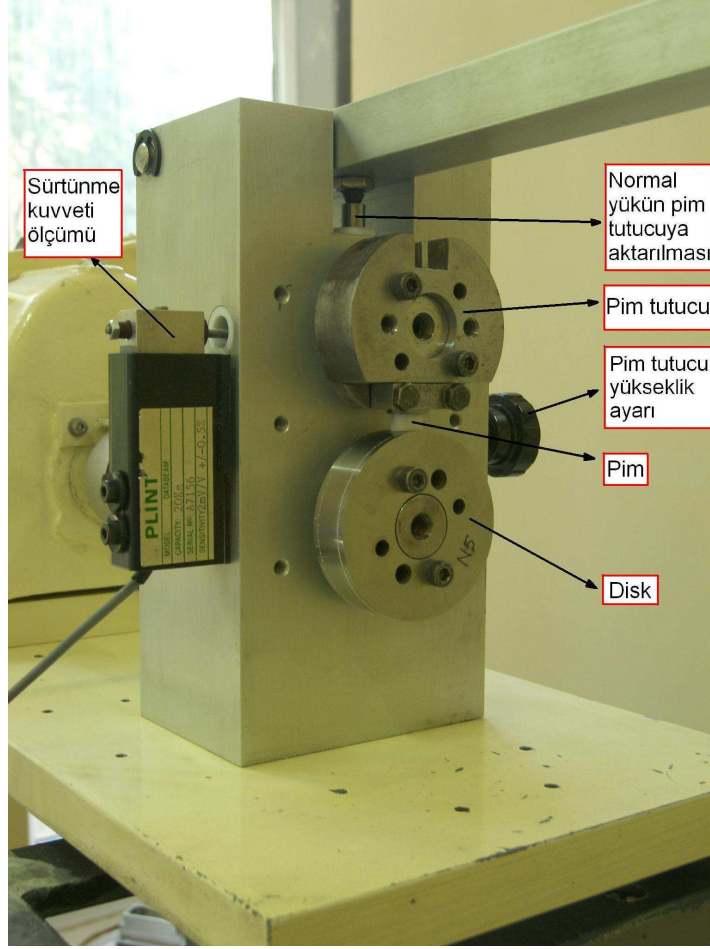
Tahrik	A.C. Motor, 425 d/d (50 Hz)
Hız aralığı	30 – 800 d/d
En küçük normal yük	36 N
En büyük normal yük	750 N
Normal yük için kaldıraç oranı	5:1
Kuvvet dönüştürücü yük aralığı	± 200 N



Şekil 6.2: Aşınma cihazı genel görünüş



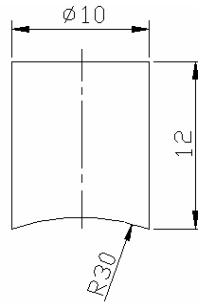
Şekil 6.3: Aşınma cihazı kontrol ünitesi



Şekil 6.4: Aşınma cihazının önemli kısımları

6.2 Polimer Numuneler

Polimer numuneler 10 mm çaplı ve yaklaşık 12 mm boyunda silindir şeklindedir (Şekil 6.5). Polimer numuneler içi dolu çubuktan tornalamayla işlenmiştir. Pimin aşınma yüzeyi, disk yüzeyiyle örtüşebilmesi için 30 mm yarıçapında freze ile işlenmiştir.



Şekil 6.5: Polimer pimler

Polimer numuneler ithalatçı Kahvecioğlu Plastik Ltd. Şti.’den temin edilmiştir. Üretici firma “Quadrant Engineering Plastic Products” (web: www.quadrantepp.com)’tır. Polimerlerin Özellikleri Tablo 6.2’de verilmektedir.

Tablo 6.2: Deneylerde kullanılan polimerlerin özellikleri.

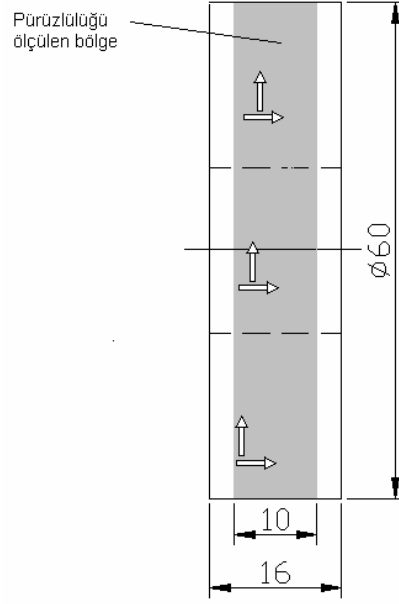
MALZEME	EKSTRÜZYON PA 6	DÖKÜM PA 6	PET	POM	PP
Yoğunluk (gr/cm ³)	1.14	1.15	1.39	1.43	0.91
Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	78	85	90	70	30
Elastisite Modülü (N/mm ²)	3100	3300	3400	3300	1300
Kopma Uzaması (%)	50	25	15	30	650
Sertlik	Rockwell M 85	Rockwell M 88	Rockwe ll M 96	Rockwell M 90	Shore 70
Darbe Mukavemeti (kJ/mm ²) (Numune dik konumda ve çentikli)	4	4	3.5	10	4
Isıl Genleşme Katsayısı (x10 ⁻⁶)/°C					
23-60° arası ortalama	90	80	60	95	150
23-100° arası ortalama	105	90	80	110	150
Isı İletim Katsayısı (W/mK)	0.28	0.29	0.29	0.31	0.22
Maksimum kullanım sıcaklığı (°C)					
Kısa süreli (birkaç saat)	160	170	160	150	120
Uzun süreli (5000-20000 saat)	85/70	105/90	115/100	105/90	90
Ergime sıcaklığı (°C)	220	220	255	175	165

6.3 Deneylerde Kullanılan Diskler ve Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi

Deneylerde aşındırıcı karşı yüzey olarak paslanmaz çelik diskler kullanılmaktadır. Çapı 60 mm, kalınlığı 16 mm’dir. Sertliği 52 HRC’dir. Disk malzemesi AISI 416 C martenzitik paslanmaz çeliktir. Alaşım % 0.15 C, % 1.25 Mn, % 1 Si, % 13 Cr, % 0.04 P, % 0.03 S’den oluşmaktadır.

MAHR marka pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak disklerin silindirik yan yüzeylerinde disk eksenine yönünde ve çevresel yönde onar adet ölçüm alınmıştır (Şekil 6.6). 10 mm çapındaki polimer numune, disk yan yüzeyinin ortasına temas ettiğinden ölçümler merkezde 10 mm genişlikteki bir bantta yapılmıştır. Yüzeyi daha

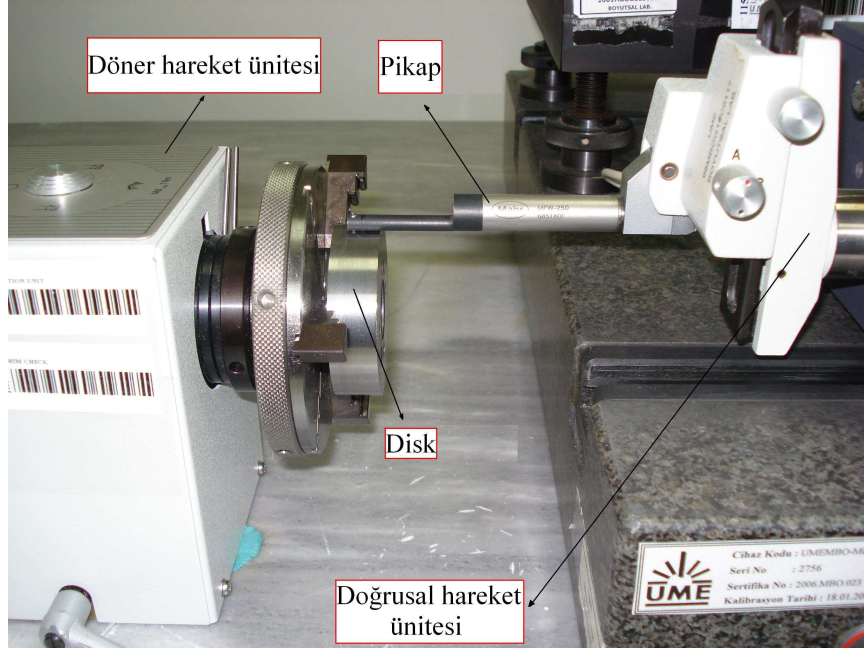
iyi karakterize edebilmek için aksel ölçümlerde yaklaşık 0.5 mm, çevresel ölçümlerde 1 mm kaydırılarak ölçümler alınmıştır. Tüm diskler döner hareket ünitesine bağlanarak ölçülmüştür (Şekil 6.7 ve 6.8). Çevresel ölçümlerde pikap sabit tutulup döner hareket ünitesi döndürülmüştür. Aksel ölçümlerde ise döner hareket ünitesi sabit tutulup doğrusal hareket ünitesi çalıştırılmıştır.



Şekil 6.6: Diskin şematik görünümü, çevresel ve aksel ölçümler



Şekil 6.7: Pürüzlülük ölçüm cihazının genel görünümü



Şekil 6.8: Disklerin pürüzlülüğünün ölçülmesi

MAHR pürüzlülük ölçüm cihazı pek çok pürüzlülük parametresini hesaplamaktadır. Her ölçümde ham profil verileri ve bu parametreler kaydedilmektedir. Cihazın yazılımı R_{av} parametresini hesaplamadığından, ham profil daha sonra R_{av} hesabında kullanılmaktadır. Cihazın orjinal çıktısına bir örnek Ek E’de ve parametrelerin kaydedilmesine bir örnek Ek F’de sunulmaktadır. Cihazın özellikleri Tablo 6.3’te ve ölçüm şartları Tablo 6.4’te görülmektedir.

Tablo 6.3: MAHR pürüzlülük ölçüm cihazının teknik özellikleri

Modeli	Perthometer Concept
Pikap tipi	Papuçlu pikap, indüktif
İğne uç yarıçapı	2 μm
İğne tepe açısı	90°
İğne kuvveti	0.9 mN
Kaydedilen parametreler	$R_a, R_z, R_{max}, R_q, R_p, R_t, R_{3z}, R_{S_m}, R_S, R_{sk}, R_{ku}, R_v, R_dq, P_t, P_a, Pdq, R$

Tablo 6.4: Pürüzlülük ölçümlerinde geçerli olan ölçüm şartları

Sınır dalga boyu (cut off) λ_c	0.8 mm
Değerlendirme uzunluğu	4.0 mm
Tarama uzunluğu	5.6 mm
Tarama hızı	0.5 mm/s
Ham profilde ardışık iki nokta arası yatay mesafe (Numune alma uzunluğu)	0.7 μm
Pürüzlülük ölçüm düzeneğinde mekanik ve elektriksel gürültü	$R_{zo} \approx 0.08 \mu\text{m}$
Pürüzlülük ölçümü esnasında ortam sıcaklığı	20 \pm 0.5°C

6.4 Deneylerin Yapılışı

Deneyler herhangi bir yağlayıcı kullanılmadan teknik olarak kuru sürtünme şartlarında yapılmıştır. Polimer pimler deneylerden 24 saat önce etil alkolle temizlenip 60-70°C'deki etüve konulmuş ve bu sayede nemi alınmıştır. Diskler ise pürüzlülük ölçümünden önce petrol eteri ile temizlenmiş, ayrıca deneyden hemen önce etil alkolle temizlenmiştir.

Pim numunelerin ağırlık ölçümleri Tablo 6.5'e göre yapılmıştır. Deney başlangıcında ve her periyodun sonunda polimer numuneler kağıt peçete ile silinip 0.1 mg çözünürlüklü Mettler marka mekanik terazide tartılmıştır (Şekil 6.9). Numuneler tekrar yerine takılırken bir önceki deney periyoduna başlama pozisyonu pimin markalanması ile aynen sağlanmıştır. Terazi tüm ölçüm aralığı için E sınıfı referans kütlelerle kalibre edilmiş olup, % 95 güvenlik düzeyinde 1 gr için belirsizliği 0.1 mg'dır.

Diskler deney öncesinde ve sonrasında optik mikroskopla incelenmiş, transfer film oluşumu araştırılmıştır (Şekil 6.10). Optik mikrofotografılar çekilirken aşınma partikülleri disk yüzeyinden uzaklaştırılmıştır. Transfer filmi olduğu görülen disklerin tekrar deneylerinde, kayma mesafesine bağlı olarak transfer filmi oluşumunun safha safha mikro fotoğrafları çekilmiştir. Bazı disklerde deneyden sonra yüzey pürüzlülüğü tekrar ölçülerek, pürüzlülüğün değişip değişmediği kontrol edilmiştir.



Şekil 6.9: Mettler mekanik terazi



Şekil 6.10: Disk yüzeylerinin optik mikroskopla incelenmesi

Aşınmış pim yüzeyleri ise JEOL marka 840JXA model tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. SEM mikrofotograflarının alınması için her polimerden iki numune seçilmiştir. Numunelerden biri aksenal R_a değeri yaklaşık $0.3 \mu\text{m}$ olan ve diğeri yaklaşık $3 \mu\text{m}$ olan disklerle eş çalışmıştır.

Her pürüzlülük değeri için deneyler 3 defa tekrar edilmiş, deney sonuçlarında ortalama değerler alınarak grafikler çizilmiştir.

Tablo 6.5: Aşınma deneylerinde pim numunelerin ölçüm noktaları

Pim ağırlığının ölçümü	Kayma mesafesi (km)	Zaman (saat)
1	0.0	0.0
2	1.3	0.5
3	2.6	1.0
4	5.1	2.0
5	7.7	3.0
6	12.8	5.0
7	17.9	7.0
8	23.1	9.0
9	28.2	11.0

Çalışmada kontrol edilen parametreler:

1. Normal kuvvet: $F_N = 36 \text{ N}$
2. Nominal basınç: 0.46 MPa
3. Kayma hızı: 0.7 m/s (223 d/dak)
4. Deney süresi: net 11 saat
5. Polimer malzeme: Tablo 6.2’de verilmektedir
6. Karşı yüzey topografyası: Eksenel $R_a \approx 0.08 - 3 \text{ }\mu\text{m}$ arasında pürüzlülük değerleri

Çalışmada ölçülen parametreler:

1. Aşınma miktarı ve aşınma hızı (Hacim/Yük x Mesafe;(mm³/Nm))
2. Sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı
3. Kayma mesafesi: $\approx 28 \text{ km}$
4. Karşı yüzey topografyasının değişimi
5. Disk yüzey sıcaklığı

Laboratuvar sıcaklığı $20 \pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$ ’dir.

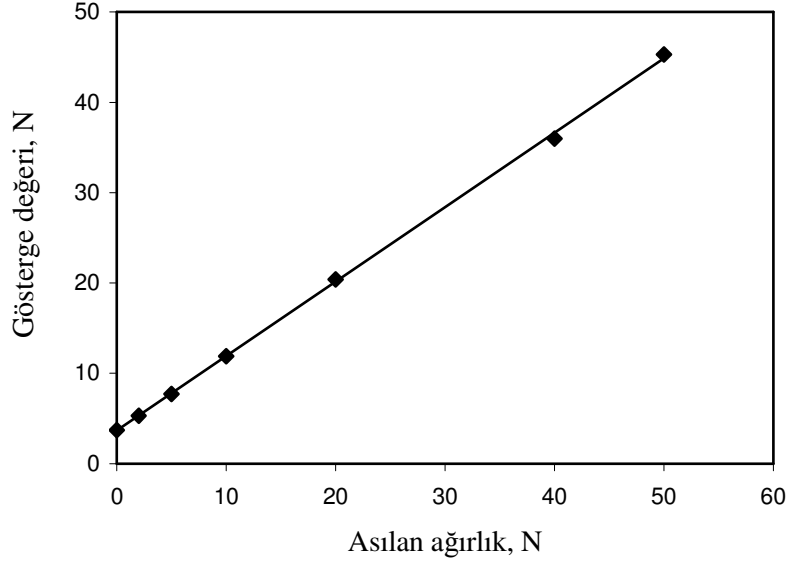
6.5 Sürtünme Kuvveti Kalibrasyonu

Aşınma cihazı, bir kuvvet dönüştürücüsü aracılığıyla sürtünme kuvvetini ölçmektedir. Ölçüm sistemi bir makara tertibatı kullanılarak bilinen ağırlıklarla kalibre edilmiştir. Kalibrasyonda kuvvetin, kuvvet dönüştürücüye çalışma esnasındaki gibi etkimesi sağlanmıştır. Asılan her bir ağırlık değerine karşılık göstergenin verdiği değerler kaydedilmiştir. Asılan ağırlık ile gösterge değerinin değişimi grafiğine bir doğru uydurulmuştur (Şekil 6.11). Sürtünme katsayısı, ölçülen sürtünme kuvvetinin uygulanan normal yüke bölünmesiyle elde edilmektedir.

Kalibre edilmiş sürtünme kuvveti,

$$F_s = \frac{F_{sg} - 3.6536}{0.8246} \quad (6.1)$$

Burada F_{sg} sürtünme kuvvetinin gösterge değeridir.



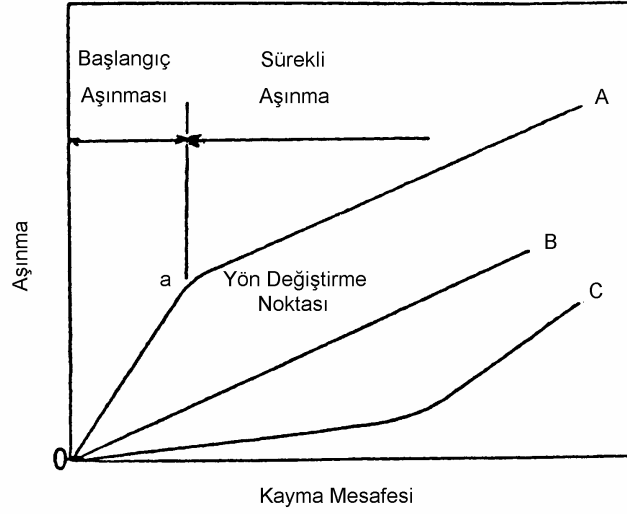
Şekil 6.11: Sürtünme kuvveti kalibrasyon eğrisi

6.6 Disk Yüzey Sıcaklığının Ölçülmesi

Disk yüzey sıcaklığı, deney periyodu sonunda disk durduğu anda, temaslı olarak ölçülmektedir. Testoterm marka ve 0.1°C çözünürlükteki termometreyle, yüzey ölçme ucu kullanılarak, disk yüzey sıcaklığı ölçülmektedir. Bu ucun zaman sabiti $T_{99} = 25$ saniyedir. Termometrenin reaksiyon süresini kısaltmak için, deney periyodunun bitmesine 10-15 saniye kala uç disk yüzeyine 1 mm mesafede tutulmaktadır. Disk durduğu anda uç yüzeye değiştirilmektedir.

6.7 Deney Parametrelerinin Tanımlanması

Polimer malzemelerin tribolojik özelliklerinin incelendiği çalışmalarda aşınma miktarı ve kayma mesafesi arasında Şekil 6.12'de gösterilen tipik eğriler görülmektedir [46]. Bu eğriler şekilde A, B ve C olarak isimlendirilmiştir. Takdim edilen çalışmada daha sonra verilecek diyagramlarda (Ek A) görüleceği üzere genellikle A eğrisine benzer eğriler elde edilmiştir. Dikkat edilirse bu eğri iki kısımdan meydana gelmektedir. "a" eğrinin yön değiştirme noktasını (deflection point) göstermektedir.



Şekil 6.12: Aşınma miktarı ve kayma mesafesi arasındaki karakteristik eğriler

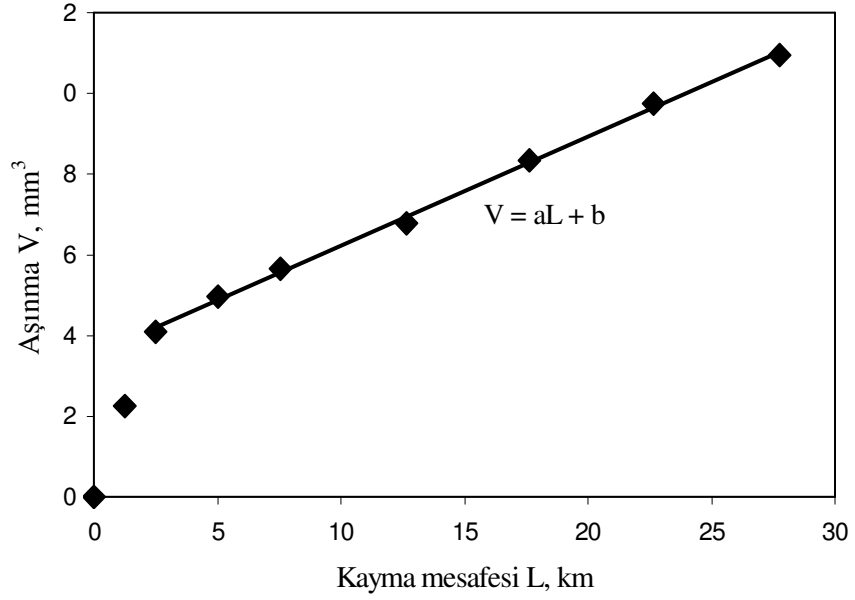
Eğrinin ilk kısmı ilk çalışma aşınmasını (başlangıç aşınması, alışma aşınması, initial wear), ikinci kısmı esas çalışma aşınmasını (daimi rejim aşınması, kararlı aşınmayı, steady-state wear) gösterir. Aşınma hızları ise aşınma bölgelerine göre ayrı ayrı hesap edilir. Başlangıç aşınma hızı, sürekli aşınma hızından genellikle büyüktür. Aşınma hızlarından bahsedilirken aksi belirtilmediği sürece daimi rejimdeki aşınma bölgesinin hızı anlaşılmalıdır. Aşınma hızları regresyon metodu ile yani eğriyi oluşturan noktalardan geçen doğrunun teşkil edilmesi ve o doğrunun eğiminin uygulanan yüke bölünmesiyle elde edilir. Şekil 6.13'te verilen örnekte aşınma hızı,

$$W = \frac{V}{F_N L} \quad (6.2)$$

eşitliğiyle verilir. Burada V aşınma hacmi, F_N normal kuvvet ve L kayma mesafesidir. Kararlı aşınma bölgesine (bu örnekte son 7 nokta) en küçük kareler metoduyla $V = aL + b$ doğrusu uydurulur ve ardından doğrunun eğimi olan "a", F_N 'e bölünerek aşınma hızı:

$$W = \frac{a}{1000F_N} \quad (6.3)$$

mm^3/Nm birimiyle hesaplanır.



Şekil 6.13: Aşınma-kayma mesafesi eğrisinin daimi rejim bölgesine doğru uydurulması

Aşınma hacmi, polimer numunenin ağırlığındaki azalmanın polimerin yoğunluğuna bölünmesiyle bulunur,

$$V = \frac{m_0 - m}{\rho} \quad (6.4)$$

Burada m bir deneyin herhangi bir periyodu sonundaki numune ağırlığı, m_0 deneyin başlangıcındaki numune ağırlığı ve ρ polimerin yoğunluğudur. Kayma mesafesi,

$$L = n_k \pi D \quad (6.5)$$

eşitliğiyle hesaplanır. Burada n_k bir deneyin herhangi bir periyodu sonunda, deneyin başından beri katedilen toplam devir sayısıdır. D disk çapıdır.

Sürtünme katsayısı,

$$\mu = \frac{F_s}{F_N} \quad (6.6)$$

eşitliğiyle verilir. Burada F_s sürtünme kuvveti, F_N normal kuvvettir.

7. BELİRSİZLİK HESAPLARI

7.1 Belirsizlik Hesapları

x_1, x_2, \dots, x_n gibi n adet değişkene bağlı bir y fonksiyonu aşağıdaki gibi verilsin,

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (7.1)$$

Değişkenlerin birbirinden bağımsız olduğu kabulüyle y fonksiyonu için standart bileşke belirsizlik,

$$u^2(y) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 u^2(x_1) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 u^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 u^2(x_n) \quad (7.2)$$

şeklinde verilir. Her bir değişkene göre alınan kısmi türevler “hassasiyet katsayısı” olarak isimlendirilmektedir. Bu denklem standart sapma gibi, normal olasılık dağılımına (Gauss eğrisi) sahip ve yaklaşık % 68 güvenlik düzeyi için geçerlidir. Eğer bir belirsizlik bileşeni normal olasılık dağılımına sahip değilse önce normal dağılıma çevrilmeli sonra eşitlik (7.2)’de kullanılmalıdır [47].

7.1.1 A tipi belirsizlik

Bir dizi gözlemin istatistiksel olarak değerlendirilmesiyle elde edilen belirsizliktir. Örneğin bir x büyüklüğünü defalarca ölçtüğümüzde ölçüm değerlerinin standart sapması A tipi bir belirsizliktir.

7.1.2 B tipi belirsizlik

Bir belirsizlik kaynağı hakkında istatistiksel olmayan bilgilere sahipsek bu belirsizlik bileşeni B tipidir. Örneğin bir x büyüklüğünün tecrübeye dayanarak alabileceği en küçük ve en büyük değerler tahmin edilebilir. Bu değerler arasındaki fark B tipi belirsizliktir. Uygulamada aşağıdaki örneklere sıkça rastlanmaktadır: Bir ölçüm cihazı için üreticinin verdiği doğruluk (accuracy) değeri; bir malzemeye ait fiziksel özelliklerin belli bir sıcaklık aralığında ne miktarda değiştiğinin malzeme el kitabından öğrenilmesi vs...

7.1.3 Güvenlik düzeyi

Bir y değeri için hesaplanan belirsizliğin hangi ihtimal dahilinde geçerli olduğunu belirtir. Örneğin güvenlik düzeyi % 68 olarak belirtiliyorsa, y değerinin % 68 ihtimalle,

$$y - U < y < y + U \quad (7.3)$$

aralığında olduğu anlaşılır.

7.1.4 Olasılık dağılımları

En çok rastlanan iki olasılık dağılım türü mevcuttur. Birincisi rastgele nitelikte olayların uyum gösterdiği “Normal dağılım-Gauss dağılımı”dır. Bu olasılık dağılımının grafiği bir çana benzemektedir. Bilinmeyen rastgele hatalardan kaynaklanan belirsizliği (tekrarlanabilirlik) hesaplamak için sözkonusu fiziksel büyüklük defalarca ölçülür. Ölçüm değerlerinin olasılık dağılım eğrisi bu şekildedir. Ölçüm değerlerinden hesaplanan standart sapma doğrudan eşitlik 7.1’de belirsizlik bileşeni olarak kullanılabilir.

İkinci olasılık dağılım şekli dikdörtgen (üniform) dağılımdır. Dağılım fonksiyonu düz bir yatay çizgidir. Yani fiziksel büyüklüğün verilen aralıkta her değeri alma olasılığı aynıdır. Belirsizliğini bilmek istediğimiz x_1 fiziksel büyüklüğünü defalarca ölçerek istatistiksel veri elde etme imkanımız yoksa, ancak bu büyüklüğün alabileceği sınır değerleri biliyorsak, olasılık dağılımının dikdörtgen olduğunu kabul ederiz. Bu belirsizliğin eşitlik 7.1’de kullanılabilmesi için öncelikle normal dağılıma çevrilmesi gerekir. Normal dağılıma çevirmek için belirsizlik $\sqrt{3}$ ’e bölünür. Fiziksel büyüklüğün alabileceği en büyük değer a_2 ve en küçük değer a_1 ise bu değere ait belirsizlik bileşeni,

$$u(x_1) = \frac{a_2 - a_1}{2\sqrt{3}} \quad (7.4)$$

olarak hesaplanır.

7.2 Aşınma Hızının Belirsizliği

Aşınma hızının bulunmasındaki belirsizlik kaynakları numune ağırlığı, kayma mesafesi, normal kuvvet, aşınma-kayma mesafesi eğrisine uydurulan doğrunun belirsizliğinden oluşmaktadır.

7.2.1 Numune ağırlığının bulunmasındaki belirsizlik

Numune ağırlığının bulunmasındaki belirsizlik kaynakları terazi belirsizliği, terazi çözünürlüğü ve numunelerin nem almasıdır.

7.2.1.1 Terazi belirsizliği

Numunelerin tartımının yapıldığı terazi referans kütlelerle kalibre edilmiş ve terazinin belirsizliği hesaplanmıştır. Referans kütlelerde nem alma problemi olmadığından bu belirsizlik sadece terazinin kabiliyetiyle ilgilidir. Yaklaşık $m_t = 1$ gr ağırlık tartıldığında terazi belirsizliği,

$$u(m_t) = 0.05 \text{ mg (\% 68 güvenlik düzeyinde)} \quad (7.5)$$

olarak bulunmuştur. Bu belirsizlik normal dağılıma sahiptir ve bileşke belirsizlik denkleminde doğrudan katılır.

7.2.1.2 Numunelerin nem almasından kaynaklanan belirsizlik

Numune ağırlığının bulunmasındaki ikinci belirsizlik kaynağı nemdir. Numunenin deneyin başında etüvden alınarak terazide tartılması için geçen sürede ve aşınma test cihazından sökülüp terazide tartılması için geçen sürede polimer numuneler havadan nem alabilmektedir. Bu olayın numunenin gerçek ağırlığını δ_{nem} kadar artırdığını kabul edelim. δ_{nem} değerinin belirsizliğinin tespiti için şu inceleme yapılmıştır: Polimer numunenin sökülmesi ile tartım işlemi arasında geçen süre deneylerimizde ortalama 3 dakikadır. Ancak bu süre ± 1 dakika değişebilmektedir. Bir gece boyunca 70°C 'de bekletilen numuneler etüvden çıkarılıp 2 dakika bekletilerek tartılmıştır. Sonra 1. tartım anından itibaren 2 dakika daha beklenip tekrar tartılmıştır. Birinci tartıma m_1 , ikinci tartıma m_2 diyelim. Bu durumda alınan nemin miktarı $\delta_{nem} \pm (m_2 - m_1)/2$ olur, yani $\pm (m_2 - m_1)/2$ kadar belirsizlik vardır. Dikkat edilirse nem alma ile ilgili olabilecek iki sınır değeri düşünülmüştür. İki bekleme süresi arasındaki sürelerde nem almanın ne miktarda olduğuna ait istatistiksel bir bilgi yoktur. 2 ila 4 dakika arasında beklemelerde nem alma olasılığının hep aynı olduğunu kabul edebiliriz. Yani nem alma olasılığı dağılımı dikdörtgen dağılım olarak alınmaktadır. Bileşke belirsizlik bağıntısı normal dağılım için geçerli olduğundan, dikdörtgen dağılıma sahip bu belirsizlik değeri önce $\sqrt{3}$ 'e bölünerek normal dağılıma çevrilir, sonra bileşke belirsizlik ifadesine katılır. Bu durumda nem alma miktarındaki belirsizlik:

$$u(\delta_{nem}) = \frac{m_2 - m_1}{2\sqrt{3}} \quad (7.6)$$

olacaktır. Tüm polimerler için bulunan m_1 ve m_2 değerleri Tablo 7.1'de verilmektedir. Yukarıda anlatılan uygulama, iki ayrı günde farklı saatlerde tekrarlanmış ve tabloda en büyük miktarlar verilmiştir.

Tablo 7.1: Polimer numunelerin nem alma miktarları

Polimer	($m_2 - m_1$) mg
Ekstrüzyon PA 6	0.3
Döküm PA 6	0.3
PET	0.2
POM	0.1
PP	0.2

Numune ağırlığının bulunmasındaki üçüncü belirsizlik kaynağı terazi çözünürlüğüdür. Kullanılan terazide çözünürlük 0.1 mg'dır. Bu belirsizlik de dikdörtgen dağılıma sahip olup önce $\sqrt{3}$ 'e bölünerek normal dağılıma çevrilir, sonra bileşke belirsizlik ifadesine katılır. Çözünürlükteki belirsizliği doğrudan çözünürlük miktarına eşit alabiliriz. Bu durumda çözünürlükten gelen belirsizliğin bileşke belirsizliğe katkısı:

$$u(\zeta) = \frac{0.1}{2\sqrt{3}} \quad (7.7)$$

olarak bulunur. Bu üç etki birbirine doğrudan ekleneceğinden numune ağırlığı için model denklem,

$$m = m_t + \delta_{nem} + \zeta \quad (7.8)$$

şeklindedir. Numune ağırlığının belirlenmesindeki bileşke belirsizlik ise,

$$u^2(m) = u^2(m_t) + u^2(\delta_{nem}) + u^2(\zeta) \quad (7.9)$$

7.2.2 Aşınma hacmi, kayma mesafesi ve normal kuvvetin belirsizliği

Aşınma hacmi eşitlik 6.4 ile hesaplanır. Aşınma hacminin bilinmesindeki belirsizlik,

$$u^2(V) = \left(\frac{1}{\rho}\right)^2 u^2(m_0) + \left(\frac{1}{\rho}\right)^2 u^2(m) \quad (7.10)$$

ile verilir. Tüm tartım işlemlerinin belirsizliği aynı olacağından,

$$u^2(V) = \frac{2}{\rho^2} u^2(m) \quad (7.11)$$

elde edilir. Kayma mesafesi ise eşitlik 6.5 ile verilir. Kayma mesafesinin bilinmesindeki belirsizlik,

$$u^2(L) = (\pi D)^2 u^2(n_k) + (\pi n_k)^2 u^2(D) \quad (7.12)$$

Katedilen devir sayısının belirsizliği ± 3 devir olarak alınabilir. Dikdörtgen dağılıma sahip olduğundan,

$$u(n_k) = \frac{3}{\sqrt{3}} \quad (7.13)$$

Disk çapının belirsizliği ise ± 0.2 mm'dir. Dikdörtgen dağılıma sahip olduğundan,

$$u(D) = \frac{0.2}{\sqrt{3}} \quad (7.14)$$

Normal kuvvet tüm deneylerimizde 36 ± 0.5 N'dur. Normal kuvvetin bilinmesindeki belirsizlik, dikdörtgen dağılıma sahip olduğundan,

$$u(F_N) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} \quad (7.15)$$

şeklindedir.

7.2.3 Aşınma-kayma mesafesi eğrisine uydurulan en küçük kareler doğrusunun eğiminin belirsizliği

Aşınma – kayma mesafesi eğrisinin kararlı aşınma bölgesine en küçük kareler metoduyla uydurulan $V = aL + b$ doğrusunun eğimi “a”dır (Şekil 6.10). En küçük kareler metoduna göre bu katsayı,

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n L_i V_i - \sum_{i=1}^n L_i \sum_{i=1}^n V_i}{n \sum_{i=1}^n L_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n L_i \right)^2} \quad (7.16)$$

formülüyle verilir [30]. Burada n en küçük kareler doğrusunun uydurulduğu nokta sayısı, L_i ve V_i bu noktaların koordinatlarıdır. Görüldüğü gibi a, L_i , V_i değerlerinin bir fonksiyonudur. Yani,

$$a = f(L_1, L_2, L_3, \dots, L_n, V_1, V_2, V_3, \dots, V_n) \quad (7.17)$$

Eşitlik 7.17 için bileşke belirsizlik denklemi yazılırsa, a'nın belirsizliği,

$$\begin{aligned} u^2(a) = & \left(\frac{\partial f}{\partial L_1} \right)^2 u^2(L_1) + \left(\frac{\partial f}{\partial L_2} \right)^2 u^2(L_2) + \left(\frac{\partial f}{\partial L_3} \right)^2 u^2(L_3) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial L_n} \right)^2 u^2(L_n) + \dots \\ & \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial V_1} \right)^2 u^2(V_1) + \left(\frac{\partial f}{\partial V_2} \right)^2 u^2(V_2) + \left(\frac{\partial f}{\partial V_3} \right)^2 u^2(V_3) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial V_n} \right)^2 u^2(V_n) \end{aligned} \quad (7.18)$$

şeklinde dir. Eşitlik 7.18'deki L'ye göre n adet kısmi türev hesaplanırsa,

$$\frac{\partial f}{\partial L_1} = \frac{\left[nV_1 - \sum_{i=1}^n V_i \right] \left[n \sum_{i=1}^n L_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n L_i \right)^2 \right] - \left[2nL_1 - 2 \sum_{i=1}^n L_i \right] \left[n \sum_{i=1}^n L_i V_i - \sum_{i=1}^n L_i \sum_{i=1}^n V_i \right]}{\left[n \sum_{i=1}^n L_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n L_i \right)^2 \right]^2} \quad (7.19)$$

.....

$$\frac{\partial f}{\partial L_n} = \frac{\left[nV_n - \sum_{i=1}^n V_i \right] \left[n \sum_{i=1}^n L_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n L_i \right)^2 \right] - \left[2nL_n - 2 \sum_{i=1}^n L_i \right] \left[n \sum_{i=1}^n L_i V_i - \sum_{i=1}^n L_i \sum_{i=1}^n V_i \right]}{\left[n \sum_{i=1}^n L_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n L_i \right)^2 \right]^2} \quad (7.20)$$

elde edilir. Eşitlik 7.18'deki V'ye göre n adet kısmi türev hesaplanırsa,

$$\frac{\partial f}{\partial V_1} = \frac{nL_1 - \sum_{i=1}^n L_i}{n \sum_{i=1}^n L_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n L_i \right)^2} \quad (7.21)$$

.....

$$\frac{\partial f}{\partial V_n} = \frac{nL_n - \sum_{i=1}^n L_i}{n \sum_{i=1}^n L_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n L_i \right)^2} \quad (7.22)$$

elde edilir. Tüm noktaların belirsizliği aynıdır, o halde,

$$u(L_1) = u(L_2) = \dots = u(L_n) = u(L) \quad (7.23)$$

$$u(V_1) = u(V_2) = \dots = u(V_n) = u(V) \quad (7.24)$$

yazılabilir. Bu değerler eşitlik 7.18'de yerine yazılırsa,

$$u^2(a) = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial L_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial L_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial L_n} \right)^2 \right] u^2(L) + \left[\left(\frac{\partial f}{\partial V_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial V_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial V_n} \right)^2 \right] u^2(V) \quad (7.25)$$

elde edilir.

7.2.4 Aşınma hızı için toplam belirsizlik

Aşınma hızı eşitlik 6.3'te verilmektedir. Aşınma hızının bilinmesindeki belirsizlik,

$$u^2(W) = \frac{1}{F_N^2} u^2(a) + \left(\frac{a}{F_N} \right)^2 u^2(F_N) \quad (7.26)$$

olacaktır. Burada eğim a , mm^3/m birimindedir.

Aşınma deneyleri 3 defa tekrar edilmekte ve ortalaması verilmektedir. Bilinmeyen rastgele hataların aşınma hızına etkisini, deneylerin 3 defa tekrarına ait standart sapmayı (s_w) kullanarak hesaba katabiliriz. Tekrar edilen deneylerde bulunan aşınma hızları sırasıyla W_1 , W_2 , W_3 ise ortalama aşınma hızı,

$$W_{ort} = \frac{W_1 + W_2 + W_3}{3} \quad (7.27)$$

Bu ifade için bileşke belirsizlik denklemi yazılırsa % 68 güvenlik düzeyinde,

$$u(W_{ort}) = \sqrt{\frac{1}{9} [u^2(W_1) + u^2(W_2) + u^2(W_3)] + s_w^2} \quad (7.28)$$

elde edilmiş olur.

Yukarıdaki tüm eşitliklerin hesaplanması için bir Vbasic programı hazırlanmıştır (Bakınız Ek H). Bu program en küçük kareler doğrusunun uydurulduğu koordinatlar girildiğinde aşınma hızının belirsizliğini hesaplamaktadır.

Deneylerde tüm polimer malzemeler için elde edilen aşınma hızlarının belirsizliği Bölüm 8'de tablolar halinde verilmektedir.

7.3 Sürtünme Katsayısının Belirsizliği

Sürtünme katsayısı eşitlik 6.6 ile verilir. Sürtünme katsayısı için bileşke belirsizlik denklemini yazılırsa,

$$u^2(\mu) = \frac{1}{F_N^2} u^2(F_s) + \left(\frac{F_s}{F_N^2} \right)^2 u^2(F_N) \quad (7.29)$$

Aşınma cihazındaki sürtünme kuvveti ölçüm tertibatı kalibre edilmiş ve aşağıdaki kalibrasyon eğrisi elde edilmiştir,

$$F_s = \frac{F_{sg} - 3.6536}{0.8246} \quad (7.30)$$

Burada F_{sg} sürtünme kuvvetinin gösterge değeridir. Gösterge değeri,

$$F_{sg} = F + \zeta \quad (7.31)$$

eşitliği ile verilebilir. Burada F göstergede okunan ortalama değer, ζ gösterge çözünürlüğüdür. Gösterge değeri genelde bir salınım göstermektedir. Sürtünme katsayısı gözle takip edilmekte ve ortalama değer kaydedilmektedir. Genellikle salınım ± 0.3 N'nun altındadır. Bu salınım F'in belirsizliği olarak alınabilir, dikdörtgen dağılıma sahiptir,

$$u(F) = \frac{0.3}{\sqrt{3}} \quad (7.32)$$

eşitliğiyle verilir. Çözünürlük 0.1 N'dur ve yine dikdörtgen dağılıma sahiptir. Çözünürlükten gelen belirsizlik,

$$u(\zeta) = \frac{0.1}{2\sqrt{3}} \quad (7.33)$$

olarak verilir. Tüm değerler eşitlik 7.29'da yerine yazılırsa sürtünme katsayısının belirsizliği % 68 güvenlik düzeyinde,

$$u(\mu) = \sqrt{\frac{1}{F_N^2 (0.8246)^2} [u^2(F) + u^2(\zeta)] + \left(\frac{\mu}{F_N}\right)^2 u^2(F_N)} \quad (7.34)$$

eşitliğiyle verilir.

Aşınma deneyleri 3 defa tekrar edilmekte ve sürtünme katsayısının ortalaması verilmektedir. Bilinmeyen rastgele hataların sürtünme katsayısına etkisini, deneylerin 3 defa tekrarına ait standart sapmayı (s_μ) kullanarak hesaba katabiliriz. Tekrar edilen deneylerde bulunan sürtünme katsayıları sırasıyla μ_1 , μ_2 , μ_3 ise ortalama sürtünme katsayısı,

$$\mu_{ort} = \frac{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3}{3} \quad (7.35)$$

Bu ifade için bileşke belirsizlik denklemi yazılırsa % 68 güvenlik düzeyinde,

$$u(\mu_{ort}) = \sqrt{\frac{1}{9} [u^2(\mu_1) + u^2(\mu_2) + u^2(\mu_3)] + s_\mu^2} \quad (7.36)$$

elde edilmiş olur.

Deneylerde tüm polimer malzemeler için elde edilen sürtünme katsayılarının belirsizliği Bölüm 8'de tablolar halinde verilmektedir.

7.4 Pürüzlülük Parametreleri R_a , R_z ve R_{max} 'ın Belirsizliği

R_a , R_z ve R_{max} parametrelerinin belirsizliğini hesaplamak için öncelikle R_z parametresinin izafi belirsizliği hesaplanır. Bu izafi belirsizlik R_a ve R_{max} için de

geçerlidir [48]. Bir disk yüzeyi için hesaplanan R_z parametresi (R_z için model denklem),

$$R_z = R_{zg} + \delta_{ref} + \delta_n \quad (7.37)$$

şeklindedir. Burada R_{zg} yüzeyin gerçek geometrik değeri, δ_{ref} pürüzlülük cihazını kalibre etmekte kullanılan referans pürüzlülük standardının değerinin tam bilinmemesinin getirdiği bozucu etki ve δ_n pürüzlülük cihazında elektriksel ve mekanik gürültünün ölçüme getirdiği bozucu etkiyi gösterir. Eşitlik 7.37'deki terimlerin belirsizlikleri aşağıda sırasıyla verilmektedir:

R_{zg} teriminin belirsizliği yüzeyde alınan 10 ölçümün standart sapmasıyla hesaplanabilir. Böylece yüzeyin homojenliği ve bilinmeyen rastgele hatalar hesaba katılmış olur. Normal dağılıma sahip olan bu belirsizlik bileşeni,

$$u(R_{zg}) = \frac{s}{\sqrt{10}} \quad (7.38)$$

ile verilir. Tabidir ki, deneylerde kullanılan çok sayıda diskin her birinde farklı bir standart sapma söz konusudur. Her disk için ayrı ayrı standart sapma değerlerini belirsizlik hesabında kullanmak yerine şöyle bir uygulama yapılmıştır: Tüm disklerin izafi standart sapmalarının ortalaması ve izafi standart sapmaların standart sapması hesaplanmıştır. İzafi standart sapmaların ortalaması,

$$\left(\frac{s}{R_z} \right)_{ort} = \frac{\sum_{i=1}^{DS} \frac{s_i}{R_{z_i}}}{DS} \quad (7.39)$$

burada R_{z_i} ve s_i bir diskin sırasıyla R_z değeri ve standart sapması, DS disklerin sayısıdır. İzafi standart sapmaların standart sapması ise,

$$s\left(\frac{s}{R_z} \right) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{DS} \left(\frac{s_i}{R_{z_i}} - \left(\frac{s}{R_z} \right)_{ort} \right)^2}{DS}} \quad (7.40)$$

eşitliğiyle verilir. Tüm disklerin % 95'inin izafi standart sapmasına (S_{95} / R_z) dersek,

$$\left(\frac{s}{R_z}\right)_{ort} - 2s\left(\frac{s}{R_z}\right) \leq \frac{S_{95}}{R_z} \leq \left(\frac{s}{R_z}\right)_{ort} + 2s\left(\frac{s}{R_z}\right) \quad (7.41)$$

aralığında olacaktır. O halde eşitlik 7.38’de standart sapma olarak,

$$S_{95} = \left[\left(\frac{s}{R_z}\right)_{ort} + 2s\left(\frac{s}{R_z}\right) \right] R_z \quad (7.42)$$

değerini kullanırsak, disklerin % 95’inde rastlanan izafi standart sapmanın üzerinde bir standart sapma kullanmış oluruz. Böylece yeterince güvenli belirsizlik hesaplanmış olur. Deneylerimizde kullanılan tüm disklerin çevresel ve eksenel ölçümleri için yukarıdaki ifadeler hesaplanmış ve Tablo 7.2’de verilmiştir.

Tablo 7.2: Tüm diskler için çevresel ve eksenel tekrarlanabilirlik değerleri

	Çevresel Ölçümler	Eksenel Ölçümler
$\left(\frac{s}{R_z}\right)_{ort}$	0.230	0.100
$s\left(\frac{s}{R_z}\right)$	0.086	0.044
$\left(\frac{S_{95}}{R_z}\right)$	0.402	0.188

δ_{ref} teriminin belirsizliği, referans pürüzlülük standardının sertifika belirsizliğidir ($U_{ref} = 0.076 \mu\text{m}$). Bu belirsizlik normal dağılıma sahip olup sertifikada % 95 güvenlik düzeyinde verilmiştir. Bu nedenle ikiye bölünerek % 68 güvenlik düzeyine indirilir,

$$u(\delta_{ref}) = \frac{U_{ref}}{2} \quad (7.43)$$

δ_n teriminin belirsizliği, diskin döner hareket ünitesinde ölçümü esnasında oluşan elektriksel ve mekanik gürültü değeri olarak alınır. Gürültü, üretici firma tarafından R_z parametresi cinsinden yaklaşık olarak verilmektedir ($R_{z0} = 0.08 - 0.1 \mu\text{m}$). Bu

değer gürültünün + ve – yönde yapacağı etkinin toplamını ifade ettiğinden öncelikle ikiye bölünür. Ayrıca bu belirsizlik dikdörtgen dağılıma sahip olduğundan $\sqrt{3}$ 'e bölünerek normal dağılıma çevrilir. Sonuç olarak,

$$u(\delta_n) = \frac{R_{zo}}{2\sqrt{3}} \quad (7.44)$$

formülüyle verilir.

Bileşke belirsizlik denklemi,

$$u(R_z) = \sqrt{u^2(R_{zg}) + u^2(\delta_{ref}) + u^2(\delta_n)} \quad (7.45)$$

Pürüzlülük parametreleri genellikle % 95 güvenlik düzeyinde verilir,

$$U(R_z) = 2\sqrt{u^2(R_{zg}) + u^2(\delta_{ref}) + u^2(\delta_n)} \quad (7.46)$$

R_z 'nin izafi belirsizliği,

$$\frac{U(R_z)}{R_z} = \frac{2\sqrt{u^2(R_{zg}) + u^2(\delta_{ref}) + u^2(\delta_n)}}{R_z} \quad (7.47)$$

eşitliği ile verilir. Bu izafi belirsizlik R_a ve R_{max} için de geçerlidir. İzafi belirsizlik çevresel ve eksenel ölçümlerde farklı pürüzlülük mertebeleri için hesaplanmış, Tablo 7.3 ve 7.4'te verilmiştir.

Tablo 7.3: Çevresel ölçümlerde R_a , R_z ve R_{max} 'in izafi belirsizliği

R_a	$\frac{U(R_a)}{R_a}, \frac{U(R_z)}{R_z}, \frac{U(R_{max})}{R_{max}}$ (% 95)
0.03	0.42
0.04	0.35
0.30	0.26
0.54	0.25
0.88	0.25

Tablo 7.4: Eksenel ölçümlerde R_a , R_z ve R_{max} 'ın izafi belirsizliği

R_a	$\frac{U(R_a)}{R_a}, \frac{U(R_z)}{R_z}, \frac{U(R_{max})}{R_{max}}$ (% 95)
0.05	0.15
0.13	0.13
0.41	0.12
0.79	0.12
3.01	0.12

7.5 R_{av} Parametresinin Belirsizliği

Bir disk yüzeyi için hesaplanan R_{av} parametresi (R_{av} için model denklem),

$$R_{av} = R_{avg} + \delta_{ref} \quad (7.48)$$

şeklindedir. Burada R_{avg} yüzeyde tepe uçlarının gerçek yuvarlaklığı, δ_{ref} pürüzlülük cihazını kalibre etmekte kullanılan referans pürüzlülük standardının değerinin tam bilinmemesinin getirdiği bozucu etkiyi gösterir. Eşitlik 7.48'deki terimlerin belirsizlikleri aşağıda sırasıyla verilmektedir:

R_{avg} teriminin belirsizliği yüzeyde alınan 10 ölçümün standart sapmasıyla hesaplanabilir. Normal dağılıma sahip olan bu belirsizlik bileşeni,

$$u(R_{avg}) = \frac{s(R_{avg})}{\sqrt{10}} \quad (7.49)$$

ile verilir. Deneylerde kullanılan çok sayıda diskin her birinde farklı bir standart sapma söz konusudur. Burada, daha evvel R_a , R_z ve R_{max} parametrelerinde yaptığımız uygulamanın aynısını yapalım ve tüm disklerin izafi standart sapmaları için istatistiksel veriler elde edelim: R_{av} için tüm disklerin izafi standart sapmalarının ortalaması,

$$\left(\frac{s}{R_{av}}\right)_{ort} = \frac{\sum_{i=1}^{DS} \frac{s_i}{R_{av_i}}}{DS} \quad (7.50)$$

burada R_{av_i} ve s_i bir diskin sırasıyla R_{av} değeri ve standart sapması, DS disklerin sayısıdır. İzafi standart sapmaların standart sapması ise,

$$s\left(\frac{s}{R_{av}}\right) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{DS} \left(\frac{s_i}{R_{av_i}} - \left(\frac{s}{R_{av}}\right)_{ort}\right)^2}{DS}} \quad (7.51)$$

eşitliğiyle verilir. Tüm disklerin % 95'inin izafi standart sapmasına (S_{95} / R_{av}) dersek,

$$\left(\frac{S_{95}}{R_{av}}\right) = \left(\frac{s}{R_{av}}\right)_{ort} + 2s\left(\frac{s}{R_{av}}\right) \quad (7.52)$$

Eşitlik 7.49'da bu değeri kullanırsak, R_{av} için disklerin % 95'inde rastlanan izafi standart sapmanın üzerinde bir standart sapma kullanmış oluruz. Böylece yeterince güvenli belirsizlik hesaplanmış olur. Denelerimizde kullanılan tüm disklerin çevresel ve eksenel ölçümleri için yukarıdaki ifadeler hesaplanmış ve Tablo 7.5'te verilmiştir.

Tablo 7.5: Tüm disklerde R_{av} için çevresel ve eksenel tekrarlanabilirlik değerleri

	Çevresel Ölçümler	Eksenel Ölçümler
$\left(\frac{s}{R_{av}}\right)_{ort}$	0.120	0.130
$s\left(\frac{s}{R_{av}}\right)$	0.048	0.044
$\left(\frac{S_{95}}{R_{av}}\right)$	0.218	0.216

δ_{ref} teriminin belirsizliği, R_a , R_z ve R_{max} parametrelerinin hesabında belirtildiği gibi,

$$u(\delta_{ref}) = \frac{U_{ref}}{2} \quad (7.53)$$

formülüyle verilir. % 95 güvenlik düzeyinde, R_{av} 'nin izafi belirsizliği,

$$\frac{U(R_{av})}{R_{av}} = \frac{2\sqrt{u^2(R_{avg}) + u^2(\delta_{ref})}}{R_{av}} \quad (7.54)$$

eşitliği ile verilir. İzafi belirsizlik, çevresel ve eksenel ölçümlerde Eşitlik 7.54'den, tüm R_{av} mertebeleri için 0.14 olarak hesaplanmaktadır.

8. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

8.1 Deney Sonuçlarının Grafiklerle İfade Edilmesi

Bu bölümde aşınma hızının karşı yüzeyin aksenal R_a ve aksenal R_{av} parametresiyle değişimi sunulmaktadır. Ayrıca sürtünme katsayısının aksenal R_a parametresiyle değişimi verilmektedir.

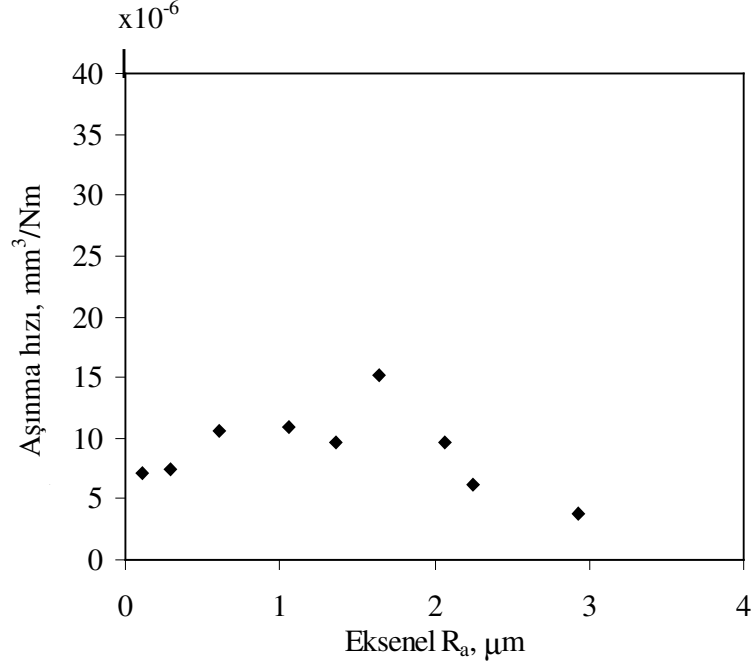
Daimi rejimdeki aşınma hızları Bölüm 6'da anlatıldığı gibi, aşınma-kayma mesafesi eğrisine uydurulan doğrunun eğiminden elde edilmektedir. Daimi rejimdeki sürtünme katsayıları ise sürtünme katsayısı-kayma mesafesi eğrisinin daimi rejimdeki kısmının ortalaması alınarak hesaplanmaktadır. Tüm pürüzlülük değerlerine ait aşınma-kayma mesafesi eğrileri ve sürtünme katsayısı-kayma mesafesi eğrileri EK A'da verilmiştir.

Polimerler için, karşı yüzeyin aksenal R_a parametresinin sıfırdan yaklaşık 1 μm değerine kadar, aşınmanın yorulma yoluyla gerçekleşmesinin muhtemel olduğu kabul edilebilir [2, 3]. Aşınma hızı- R_{av} dağılımının bu aralığa karşılık gelen kısımlarına, çalışmada kullanılan yorulma aşınması modeline göre, eşitlik 3.11 formunda eğriler uydurularak t_w değerleri elde edilmektedir.

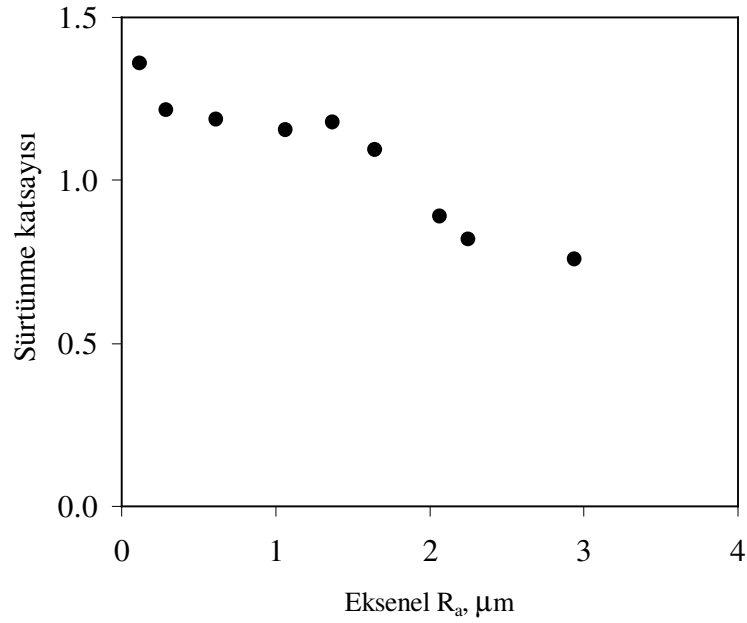
Tüm polimerler için, deneyin başı ve sonunda çekilen disk yüzeyinin optik mikrofotografları Ek B'de sunulmaktadır. Ayrıca transfer filmi oluşturduğu tespit edilen polimerlerde, bir deney boyunca kayma mesafesine bağlı olarak transfer filminin oluşum basamaklarının optik mikrofotografları çekilmiştir ve EK C'de sunulmaktadır. SEM mikrofotograflarının alınması için her polimerden iki numune seçilmiştir. Biri aksenal R_a değeri yaklaşık 0.3 μm olan ve diğeri aksenal R_a değeri yaklaşık 3 μm olan diskle eş çalışmıştır. Çeşitli büyütme oranlarında çekilen SEM mikrofotografları Ek D'de verilmektedir.

8.1.1 Ekstrüzyon PA-6'nın aşınma ve sürtünme durumu

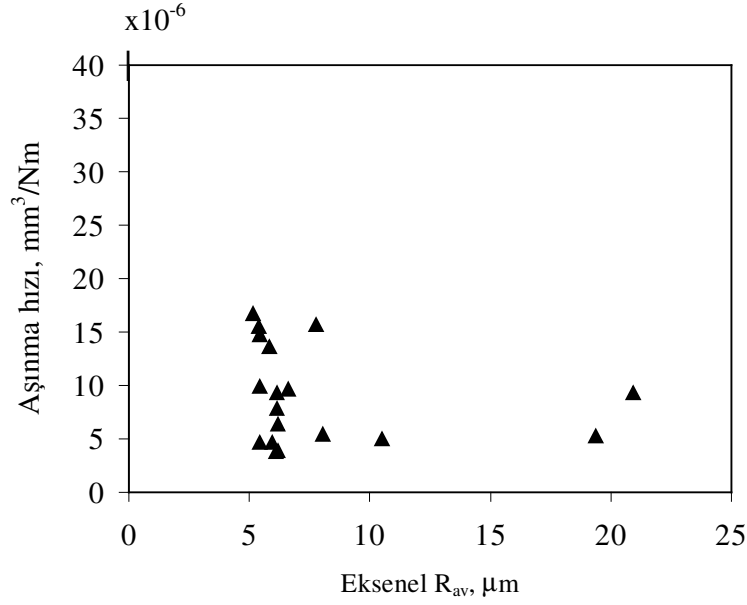
Ekstrüzyon PA 6'nın aşınma hızının ve sürtünme katsayısının eksenel R_a ile değişimi Şekil 8.1 ve 8.2'de, aşınma hızı-eksenel R_{av} dağılımı Şekil 8.3'te sunulmaktadır. Şekil 8.4'te $t_w = 0.7$ elde edilmektedir.



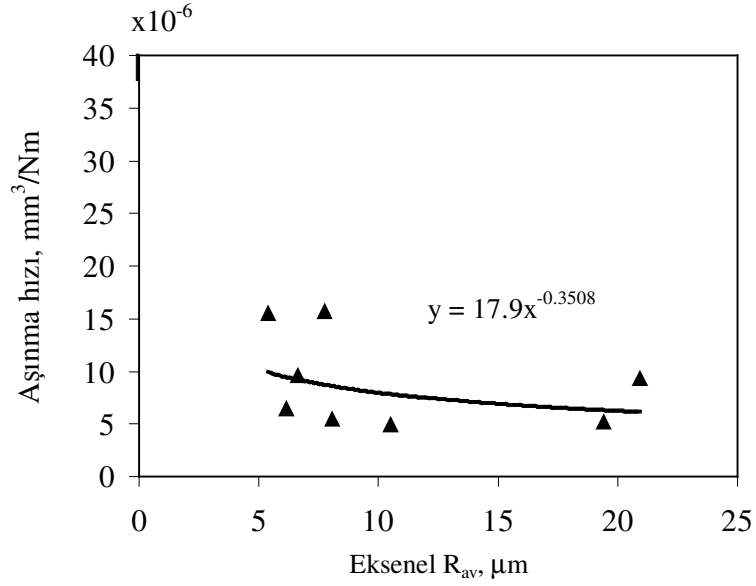
Şekil 8.1: Ekstrüzyon PA 6'nın aşınma hızının diskin eksenel R_a değeriyle değişimi



Şekil 8.2: Ekstrüzyon PA 6'nın sürtünme katsayısının diskin eksenel R_a değeriyle değişimi



Şekil 8.3: Ekstrüzyon PA 6 aşınma hızı - disk eksenel R_{av} değeri dağılımı



Şekil 8.4: Ekstrüzyon PA 6 için yorulma aşınması modelinin uygulanması

Ekstrüzyon PA 6 ile yapılan deneylerde, disk yüzeyinin deney öncesi ve sonrasını gösteren optik mikrofotografaları Şekil B.1 ile B.6 arasında sunulmaktadır. Eksenel $R_a = 0.12 \mu\text{m}$ için transfer filmi görülememektedir. Eksenel $R_a = 0.6 \mu\text{m}$ için sürekli fakat kalın olmayan bir transfer filmi mevcuttur. Eksenel $R_a = 1 \mu\text{m}$ ve daha büyük pürüzlülük değerlerinde ise daha kalın transfer filmleri oluşmaktadır.

Eksenel $R_a = 1.37 \mu\text{m}$ 'dan itibaren, transfer filmi olan bölgelerde, yüzeydeki işleme izleri transfer filmi tarafından tamamen örtülmektedir. Filmin altındaki işleme izleri zor farkedilmektedir.

Eksenel $R_a = 3 \mu\text{m}$ 'a yaklaştıkça transfer filmi kalınlığını korumakta ancak seyrekleşmektedir. Şekil C.1'de eksenel $R_a = 0.6 \mu\text{m}$ için, deney başından itibaren karşı yüzeyde transfer filmi oluşumu, artan kayma mesafesine bağlı olarak verilmektedir.

Genel olarak artan pürüzlülükle birlikte aşınma hızının artması beklenir. Ancak Şekil 8.1'den görüldüğü gibi eksenel $R_a = 1 - 2 \mu\text{m}$ aralığından başlayarak, transfer filmi, aşınma hızının azalmasına neden olmuştur. $R_a = 1.5 \mu\text{m}$ civarında aşınma hızı maksimum $15 \times 10^{-6} \text{mm}^3/\text{Nm}$ değerine ulaşmıştır.

Şekil 8.2'de sürtünme katsayısının $R_a = 0.1 - 3 \mu\text{m}$ arasında 1.3 değerinden 0.7 değerine kadar yavaşça azaldığı görülmektedir.

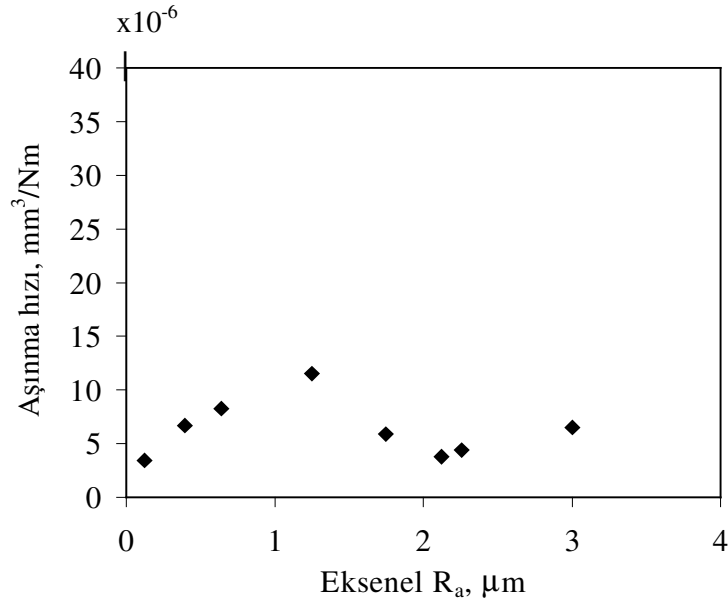
Şekil D.1 ve D.2'deki SEM mikrofotografılarında eksenel $R_a = 0.3$ ve $3 \mu\text{m}$ için pim yüzeyinin çeşitli büyütme oranlarında, deney sonrası görünümü sunulmaktadır. Şekil D.1b ve D.1c'de yerel erimeler görülmektedir. Ayrıca Şekil D.1d'de SEM cihazının yüksek büyütme yapması sebebiyle oluşan radyasyon hasarı farkedilmektedir. Eksenel $R_a = 3 \mu\text{m}$ için, Şekil D.2b'de ısıl yumuşama sebebiyle yerel hacimsel deformasyon oluşmuştur. Şekil D.2c ve D.2d'den ise karşı yüzey ve polimer pim yüzeyi arasında sıkışan polimerin püskürdüğü izlenmektedir. Aynı SEM görüntülerinde bir miktar yerel erime izine de rastlanmaktadır.

8.1.2 Döküm PA 6'nın aşınma ve sürtünme durumu

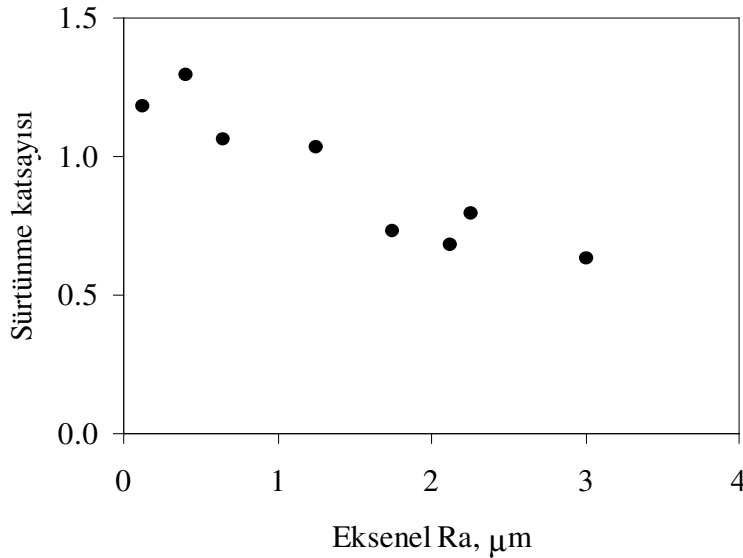
Döküm PA 6'nın aşınma hızının ve sürtünme katsayısının eksenel R_a ile değişimi Şekil 8.5 ve 8.6'da, aşınma hızı-eksenel R_{av} dağılımı Şekil 8.7'de sunulmaktadır. Şekil 8.8'de $t_w = 2.7$ elde edilmektedir.

Döküm PA6 ile yapılan deneylerde, disk yüzeyinin optik mikrofotografıları Şekil B.7 ile B.12 arasında sunulmaktadır. Eksenel $R_a = 0.1 \mu\text{m}$ için transfer filmi görülememektedir. Eksenel $R_a = 0.4 \mu\text{m}$ için transfer filmi mevcuttur. Eksenel $R_a = 1.25 \mu\text{m}$ ve daha büyük pürüzlülük değerlerinde ise daha kalın transfer filmleri oluşmaktadır. Ekstrüzyon PA 6'ya benzer olarak, eksenel $R_a = 1.75 \mu\text{m}$ 'de, transfer

filmi olan bölgelerde, işleme izleri, zor farkedilecek kadar örtülmektedir. Yine ekstrüzyon PA 6’da olduğu gibi eksenel $R_a = 3 \mu\text{m}$ ’a doğru transfer filmi kalınlığını



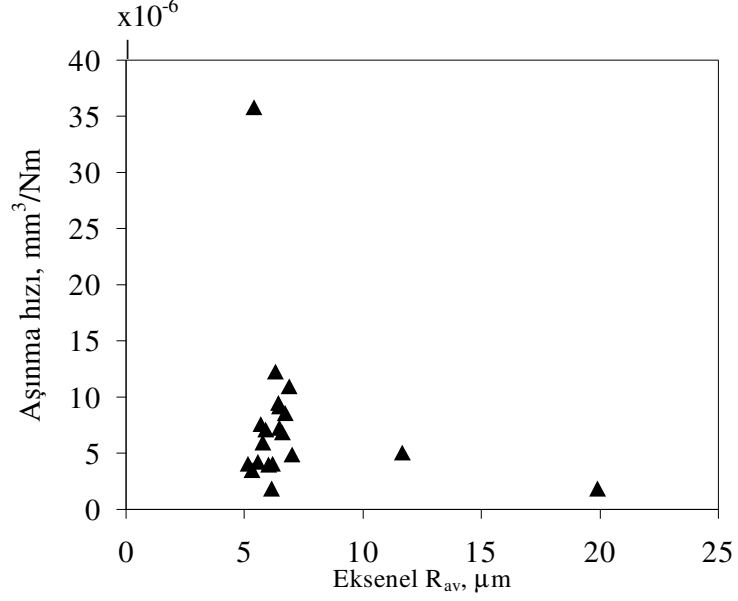
Şekil 8.5: Döküm PA 6’nın aşınma hızının diskin eksenel R_a değeriyle değişimi



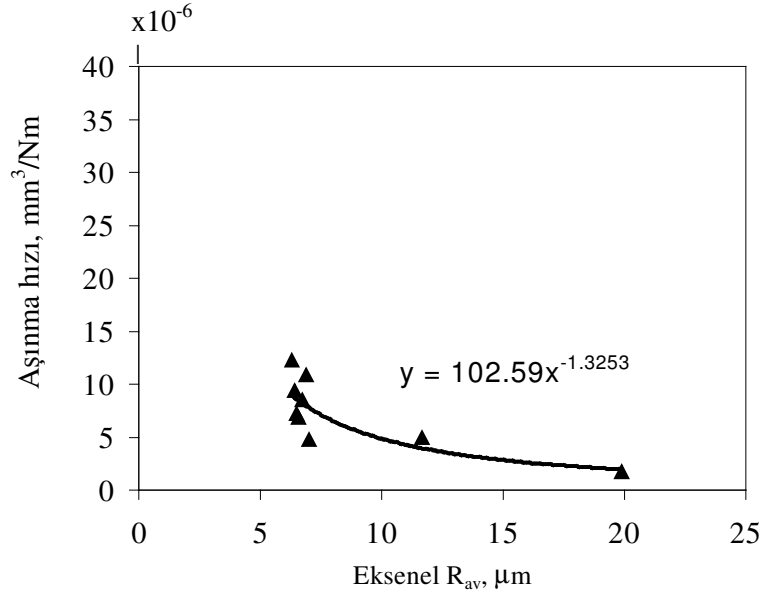
Şekil 8.6: Döküm PA 6’nın sürtünme katsayısının diskin eksenel R_a değeriyle değişimi

korumakta ancak seyrekleşmektedir. Şekil C.2’de eksenel $R_a = 1.24 \mu\text{m}$ için, karşı yüzeyde transfer filmi oluşumu, kayma mesafesine bağlı olarak verilmektedir.

Şekil 8.5'ten görüldüğü gibi eksenel $R_a = 1 - 2 \mu\text{m}$ aralığından itibaren, transfer filmi sebebiyle aşınma hızı azalmaktadır. $R_a = 1.2 \mu\text{m}$ civarında aşınma hızı maksimum $12 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerine ulaşmıştır.



Şekil 8.7: Döküm PA 6 aşınma hızı - disk eksenel R_{av} değeri dağılımı



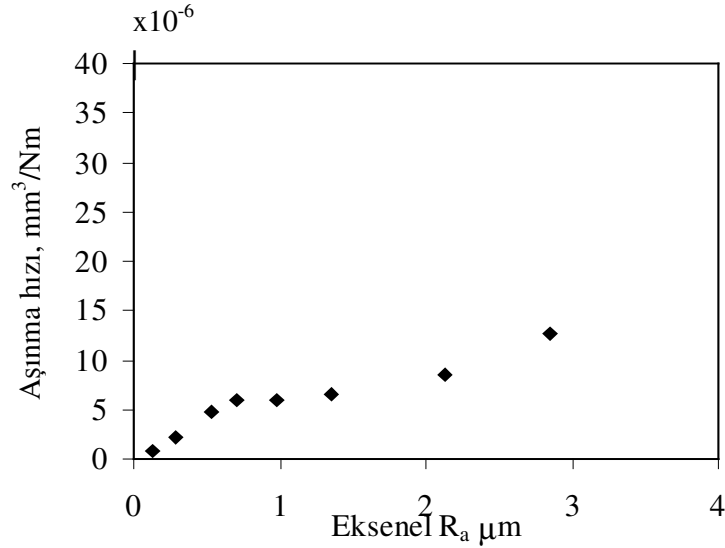
Şekil 8.8: Döküm PA 6 için yorulma aşınması modelinin uygulanması

Şekil 8.6'da sürtünme katsayısının $R_a = 0.1 - 3 \mu\text{m}$ arasında 1.3 değerinden 0.6 değerine kadar yavaşça azaldığı görülmektedir.

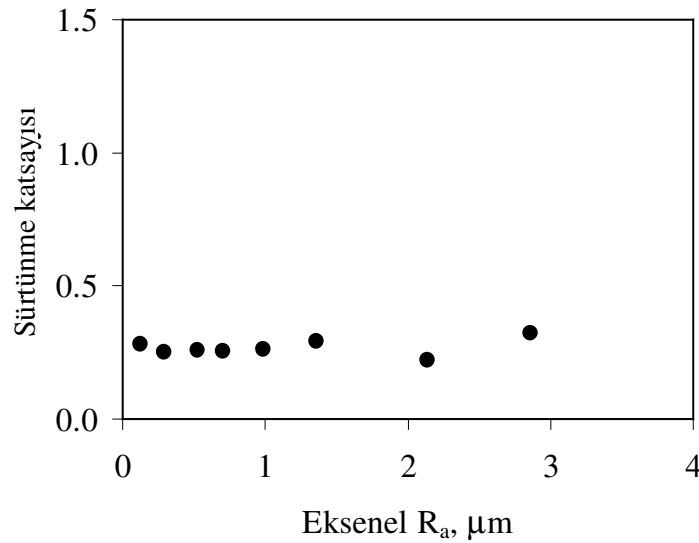
SEM mikrofotoğraflarına bakıldığında, Şekil D.3d'de yerel erimeler görülmektedir. Şekil D.4b ve D.4c'de ise ısıl yumuşama sebebiyle yerel hacimsel deformasyonun olduğu izlenmektedir.

8.1.3 Polietilen tereftalat (PET)'in aşınma ve sürtünme durumu

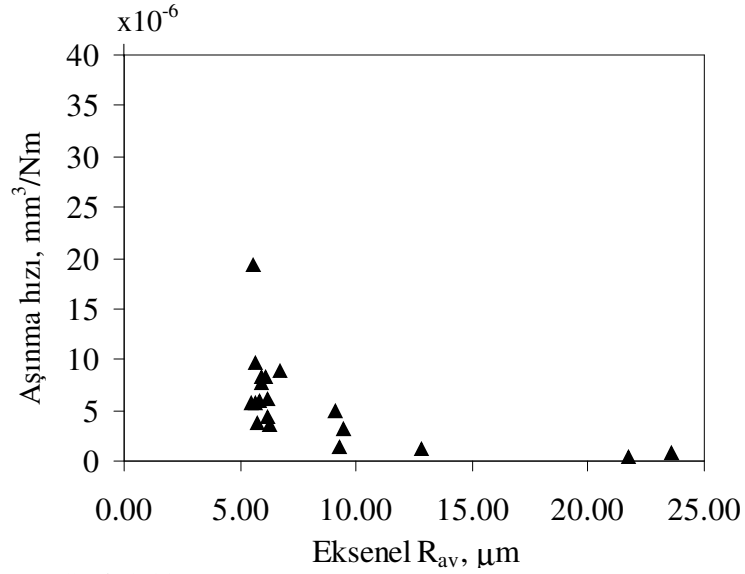
PET'in aşınma hızının ve sürtünme katsayısının eksenel R_a ile değişimi Şekil 8.9 ve 8.10'da, aşınma hızı-eksenel R_{av} dağılımı Şekil 8.11'de sunulmaktadır. Şekil 8.12'de $t_w = 3.4$ elde edilmektedir.



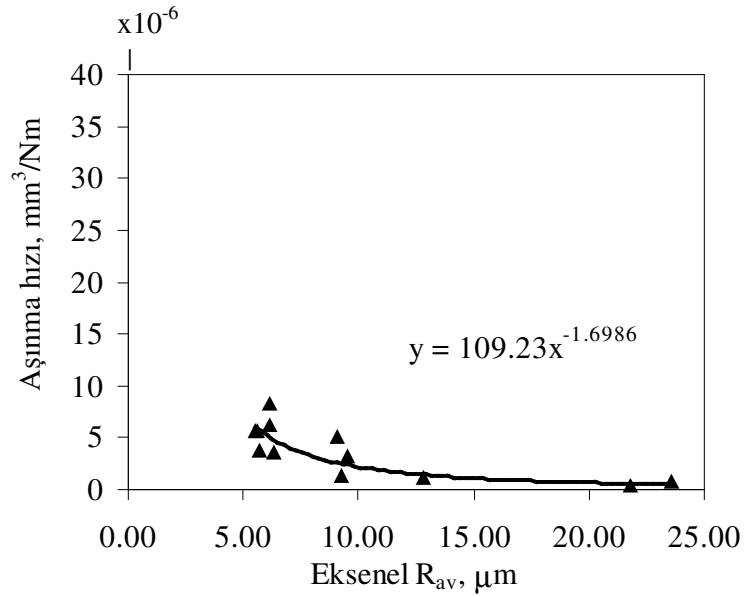
Şekil 8.9: PET'in aşınma hızının disk eksenel R_a değeriyle değişimi



Şekil 8.10: PET'in sürtünme katsayısının disk eksenel R_a değeriyle değişimi



Şekil 8.11: PET aşınma hızı - disk eksenel R_{av} değeri dağılımı



Şekil 8.12: PET için yorulma aşınması modelinin uygulanması

PET ile yapılan deneylerde eksenel $R_a = 0.1 \mu\text{m}$ için transfer filmi görülmemiştir. Eksenel $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ ve üstündeki pürüzlülük değerlerinde, disk yüzeyinde çok seyrek ve yüzeye zayıf yapışmış bir transfer filmi mevcuttur (Şekil B.13 - B.16). Şekil C.3'de ise eksenel $R_a = 1.01 \mu\text{m}$ için, deney başından itibaren karşı yüzeydeki transfer film oluşumu, artan kayma mesafesine bağlı olarak verilmektedir.

Artan pürüzlülükle birlikte aşınma hızı da artmaktadır. Aşınma hızı eksenel $R_a = 3 \mu\text{m}$ 'da yaklaşık $13 \times 10^{-6} \text{mm}^3/\text{Nm}$ değerine ulaşmıştır. Transfer filmi çok seyrek

yapıda olduğundan transfer filminin ekstrüzyon ve döküm PA 6'da görülen aşınma hızını azaltıcı etkisi burada görülmemiştir.

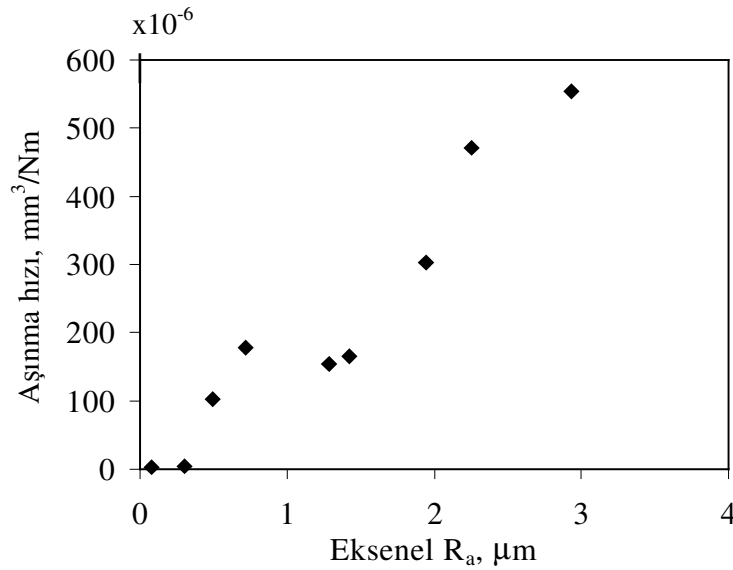
Şekil 8.10'da sürtünme katsayısının yaklaşık 0.25 olup, artan pürüzlülükle hemen hemen hiç değişmediği görülmektedir.

Tüm pürüzlülük değerlerinde aşınma döküntüleri pulcuklar halindedir (Optik mikrofotoğraf Şekil B.24a). Bu tipte bir aşınma döküntüsü deneylerimizde kullandığımız polimerler arasında sadece PET'te görülmüştür.

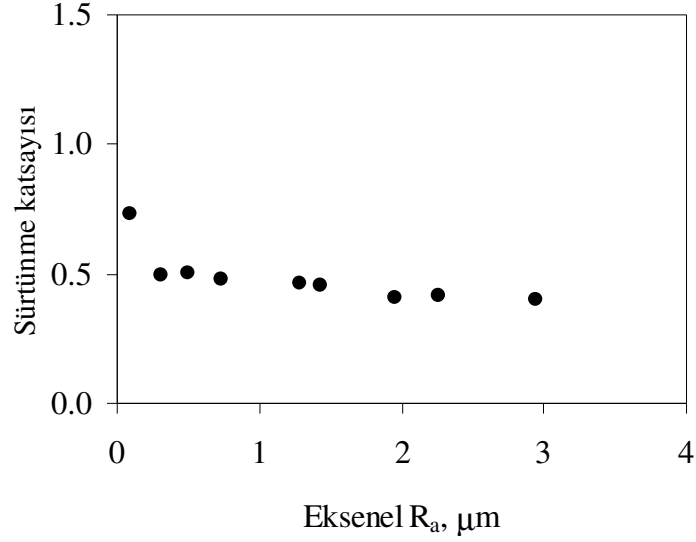
SEM mikrofotoğraflarına bakıldığında, eksenel $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ için kayda değer bulgular görülmemiştir. Eksenel $R_a = 3 \mu\text{m}$ için Şekil D.6'da, sadece olukların kenarında görülen ve aşınma izlerine dik doğrultuda uzanan derin ve büyük boyutlu çatlaklar izlenmektedir. Bu çatlaklar Şekil 3.7b'de gösterilen kohesiv aşınma grubuna giren çatlaklar olup, yorulma sebebiyle oluşmuş olabilirler. Ancak $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ 'da bu çatlaklar hiç görülmemektedir.

8.1.4 Polioksümetilen (POM)'in aşınma ve sürtünme durumu

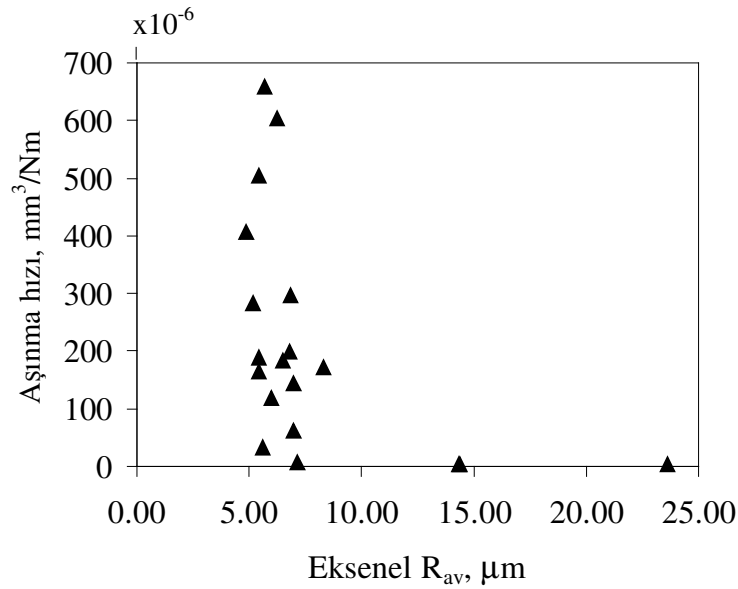
POM'un aşınma hızının ve sürtünme katsayısının eksenel R_a ile değişimi Şekil 8.13 ve 8.14'te, aşınma hızı-ksenel R_{av} dağılımı Şekil 8.15'de sunulmaktadır. Şekil 8.16'da $t_w = 6.4$ elde edilmektedir.



Şekil 8.13: POM'un aşınma hızının eksenel R_a değeriyle değişimi

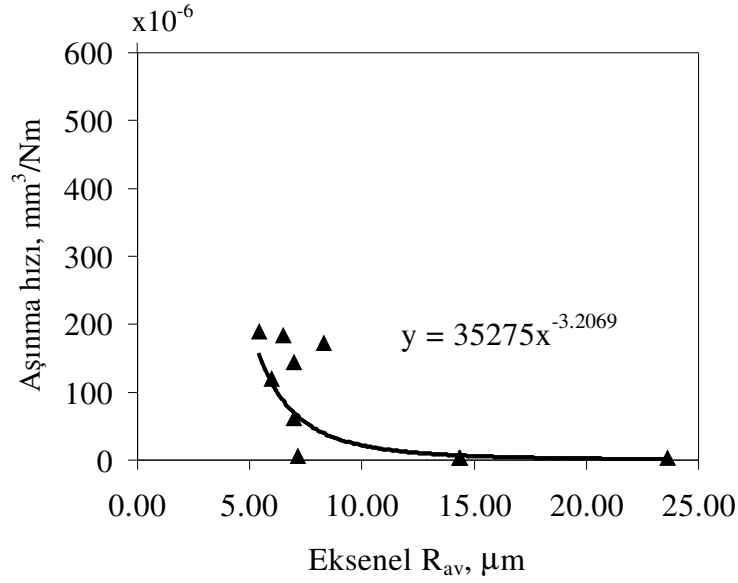


Şekil 8.14: POM'un sürtünme katsayısının eksenel R_a değeriyle değişimi



Şekil 8.15: POM aşınma hızı - disk eksenel R_{av} değeri dağılımı

POM ile yapılan deneylerde hiçbir pürüzlülük değerinde, disk yüzeyinde transfer filmine rastlanmamıştır (Şekil B.17-21). Pürüzlülüğün artmasıyla aşınma hızı da artmaktadır. Aşınma hızı eksenel R_a = 3 μm'da yaklaşık 550x10⁻⁶ mm³/Nm değerine ulaşmıştır. Deneylerimizde kullandığımız polimerler arasında en yüksek aşınma hızı POM'da görülmektedir. Eksenel R_a = 3 μm gibi büyük pürüzlülüklerde, yüksek aşınma hızı sebebiyle numune hızla tükendiğinden, bazı deneyler 28 km yerine 23 km'de bitirilmiştir.



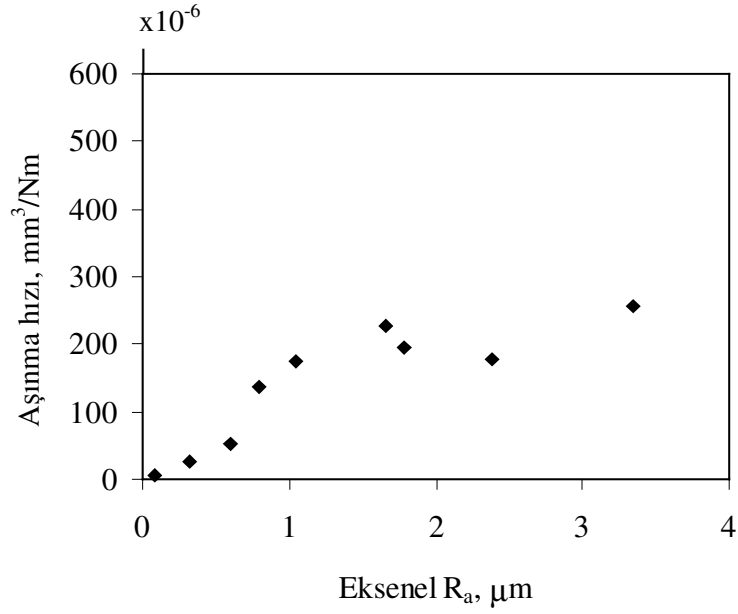
Şekil 8.16: POM için yorulma aşınması modelinin uygulanması

Şekil 8.14'te sürtünme katsayısının eksenel $R_a = 0 - 0.3 \mu\text{m}$ aralığında hızla azalarak 0.7'den 0.5'e düştüğü, eksenel $R_a = 0.3 - 3 \mu\text{m}$ aralığında ise çok yavaş bir şekilde 0.4'e indiği görülmektedir.

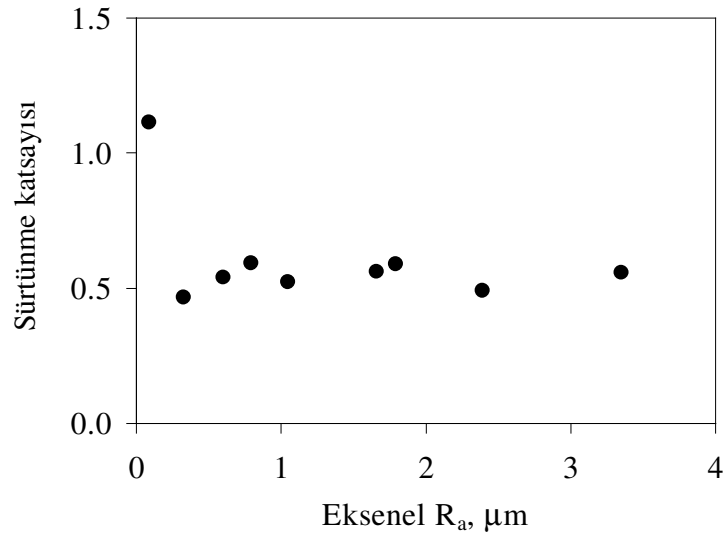
SEM mikrofotograflarında eksenel $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ için, genel olarak aşınma izlerine dik doğrultuda uzanan küçük çatlaklar görülmektedir (Şekil D.7c ve D.7d). Bunlar polimerde yorulma sebebiyle oluşmuş çatlaklardır. Eksenel $R_a = 3 \mu\text{m}$ için aşınma izlerinin (olukların) etrafında, oluk kenarlarının kopmasıyla oluşan pek çok aşınma parçacığı gözlenmektedir (Şekil D.8b, D.8c ve D.8d). Bu parçacıklar abrazif aşınmanın belirtisidir [3]. Yine eksenel $R_a = 3 \mu\text{m}$ için, genel olarak aşınma izlerine paralel çatlaklar görülmektedir (Şekil D.8d). Çatlaklar aşınma izlerine dik doğrultuda uzanmadığı için yorulmadan kaynaklandığı söylenemez. Bunların abrazif aşınma sonucu oluştuğu tahmin edilmektedir.

8.1.5 Polipropilenin (PP) aşınma ve sürtünme durumu

PP'nin aşınma hızının ve sürtünme katsayısının eksenel R_a ile değişimi Şekil 8.17 ve 8.18'de ve aşınma hızı-eksenel R_{av} dağılımı Şekil 8.19'da sunulmaktadır. Şekil 8.20'de $t_w = 4.7$ elde edilmektedir.

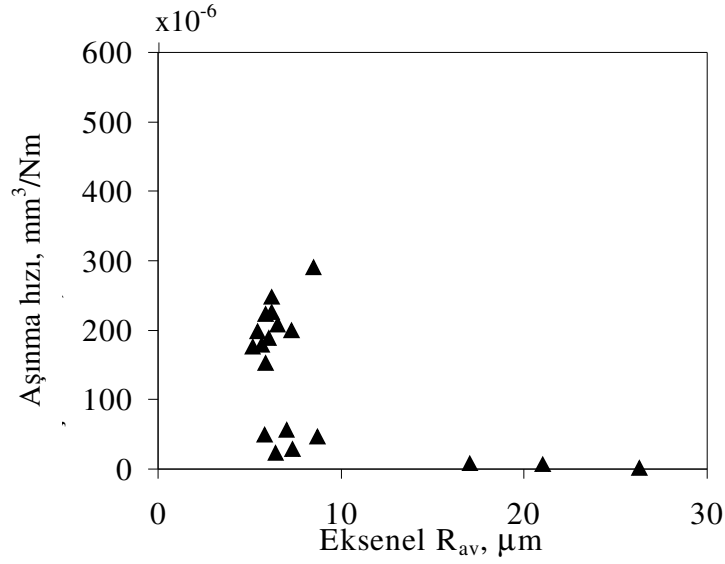


Şekil 8.17: PP'nin aşınma hızının diskin eksenel R_a değeriyle değişimi

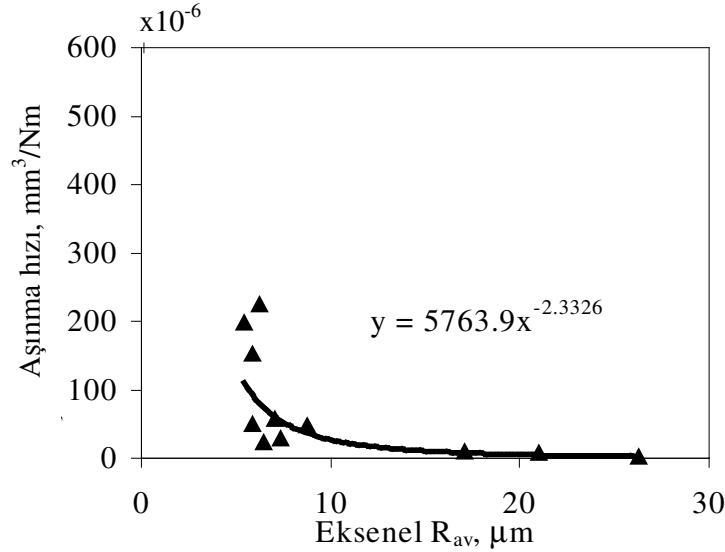


Şekil 8.18: PP'nin sürtünme katsayısının diskin eksenel R_a değeriyle değişimi

PP ile yapılan deneylerde hiçbir pürüzlülük değerinde disk yüzeyinde bir transfer filmine rastlanmamıştır (Şekil B.22 ve B.23). Pürüzlülüğün artmasıyla aşınma hızı artmaktadır. Aşınma hızı eksenel R_a = 3.3 μm'da yaklaşık 250x10⁻⁶ mm³/Nm değerine ulaşmıştır. POM'da olduğu gibi, büyük pürüzlülük değerlerindeki yüksek aşınma hızı sebebiyle, bazı deneylerde 28 km yerine 23 km'de deney bitirilmiştir.



Şekil 8.19: PP aşınma hızı - disk eksenel R_{av} değeri dağılımı



Şekil 8.20: PP için yorulma aşınması modelinin uygulanması

Şekil 8.18’de sürtünme katsayısının eksenel $R_a = 0 - 0.3 \mu\text{m}$ aralığında hızla azalarak yaklaşık 1.1’den 0.5’e indiği ve sonra hemen hemen sabit kaldığı görülmektedir.

Şekil B.24 b’deki optik mikrofotografda PP aşınma döküntüleri görülmektedir. Tüm pürüzlülük değerlerinde aşınma döküntüleri aynı formda olup kayma yönüne dik doğrultuda uzanmaktadır. Bu tipte aşınma döküntüsü sadece PP’de görülmüştür.

SEM mikrofotograflarında eksenel $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ için kayda değer bir bulguya rastlanmamıştır. $R_a = 3 \mu\text{m}$ için pürüz tepelerinin yüzeyde oluşturduğu yırtıklar görülmektedir (Şekil D.10b, D10.c ve D10.d).

8.2 Deney Sonuçlarının Tablolar Halinde Verilmesi

Deneylerde elde edilen tüm sonuçlar, Tablo 8.1'den Tablo 8.5'e kadar sunulmaktadır. Belirsizlik hesapları Bölüm 7.2 ve 7.3'te anlatılan yöntemle yapılmıştır.

Tablo 8.1: Ekstrüzyon PA6'nın aşınma ve sürtünme durumu

Eksenel R_a (μm)	Eksenel R_{av} (μm)	t_w	Aşınma Hızı (mm^3/Nm)	Aşınma Hızının Belirsizliği (mm^3/Nm)	Sürtünme Katsayısı	Sürtünme Katsayısının Belirsizliği	Transfer filmi	Maksimum disk yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0.12	15.71	0.7	7.15×10^{-6}	3.09×10^{-6}	1.36	0.02	Yok	131
0.29	13.01		7.44×10^{-6}	3.12×10^{-6}	1.22	0.07	İnce	119
0.61	7.90		10.55×10^{-6}	7.23×10^{-6}	1.19	0.10	İnce	115
1.06	5.78		10.97×10^{-6}	6.44×10^{-6}	1.15	0.04	Kalın	84
1.37	5.79	0.7	9.60×10^{-6}	0.55×10^{-6}	1.18	0.08	Kalın	97
1.65	5.49		15.18×10^{-6}	2.19×10^{-6}	1.09	0.09	Kalın	99
2.07	5.68		9.69×10^{-6}	7.11×10^{-6}	0.89	0.16	Kalın	67
2.25	5.80		6.23×10^{-6}	2.27×10^{-6}	0.82	0.02	Kalın	80
2.94	6.15		3.83×10^{-6}	0.14×10^{-6}	0.76	0.13	Kalın	70

Tablo 8.2: Döküm PA6'nın aşınma ve sürtünme durumu

Eksenel R_a (μm)	Eksenel R_{av} (μm)	t_w	Aşınma Hızı (mm^3/Nm)	Aşınma Hızının Belirsizliği (mm^3/Nm)	Sürtünme Katsayısı	Sürtünme Katsayısının Belirsizliği	Transfer filmi	Maksimum disk yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0.13	15.78	2.7	3.39×10^{-6}	2.29×10^{-6}	1.18	0.08	Yok	95
0.40	6.78		6.72×10^{-6}	1.87×10^{-6}	1.30	0.08	İnce	101
0.64	6.45		8.29×10^{-6}	1.60×10^{-6}	1.07	0.12	İnce	94
1.25	6.59		11.55×10^{-6}	0.98×10^{-6}	1.04	0.11	Kalın	101
1.75	5.69	0.7	5.86×10^{-6}	1.69×10^{-6}	0.73	0.08	Kalın	70
2.12	5.54		3.81×10^{-6}	0.37×10^{-6}	0.68	0.05	Kalın	60
2.26	6.03		4.44×10^{-6}	3.72×10^{-6}	0.79	0.21	Kalın	80
3.00	5.96		6.53×10^{-6}	3.69×10^{-6}	0.63	0.05	Kalın	60

Tablo 8.3: PET'in aşınma ve sürtünme durumu

Eksenel R_a (μm)	Eksenel R_{av} (μm)	t_w	Aşınma Hızı (mm^3/Nm)	Aşınma Hızının Belirsizliği (mm^3/Nm)	Sürtünme Katsayısı	Sürtünme Katsayısının Belirsizliği	Transfer filmi	Maksimum disk yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0.12	19.40	3.4	0.76×10^{-6}	0.42×10^{-6}	0.28	0.06	Yok	50
0.29	9.39		2.27×10^{-6}	1.31×10^{-6}	0.25	0.04	Çok seyrek	52
0.53	6.81		4.81×10^{-6}	1.02×10^{-6}	0.26	0.03	Çok seyrek	40
0.70	6.20		5.87×10^{-6}	3.31×10^{-6}	0.26	0.03	Çok seyrek	40
0.99	5.83		5.88×10^{-6}	0.42×10^{-6}	0.27	0.01	Çok seyrek	45
1.36	6.44	0.7	6.58×10^{-6}	3.31×10^{-6}	0.29	0.02	Çok seyrek	40
2.13	5.83		8.54×10^{-6}	1.01×10^{-6}	0.22	0.04	Çok seyrek	40
2.86	5.70		12.60×10^{-6}	9.58×10^{-6}	0.32	0.09	Çok seyrek	50

Tablo 8.4: POM'un aşınma ve sürtünme durumu

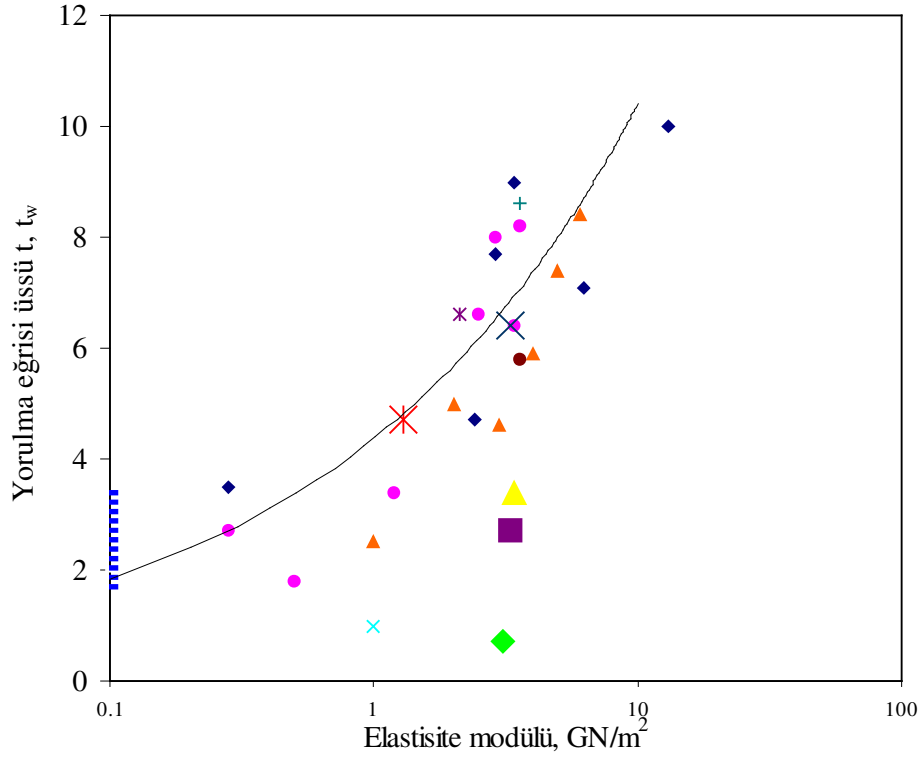
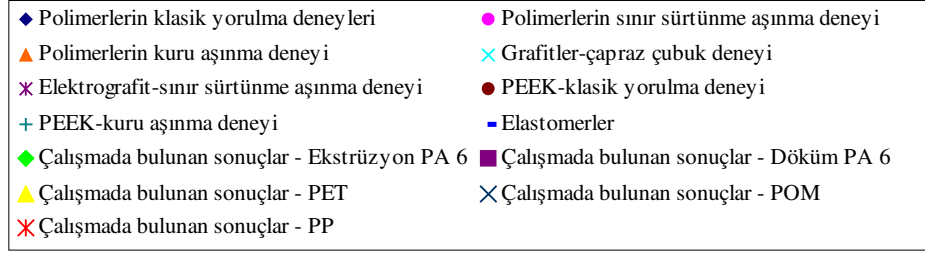
Eksenel R_a (μm)	Eksenel R_{av} (μm)	t_w	Aşınma Hızı (mm^3/Nm)	Aşınma Hızının Belirsizliği (mm^3/Nm)	Sürtünme Katsayısı	Sürtünme Katsayısının Belirsizliği	Transfer filmi	Maksimum disk yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0.08	18.98	6.4	3.29×10^{-6}	0.18×10^{-6}	0.74	0.28	Yok	86
0.31	10.77		4.57×10^{-6}	2.38×10^{-6}	0.50	0.24	Yok	58
0.50	6.98		102.7×10^{-6}	58.66×10^{-6}	0.50	0.03	Yok	60
0.72	7.41		177.6×10^{-6}	8.46×10^{-6}	0.48	0.02	Yok	52
1.29	5.72		153.8×10^{-6}	49.23×10^{-6}	0.47	0.04	Yok	45
1.42	5.95	6.4	164.8×10^{-6}	132.4×10^{-6}	0.46	0.04	Yok	45
1.95	5.83		302.6×10^{-6}	146.5×10^{-6}	0.41	0.04	Yok	50
2.26	5.43		471.5×10^{-6}	265.9×10^{-6}	0.42	0.08	Yok	51
2.94	5.83		554.2×10^{-6}	71.23×10^{-6}	0.40	0.05	Yok	50

Tablo 8.5: PP'nin aşınma ve sürtünme durumu

Eksenel R_a (μm)	Eksenel R_{av} (μm)	t_w	Aşınma Hızı (mm^3/Nm)	Aşınma Hızının Belirsizliği (mm^3/Nm)	Sürtünme Katsayısı	Sürtünme Katsayısının Belirsizliği	Transfer filmi	Maksimum disk yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0.09	21.47	4.7	5.92×10^{-6}	3.46×10^{-6}	1.11	0.30	Yok	127
0.33	6.89		25.8×10^{-6}	3.61×10^{-6}	0.47	0.09	Yok	56
0.60	6.43		53.2×10^{-6}	4.78×10^{-6}	0.54	0.12	Yok	49
0.80	7.47		136.1×10^{-6}	125.8×10^{-6}	0.60	0.08	Yok	56
1.05	5.67		175.5×10^{-6}	32.45×10^{-6}	0.53	0.10	Yok	50
1.66	6.37	4.7	228.1×10^{-6}	28.20×10^{-6}	0.56	0.08	Yok	50
1.79	6.66		193.9×10^{-6}	8.68×10^{-6}	0.59	0.03	Yok	55
2.39	5.41		177.9×10^{-6}	2.82×10^{-6}	0.49	0.04	Yok	51
3.35	7.17		256.4×10^{-6}	47.69×10^{-6}	0.56	0.04	Yok	55

8.3 Yorulma Aşınması Sonuçlarının Kıyaslanması

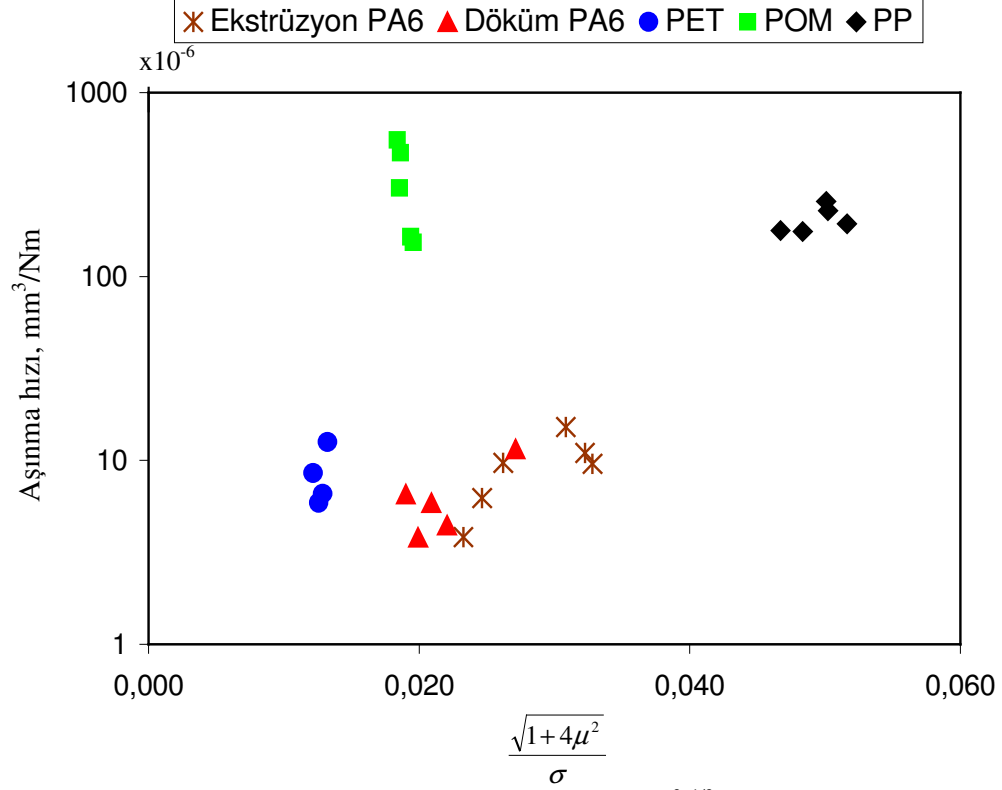
Elde edilen sonuçların, başka çalışmalara ait aşınma deneyi ve klasik yorulma deneyi sonuçlarıyla kıyaslanması için, Şekil 3.9'a çalışmada bulunan t_w değerleri eklenmiş ve Şekil 8.21'de tekrar sunulmuştur. Görüldüğü gibi elastisite modülü 1.3 GN/m^2 olan PP ve 3.3 GN/m^2 olan POM'a ait sonuçlar, yorulma eğrisi üslerinin ortalamasını ifade eden çizgiye çok yakın bulunmuştur. PET ($E = 3.4 \text{ GN/m}^2$) için elde edilen sonuç ortalama çizgiye pek yakın olmayıp deneysel veri bandının sınırındadır. Ekstrüzyon PA 6 ($E = 3.1 \text{ GN/m}^2$) ve döküm PA 6 ($E = 3.3 \text{ GN/m}^2$) sonuçları ise bandın çok dışındadır.



Şekil 8.21: Çalışmada elde edilen t_w değerlerinin Şekil 3.9'da verilen diğer çalışmalarla kıyaslanması

8.4 Aşınma Hızının $(1+4\mu^2)^{1/2}/\sigma$ Parametresiyle Değişimi

Abraziv aşınmanın etkili olmasının beklendiği, karşı yüzey eksenel R_a parametresinin yaklaşık $1 \mu\text{m}$ 'den büyük değerleri için, aşınma hızının $(1+4\mu^2)^{1/2}/\sigma$ parametresiyle değişimi Şekil 8.22'de verilmektedir. POM'a ait veriler hariç tutulursa, aşınma hızının $(1+4\mu^2)^{1/2}/\sigma$ parametresiyle arttığı söylenebilir.



Şekil 8.22: Deneylelerdeki polimerler için aşınma hızının $(1+4\mu^2)^{1/2}/\sigma$ parametresiyle değişimi

8.5 Deney Esnasında Disk Pürüzlülüğünün Değişmesi

Deney esnasında paslanmaz çelik disklerin yüzey pürüzlülüğünün değişip değişmediğini anlamak için, bazı disklerin deney sonrasında pürüzlülüğü tekrar ölçülmüştür. Tablo 1'den görüldüğü gibi, disk yüzeyinde transfer filmi oluşturmayan PP deneylerinde yüzey pürüzlülüğünde anlamlı bir değişim söz konusu değildir. PET bazı pürüzlülük değerlerinde zayıf yapışmış ve çok seyrek bir transfer filmi oluşturabilmektedir, ancak tablodaki pürüzlülük değerinde (Eksenel $R_a = 0.13 \mu\text{m}$) bir transfer filmi yoktur ve yüzey pürüzlülüğünde anlamlı bir değişim olmamıştır.

PA 6 gibi iyi yapışmış ve sürekli transfer filmi oluşturan polimerlerle yapılan deneylerde ise pürüzlülükte büyük değişim görülmüştür. Bu değişim tablodan görüldüğü gibi esas olarak R_a ve R_{av} parametrelerinde söz konusudur. Profilin maksimum tepe-çukur yüksekliğini ifade eden R_z ve R_{max} gibi parametrelerde önemli bir değişim olmamıştır. Şekil I.2 ve I.3'te görüldüğü gibi deney sonrasında profile, kısa dalga boylu yeni tepcikler eklenmiştir. Bu tepcikler deney öncesi profildeki tepeler gibi sivri uçlu değil, küt uçludur. Buradan küt uçlu tepciklerin transfer

filminin etkisiyle oluştuğu ve polimerin, karşı yüzeyin yüksek tepelerine pek sıvanmadığı sonucu çıkarılabilir.

Sonuç olarak, deney esnasında metal disklerin yüzeyinde herhangi bir deformasyon ve çizilme olmadığı söylenebilir. Pürüzlülükteki değişim tamamen transfer film oluşumu ile ilgilidir.

Tablo 8.6: Deneyden önce ve deneyden sonra disk pürüzlülüğü (Tüm birimler μm 'dir)

Disk no	Polimer		Deneyden önce				Deneyden sonra			
			R_a	R_z	R_{max}	R_{av}	R_a	R_z	R_{max}	R_{av}
F2	PP	Cevresel	0.58	3.53	5.43	55.36	0.62	3.55	5.44	68.47
		Eksenel	1.79	11.41	14.11	6.04	1.79	11.44	13.71	5.84
G2	PA 6	Cevresel	0.59	3.30	5.02	69.93	1.06	5.69	8.77	68.07
		Eksenel	2.08	12.34	15.36	5.94	2.85	14.24	16.96	14.33
I7	PA 6	Cevresel	0.58	3.87	6.80	52.09	1.04	6.05	9.00	61.28
		Eksenel	2.90	17.16	21.79	6.1	3.93	18.75	24.08	14.28
I13	PP	Cevresel	0.36	2.01	3.04	63.29	0.34	1.88	2.82	84.88
		Eksenel	1.03	7.67	8.77	5.45	0.99	7.17	8.35	5.43
J3	PET	Cevresel	0.04	0.24	0.37	118.98	0.05	0.26	0.41	120.73
		Eksenel	0.13	1.30	1.69	21.77	0.13	1.28	1.60	20.42

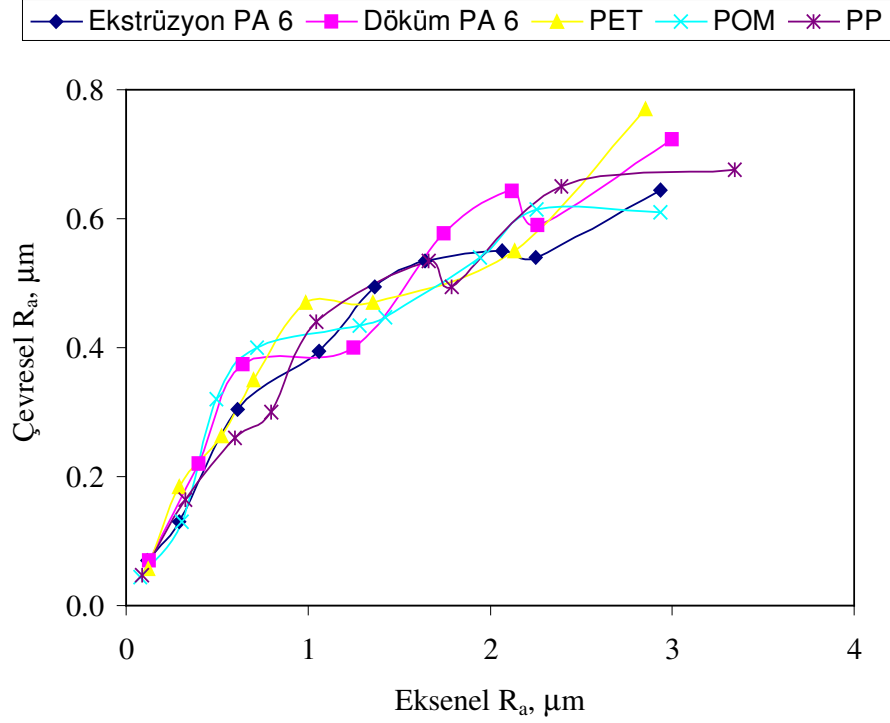
8.6 Eksenel R_a ve Çevresel R_a Parametreleri Arasındaki İlişki

Deneylerde kullanılan tüm disklerin eksenel R_a ve çevresel R_a parametreleri arasındaki ilişki Şekil 8.23'te görülmektedir. Dikkat edilirse yaklaşık olarak eksenel $R_a = 0-1 \mu\text{m}$ aralığında çevresel R_a , eksenel R_a ile doğrusal olarak artmaktadır. Eksenel $R_a = 1 \mu\text{m}$ değerinden sonra ise çevresel R_a , eksenel R_a kadar artmamakta ve değişim, yatay eksene doğru bükülen bir eğri halini almaktadır.

8.7 Değerlendirme

Yorulma aşınması ile ilgili değerlendirmeler:

1) Orta pürüzlülük değerleri (yaklaşık eksenel $R_a = 0.1 - 1 \mu\text{m}$) için polimer aşınması, Hollander ve Lancaster'in yorulma aşınması modeliyle izah edilmeye çalışılmıştır. Şekil 3.9'da yorulma eğrisi üssü t ve t_w 'nin, polimerlerin elastisite modülüyle değişimi görülmektedir. Yorulma eğrisi üssünün kalın bir bant halinde



Şekil 8.23: Deneylerde kullanılan disklerin eksenel R_a ve çevresel R_a parametreleri arasındaki ilişki

değiştirdiği görülmektedir. Aşınma, yorulmayla gerçekleşiyorsa deneyde kullanılan polimerlere ait t_w değerlerinin, grafikteki verilerin ortalamasına yakın olması gerekir. Bölüm 8.3'te Şekil 8.21'de görüleceği gibi PP ve POM için bulunan t_w değerleri yorulma aşınması modeline uygundur. Döküm PA 6 ve ekstrüzyon PA 6 için bulunan t_w değerleri ise modele uygun değildir. PET için elde edilen sonuç ise sınır değerlerdedir.

2) Bazı polimerler için deneylerde bulunan ve beklenen t_w değerleri arasındaki farkın sebebi, disk yüzeyinde transfer filminin oluşmasıdır. Dikkat edilirse sürekli bir transfer filmi oluşumu görülen ekstrüzyon PA 6 ve döküm PA 6 için beklenen değerden sapma en büyük mertebededir. Çok seyrek transfer filmi görülen PET deneylerinde t_w beklenen değere daha yakındır. Hiç transfer filmi görülmeyen PP ve POM deneylerinde elde edilen t_w değeri ise beklenen mertebededir.

3) t_w değerleri arasındaki farkın transfer filmi oluşumu dışındaki diğer bir nedeni, ortalama tepe yuvarlak yarıçapı R_{av} 'nin hesaplanması ile ilgili olabilir. Pürüzlülük ölçümleriyle elde edilen yüzey profillerinde R_{av} hesaplanırken, hiçbir filtreden geçirilmemiş profiller kullanılmıştır. Halbuki yorulma sürecine katkıda bulunan

tepeciklerin hangi mertebede olduğu bilinmemektedir [2]. Filtreleme yoluyla yüzey profilinden, aşınmaya katkısı olmayan yüzey bileşenleri çıkarılabilirse, R_{av} 'nin hesaplanması daha sağlıklı olabilir. Ayrıca kaçınılmaz olarak, pürüzlülük ölçüm sisteminden kaynaklanan bir takım bozucu etkiler de mevcuttur: İğne uç yarıçapının sonlu olması, elektriksel ve mekanik gürültü gibi.

4) POM için eksenel R_a değeri 0.3 μm olan disklerle yapılan deneyler sonunda elde edilen SEM mikrofotografalarında, aşınma izlerine dik doğrultuda uzanan çatlaklar görülmüştür (Şekil D.7c ve D.7d). Bunlar yorulma sebebiyle oluşmuş çatlaklardır. Ayrıca PET için eksenel R_a değeri 3 μm olan disklerle yapılan deneylere ait SEM mikrofotografalarında, sadece oluk kenarlarında rastlanan ve yine aşınma izlerine dik doğrultuda büyük boyutlu çatlaklar görülmektedir (Şekil D.6c ve D.6d). Bu çatlaklar da yorulmadan kaynaklanıyor olabilir.

Aşınma ve transfer filmi ile ilgili değerlendirmeler:

5) POM ve PP için karşı yüzeyde transfer filmi oluşmadığından artan pürüzlülük ile aşınma hızı da artmaktadır (Şekil 8.13 ve 8.17). PET ile yapılan deneylerde bazı pürüzlülük değerlerinde çok seyrek transfer filmleri oluşmuşsa da, bunların aşınmayı azaltıcı etkisi küçük olduğundan, artan pürüzlülük ile aşınma hızı artmaktadır (Şekil 8.9).

6) Ekstrüzyon PA 6 ve döküm PA 6 ile yapılan deneylerde, karşı yüzeyde sürekli ve kalın transfer filmleri oluşmuştur. Bu polimerlerde artan pürüzlülük ile aşınma hızı önce artmakta, sonra eksenel $R_a = 1 - 2 \mu\text{m}$ aralığından başlayıp 3 μm 'ye kadar aşınma hızında bir azalma eğilimi görülmektedir. Bu azalmanın esas sebebinin transfer filmi olduğu tahmin edilmektedir.

7) Yüksek pürüzlülük değerlerinde transfer filmi daha seyrek yapıdadır.

Sürtünme katsayısı ile ilgili değerlendirmeler:

8) PET dışında tüm polimerler için, artan pürüzlülük ile birlikte sürtünme katsayısı azalmaktadır. Pürüzlülüğün artmasıyla karşı yüzey ile polimer arasındaki temas basıncı arttığından sürtünme katsayısı azalmaktadır. Ekstrüzyon PA 6 ve döküm PA 6 için artan pürüzlülük ile sürtünme katsayısının azalması (Şekil 8.2 ve 8.6), POM ve PP'ye nazaran çok daha yavaştır (Şekil 8.14 ve 8.18). POM'un sürtünme katsayısı eksenel $R_a = 0 - 0.3 \mu\text{m}$ aralığında 0.7'den 0.5'e, PP'in sürtünme katsayısı ise aynı aralıkta 1.1'den 0.5'e düşmekte ve diğer tüm pürüzlülük değerlerinde hemen hemen

sabit kalmaktadır. Ekstrüzyon PA 6 ve döküm PA 6'nın sürtünme katsayısının diğer polimerlere göre çok daha yavaş azalmasının sebebi, bu polimerlerin çelik karşı yüzeyle sürtünme katsayısının denenen diğer polimerlerden yüksek olmasıdır. Yüksek sürtünme ısıyı mevcut aşınma sistemi tarafından uzaklaştırılmamakta ve sistemin sıcaklığı artmaktadır. Sıcaklık artışı sürtünme katsayısını artırdığından, artan pürüzlülüğün sürtünme katsayısını azaltma eğiliminin, POM ve PP deneylerindeki kadar baskın olmadığı tahmin edilmektedir.

9) PET ile yapılan deneylerde, tüm pürüzlülük değerleri için sürtünme katsayısı hemen hemen sabit kalmıştır. Sürtünme katsayısı 0.25 – 0.30 arasında değişmektedir.

10) Ekstrüzyon PA 6 ve döküm PA 6 deneylerinde, özellikle küçük karşı yüzey pürüzlülüğü için sürtünme katsayısı büyük değerlere eriştiğinden, SEM mikrofotografılarında yerel erime izleri görülmektedir.

Diğer değerlendirmeler:

11) Deneylerde kullanılan polimerler için, eksenel R_a 'nın 1 μm 'dan büyük değerlerinde aşınma hızının, $(1+4\mu^2)^{1/2}/\sigma$ parametresiyle genel olarak arttığı ve Bölüm 3.7'de verilen abrazif aşınma modeline uyduğu söylenebilir (Şekil 8.22). Ancak POM'a ait verilerin modelden önemli miktarda saptığı görülmektedir. Bu polimerin modele uymamasının sebebi anlaşılamamıştır.

Takdim edilen çalışmanın devamı niteliğinde, aşağıdaki araştırmaların yapılmasının faydalı olabileceği düşünülmektedir:

1) R_{av} parametresi ham profil yerine, değişik sınır dalga boyundaki filtrelerle filtrelenmesi ile elde edilmiş profillerden heaplanabilir. Böylece aşınma olayına etkisi olmayan yüzey profil saptamaları ayrılabilir.

2) Polimerler için küçük karşı yüzey pürüzlülük değerlerinde (yaklaşık $R_a = 0.1-0.2 \mu\text{m}$) rastlanan aşınma minimumunu saptayabilmek için bu pürüzlülük aralığında birbirine çok yakın R_a değerleri kullanılarak aşınma deneyleri yapılabilir.

3) Takdim edilen çalışmaya katkılı polimerler dahil edilebilir.

4) Şekil 8.23' ten görüldüğü gibi deneyde kullanılan disklerin çevresel ve eksenel R_a değerleri arasındaki ilişki eksenel R_a 'nın 1 μm 'den büyük değerlerinde doğrusallığını kaybetmektedir. Silindirik taşlamada artan eksenel R_a değerine karşılık çevresel R_a aynı miktarda artmamaktadır. Ayrıca karşı yüzeyde transfer filmi oluşturmayan POM

ve PP deneylerinde, aşınma hızının aksenal R_a ile değişimi çevresel R_a 'nın aksenal R_a ile değişimini andırmaktadır. Bu nedenle aşınma hızında aksenal R_a 'nın yanında çevresel R_a 'nın da etkisinin olup olmadığı araştırılabilir. Bu araştırmada disklerin taşlama parametreleri değiştirilerek çevresel ve aksenal R_a arasında doğrusal bağlantı elde edilip edilmeyeceği denenebilir.

5) Sunulan deneysel çalışma için, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı ile R_a dışındaki pürüzlülük parametreleri arasında anlamlı ilişkiler olup olmadığı incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Rhee, S.H. , Ludema, K.C.**, 1978. Mechanisms of formation of polymeric transfer films, *Wear*, 46, 231-240.
- [2] **Hollander, A.E. and Lancaster, J.K.**, 1973. An application of topographical analysis to the wear of polymers, *Wear*, 25, 155-170.
- [3] **Ovaert, T.C. and Cheng, H.S.**, 1991. Counterface topographical effects on the wear of polyetheretherketone and a polyetheretherketone-carbon fiber composite, *Wear*, 150, 275-287.
- [4] **Jain, V.K. and Bahadur, S.**, 1980. Development of a wear equation for polymer-metal sliding in terms of the fatigue and topography of the sliding surfaces, *Wear*, 60, 237-248.
- [5] **Bellow D.G., Viswanath N.S.**, 1995. Development of an equation for the wear of polymers, *Wear*, 181-183, 42-49.
- [6] **Warren, J.H. and Eiss, N.S.**, 1978. Depth of penetration as a predictor of the wear polymers on hard, rough surfaces, *Journal of Lubrication Technology*, 100, 92-97.
- [7] **Friedrich, K., Karger-Kocsis, J. and Lu, Z.**, 1991. Effects of steel counterface roughness and temperature on the friction and wear of PE(E)K composites under dry sliding conditions, *Wear*, 148, 235-247.
- [8] **Barrett, T.S., Stachowiak, G.W. and Batchelor, A.W.**, 1992. Effect of roughness and sliding speed on the wear and friction of ultra-high molecular weight polyethylene, *Wear*, 153, 331-350.
- [9] **Birkett, A. and Lancaster, J.K.**, 1986. Counterface effects on the wear of a composite dry-bearing liner, *Wear*, 110, 345-357.
- [10] **Ovaert, T.C. and Ramachandra, S.** 1995. The effect of controlled counterface topography on polymer transfer and wear, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 35, No.2, 94-99.
- [11] **Ramachandra, S. and Ovaert, T.C.**, 1997. The effect of controlled surface topographical features on the unlubricated transfer and wear of PEEK, *Wear*, 206, 94-99.

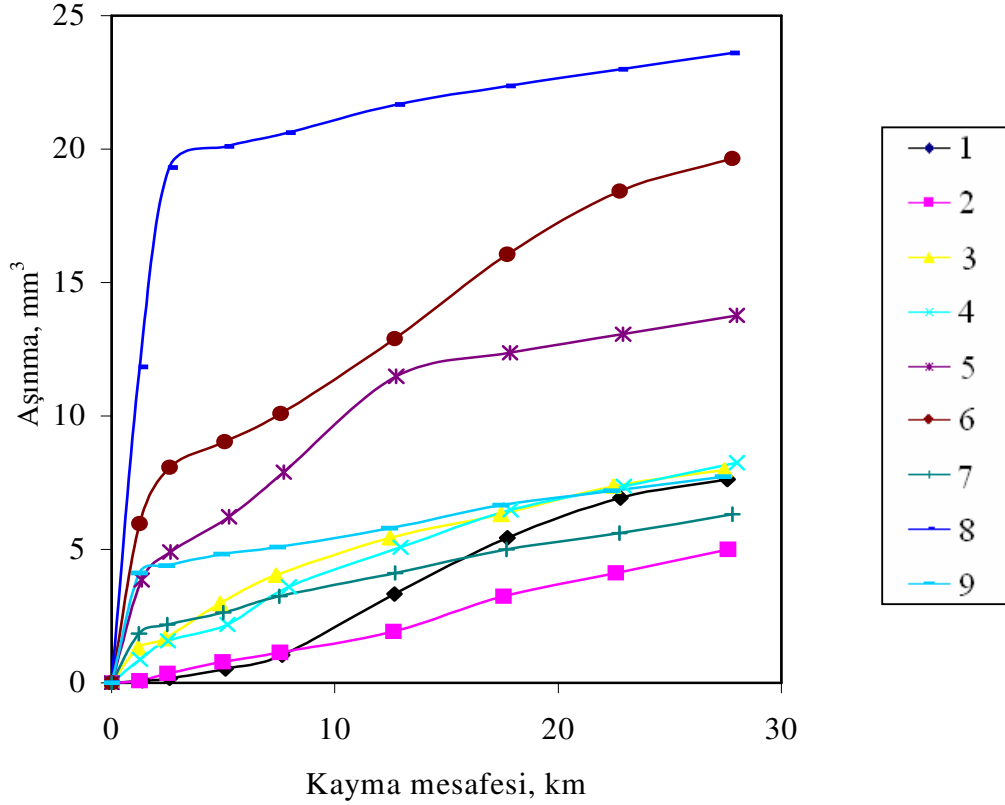
- [12] **Elliott, D.M., Fisher, J. and Clark, D.T.**, 1998. Effect of counterface surface roughness and its evolution on the wear and friction of PEEK and PEEK-bonded carbon fibre composites on stainless steel, *Wear*, 217, 288-296.
- [13] **Chang, W.R.**, 2001. The effect of surface roughness and contaminant on the dynamic friction of porcelain tile, *Applied Ergonomics*, 32, 173-184.
- [14] **Chang, W.R.**, 1998. The effect of surface roughness on dynamic friction between neolite and quarry tile, *Safety Science*, 29, 89-105.
- [15] **Czichos, H.**, 1983. Influence of adhesive and abrasive mechanisms on the tribological behavior of thermoplastic polymers, *Wear*, 88, 27-43.
- [16] **Franklin, S. E. and Kraker, A.**, 2003. Investigation of counterface surface topography effects on the wear and transfer behaviour of a POM-20%PTFE composite , *Wear*, 255, 766-773.
- [17] **Mens, J. W. M. and Gee, A.W.J.**, 1991. Friction and behaviour of 18 polymers in contact with steel in environments of air and water, *Wear*, 149, 255-268.
- [18] **Clarke, C. G. and Allen, C.**, 1991. The water lubricated, sliding wear behaviour of polymeric materials against steel, *Tribology International*, 24,109-118.
- [19] **Marcus K., Ball A. and Allen C.**, 1991. The effect of grinding direction on the nature of the transfer film formed during the sliding wear of ultrahigh molecular weight polyethylene against stainless steel, *Wear*, 151, 323-336.
- [20] **Bellow D.G., Viswanath N.S.**, 1993. An analysis of the wear of polymers, *Wear*, 162-164, 1048-1053.
- [21] **Bahadur, S. and Gong, D.**, 1993. The transfer and wear of nylon and CuS-nylon composites: filler proportion and counterface characteristics, *Wear*, 162-164, 397-406.
- [22] **Bahadur, S., Gong, D.**, 1992. The role of copper compounds as fillers in the transfer and wear behavior of polyetheretherketone, *Wear*, 154, 151-165.
- [23] **Bahadur, S., Gong, D. and Anderegg, J.W.**, 1983. Tribomechanical studies by XPS analysis of the transfer film of nylon 11 and its composites, *Wear*, 160, 131-138.

- [24] **Bahadur, S.**, 2000. The development of transfer layers and their role in polymer tribology, *Wear*, 245, 92-99.
- [25] **Kar, M. K. and Bahadur S.**, 1978. Micromechanism of wear at polymer-metal sliding interface, *Wear*, 46, 189-202.
- [26] **Jain, V. K. and Bahadur, S.**, 1982. An investigation of the markings on wear and fatigue fracture surface, *Wear*, 75, 357-368.
- [27] **Clerico, M. and Patierno, V.**, 1979. Sliding wear of polymeric composites, *Wear*, 53, 279-301.
- [28] **Rajesh, J.J. , Bijwe, J., Tewari, U.S.**, 2002. Abrasive wear performance of various polyamides, *Wear*, 252, 769-776.
- [29] **Thomas, T.R.**, 1981. Characterisation of surface roughness, *Precision Engineering*, 97-104.
- [30] **Whitehouse, D. J.**, 1994. Handbook of surface metrology, Institute of Physics Publishing, Bristol.
- [31] **Pişkin, E.**, 1987. Polimer teknolojisine giriş, İnkılap Kitabevi, İstanbul.
- [32] **Akkurt, S.**, 1991. Plastik Malzeme Bilgisi, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [33] **Hutchings, I.M.**, 1992. Tribology, Edward Arnold, London.
- [34] **Brostow, W. and Corneliusen, R.D.**, 1989. Failure of Plastics, Hanser Publisher, Munich.
- [35] **Stachowiak, G. W., Batchelor, A. W., Stachowiak, G. B.**, 2004. Experimental methods in tribology, Elsevier, Oxford.
- [36] **Briscoe, B.J.**, 1981. Wear of polymers: an essay on fundamental aspects, *Tribology International*, 14, 231-243.
- [37] **Gahr, Z.**, 1987. Microstructure and Wear of Materials, Elsevier, Amsterdam
- [38] **Mittal, K.L.**, 1981. Physicochemical Aspects of Polymer Surfaces, pp.387-425. Plenum Press, New York.
- [39] **Moore, D.F.**, 1972. The friction and lubrication of elastomers, Pergamon Press, Oxford.
- [40] **Whitehouse, D.J. and Archard, J.F.**, 1970. The properties of random surfaces of significance in their contact, *Proc. Roy. Soc. Lond*, A 316, 97-121.
- [41] **Sander, M.**, 1991. A practical guide to the assessment of surface texture, Feinprüf Perthen GmbH, Göttingen.

- [42] **ISO 4288**, 1996. Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture, International Organization For Standardization, Geneva.
- [43] **ISO 11562**, 1996. Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Metrological Characteristics of Phase Correct Filters, International Organization For Standardization, Geneva.
- [44] **ISO 4287,1997**. Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters Replaces ISO 4287-1:1984.
- [45] **Akkurt, M.**, 1985. Takım tezgahları – Talaş kaldırma yöntemleri ve teknolojisi, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [46] **Yamaguchi, Y.**, 1990. Tribology of Plastic Materials, Elsevier, New York
- [47] **ISO GUM**, 1993. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, International Organization For Standardization, Switzerland.
- [48] **Aksulu, M.**, 2005. Yüzey Pürüzlülüğü ve Pürüzlülük Ölçümleri Eğitimi, Tübitak Ulusal Metroloji Enstitüsü, Gebze.

EK A

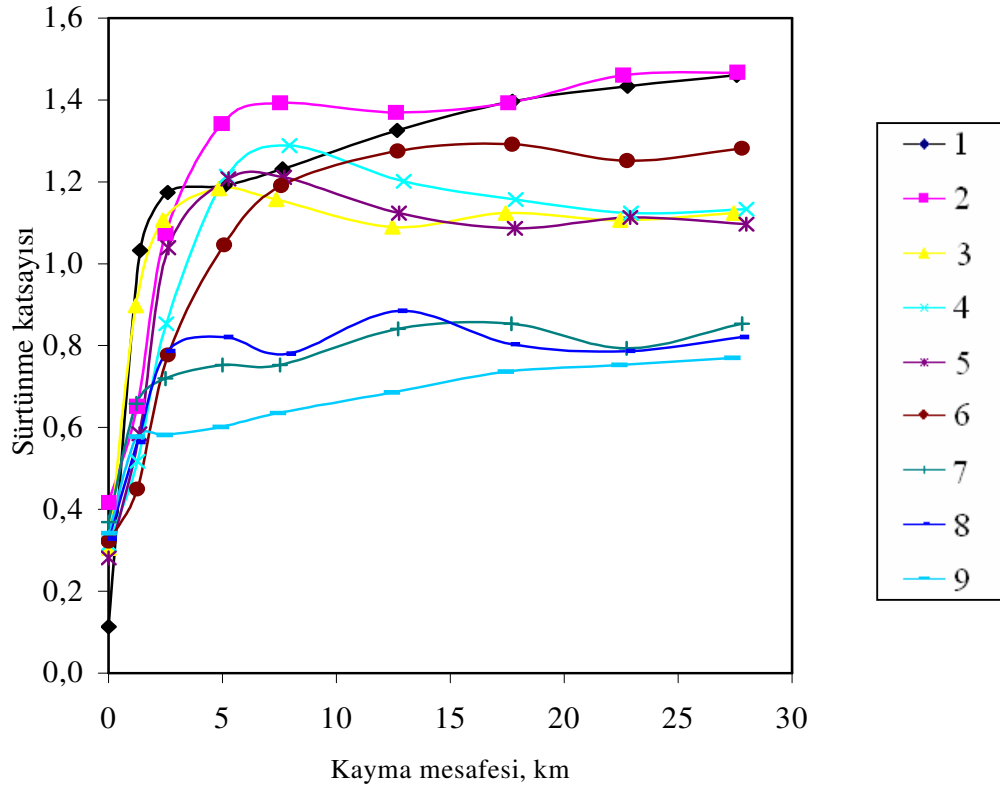
AŞINMA - KAYMA MESAFESİ VE SÜRTÜNME KATSAYISI -
KAYMA MESAFESİ GRAFİKLERİ



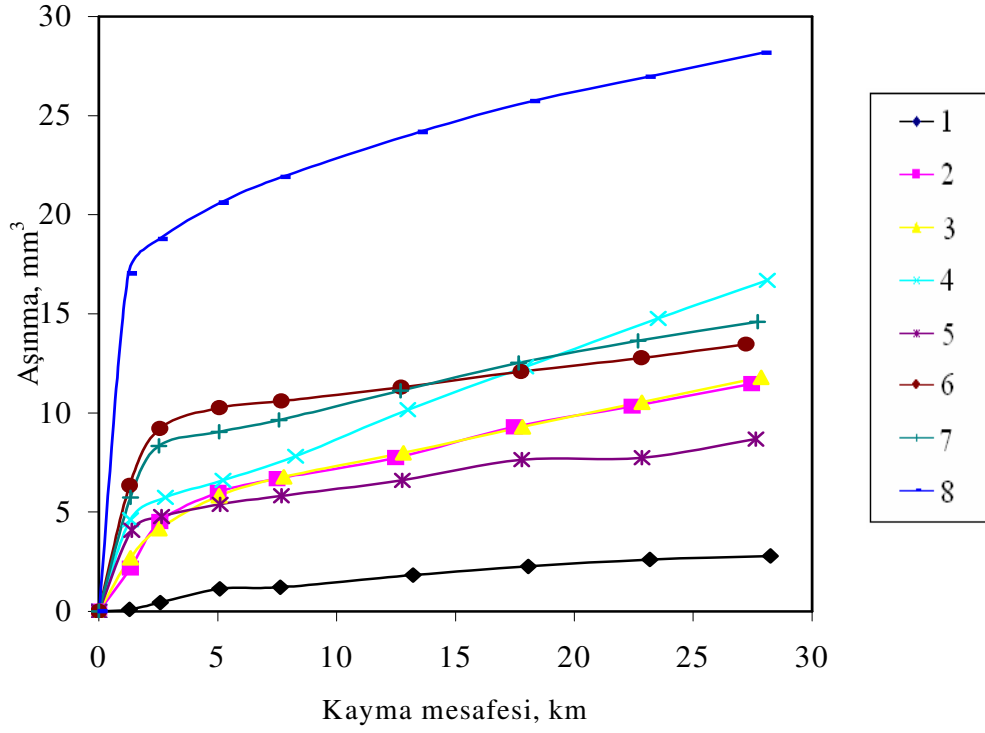
Şekil A.1: Ekstrüzyon PA 6 için Aşınma – Kayma mesafesi grafikleri

Tablo A.1: Ekstrüzyon PA 6 ile çalışmış disklerin pürüzlülük parametreleri

No	Çevresel R_a (μm)	Eksenel R_a (μm)	Çevresel R_{av} (μm)	Eksenel R_{av} (μm)
1	0.03	0.09	142.17	20.91
2	0.09	0.28	142.85	19.39
3	0.33	0.63	112.51	8.05
4	0.36	1.04	89.55	6.17
5	0.48	1.38	57.96	5.44
6	0.66	1.64	77.17	5.81
7	0.59	2.08	69.93	5.94
8	0.47	2.24	90.68	5.43
9	0.71	2.97	68.67	6.19



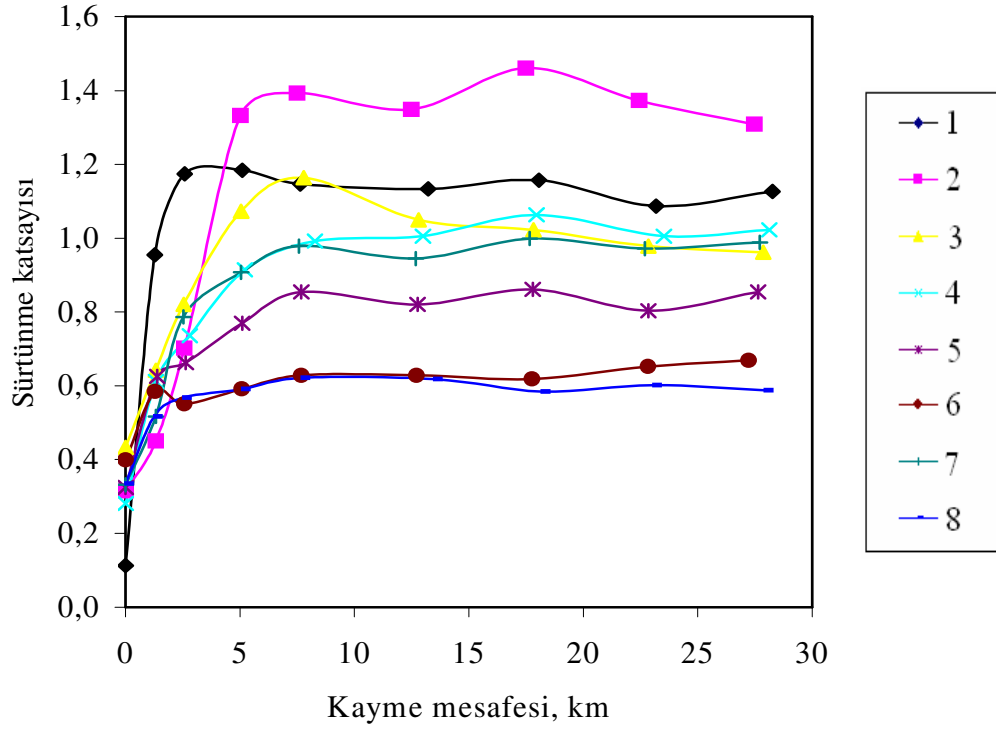
Şekil A.2: Ekstrüzyon PA 6 için Sürtünme katsayısı – Kayma mesafesi grafikleri



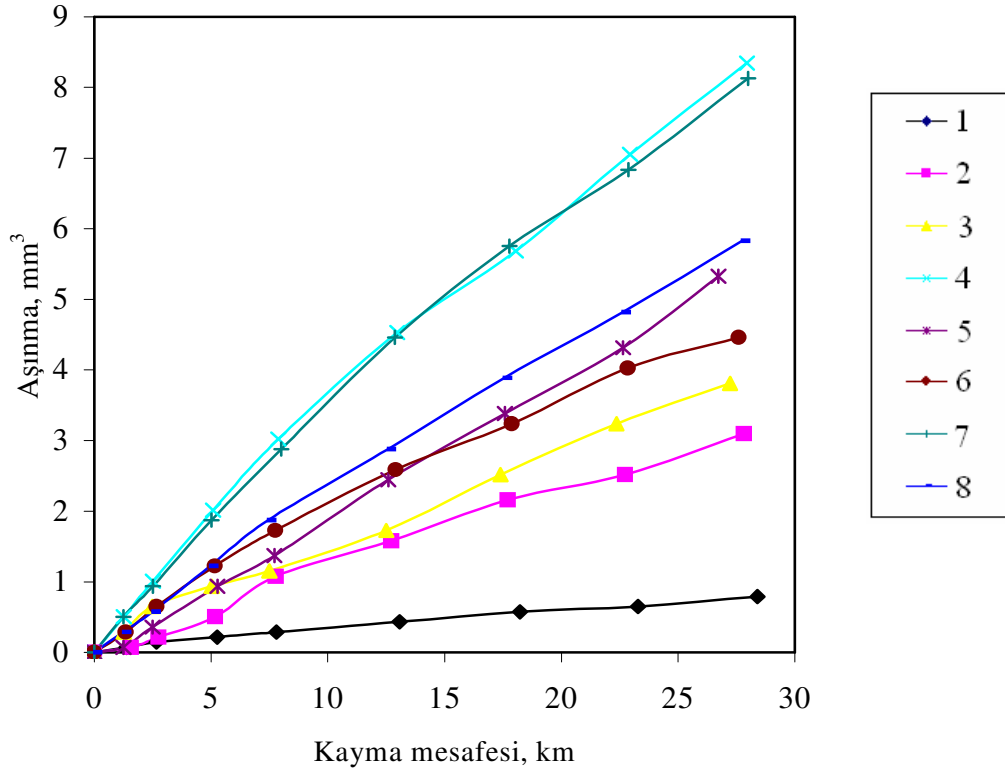
Şekil A.3: Döküm PA 6 için Aşınma – Kayma mesafesi grafikleri

Tablo A.2: Döküm PA 6 ile çalışmış disklerin pürüzlülük parametreleri

No	Çevresel R_a (μm)	Eksenel R_a (μm)	Çevresel R_{av} (μm)	Eksenel R_{av} (μm)
1	0.05	0.1	99.29	19.89
2	0.18	0.39	107.65	6.59
3	0.41	0.58	90.78	6.48
4	0.44	1.24	93.52	6.29
5	0.53	1.75	61.35	5.58
6	0.61	2.09	55.31	5.14
7	0.47	2.25	79.7	5.9
8	0.77	3	65.78	6.46



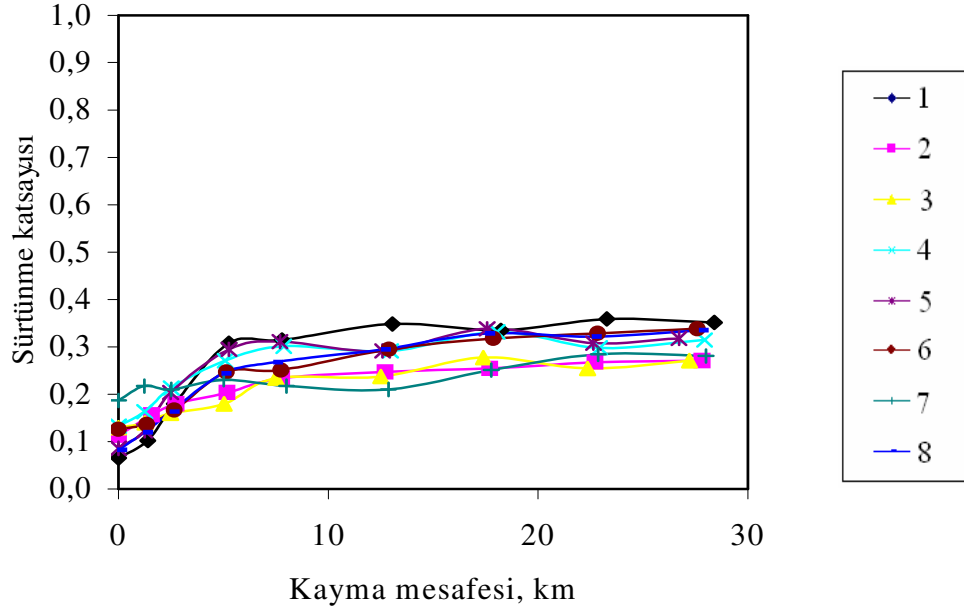
Şekil A.4: Döküm PA 6 için Sürtünme katsayısı – Kayma mesafesi grafikleri



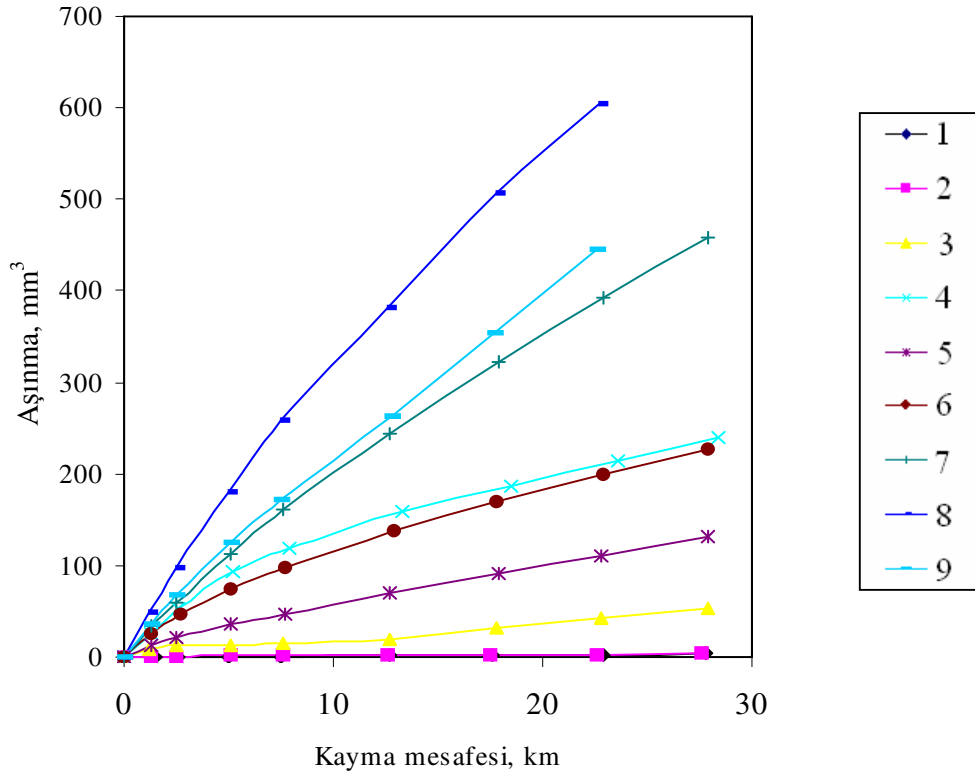
Şekil A.5: PET için Aşınma – Kayma mesafesi grafikleri

Tablo A.3: PET ile çalışmış disklerin pürüzlülük parametreleri

No	Çevresel R_a (μm)	Eksenel R_a (μm)	Çevresel R_{av} (μm)	Eksenel R_{av} (μm)
1	0.05	0.12	99.96	23.57
2	0.22	0.33	133.1	9.48
3	0.26	0.5	91.1	5.72
4	0.41	0.7	59.33	6.12
5	0.44	1.01	87.38	5.5
6	0.35	1.33	70.95	6.15
7	0.55	2.1	81.5	5.89
8	0.66	2.87	76.27	5.8



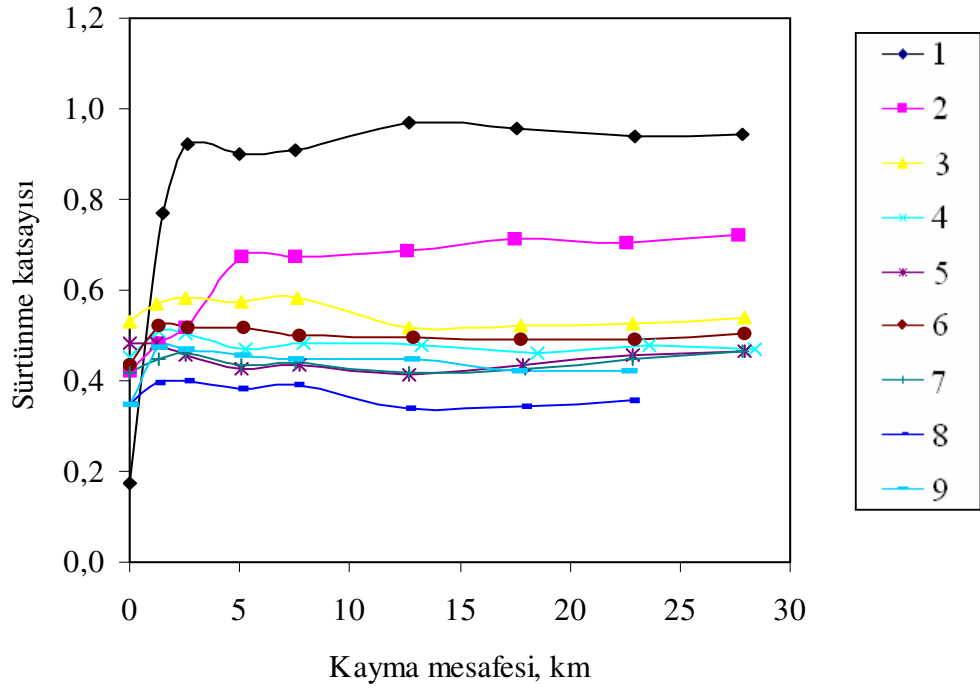
Şekil A.6: PET için Sürtünme katsayısı – Kayma mesafesi grafikleri



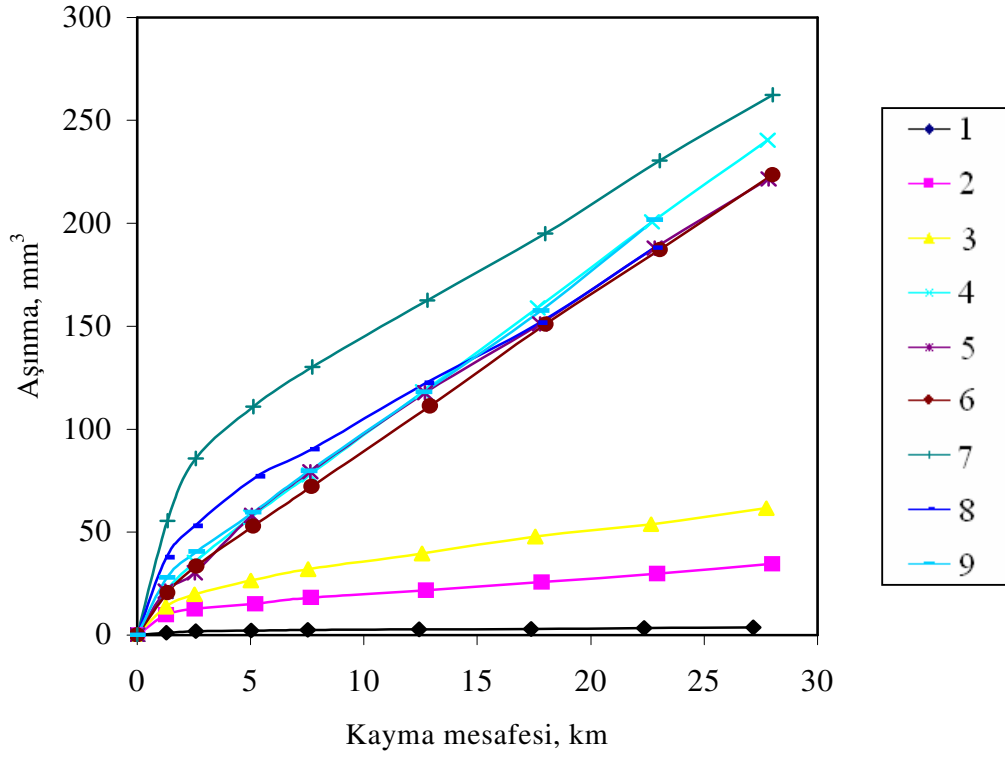
Şekil A.7: POM için Aşınma – Kayma mesafesi grafikleri

Tablo A.4: POM ile çalışmış disklerin pürüzlülük parametreleri

No	Çevresel R_a (μm)	Eksenel R_a (μm)	Çevresel R_{av} (μm)	Eksenel R_{av} (μm)
1	0.03	0.06	166.57	23.63
2	0.12	0.33	99.79	14.39
3	0.31	0.47	91.52	6.98
4	0.35	0.71	109.72	8.32
5	0.49	1.31	76.75	6
6	0.51	1.42	54.11	5.42
7	0.58	1.94	50.55	4.85
8	0.64	2.19	73.16	5.68
9	0.56	3.14	75.43	5.41



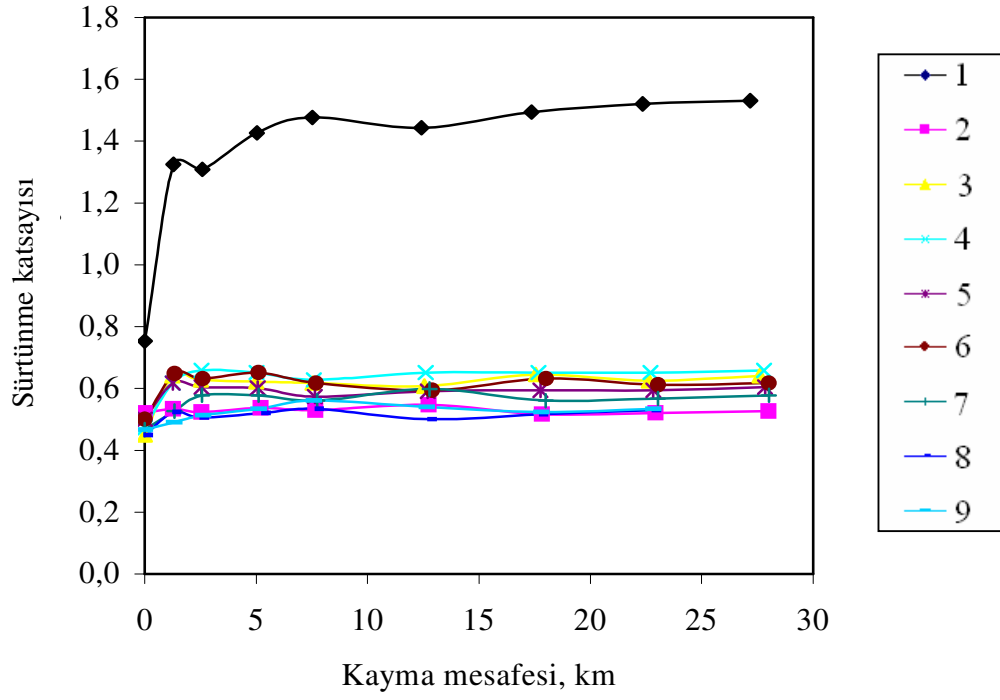
Şekil A.8: POM için Sürtünme katsayısı – Kayma mesafesi grafikleri



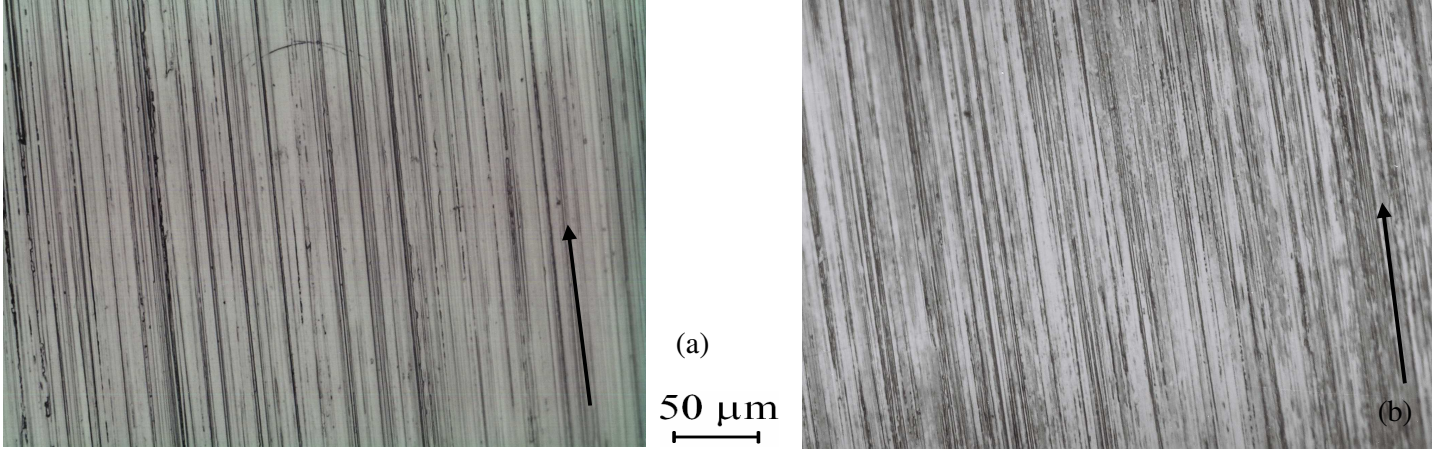
Şekil A.9: PP için Aşınma – Kayma mesafesi grafikleri

Tablo A.5: PP ile çalışmış disklerin pürüzlülük parametreleri

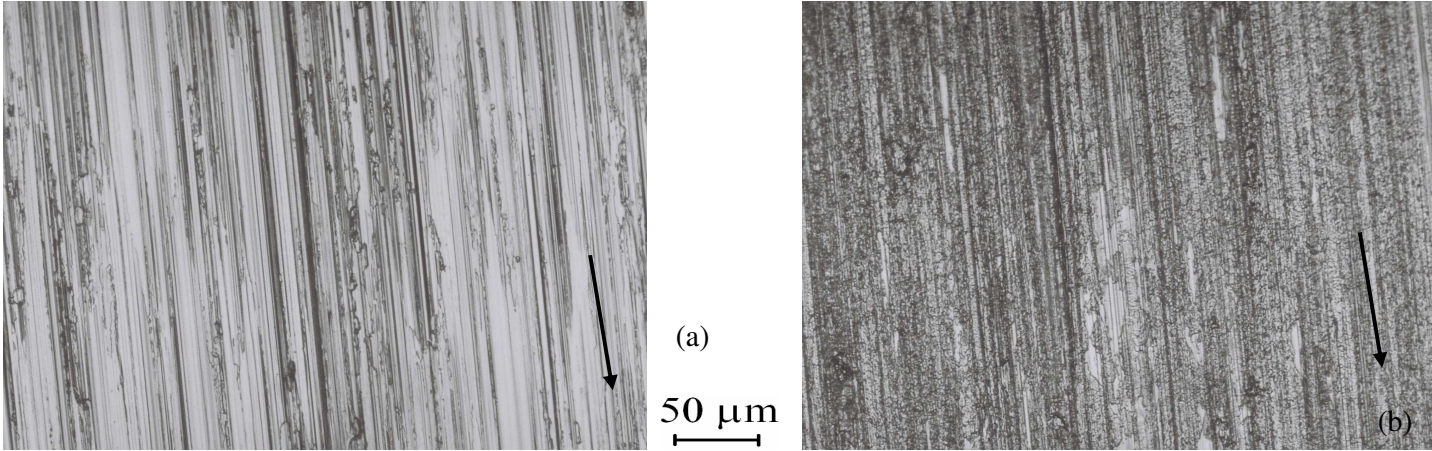
No	Çevresel R_a (μm)	Eksenel R_a (μm)	Çevresel R_{av} (μm)	Eksenel R_{av} (μm)
1	0.03	0.05	138.28	26.32
2	0.16	0.35	102.39	6.43
3	0.3	0.61	93.31	5.84
4	0.37	0.8	81.88	6.21
5	0.36	1.03	63.25	5.45
6	0.54	1.66	62.79	6.53
7	0.58	1.79	55.36	6.04
8	0.76	2.46	63.2	5.65
9	0.84	3.46	73.55	5.87



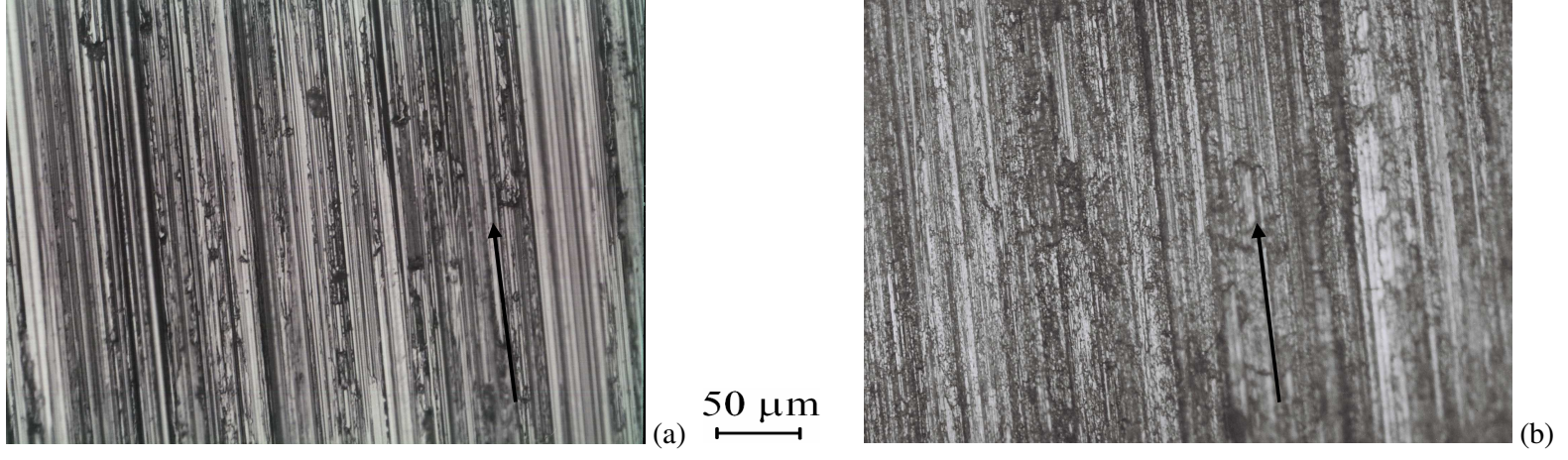
Şekil A.10: PP için Sürtünme katsayısı – Kayma mesafesi grafikleri



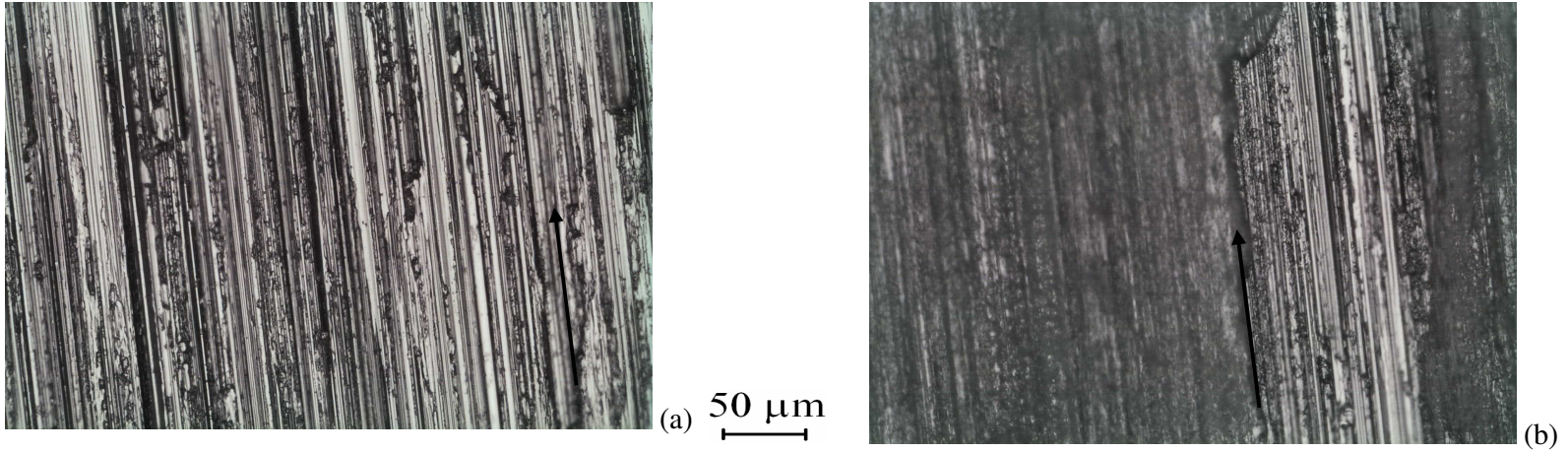
Şekil B.1: Ekstrüzyon PA6, eksenel $R_a = 0.12 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı



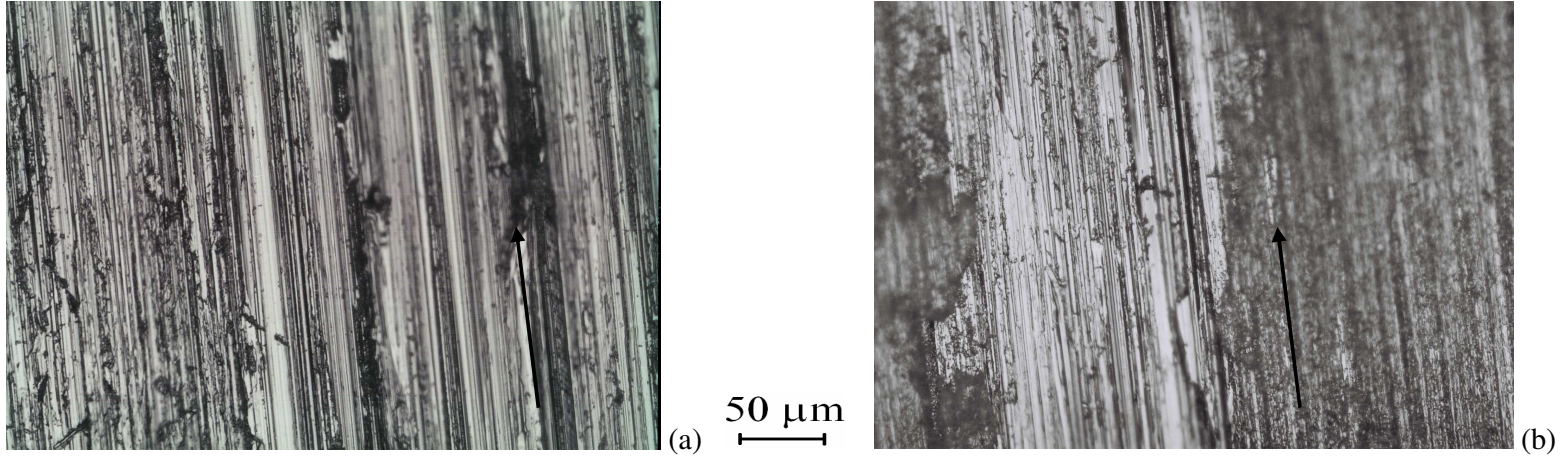
Şekil B.2: Ekstrüzyon PA6, eksenel $R_a = 0.60 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı



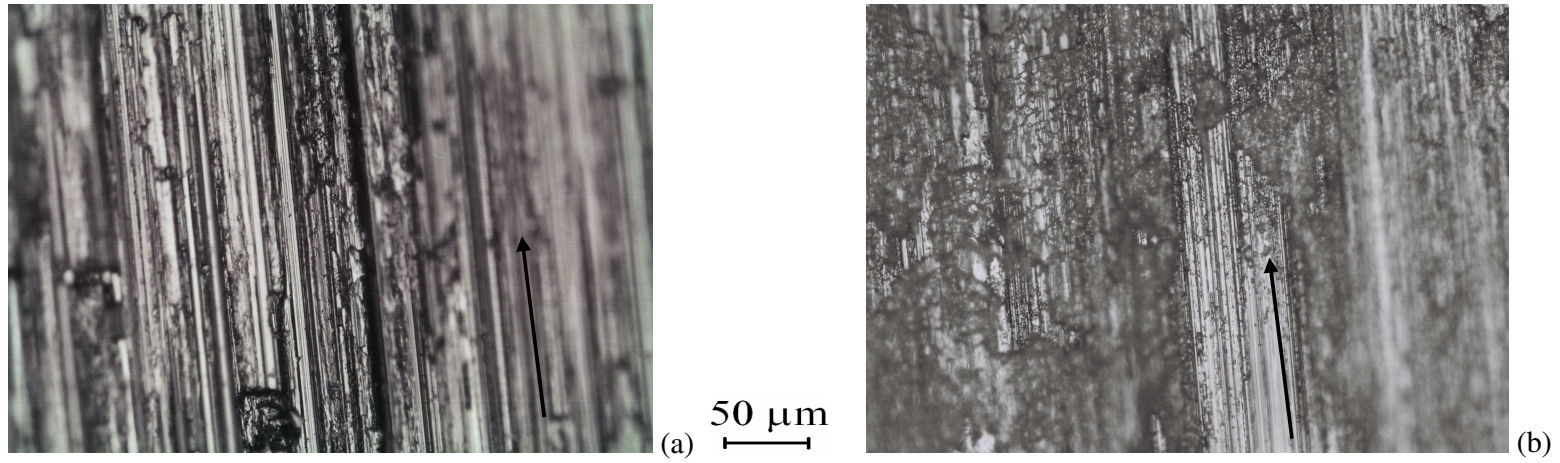
Şekil B.3: Ekstrüzyon PA6, aksenal $R_a = 1.00 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı



Şekil B.4: Ekstrüzyon PA6, aksenal $R_a = 1.37 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı



Şekil B.5: Ekstrüzyon PA6, eksenel $R_a = 2.25 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı



Şekil B.6: Ekstrüzyon PA6, eksenel $R_a = 2.94 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı

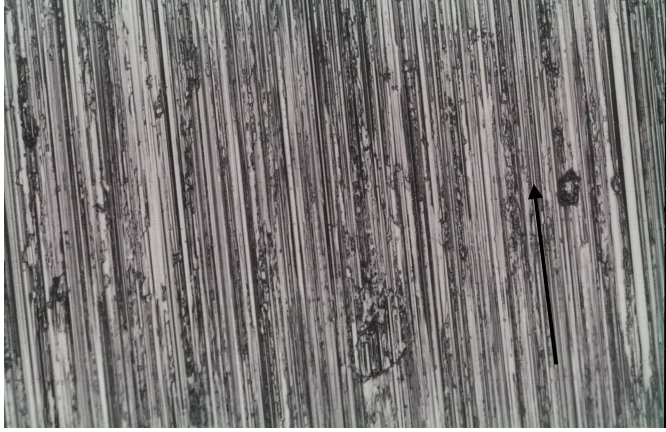


50 μm
(a)

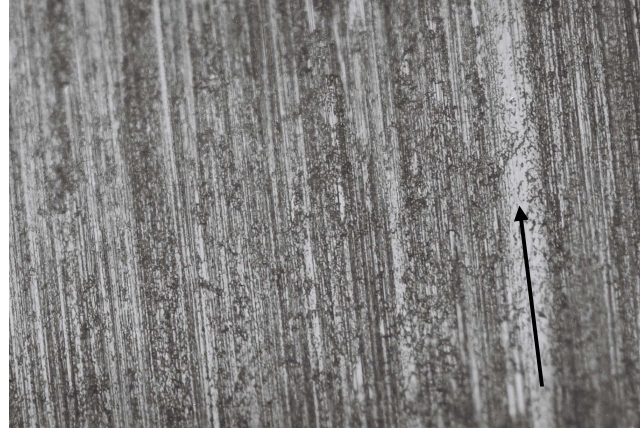


(b)

Şekil B.7: Döküm PA6, eksenel $R_a = 0.1 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı

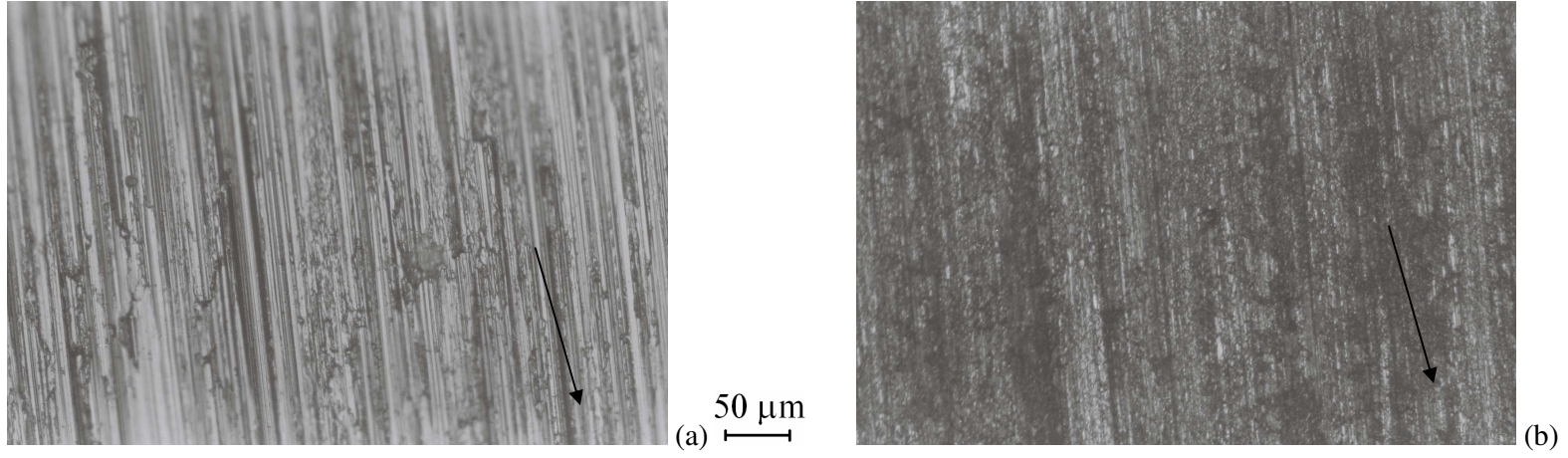


50 μm
(a)

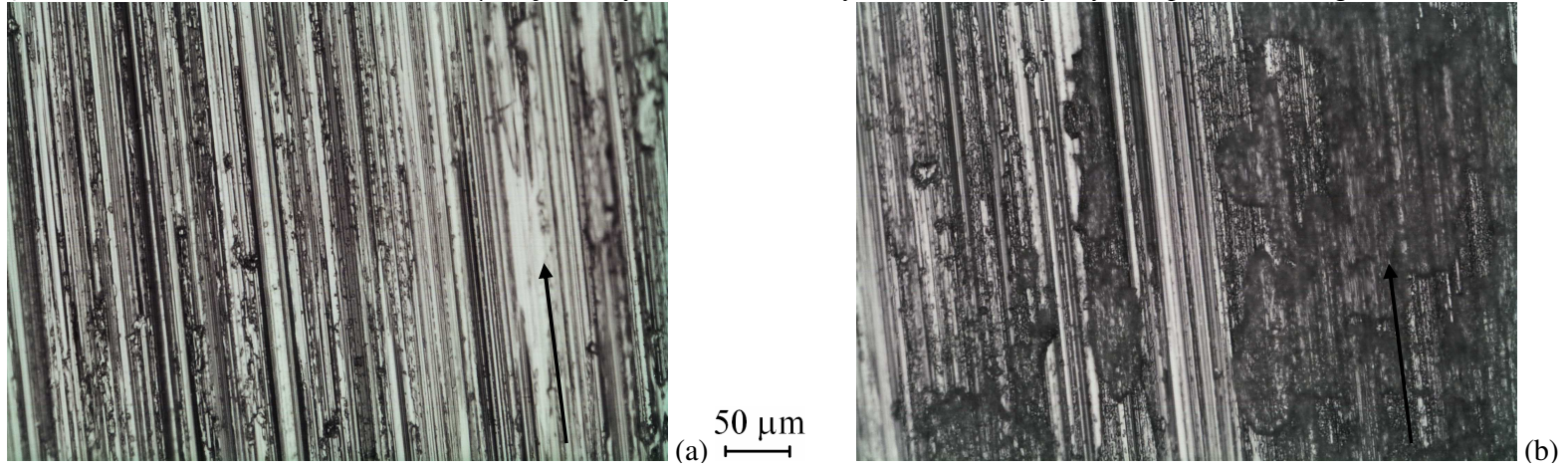


(b)

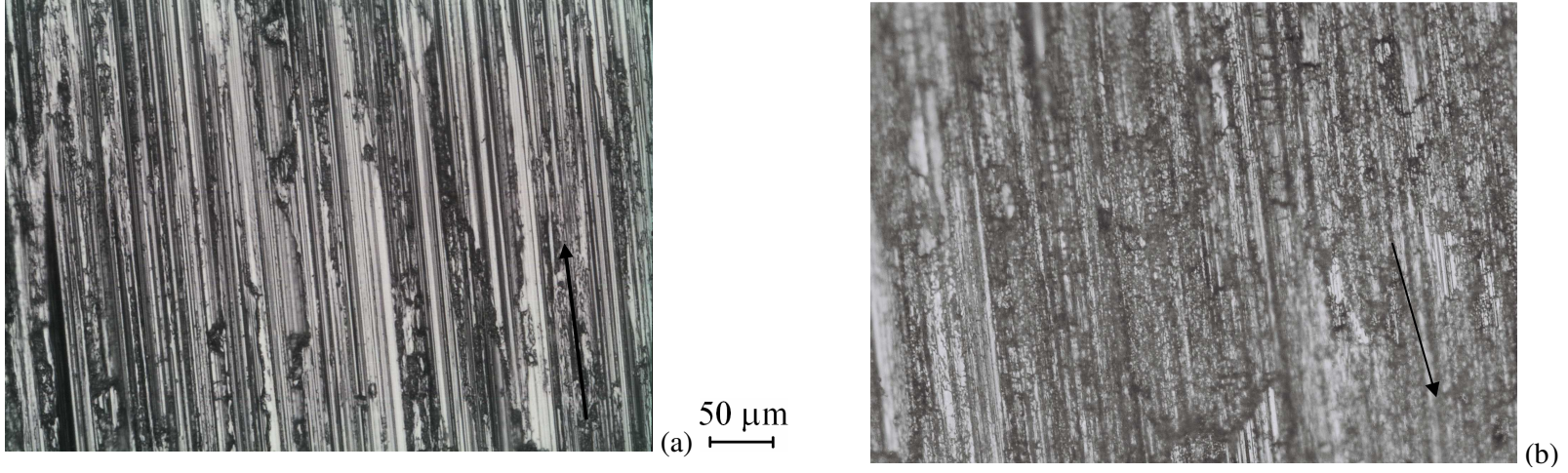
Şekil B.8: Döküm PA6, eksenel $R_a = 0.4 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı



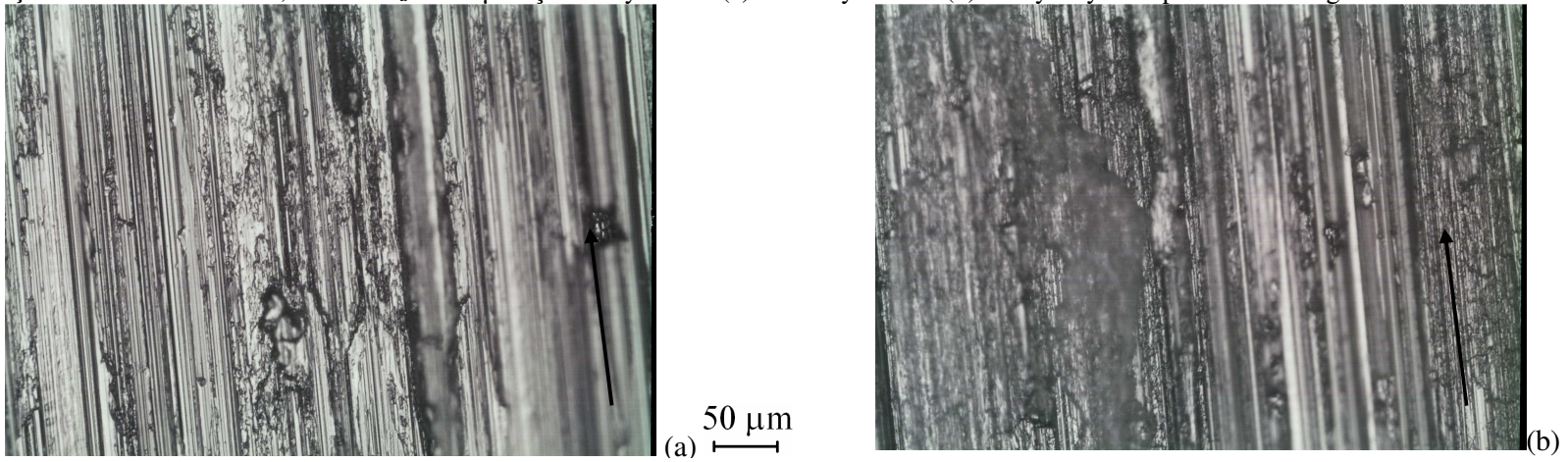
Şekil B.9: Döküm PA6, eksenel $R_a = 1.25 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı



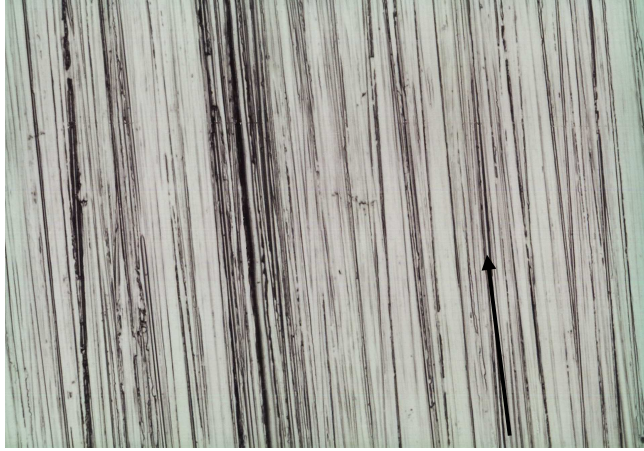
Şekil B.10: Döküm PA6, eksenel $R_a = 1.75 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı



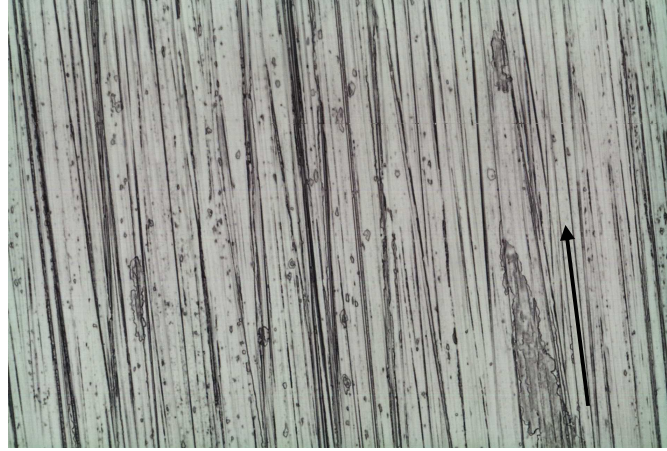
Şekil B.11: Döküm PA6, aksel $R_a = 2.12 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı



Şekil B.12: Döküm PA6, aksel $R_a = 3.0 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı



(a) 50 μm



(b)

Şekil B.13: PET, aksel $R_a = 0.1 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı

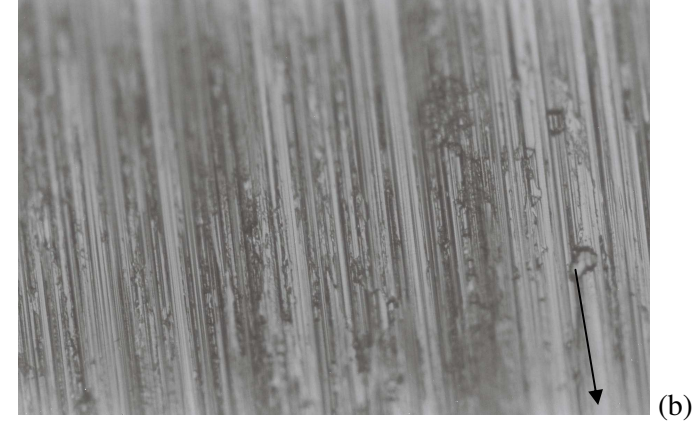
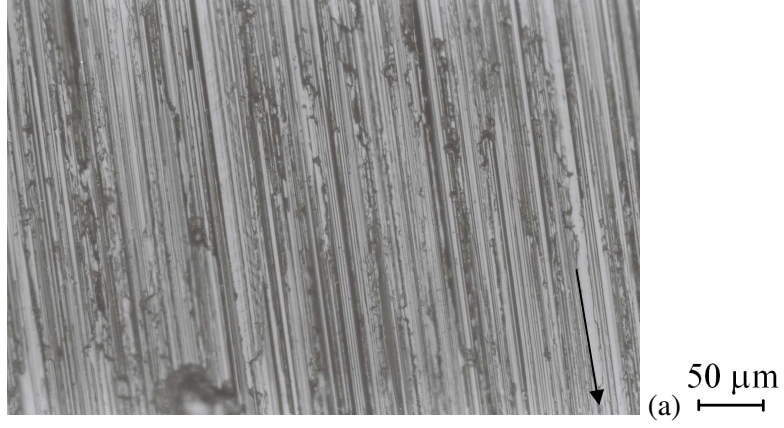


(a) 50 μm



(b)

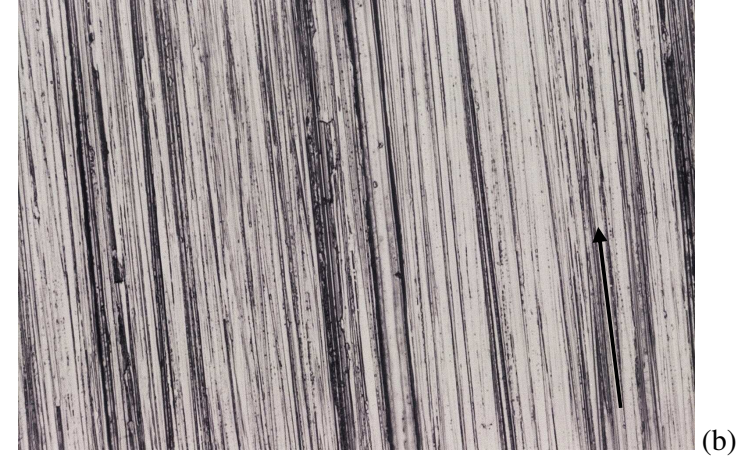
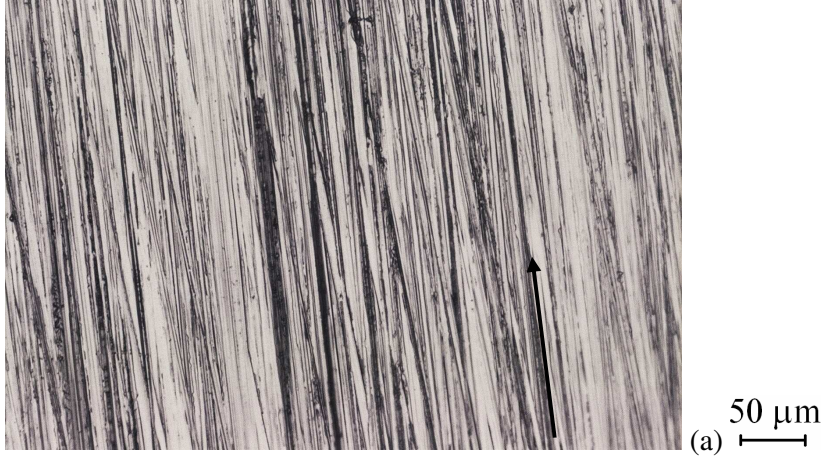
Şekil B.14: PET, aksel $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı



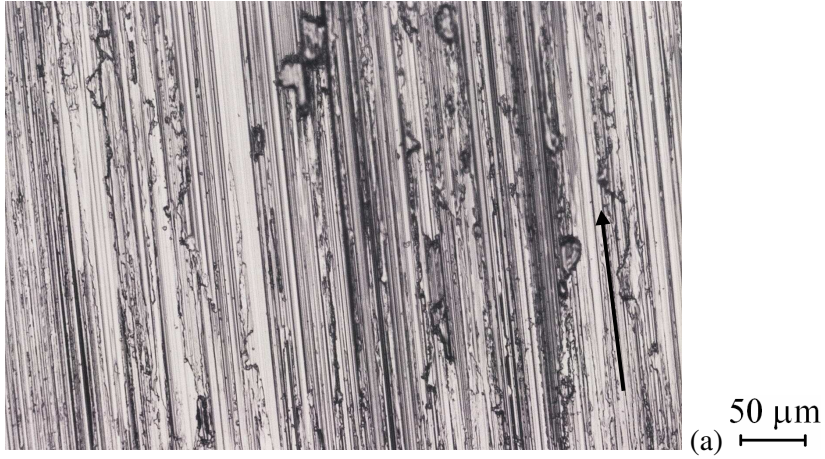
Şekil B.15: PET, eksenel $R_a = 1 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı



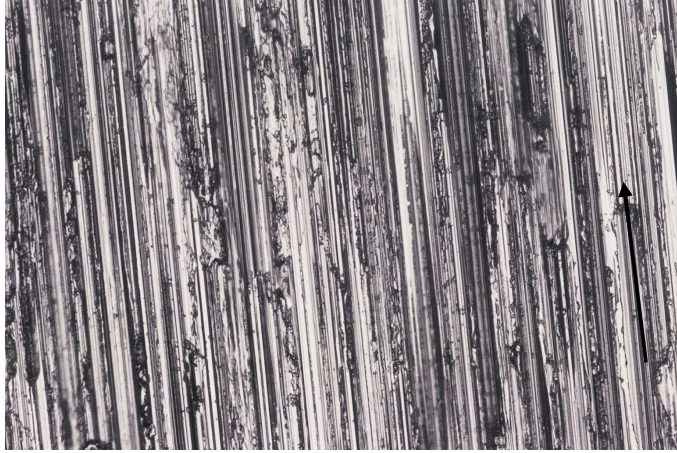
Şekil B.16: PET, eksenel $R_a = 2.86 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı



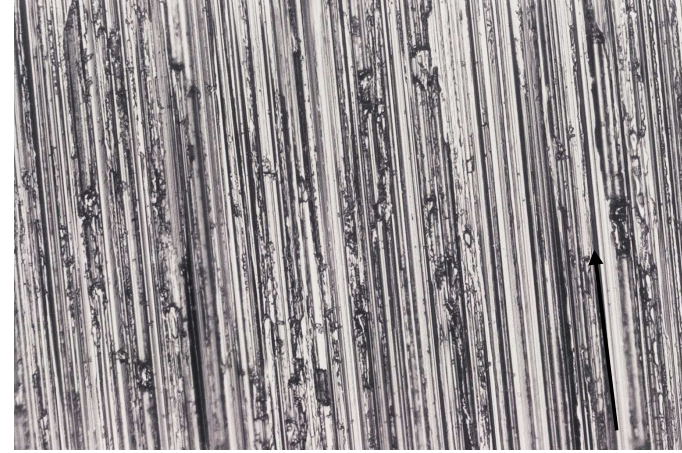
Şekil B.17: POM, eksenel $R_a = 0.30 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı



Şekil B.18: POM, eksenel $R_a = 0.70 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı

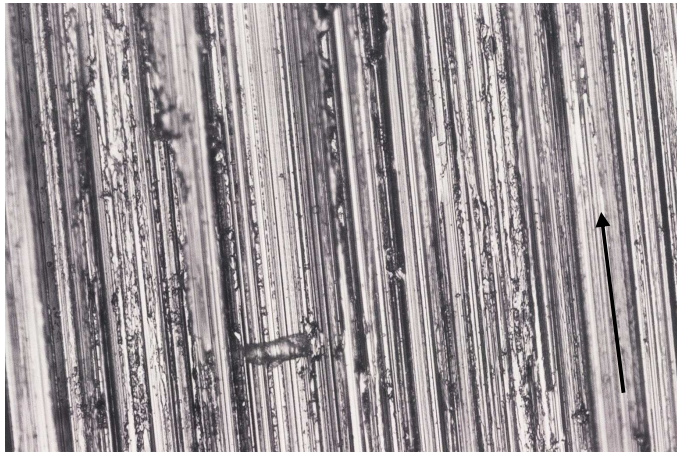


(a) 50 μm

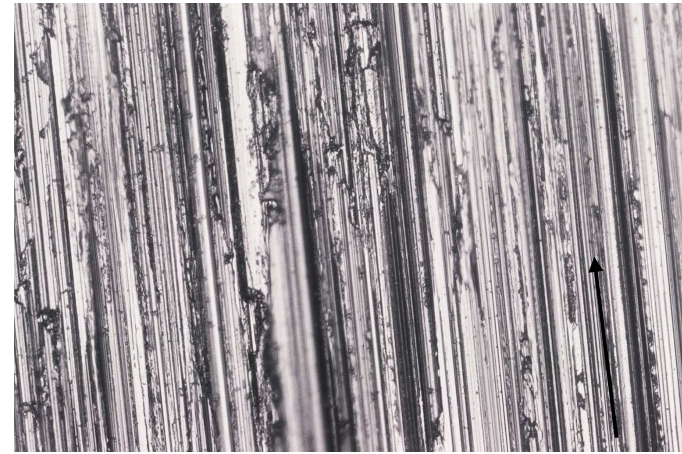


(b)

Şekil B.19: POM, eksenel $R_a = 1.40 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı

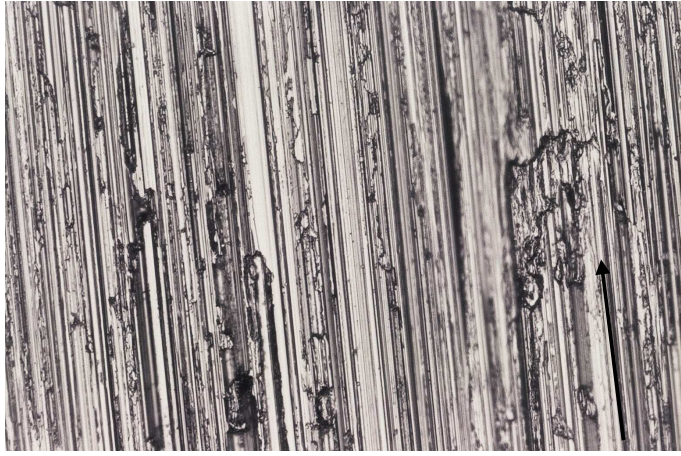


(a) 50 μm



(b)

Şekil B.20: POM, eksenel $R_a = 2.26 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı

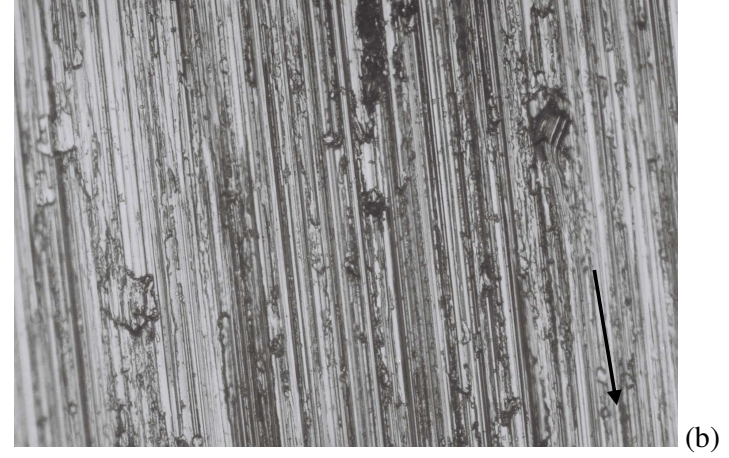
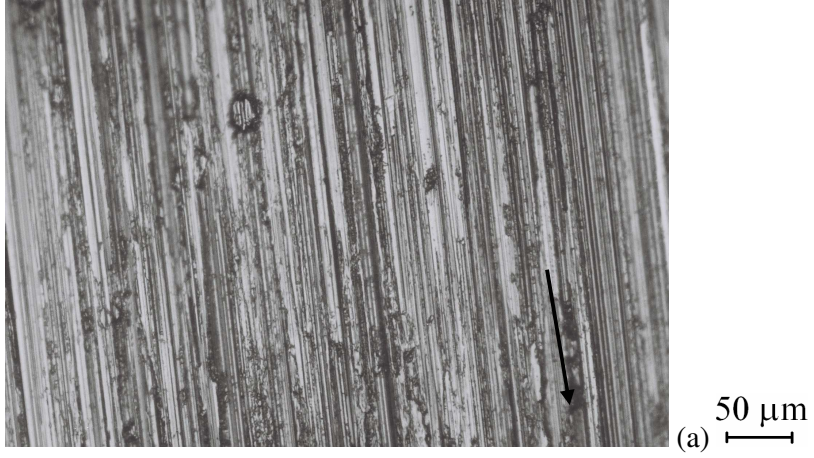


(a) 50 μm

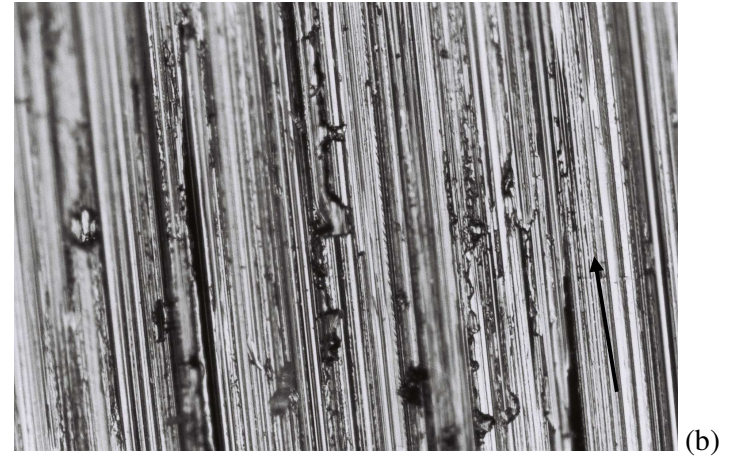
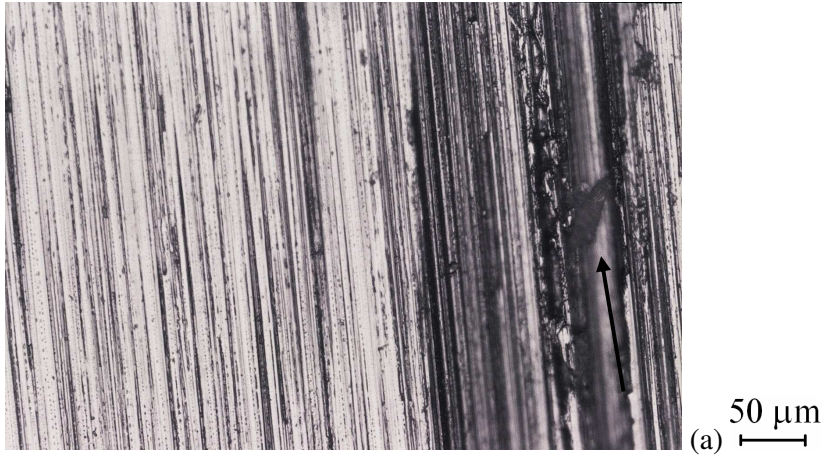


(b)

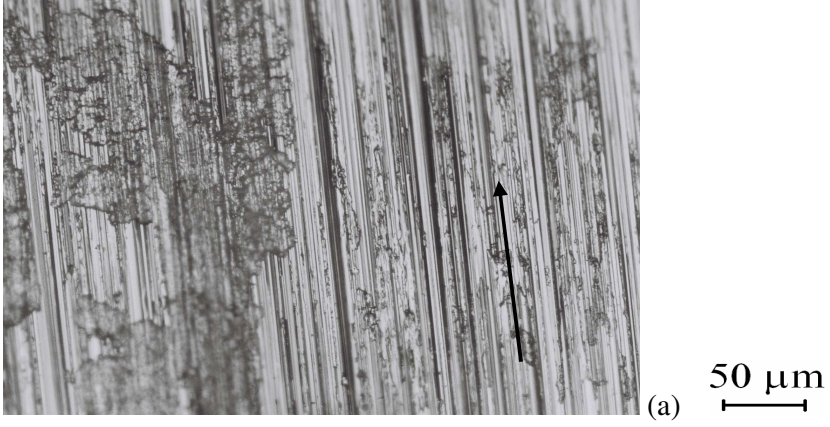
Şekil B.21: POM, eksenel $R_a = 3.14 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı



Şekil B.22: PP, eksenel $R_a = 2.39 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı

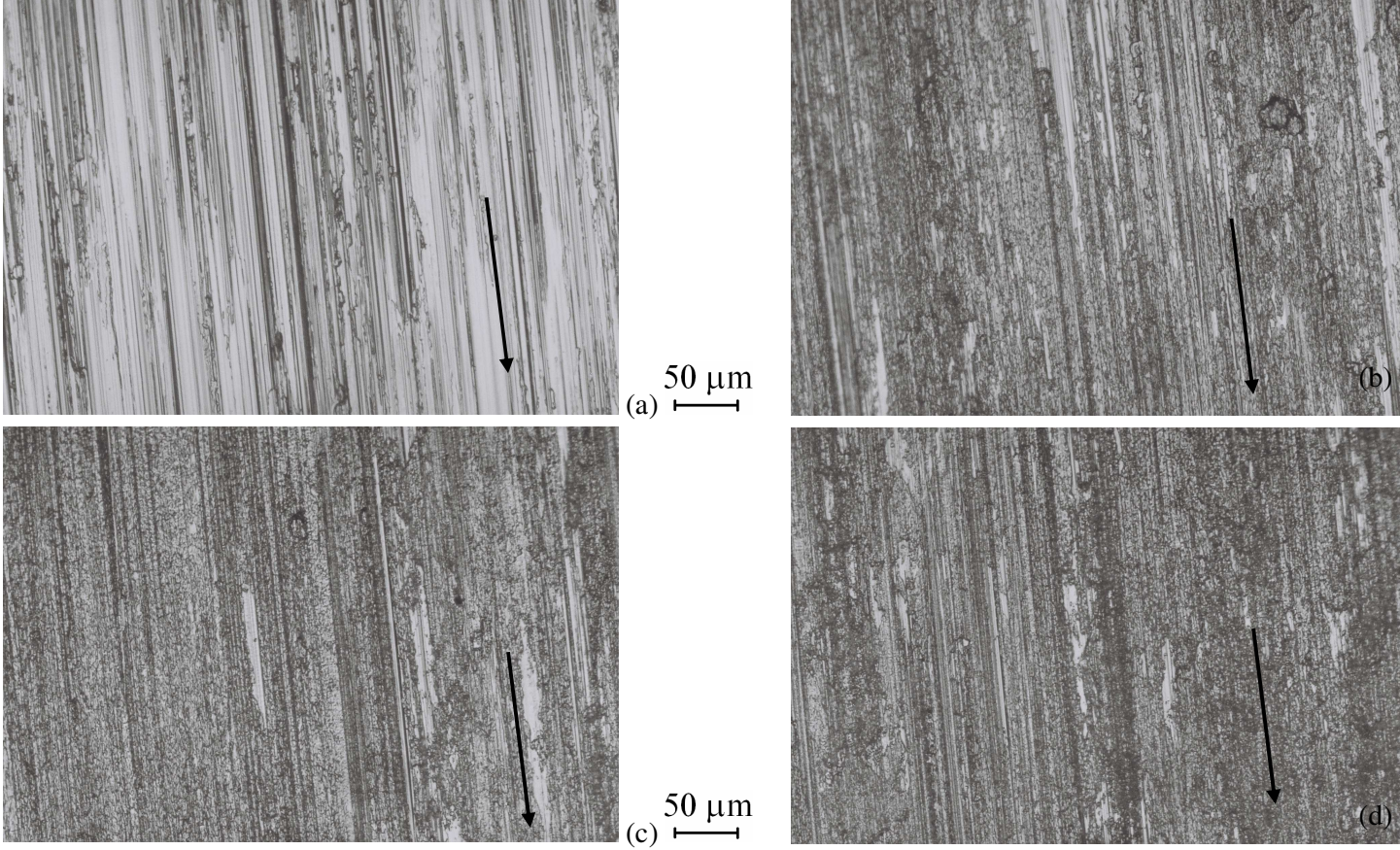


Şekil B.23: PP, eksenel $R_a = 3.35 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a) ve deney sonrası (b) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı

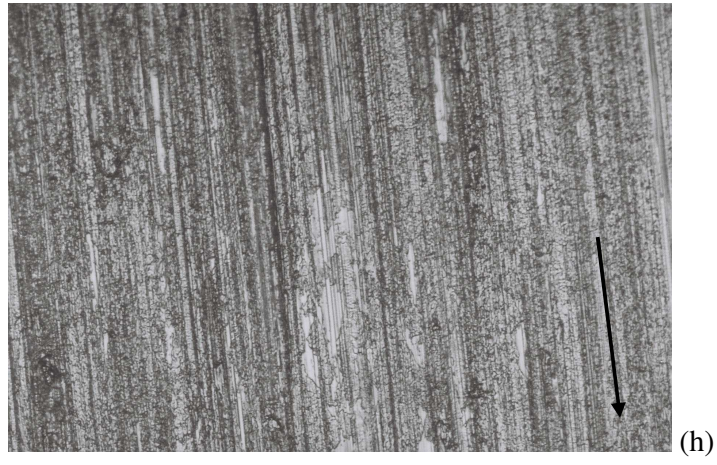
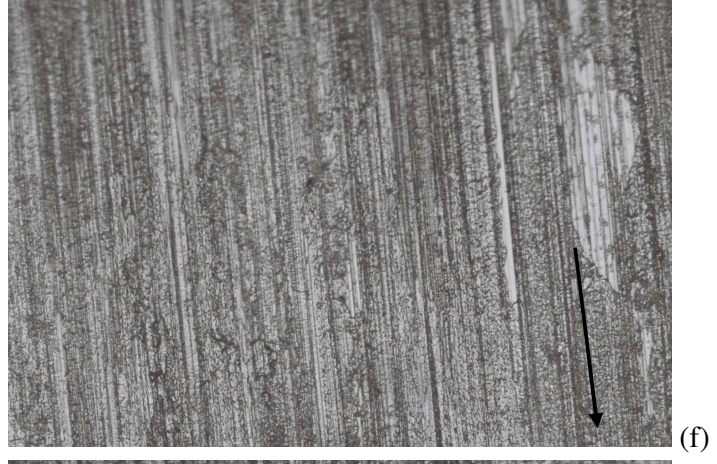


Şekil B.24: a) PET ile çalışmış eksenel R_a değeri $0.7 \mu\text{m}$ olan disk yüzeyinde, deney sonrası aşınma döküntülerinin optik mikro fotoğrafı
b) PP ile çalışmış eksenel R_a değeri $0.3 \mu\text{m}$ olan disk yüzeyinde, deney sonrası aşınma döküntülerinin optik mikro fotoğrafı

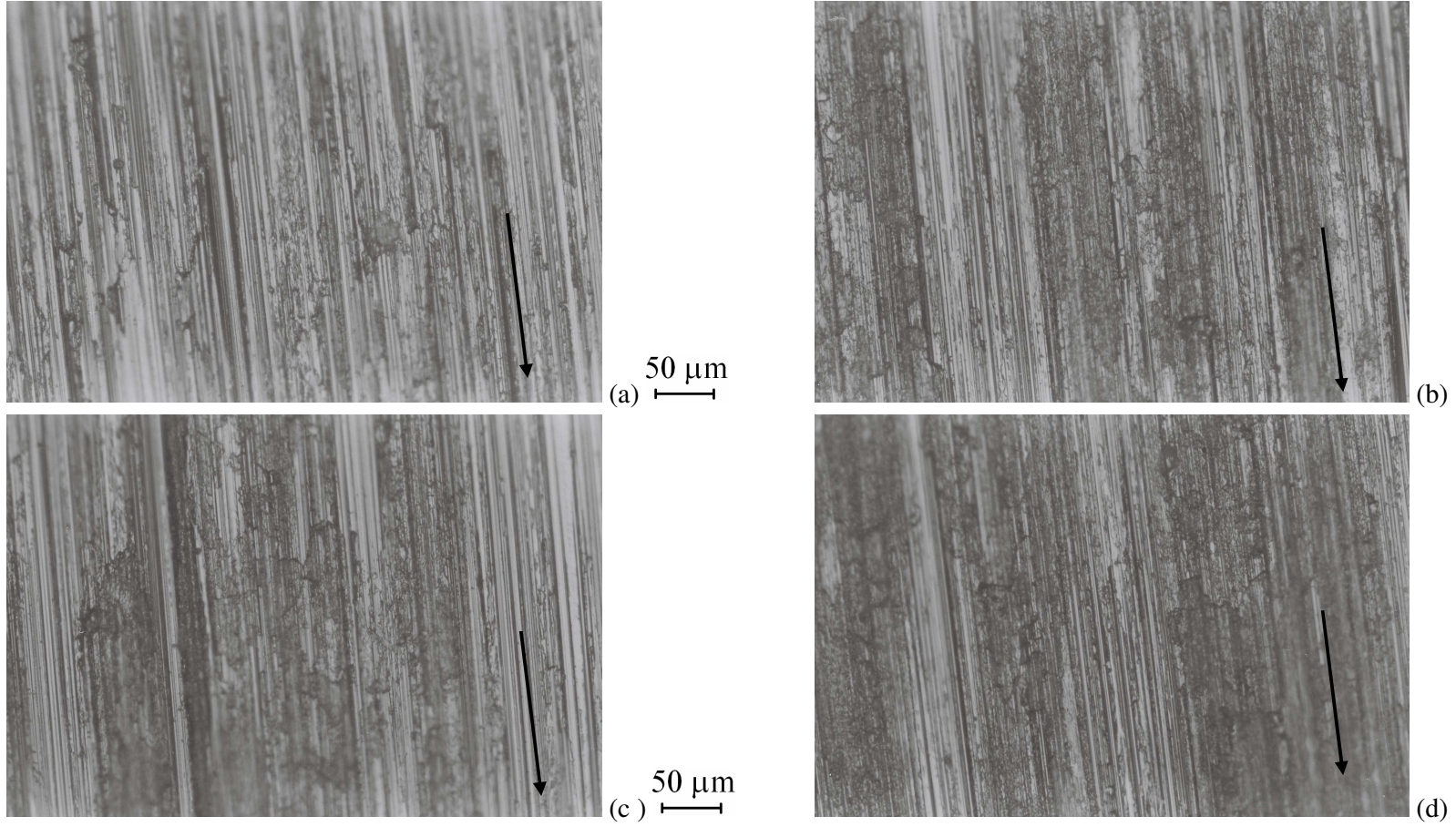
EK C
DISK YÜZEYİNDE TRANSFER FİLM OLUŞUM SAHHALARI



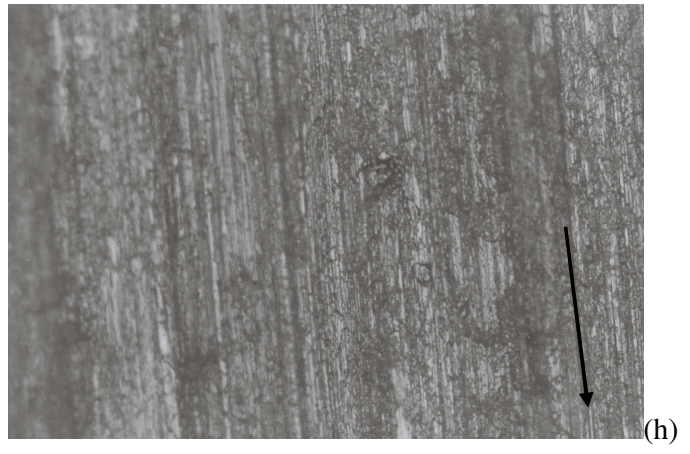
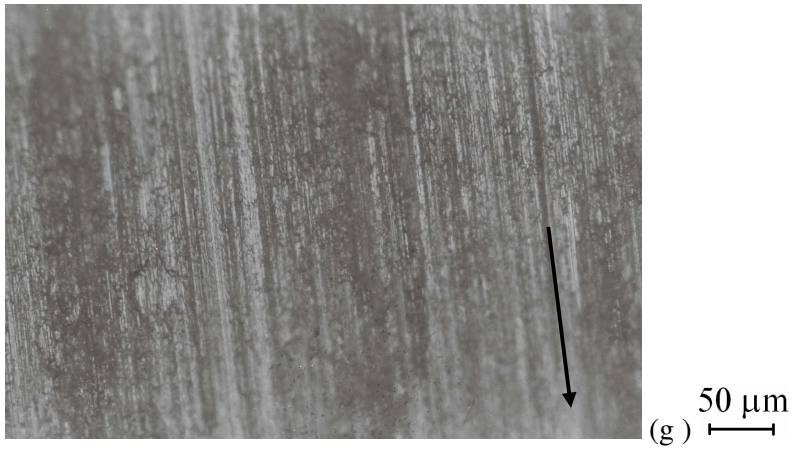
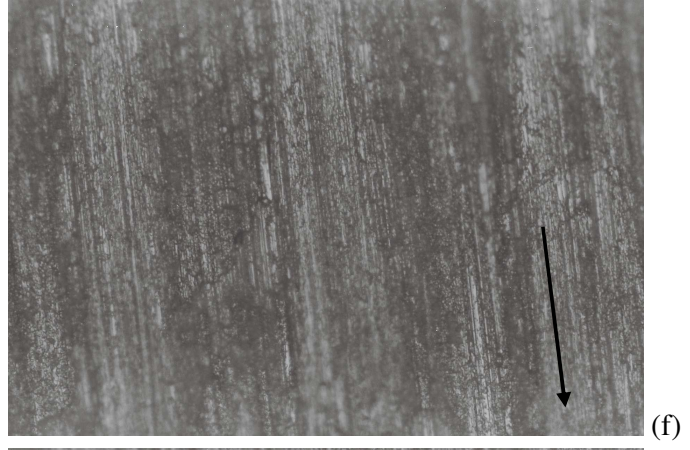
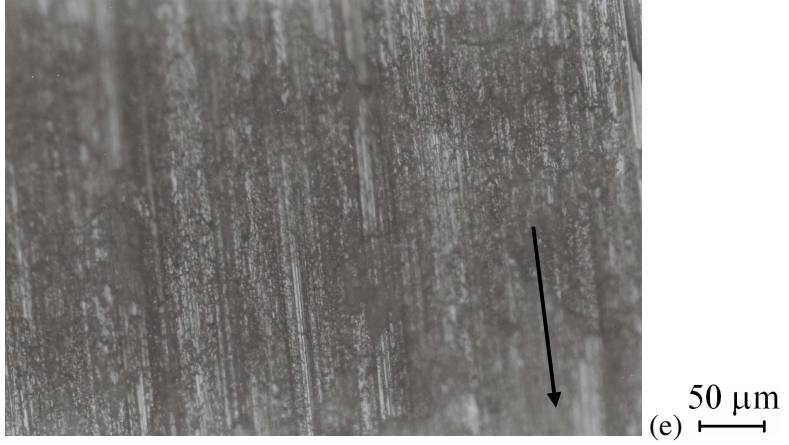
Şekil C.1: Ekstrüzyon PA6, aksnel $R_a = 0.63 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a), 2.6 km kayma mesafesi sonundaki (b), 5.1 km kayma mesafesi sonundaki (c), 7.7 km kayma mesafesi sonundaki (d), 12.8 km kayma mesafesi sonundaki (e), 17.9 km kayma mesafesi sonundaki (f), 23.1 km kayma mesafesi sonundaki (g) ve 28.2 km kayma mesafesi sonundaki (h) disk yüzeyi optik mikro fotoğrafı



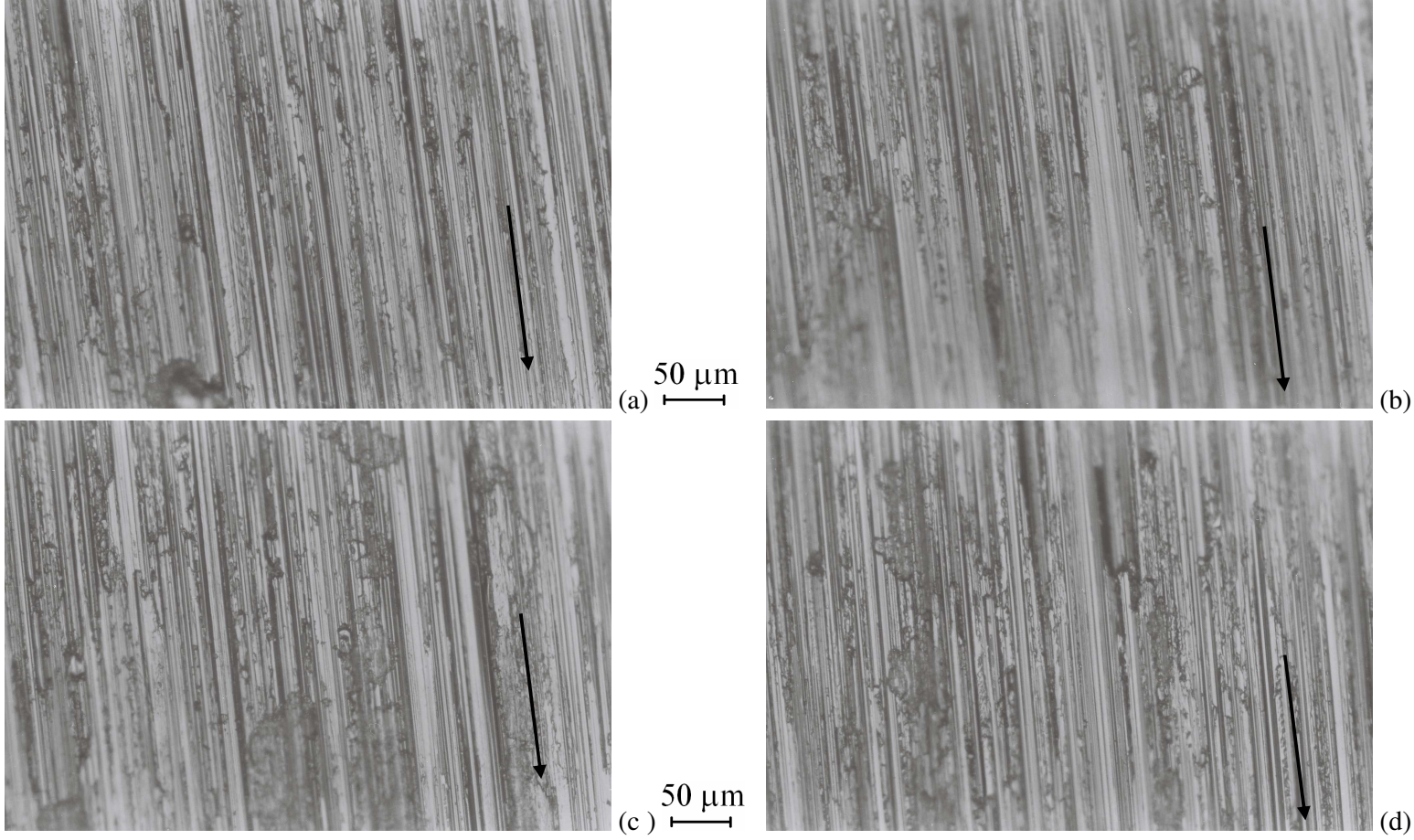
Şekil C.1: (Devam)



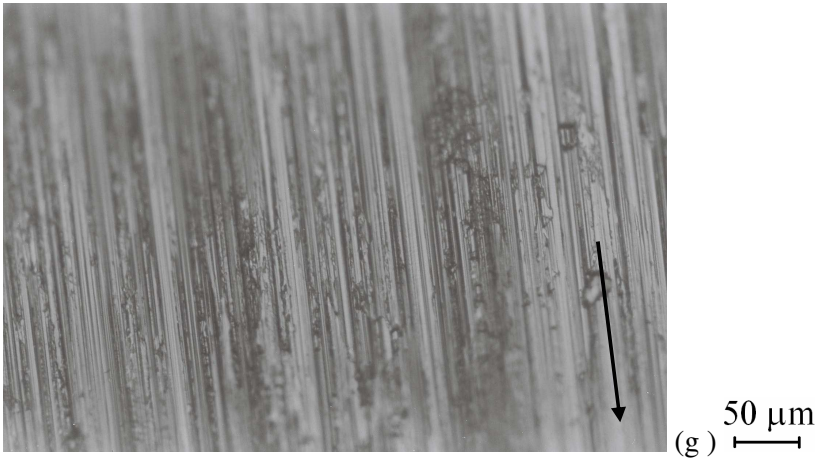
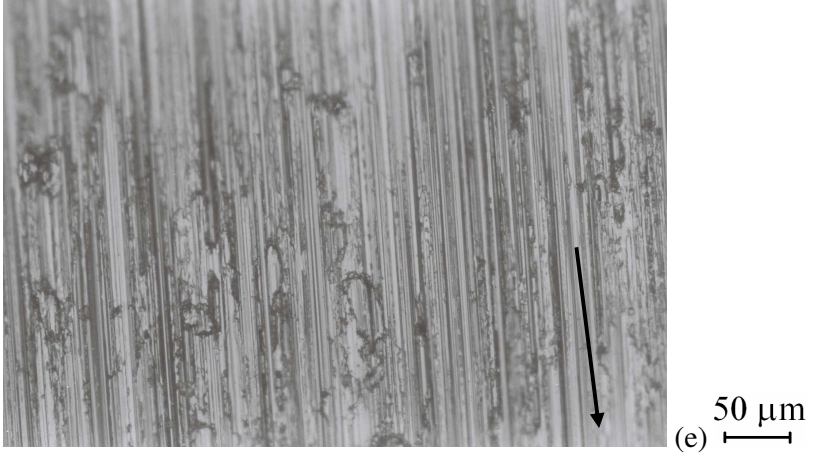
Şekil C.2: Döküm PA6, eksenel $R_a = 1.24 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a), 2.6 km kayma mesafesi sonundaki (b), 5.1 km kayma mesafesi sonundaki (c) 7.7 km kayma mesafesi sonundaki (d), 12.8 km kayma mesafesi sonundaki (e), 17.9 km kayma mesafesi sonundaki (f), 23.1 km kayma mesafesi sonundaki (g) ve 28.2 km kayma mesafesi sonundaki (h) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafı



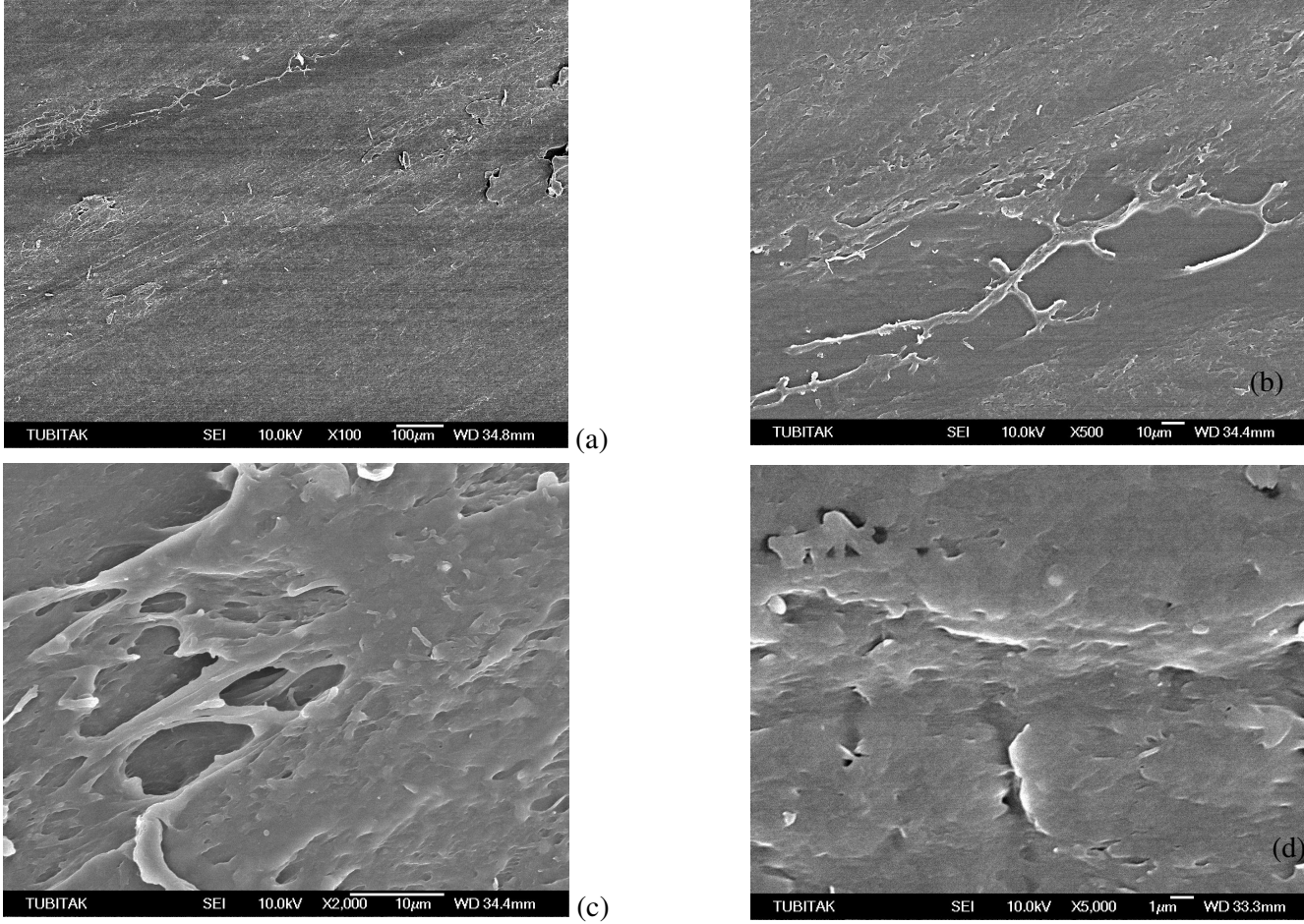
Şekil C.2: (Devam)



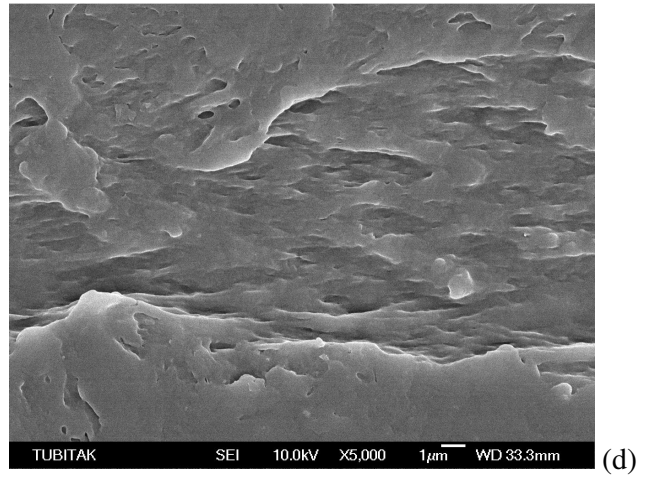
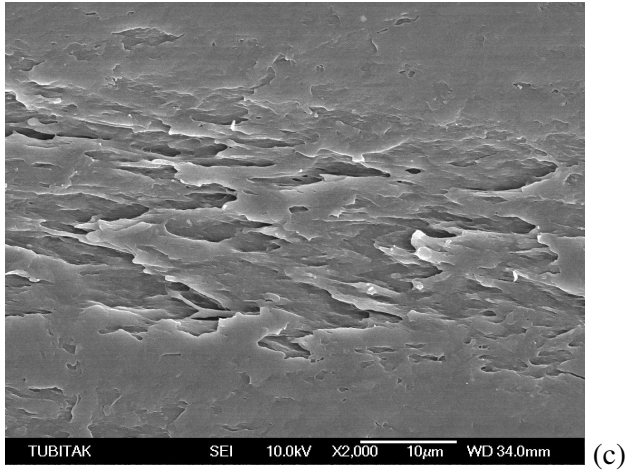
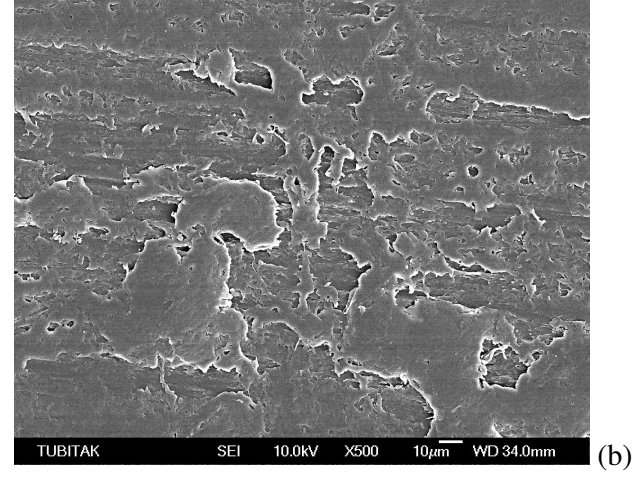
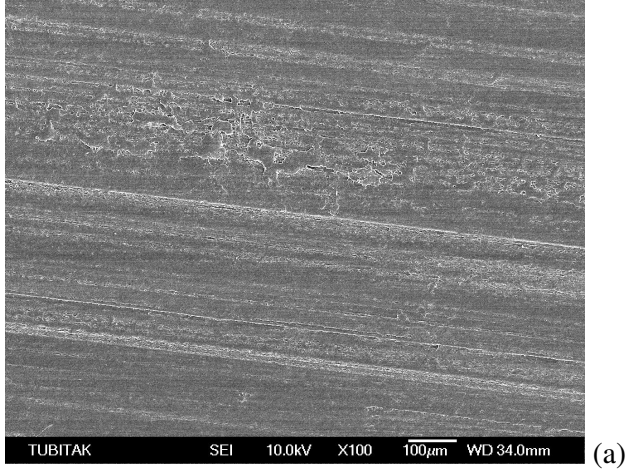
Şekil C.3: PET, eksenel $R_a=1.01 \mu\text{m}$ için deney öncesi (a), 2.6 km kayma mesafesi sonundaki (b), 7.7 km kayma mesafesi sonundaki (c), 12.8 km kayma mesafesi sonundaki (d), 17.9 km kayma mesafesi sonundaki (e), 23.1 km kayma mesafesi sonundaki (f) ve 28.2 km kayma mesafesi sonundaki (g) disk yüzeyinin optik mikro fotoğrafları



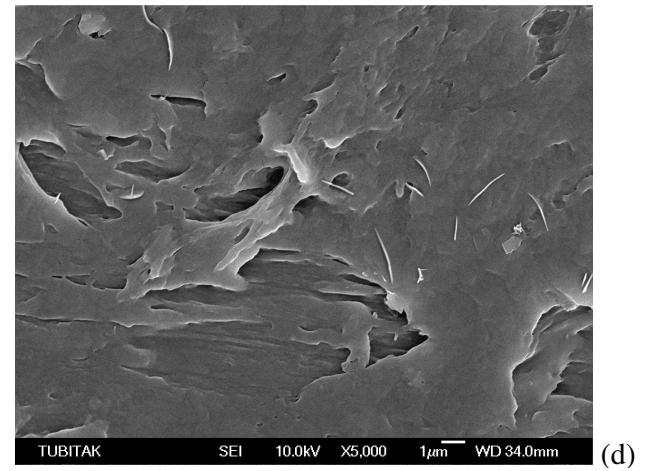
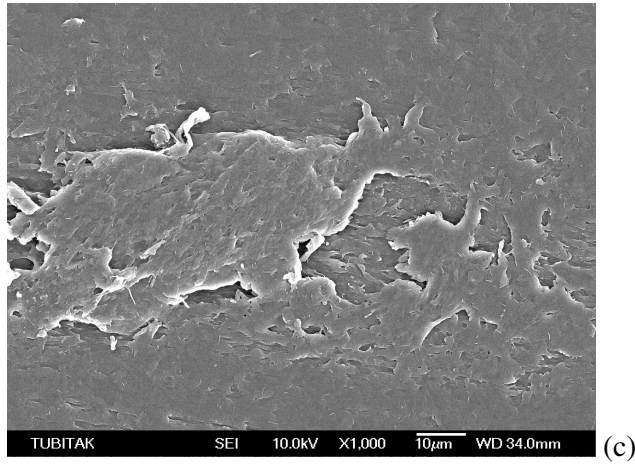
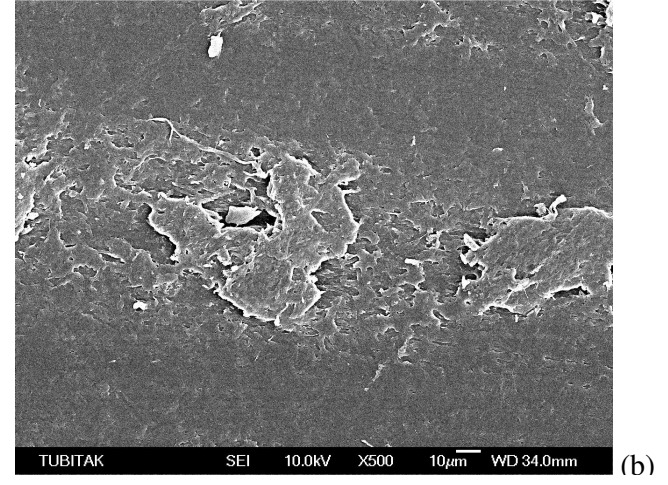
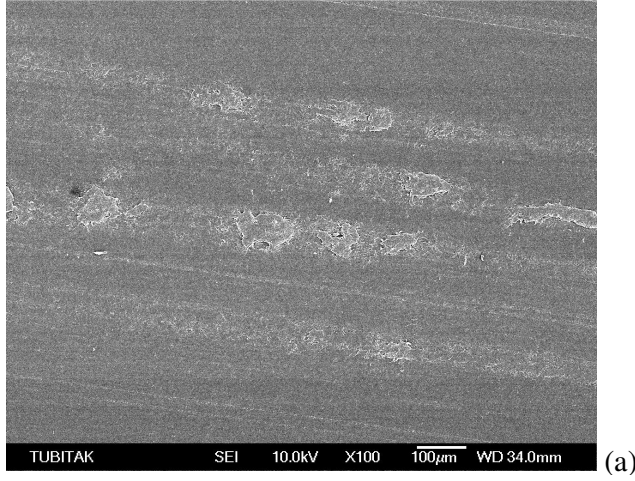
Şekil C.3: (Devam)



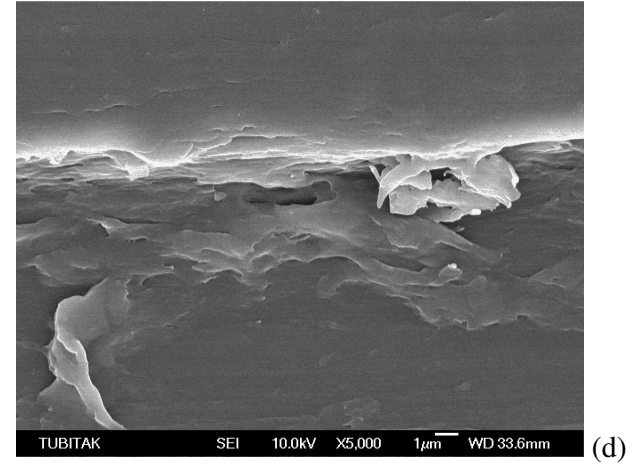
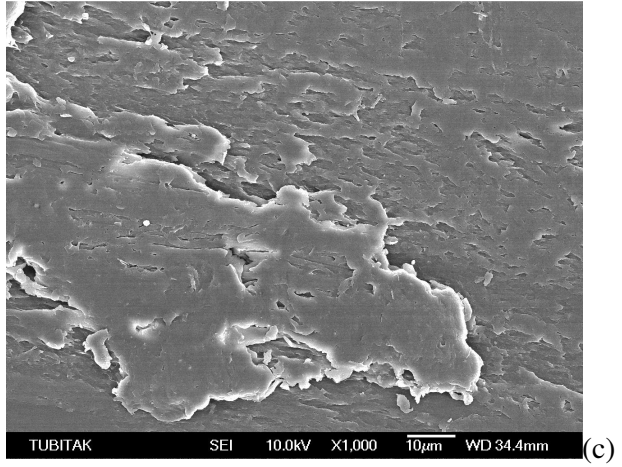
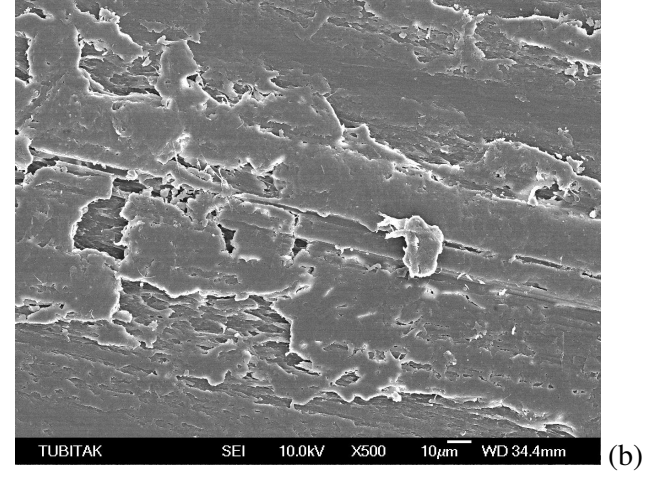
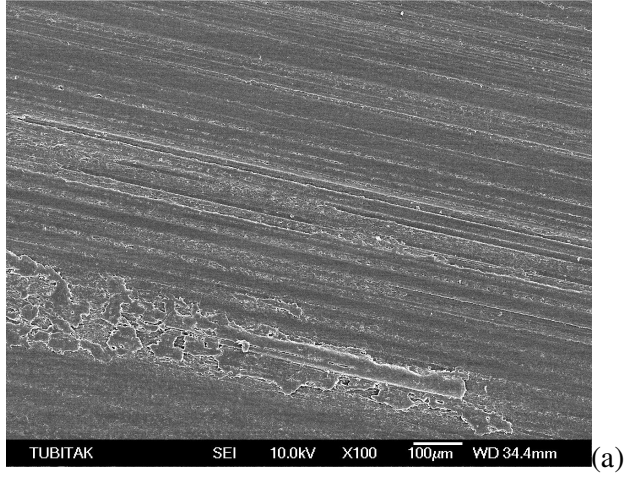
Şekil D.1: Eksenel $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ için ekstrüzyon PA6 SEM mikro fotoğrafları. (a) X 100 (b) X 500 (c) X 2000 (d) X 5000



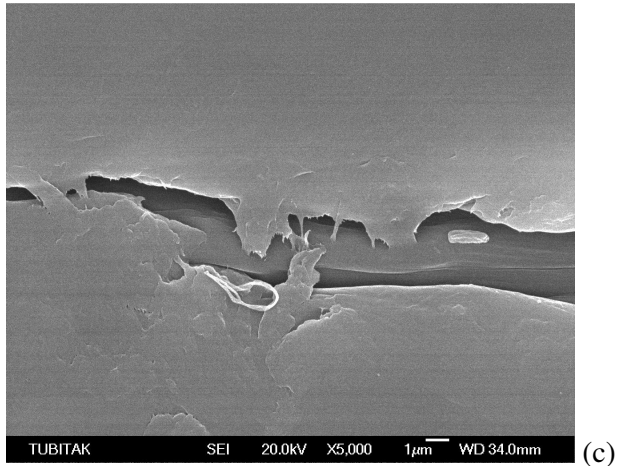
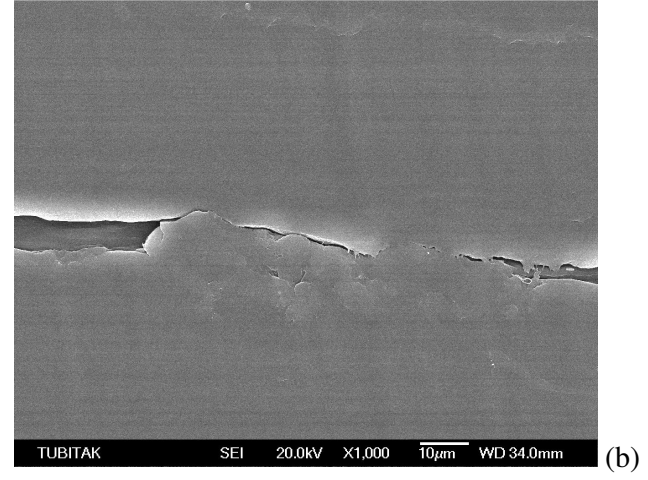
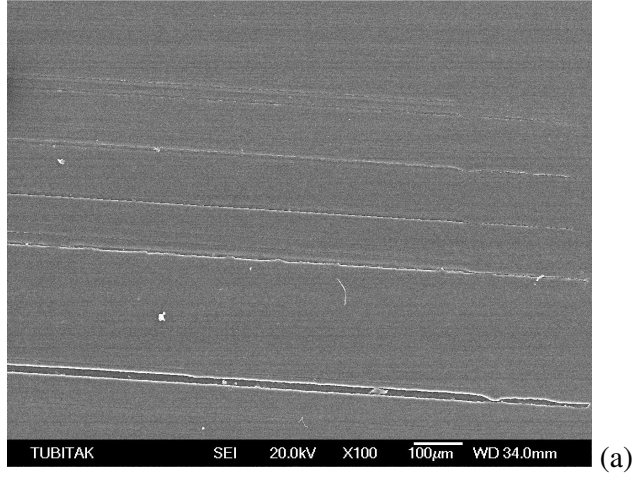
Şekil D.2: Eksenel $R_a = 3 \mu\text{m}$ için ekstrüzyon PA6 SEM mikro fotoğrafları. (a) X 100 (b) X 500 (c) X 2000 (d) X 5000 büyütme



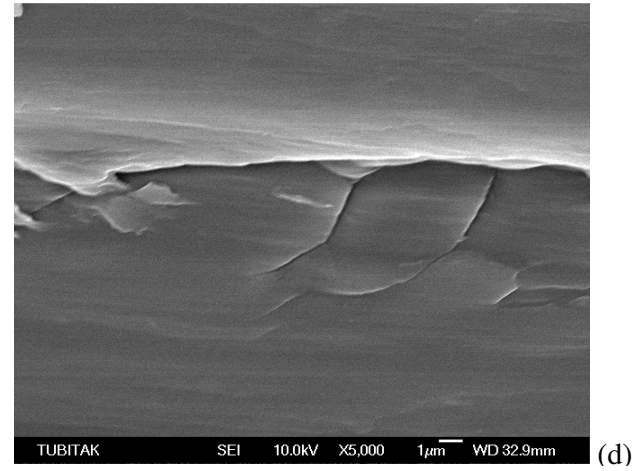
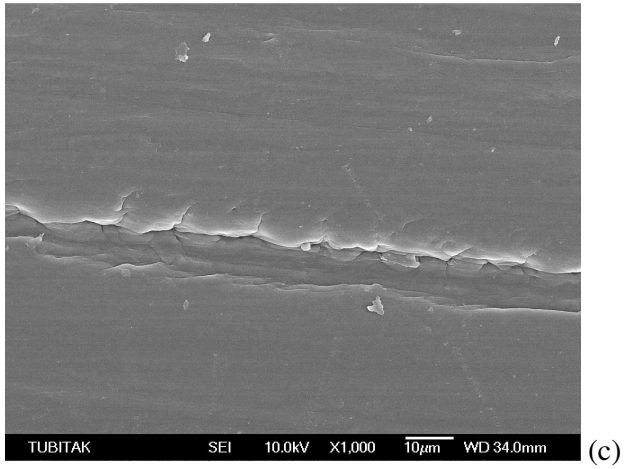
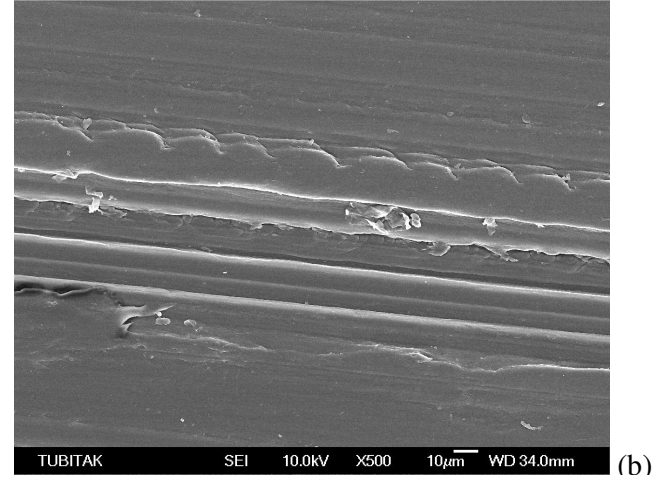
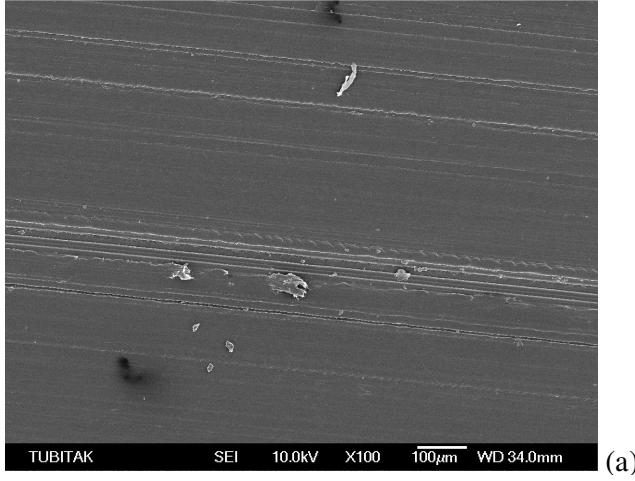
Şekil D.3: Eksenel $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ için döküm PA6 SEM mikro fotoğrafları. (a) X 100 (b) X 500 (c) X 1000 (d) X 5000 büyütme



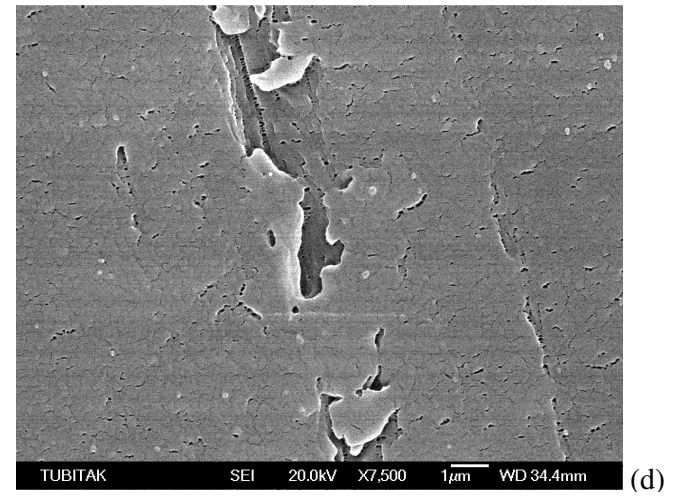
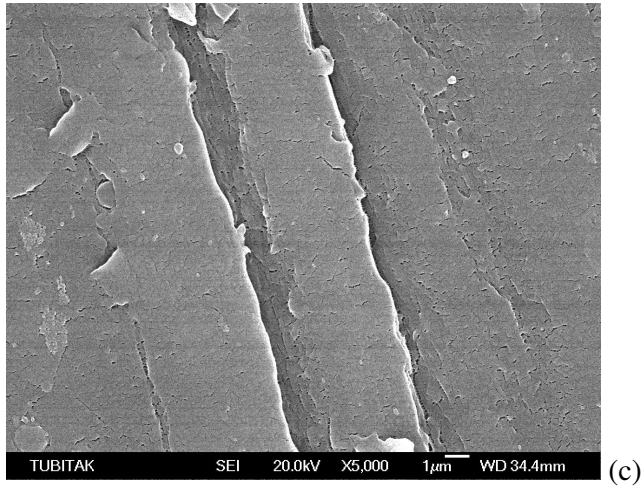
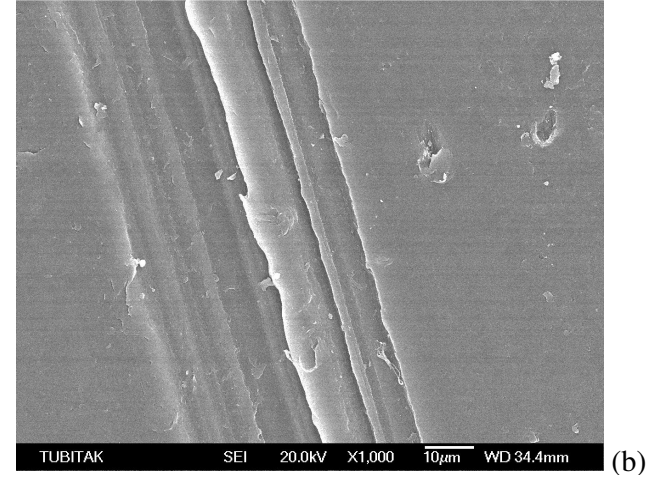
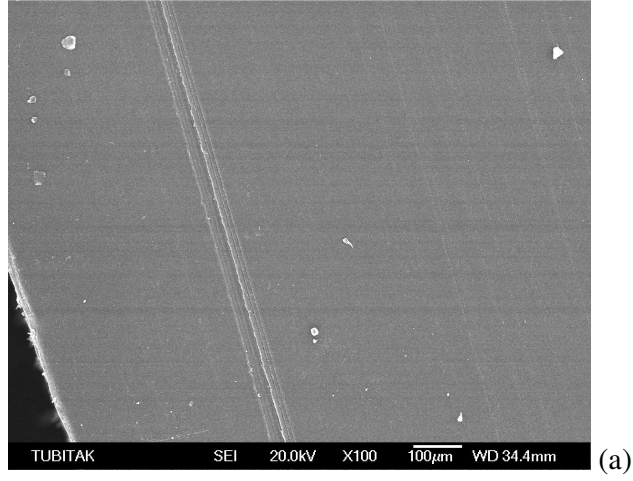
Şekil D.4: Eksenel $R_a = 3 \mu\text{m}$ için döküm PA6 SEM mikro fotoğrafları. (a) X 100 (b) X 500 (c) X 1000 (d) X 5000 büyütme



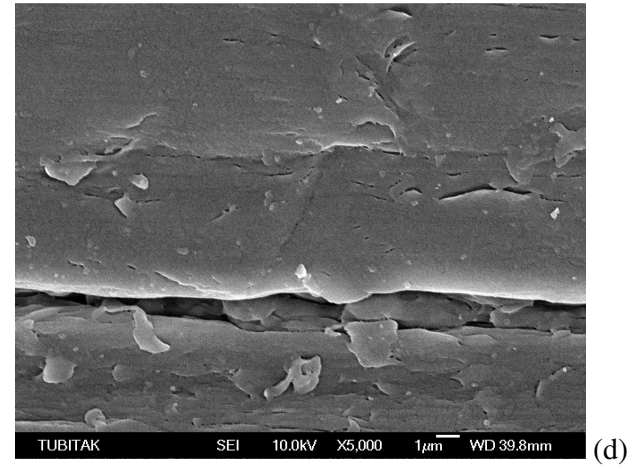
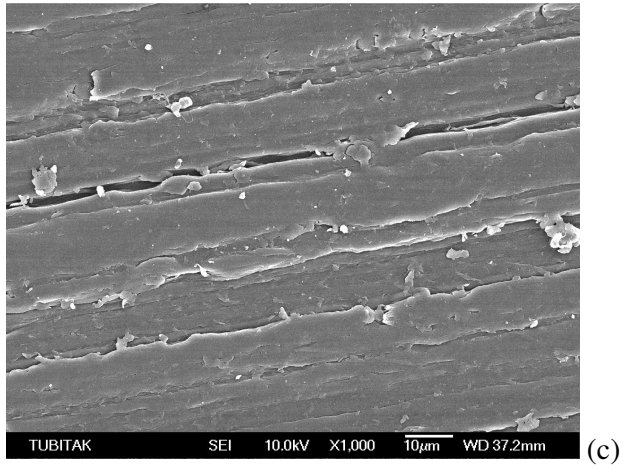
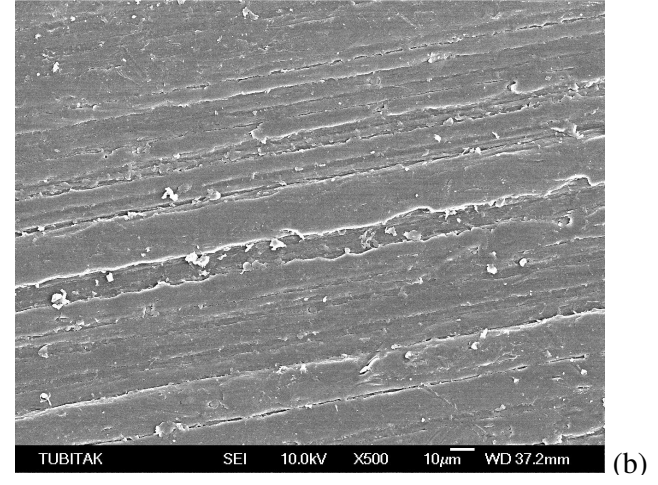
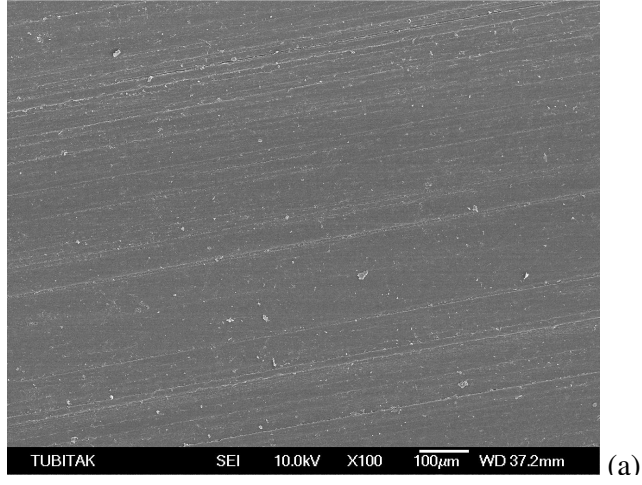
Şekil D.5: Eksenel $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ için PET SEM mikro fotoğrafları. (a) X 100 (b) X 1000 (c) X 5000 büyütme



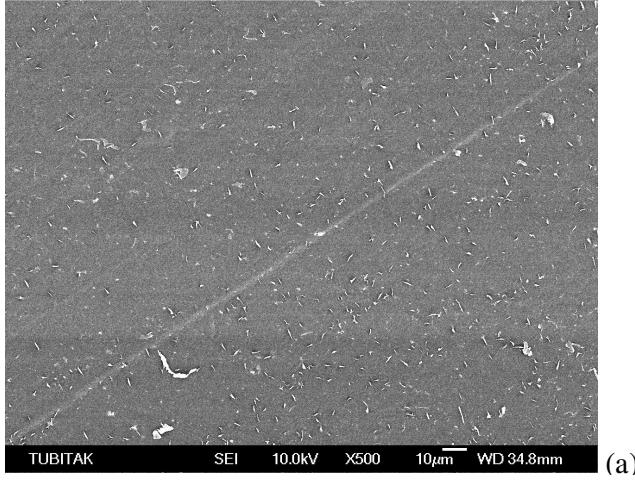
Şekil D.6: Eksenel $R_a = 3 \mu\text{m}$ için PET SEM mikro fotoğrafları. (a) X 100 (b) X 500 (c) X 1000 (d) X 5000 büyütme



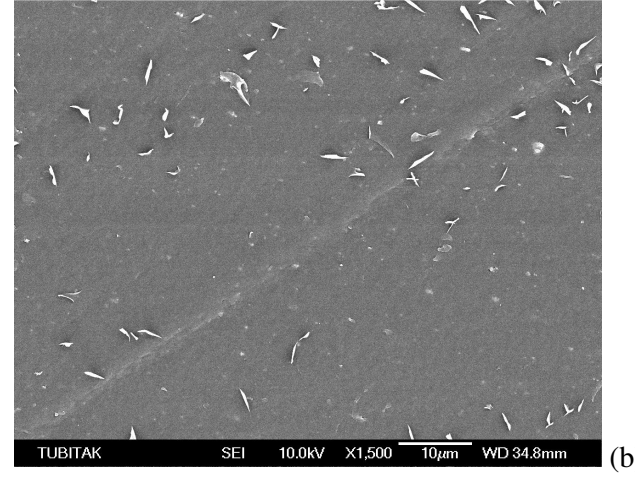
Şekil D.7: Eksenel $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ için POM SEM mikro fotoğrafları. (a) X 100 (b) X 1000 (c) X 5000 (d) 7500 büyütme



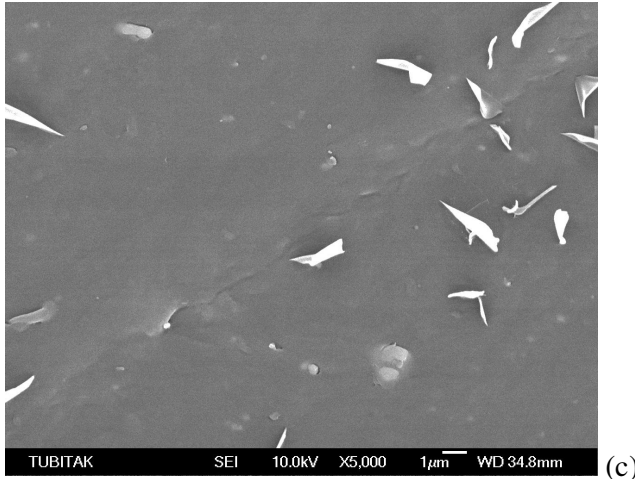
Şekil D.8: Eksenel $R_a = 3 \mu\text{m}$ için POM SEM mikro fotoğrafları. (a) X 100 (b) X 500 (c) X 1000 (d) X 5000 büyütme



(a)

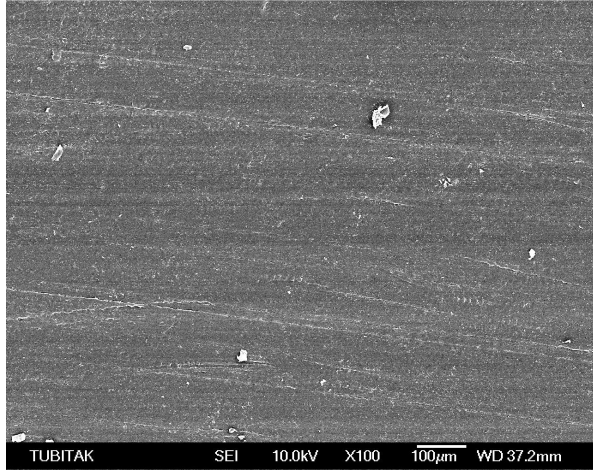


(b)

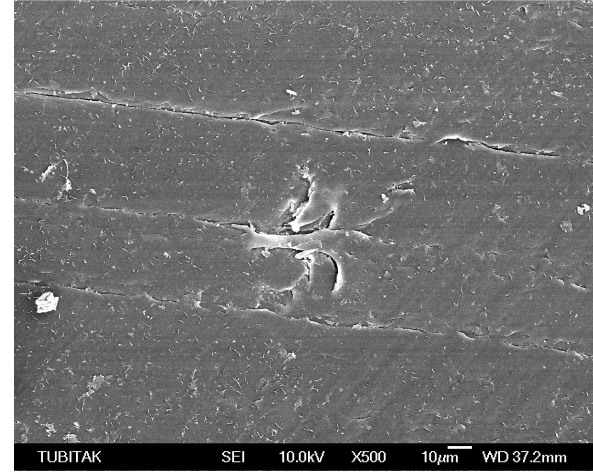


(c)

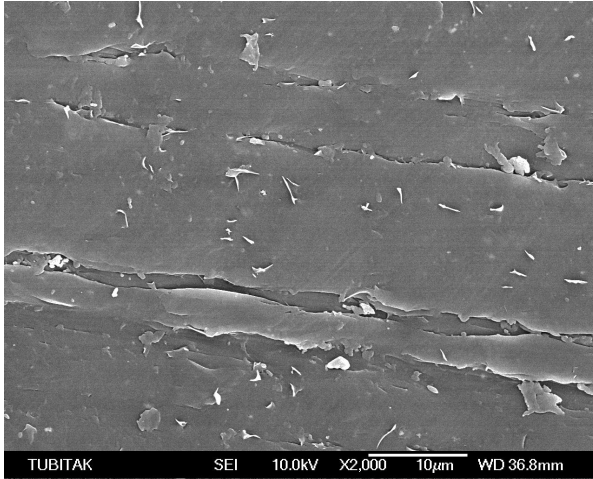
Şekil D.9: Eksenel $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ için döküm PP SEM mikro fotoğrafları. (a) X 500 (b) X 1500 (c) X 5000 büyütme



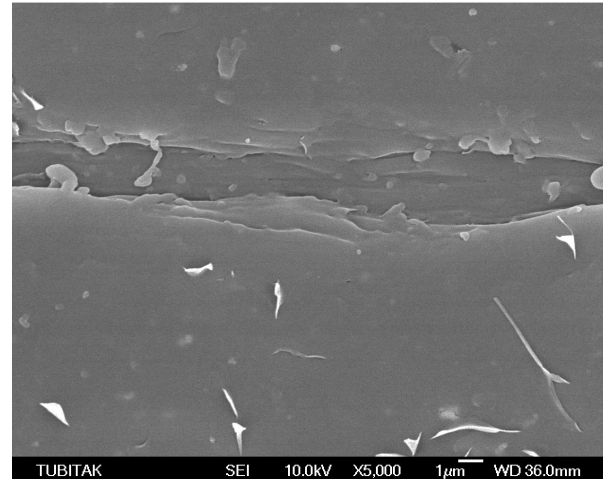
(a)



(b)



(c)

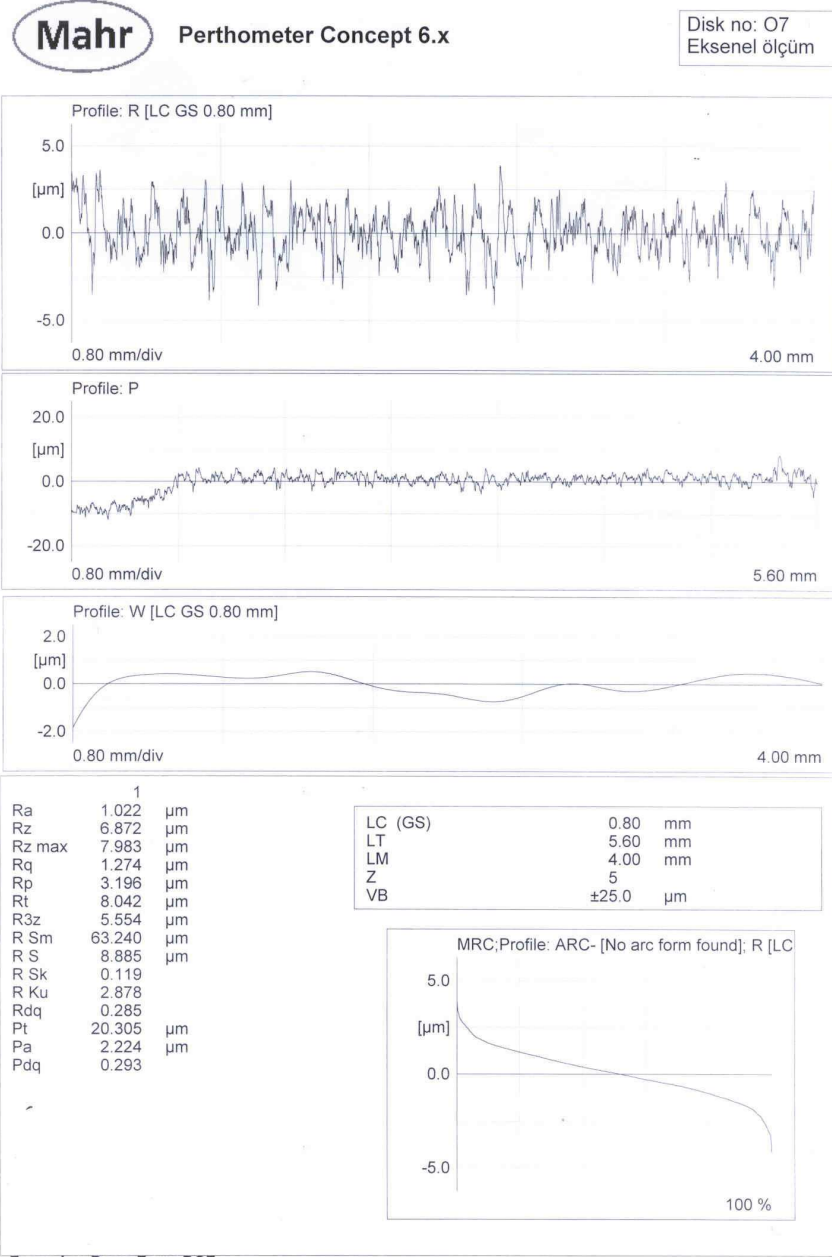


(d)

Şekil D.10: Eksenel $R_a = 3 \mu\text{m}$ için PP SEM mikro fotoğrafları. (a) X 100 (b) X 500 (c) X 2000 (d) X 5000 büyütme

EK E

PÜRÜZLÜLÜK CİHAZININ ÖLÇÜM ÇIKTISI



EK F

PÜRÜZLÜLÜK PARAMETRELERİNİN KAYDEDİLMESİ

<u>Tarih</u>	<u>Saat</u>	<u>Parametre</u>	<u>Değer</u>	<u>Birim</u>
10.08.04	09:12		1	
10.08.04	09:12	Ra	0.5	µm
10.08.04	09:12	Rz	3.549	µm
10.08.04	09:12	Rz max	4.594	µm
10.08.04	09:12	Rq	0.643	µm
10.08.04	09:12	Rp	1.713	µm
10.08.04	09:12	Rt	4.733	µm
10.08.04	09:12	R3z	2.712	µm
10.08.04	09:12	R Sm	58.201	µm
10.08.04	09:12	R S	6.59	µm
10.08.04	09:12	R Sk	0.175	
10.08.04	09:12	R Ku	3.546	
10.08.04	09:12	Rk	1.742	µm
10.08.04	09:12	Rpk	0.769	µm
10.08.04	09:12	Rvk	0.754	µm
10.08.04	09:12	MR1	10.57	%
10.08.04	09:12	MR2	90.78	%
10.08.04	09:12	Rv	1.837	µm
10.08.04	09:12	Rdq	0.194	
10.08.04	09:12	Pt	9.232	µm
10.08.04	09:12	Pa	1.522	µm
10.08.04	09:12	Pdq	0.194	
10.08.04	09:12	[A]	0.5	mm
10.08.04	09:12	[B]	2.5	mm
10.08.04	09:12	R	1.405	µm
10.08.04	09:14		1	
10.08.04	09:14	Ra	0.451	µm
10.08.04	09:14	Rz	3.573	µm
10.08.04	09:14	Rz max	4.333	µm
10.08.04	09:14	Rq	0.578	µm
10.08.04	09:14	Rp	1.746	µm
10.08.04	09:14	Rt	4.333	µm
10.08.04	09:14	R3z	2.609	µm
10.08.04	09:14	R Sm	37.345	µm
10.08.04	09:14	R S	6.765	µm
10.08.04	09:14	R Sk	-0.074	
10.08.04	09:14	R Ku	3.675	
10.08.04	09:14	Rk	1.49	µm
10.08.04	09:14	Rpk	0.572	µm
10.08.04	09:14	Rvk	0.798	µm
10.08.04	09:14	MR1	9.65	%
10.08.04	09:14	MR2	89.88	%
10.08.04	09:14	Rv	1.827	µm
10.08.04	09:14	Rdq	0.2	
10.08.04	09:14	Pt	7.033	µm
10.08.04	09:14	Pa	0.674	µm
10.08.04	09:14	Pdq	0.197	
10.08.04	09:14	[A]	0.5	mm
10.08.04	09:14	[B]	2.5	mm
10.08.04	09:14	R	1.745	µm

EK G

ORTALAMA TEPE YUVARLAKLIK YARIÇAPI (R_{av}) HESAPLAYAN VBASIC PROGRAMI

'LSS metoduyla profil yatay hale getirilir sonra ortalama tepe yuvarlaklık yarıçapı hesaplanır. Profilin başından ve sonundan 0.8 mm değerlendirmeye alınmaz.

Dim t1, t2, t3, t4, a, b, px, py, np, cp, Rtop, L, Rav(21), x(20000), y(20000), yy(20000) As Double

Private Sub CommandButton1_Click()

N = 8064 'Değer çifti sayısı

Open "c:\l4rdyal1.txt" For Binary As #1 'Çevresel ölçümler

Open "c:\l4rdyal2.txt" For Binary As #2

Open "c:\l4rdyal3.txt" For Binary As #3

Open "c:\l4rdyal4.txt" For Binary As #4

Open "c:\l4rdyal5.txt" For Binary As #5

Open "c:\l4rdyal6.txt" For Binary As #6

Open "c:\l4rdyal7.txt" For Binary As #7

Open "c:\l4rdyal8.txt" For Binary As #8

Open "c:\l4rdyal9.txt" For Binary As #9

Open "c:\l4rdyl10.txt" For Binary As #10

Open "c:\l4eksen1.txt" For Binary As #11 'Eksenel ölçümler

Open "c:\l4eksen2.txt" For Binary As #12

Open "c:\l4eksen3.txt" For Binary As #13

Open "c:\l4eksen4.txt" For Binary As #14

Open "c:\l4eksen5.txt" For Binary As #15

Open "c:\l4eksen6.txt" For Binary As #16

Open "c:\l4eksen7.txt" For Binary As #17

Open "c:\l4eksen8.txt" For Binary As #18

Open "c:\l4eksen9.txt" For Binary As #19

Open "c:\l4eksn10.txt" For Binary As #20

For dosya = 1 To 20

For i = 1 To N

Input #dosya, px

Input #dosya, py

x(i) = px / 1

y(i) = py / 1

Next i

t1 = 0: t2 = 0: t3 = 0: t4 = 0

For i = 1153 To 6912

t1 = t1 + x(i)
t2 = t2 + x(i) ^ 2
t3 = t3 + y(i)
t4 = t4 + x(i) * y(i)
Next i

b = (t2 * t3 - t4 * t1) / (5760 * t2 - t1 ^ 2)
a = (t4 - b * t1) / t2

For i = 1153 To 6912

yy(i) = y(i) - (a * x(i) + b)
Next i

L = 0.69444 Numune alma mesafesi (mikron)

np = 0 'Yerel tepelerin sayısı

Rtop = 0 'Yuvarlaklık yarıçapları toplamı

For i = 1153 To 6910

If yy(i + 1) > yy(i) And yy(i + 1) > yy(i + 2) Then
cp = (2 * yy(i + 1) - yy(i) - yy(i + 2)) / L ^ 2
np = np + 1
Rtop = Rtop + (1 / cp)
End If
Next i

Rav(dosya) = Rtop / np

If dosya = 1 Then TextBox1 = Format(Rav(dosya), "#.##")
If dosya = 2 Then TextBox2 = Format(Rav(dosya), "#.##")
If dosya = 3 Then TextBox3 = Format(Rav(dosya), "#.##")
If dosya = 4 Then TextBox4 = Format(Rav(dosya), "#.##")
If dosya = 5 Then TextBox5 = Format(Rav(dosya), "#.##")
If dosya = 6 Then TextBox6 = Format(Rav(dosya), "#.##")
If dosya = 7 Then TextBox7 = Format(Rav(dosya), "#.##")
If dosya = 8 Then TextBox8 = Format(Rav(dosya), "#.##")
If dosya = 9 Then TextBox9 = Format(Rav(dosya), "#.##")
If dosya = 10 Then TextBox10 = Format(Rav(dosya), "#.##")

If dosya = 11 Then TextBox11 = Format(Rav(dosya), "#.##")
If dosya = 12 Then TextBox12 = Format(Rav(dosya), "#.##")
If dosya = 13 Then TextBox13 = Format(Rav(dosya), "#.##")
If dosya = 14 Then TextBox14 = Format(Rav(dosya), "#.##")
If dosya = 15 Then TextBox15 = Format(Rav(dosya), "#.##")
If dosya = 16 Then TextBox16 = Format(Rav(dosya), "#.##")
If dosya = 17 Then TextBox17 = Format(Rav(dosya), "#.##")
If dosya = 18 Then TextBox18 = Format(Rav(dosya), "#.##")
If dosya = 19 Then TextBox19 = Format(Rav(dosya), "#.##")

```
If dosya = 20 Then TextBox20 = Format(Rav(dosya), "#.##")
```

```
Next dosya
```

```
Top = 0: Sapma = 0
```

```
For dosya = 1 To 10
```

```
Top = Top + Rav(dosya)
```

```
Next dosya
```

```
OrtalamaRav = Top / 10
```

```
For dosya = 1 To 10
```

```
Sapma = Sapma + (Rav(dosya) - OrtalamaRav) ^ 2
```

```
Next dosya
```

```
Standartsapma = Sqr(Sapma / 9)
```

```
TextBox21 = Format(OrtalamaRav, "#.##") 'Diskin ortalama Çevresel Rav değeri
```

```
TextBox22 = Format(Standartsapma, "0.###") 'Diskin Çevresel Rav değerinin standart sapması
```

```
Top = 0: Sapma = 0
```

```
For dosya = 11 To 20
```

```
Top = Top + Rav(dosya)
```

```
Next dosya
```

```
OrtalamaRav = Top / 10
```

```
For dosya = 11 To 20
```

```
Sapma = Sapma + (Rav(dosya) - OrtalamaRav) ^ 2
```

```
Next dosya
```

```
Standartsapma = Sqr(Sapma / 9)
```

```
TextBox23 = Format(OrtalamaRav, "#.##") 'Diskin ortalama Eksenel Rav değeri
```

```
TextBox24 = Format(Standartsapma, "0.###") 'Diskin Eksenel Rav değerinin standart sapması
```

```
Close #1: Close #2: Close #3: Close #4: Close #5: Close #6: Close #7: Close #8:
```

```
Close #9: Close #10: Close #11: Close #12: Close #13: Close #14: Close #15:
```

```
Close #16: Close #17: Close #18: Close #19: Close #20:
```

```
End Sub
```

EK H

AŞINMA HIZININ BELİRSİZLİĞİNİ HESAPLAYAN VBASIC PROGRAMI

‘Aşınma – kayma mesafesi eğrisine uydurulan doğrunun eğiminin belirsizliğini hesaplar. Diğer belirsizlik bileşenlerini de katarak bir deneye ait aşınma hızının belirsizliğini bulur.

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
Dim L(10), V(10), dadL(10), dadV(10) As Double
```

```
n = 7
```

```
‘Doğru uydurulacak noktaların yatay koordinatları (Kayma mesafesi)
```

```
L(1) = 2628.945
```

```
L(2) = 5259.964
```

```
L(3) = 7714.174
```

```
L(4) = 12752.47
```

```
L(5) = 17838.26
```

```
L(6) = 22902.57
```

```
L(7) = 28000.8
```

```
‘Doğru uydurulacak noktaların düşey koordinatları (Aşınma hacmi)
```

```
V(1) = 4.912281
```

```
V(2) = 6.22807
```

```
V(3) = 7.894737
```

```
V(4) = 11.49123
```

```
V(5) = 12.36842
```

```
V(6) = 13.07018
```

```
V(7) = 13.77193
```

```
LTOP = 0: L2TOP = 0: VTOP = 0: LVTOP = 0
```

```
For i = 1 To n
```

```
LTOP = LTOP + L(i)
```

```
L2TOP = L2TOP + L(i) ^ 2
```

```
VTOP = VTOP + V(i)
```

```
LVTOP = LVTOP + L(i) * V(i)
```

```
Next i
```

```
a = (n * LVTOP - LTOP * VTOP) / (n * L2TOP - LTOP ^ 2)
```

```
For i = 1 To n
```

```
dadL(i) = ((n * V(i) - VTOP) * (n * L2TOP - LTOP ^ 2) - (2 * n * L(i) - 2 * LTOP) * (n * LVTOP - LTOP * VTOP)) / (n * L2TOP - LTOP ^ 2) ^ 2
```

```
dadV(i) = (n * L(i) - LTOP) / (n * L2TOP - LTOP ^ 2)
TOPdadL = TOPdadL + dadL(i) ^ 2
TOPdadV = TOPdadV + dadV(i) ^ 2
Next i
```

```
um = 0.1 'Kütlenin belirlenmesindeki toplam belirsizlik
RO = 1.14 'Polimer yoğunluğu
uL = 50 'Kayma mesafesinin belirlenmesindeki toplam belirsizlik
uV = (2 ^ 0.5) * um / RO 'Aşınma hacminin belirlenmesindeki toplam belirsizlik
ua = (TOPdadL * uL ^ 2 + TOPdadV * uV ^ 2) ^ 0.5 'Eğimin belirsizliği
```

```
Fn = 36 'Düşey yük (N)
uFn = 0.5 'Düşey yükün belirsizliği
w = a / Fn
```

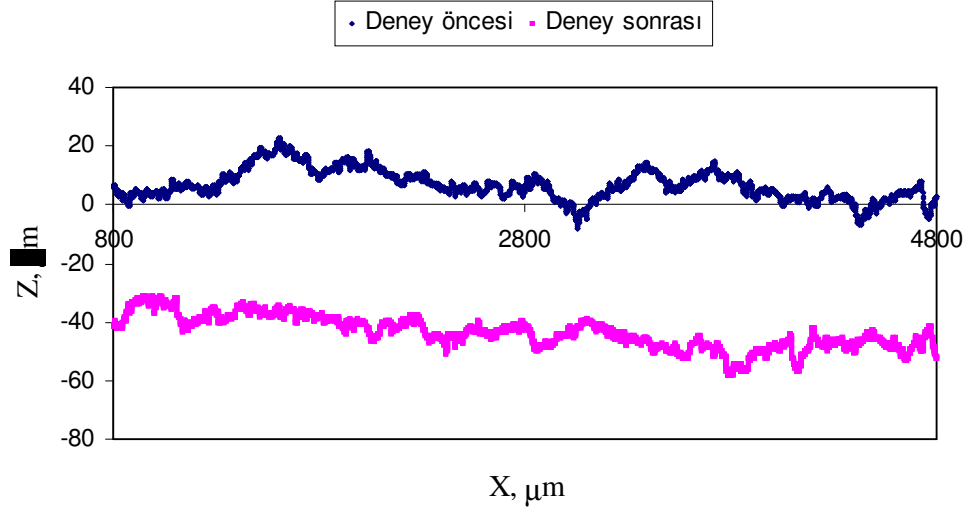
```
uw = ((1 / Fn ^ 2) * ua ^ 2 + ((a / Fn ^ 2) ^ 2) * uFn ^ 2) ^ 0.5 'Aşınma hızı
belirsizliği
```

```
TextBox1 = w
TextBox2 = uw
End Sub
```

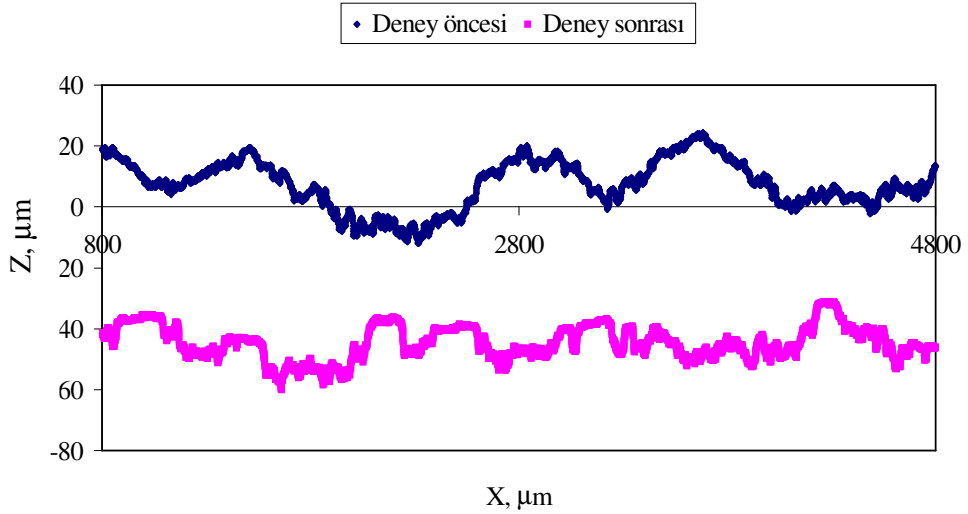
```
Private Sub UserForm_Click()
End Sub
```

EK I

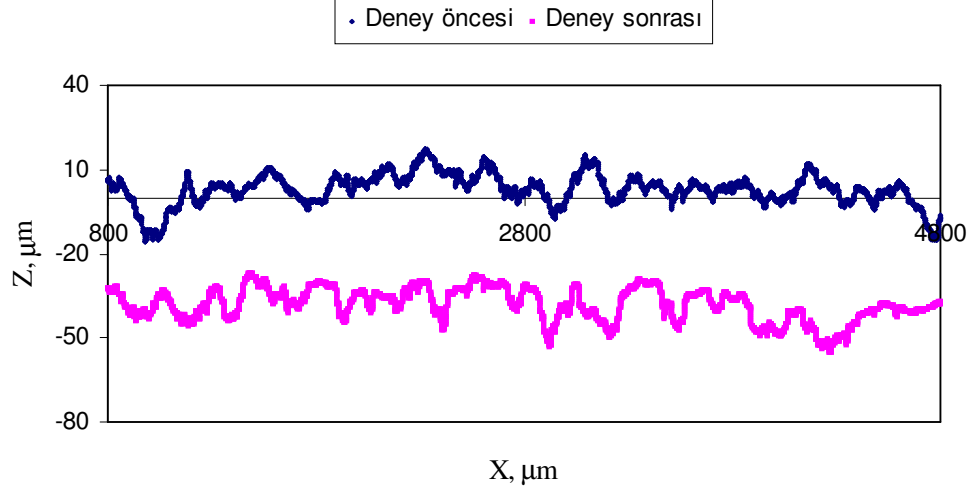
DENEYLERDE DİSK YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞİŞMESİ



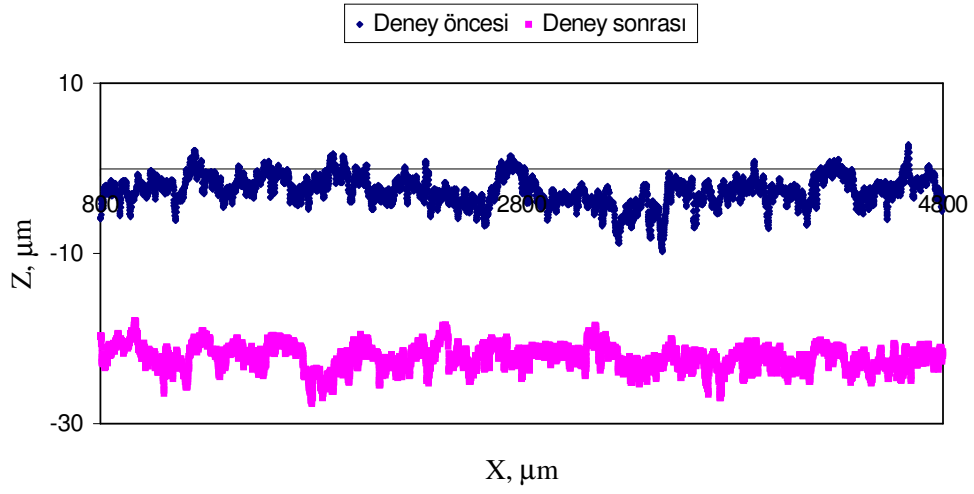
Şekil I.1: F2 diskinin deney öncesi ve sonrası yüzey profilleri



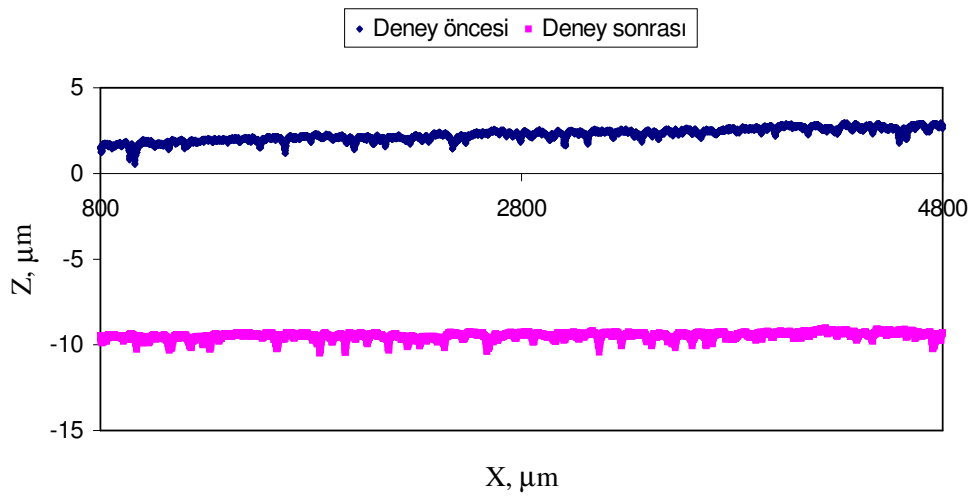
Şekil I.2: G2 diskinin deney öncesi ve sonrası yüzey profilleri



Şekil I.3: I7 diskinin deney öncesi ve sonrası yüzey profilleri



Şekil I.4: I13 diskinin deney öncesi ve sonrası yüzey profilleri



Şekil I.5: J3 diskinin deney öncesi ve sonrası yüzey profilleri

ÖZGEÇMİŞ

1969 yılında İstanbul'da doğdu. İlk öğrenimini Alparslan İlkokulu'nda tamamladıktan sonra, ortaokulu Sarıyer Ortaokulu ve liseyi Behçet Kemal Çağlar Lisesi'nde bitirerek 1986 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Bölümüne girdi. 1991 yılında Yüksek Lisans'a başladı ve 1993 yılında Yüksek Lisansını tamamlayarak Doktora başladı. 1996 yılında Tübitak Ulusal Metroloji Enstitüsüne girdi. 2000 yılında askerlik görevini tamamladı. Halen Tübitak Ulusal Metroloji Enstitüsünde araştırmacı olarak görev yapmaktadır. Evli ve 1 çocuk babasıdır.