

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POLİMER ESASLI KURU KAYMALI YATAKLARIN
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Gökhan TAYLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi C. Oktay AZELOĞLU

Şubat, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİMER KAYMALI YATAKLARIN TRİBOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Gökhan TAYLAN tarafından hazırlanan tez çalışması 09.02.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi C. Oktay AZELOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi C. Oktay AZELOĞLU, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ahmet SAĞIRLI, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep PARLAR, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi C. Oktay AZELOĞLU sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Kaymalı Yatakların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Gökhan TAYLAN

İmza

TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca hiçbir zaman desteğini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme, nişanlıma, dostlarıma ve kıymetli bilgilerinden her daim faydalandığım çok değerli hocam Dr. Öğr. C. Oktay AZELOĞLU'na teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı	9
1.3 Hipotez	10
2 KAYMALI YATAKLARDA SÜRTÜNME VE AŞINMA	11
2.1 Tribolojiye Giriş ve Temel Kavramlar	11
2.2 Sürtünme	12
2.2.1 Kuru Sürtünme	13
2.2.2 Sınır Sürtünmesi	14
2.2.3 Sıvı Sürtünme	14
2.3 Aşınma	14
2.3.1 Adhesiv Aşınma	15
2.3.2 Abrasiv Aşınma	15
2.3.3 Yorulma (Pitting) Aşınması	16
2.3.4 Koroziif Aşınma	17
2.3.5 Erozyon Aşınması	17
2.4 Çalışmada Kullanılan Yatak Malzemeleri	18
3 MATERYAL VE METOT	19
3.1 Deney Numuneleri	19
3.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar	20
3.2.1 Radyal Kaymalı Yatak Test Düzeneği	20
3.2.2 Yüzey Pürüzlülük Ölçümü	21
3.2.3 SEM Görüntüleme	22
3.3 Deney Senaryoları	23
4 DENEY VERİLERİ	24
4.1 Sürtünme Katsayısı Değerleri	24

4.2 Sıcaklık Değişimi.....	30
4.3 Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri	35
4.4 Ağırlık ve Aşınma Ölçümleri.....	38
4.5 SEM Görüntüleri.....	40
4.6 Tüm Deney Verilerinin Karşılaştırılması.....	44
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	56
KAYNAKÇA	60
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	63

SİMGE LİSTESİ

α	Isıl Genleşme Katsayısı
ε_f	Nemle Genleşme Katsayısı
μ	Sürtünme Katsayısı
ρ	Yoğunluk
Δl	Yatak Boşluğu Azalma Miktarı
Δm	Ağırlık Kaybı
Δt^2	Yatak Yüzeyi ile Dış Ortam Arasındaki Sıcaklık Farkı
ΔV	Hacimsel Malzeme Kaybı
d	Yatak Çapı
F	Yük
F_s	Statik Sürtünme Kuvveti
F_k	Dinamik Sürtünme Kuvveti
F_N	Normal Kuvvet
L	Özgül Aşınmada Kat Edilen Yol
l	Yatak boşluğu
l_{min}	Minimum yatak boşluğu
n	Devir Sayısı
R_a	Yüzey Pürüzlülüğü
s	Yatak Kalınlığı
T	Sıcaklık
v	Kayma Hızı
W	Ağırlık
W_s	Özgül Aşınma Miktarı

KISALTMA LİSTESİ

AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
CMRO	Kimyasal Olarak Modifiye Edilmiş Kolza Yağı
CrVNiMo	Krom-Vanadyum-Nikel-Molibden
Cu	Bakır
CuSn10	Kalay Bronzu
ÇYMAPE	Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen
Mo	Molibden
MoS ₂	Molibden Disülfid
PA	Poliamid
PE	Polietilen
PEEK	Polieter Eter Keton
PETP	Polietilen Tereftalat
POM	Polioksimetilen
PPS	Polifenilen Sülfid
PTFE	Politetrafloroetilen
SAE	Otomotiv Mühendisleri Birliği
Sb	Antimon
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Sn	Kalay
SnP6CuS6	Beyaz Metal
UHMWPE	Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen
Zn	Çinko

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Adhesiv aşınma	15
Şekil 2.2	Abrasiv aşınma	16
Şekil 2.3	Yorulma (pitting) aşınması.....	17
Şekil 3.1	Yatak ölçüleri	19
Şekil 3.2	Deney numuneleri	20
Şekil 3.3	Kaymalı yatak deney düzeneği.....	21
Şekil 3.4	Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.....	22
Şekil 3.5	SEM görüntüleme cihazı	22
Şekil 4.1	Sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (iyi yüzey kalitesi, UHMWPE, 10N).....	24
Şekil 4.2	Sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (iyi yüzey kalitesi, UHMWPE, 20N).....	25
Şekil 4.3	Sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (kaba yüzey kalitesi, UHMWPE, 10N).....	26
Şekil 4.4	Sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (kaba yüzey kalitesi, UHMWPE, 20N).....	26
Şekil 4.5	Sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (iyi yüzey kalitesi, POM, 10N)	27
Şekil 4.6	Sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (iyi yüzey kalitesi, POM, 20N)	28
Şekil 4.7	Sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (kaba yüzey kalitesi, POM, 10N).....	29
Şekil 4.8	Sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (kaba yüzey kalitesi, POM, 20N).....	29
Şekil 4.9	Sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (iyi yüzey kalitesi, UHMWPE, 10N).....	30
Şekil 4.10	Sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (iyi yüzey kalitesi, UHMWPE, 20N).....	31
Şekil 4.11	Sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (kaba yüzey kalitesi, UHMWPE, 10N).....	32
Şekil 4.12	Sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (kaba yüzey kalitesi, UHMWPE, 20N).....	32
Şekil 4.13	Sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (iyi yüzey kalitesi, POM, 10N).....	33
Şekil 4.14	Sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (iyi yüzey kalitesi, POM, 20N).....	34
Şekil 4.15	Sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (kaba yüzey kalitesi, POM, 10N).....	34
Şekil 4.16	Sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (kaba yüzey kalitesi, POM, 20N).....	35
Şekil 4.17	250x SEM görüntüleri (iyi yüzey kalitesi, UHMWPE, 10N)	40
Şekil 4.18	250x SEM görüntüleri (iyi yüzey kalitesi, UHMWPE, 20N)	41
Şekil 4.19	250x SEM görüntüleri (kaba yüzey kalitesi, UHMWPE, 10N).....	41
Şekil 4.20	250x SEM görüntüleri (kaba yüzey kalitesi, UHMWPE, 20N).....	42
Şekil 4.21	250x SEM görüntüleri (iyi yüzey kalitesi, POM, 10N)	42
Şekil 4.22	250x SEM görüntüleri (iyi yüzey kalitesi, POM, 20N)	43
Şekil 4.23	250x SEM görüntüleri (kaba yüzey kalitesi, POM, 10N)	43
Şekil 4.24	250x SEM görüntüleri (kaba yüzey kalitesi, POM, 20N)	44
Şekil 4.25	Deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (10N yük, 0.5 m/s hız).....	45
Şekil 4.26	Deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (20N yük, 0.5 m/s hız).....	45

Şekil 4.27	Deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (10N yük, 1 m/s hız).....	46
Şekil 4.28	Deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (20N yük, 1 m/s hız).....	46
Şekil 4.29	Deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (10N yük, 1.5 m/s hız).....	47
Şekil 4.30	Deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (20N yük, 1.5 m/s hız).....	47
Şekil 4.31	Deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (10N yük, 2 m/s hız).....	48
Şekil 4.32	Deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (20N yük, 2 m/s hız).....	48
Şekil 4.33	Deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (10N yük, 0.5 m/s hız).....	49
Şekil 4.34	Deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (20N yük, 0.5 m/s hız).....	50
Şekil 4.35	Deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (10N yük, 1 m/s hız).....	50
Şekil 4.36	Deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (20N yük, 1 m/s hız).....	51
Şekil 4.37	Deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (10N yük, 1.5 m/s hız).....	51
Şekil 4.38	Deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (20N yük, 1.5 m/s hız).....	52
Şekil 4.39	Deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (10N yük, 2 m/s hız).....	52
Şekil 4.40	Deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (20N yük, 2 m/s hız).....	53

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 UHMWPE malzemeler için deney sonrası yüzey pürüzlülüğü değerleri	36
Tablo 4.2 POM malzemeler için deney sonrası yüzey pürüzlülüğü değerleri	37
Tablo 4.3 UHMWPE malzemeler için ağırlık ve özgül aşınma miktarı değerleri.....	38
Tablo 4.4 POM malzemeler için ağırlık ve özgül aşınma miktarı değerleri	39
Tablo 4.5 UHMWPE malzemeler için tüm deney sonrası verileri	54
Tablo 4.6 POM malzemeler için tüm deney sonrası verileri	55

Polimer Esaslı Kuru Kaymalı Yatakların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Gökhan TAYLAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi C. Oktay AZELOĞLU

Kaymalı yataklar, dönen veya salınım yapan makine parçalarının yataklanmasında yaygın olarak kullanılan önemli makine elemanlarıdır. Literatürde kaymalı yatakların tribolojik karakteristiklerini incelemek ve optimize etmek için yapılan birçok çalışma mevcuttur. Günümüzde, polimer esaslı malzemelerden üretilen kaymalı yataklar, özellikle yağlama imkânı bulunmayan yerlerde sıklıkla tercih edilmektedirler. Polimer esaslı malzemeler, sahip oldukları yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayıları sebebiyle doğrudan ya da kaplama malzemesi olarak yataklara uygulanabilmektedir. Kaymalı yataklarda kullanılan polimer malzemelerden ikisi Ultra Yüksek Moleküler Yoğunluklu Polietilen (UHMWPE) ve Polioksimetilen'dir (POM). Bu malzemeler tribolojik performansının yanı sıra, yüksek mukavemet, sert yapı, diğer termoplastik malzemelere göre yüksek darbe dayanımı, ayrıca aşınma, çatlama ve kimyasal direnç yönünden üstünlükleri, toksik etkiye sahip olmama ve düşük sürtünme katsayısı gibi özellikleri sebebiyle kaymalı yatak malzemesi olarak tercih edilmektedirler. Bu projede, UHMWPE ve POM kuru kaymalı yatakların farklı çalışma senaryolarındaki tribolojik performansları incelenmiştir. Bu amaçla, UHMWPE ve POM malzemedен numuneler hazırlanmış ve bunların sürtünme, aşınma ve sıcaklık gibi parametreleri deneysel olarak test edilmiştir. Projede, öncelikle

kaymalı yatak numunelerinin iki farklı yüzey kalitesinde imalatı yapılmış, ardından tüm numunelerin deneylerden önceki tribolojik ve fiziksel özellikleri ölçülmüş ve önceden belirlenmiş senaryolara göre kaymalı yatak testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler SEM analizleri ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ile de desteklenmiştir. Deneylerden sonra tüm numunelerin tribolojik ve fiziksel özellikleri yeniden ölçülerek, numunelerin hem deney öncesi durumlarıyla hem de birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bu sayede yatak numunelerinin çeşitli özellikler yönünden birbirleriyle kıyaslanması mümkün olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Kaymalı yataklar, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE), polioksimetilen (POM), tribolojik özellikler.

Investigation of Tribological Properties of Polymer-Based Dry Journal Bearings

Gökhan TAYLAN

Department of Mechanical Engineering
Master's Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. C. Oktay AZELOĞLU

Journal bearings are important machine elements that are widely used in bearing of rotating or oscillating machine parts. There are many studies in the literature to examine and optimize the tribological characteristics of journal bearings. Today, journal bearings which produced from polymer-based materials are frequently preferred especially in places where lubrication is not possible. Polymer-based materials can be applied to bearings directly or as a coating material, due to their high wear resistance and low friction coefficient. Two of the polymer materials used in journal bearings are Ultra High Molecular Density Polyethylene (UHMWPE) and Polyoxymethylene (POM). These materials are preferred as journal bearing materials due to their tribological performance, high strength, hard structure, high impact resistance compared to other thermoplastic materials, superiority in terms of abrasion, cracking and chemical resistance, non-toxic effect and low coefficient of friction. In this project, the tribological performances of UHMWPE and POM dry journal bearings in different operating scenarios were investigated. For this purpose, samples from UHMWPE and POM materials were prepared and their parameters such as friction, wear and temperature were experimentally tested. In the project, firstly, the journal bearing samples were manufactured in two different surface qualities, then the tribological and physical properties of all samples before the tests were measured and the journal bearing tests were carried out according

to the predetermined scenarios. The tests were also supported by SEM analyzes and surface roughness measurements. After the experiments, the tribological and physical properties of all samples were re-measured, and the samples were compared both with their pre-experimental condition and with each other. In this way, it will be possible to compare the bearing samples with each other in terms of various properties.

Keywords: Journal bearings, ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE), polyoxymethylene (POM); tribological Properties.

Yataklar, dönme veya salınma yapan makine parçalarının arasındaki bir veya birden fazla yönde rölatif harekete minimum sürtünme oluşacak şekilde izin veren makine elemanlarıdır. Kuvvet ile aynı doğrultuda hareketi kısıtlarlar. Konstrüksiyon çeşitlerine göre yataklar; kaymalı yatak, yuvarlanmalı yatak ve manyetik yataklar olma üzere üçe ayrılırlar. Yuvarlanmalı yataklar ayrıca rulmanlar olarak da adlandırılabilirler. Yataklar, üzerine etkiyen kuvvetin yönüne göre de radyal ve eksenel yataklar olarak ikiye ayrılırlar.

Kaymalı yataklar, basit ve ucuz yapıları, darbe dayanımı, gürültü ve titreşim sönümleme, yağlama halinde toza karşı koruma, yüksek aşınma direnci gibi özellikleri sebebiyle tercih edilen makine elemanlarıdır. Çalışma şartlarına göre değişkenlik gösterse de 20000 ile 50000 saat arasında kullanım ömrüne sahiptirler. Yatakların servis ömrü özellikle karışık sürtünme alanlarındaki çalışma performanslarıyla sınırlıdır ve çalışma şartlarına bağlı olarak yatakların ömürleri teorik olarak 20.000 ile 50.000 saat arasındadır. Kaymalı yataklar karışık sürtünme şartlarında ve aşırı yük altında aşınmalara maruz kalır. Birçok sebebi olan aşınma olayının sebeplerinin başında aşırı ve ani yükler, düşük kayma hızı, titreşim ve sıcaklık farkının yüksek olması durumları gelmektedir [1].

Kaymalı yatak sistemlerinde, hareket eden parçaların temas ettikleri yüzey arasında kayma sürtünmesinin oluşturduğu dirence karşı yatak elemanı kaymaktadır. Yatak elemanlarının temas ettiği yüzeylerin sürtünme katsayılarının düşük olması, iyi bir yağlamanın yapılması, sürtünme direncini azaltır [2]. Kaymalı yataklar, dönmekte olan milleri desteklemek için iki tipte kullanılabilirler. Bunlar tek parça halindeki burçlar veya yarım ay şeklinde yapılmış iki parçalı yataklardır [3].

Polimer malzemeler, mühendislik alanında geniş bir spektrumda kullanılan malzemelerdir. Dayanım, hafif olma, işlenebilirlik gibi özellikleri daha düşük bir maliyet ile sağlayarak iyi bir performans gösteren malzemelerdir. Polimer malzemelerin aşınma direnci; özellikle yataklarda sıcaklık, yük ve kayma hızı ile değişim göstermektedir. Bir metal yüzey ile temasında (mil gibi) karşıt yüzeye monomoleküler film oluşturur. Bu olayın sebebi, malzeme moleküllerinin kohesiv bağlarının bu film bölgesindeki adhesiv bağa kıyasla daha zayıf olmasıdır [4].

Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) 4.000.000-6.000.000 adet moleküle sahiptir ve diğer plastiklere karşı üstün bir özelliğe sahiptir. Sahip olduğu düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direnci ile mühendislik uygulamaları için kullanılmaya elverişli bir yatak malzemesidir. Endüstriyel kullanım haricinde tıp alanında da kullanılmaktadır.

Aşındırıcı malzeme olarak çelik miller kullanıldığında döner UHMWPE malzemelerin temas halindeyken sürtünme katsayısının ve aşınma değerinin incelendiği çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda genellikle yükün ve hızın artması ile değerlerin artan yük ve hızla değiştiğini ele almaktadır. Bu çalışmalar, UHMWPE'nin tribolojik uygulamalara elverişli bir malzeme olduğunu belirtmiştir [5].

Özellikle son yıllarda polimer esaslı malzemeler, metal malzemelere alternatif olarak birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Makine, otomotiv, elektrik/elektronik, beyaz eşya gibi sektörlerde bu malzemelere sıklıkla rastlanır. Bazı polimer malzemeler, iyi aşınma ve sürtünme özelliklerine sahiptirler. UHMWPE, PA, POM ve PTFE malzemeler buna örnek gösterilebilir [6].

POM malzeme sahip olduğu aşınma direnci, yüksek rijitlik, esneklik gibi özellikleri sebebiyle tercih edilen polimer malzemelerden birisidir. Bunun yanı sıra, kolay işlenebilir bir malzemedir. Mobilya, dişliler, çakmak ve fermuar gibi çeşitli kullanım alanları mevcuttur.

1.1 Literatür Özeti

Kaymalı yatakların kullanımı ile ilgili yıllardır birçok çalışma yapılmıştır. Son yıllarda mühendislik polimerlerinin de yatak malzemesi olarak kullanımı ve geliştirilmesine dair çalışmalar devam edilmektedir. Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan UHMWPE ve POM malzemedan üretilmiş kaymalı yataklar için ilgili parametrelerin seçimi, çeşitli yöntemler ve malzeme özellikleri açısından incelenmesine dair daha önceden literatürde yapılmış çalışmalar hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

İlk olarak benzer konularda metal esaslı malzemelerin, daha sonra da polimer esaslı malzemelerin kullanıldığı literatür çalışmaları incelenmiştir. Son olarak yaptığımız çalışmaya ön bilgi olması ve ışık tutması amacıyla UHMWPE ve POM malzemelerin kullanıldığı çalışmalar da eklenerek yorumlanmıştır.

Ünlü ve ark. [7], Saf Cu, Sn, Zn malzemelerin aşınma ve sürtünme performansını incelemiştir. Aşındırıcı malzeme olarak SAE 1050 çelik mil kullanılmıştır. Deneyler 1500 d/dk devir sayısında, 20N yük altında 2,5 saatte tamamlanmıştır. Deneyler sonucunda, Saf Cu'dan üretilen numunelerde daha büyük sürtünme katsayısı (0,08 – 0,1) ve sıcaklık değerleri (40-45 °C) elde edilmiştir. En fazla ağırlık kaybı Sn'den üretilmiş numunede olup en az ağırlık kaybı ise Cu ve Zn'den üretilmiş numunelerde görülmüştür.

Ünlü ve ark. [8] saf Cu, Sn, Pb ve bunların alaşımından oluşan SnPbCuSb (beyaz metal) kaymalı yatak numunelerinin sürtünme ve aşınma özelliklerini kaymalı yatak test düzeneğinde incelemiştir. Aşındırıcı malzeme olarak SAE 1050 çelik mil kullanılmıştır. 1500 d/dk hızda, 20 N yük altında yağlı ortamda 2.5 saatte deneyler tamamlanmıştır. Deneyin sonucunda saf Sn, Pb ve beyaz metal numunelerin sürtünme katsayılarını 0.01 – 0.03 arasında ve sıcaklıklarını 37-40 °C arasında hesaplamışlardır. Saf Cu yatak numunesinin sürtünme katsayısı da 0,08 – 0,1 aralığında ve sıcaklığı 42-44 °C arasında bulunmuştur. Deneyde ağırlık kayıpları da hesaplanmış olup bu değer en fazla saf Pb numunede, en düşük ise saf Cu ve beyaz metal yatakta görülmüştür.

Baskar ve Sriram [9], pirinçten üretilmiş (%64 Cu, %34 Zn, %2 Pb) kaymalı yatak malzemelerinin sürtünme ve aşınma davranışını, üç farklı yağlama yağı (sentetik yağlama yağı (SAE20W40), kimyasal olarak modifiye edilmiş kolza yağı (CMRO), Nano CuO ile kimyasal olarak modifiye edilmiş kolza yağı) ile pin-on-disk aşınma test cihazında 2 – m/s arası kayma hızı ve 200 N yük altında deneyler tamamlanmıştır. Sonuçlara göre kaymalı yatak numunelerinin sürtünme ve aşınma davranışı, kayma koşullarına ve yağlama yağlarına göre değişmiştir. Kaymalı yatak malzemelerinden nano CuO'lu CMRO için diğer iki yağdan daha düşük bir sürtünme katsayısı değeri bulunmuştur. Daha yüksek aşınma SAE 20W40 ve CMRO'da gözlenmiştir. SEM görüntüleri ile de aşınma mekanizmaları yorumlanmıştır.

Yapılan araştırmalar ve endüstriyel kullanım amaçları doğrultusunda metal esaslı yataklar yerine alternatif yatak malzemesi arayışına ihtiyaç olmuştur. Bu bağlamda, fonksiyon ve maliyet durumları ele alındığında polimer esaslı yataklar da kullanıma uygun bulunmuştur. Sahip oldukları yüksek aşınma direnci, malzeme çifti arasında yağlama ihtiyacının olmaması, düşük maliyet ve hafif yapıları gibi özelliklerinden ötürü polimer malzemeler, önemli bir yatak malzemesi olmuştur. Polimer yataklar ile daha düşük sürtünme katsayılarına ulaşılarak bu malzemelerin gerek direkt gerek kaplama olarak

kullanılabileceği görülmüştür. Literatürde polimer malzeme ağırlıklı yapılan çalışmalar da aşağıda sunulmuştur.

Nickchi ve Ghorbani [10], Grafit, MoS₂ ve PTFE gibi kendinden yağlamalı partiküller içeren kompozit kaplamaların tribolojik yüzeylerin sürtünme katsayısı azaltmada yaygın olarak kullanıldığından yola çıkarak, elektrodepolanmış bronz-grafit kompozit kaplamaların kaplama parametrelerini ve pin on disk aşınma cihazında sürtünme ve aşınma davranışlarına etkisini ve incelemişlerdir. Sonuç olarak, kaplamada kullandıkları %4 – %18 grafit miktarının sürtünme katsayısını ve malzemenin sertliği azalttığını belirlemişlerdir. En düşük sürtünme katsayısını %12 grafit miktarında tespit etmişlerdir.

Demirci [11], poliamid 66 ve poliamid 6.6 ile bu malzemelerin cam elyaf, teflon (PTFE) ve MoS₂ katkılı malzemelerinden üretilmiş yatakların tribolojisi ile ilgili deneysel bir çalışma yapmıştır. Bu deneyler sonucunda üç farklı hız ve basınç senaryoları için veriler elde etmiştir. Deneyler kaymalı yatak test cihazında gerçekleştirilmiş olup, veriler grafikler yardımı ve SEM görüntüleri desteği ile açıklanmıştır. Çalışmada bulunan PA 66, PA 6.6 malzemeleri ve PA6.6'nın %30 cam elyaf katkılısı, PA66'nın %20 cam elyaf ve %25 PTFE katkılısı, PA 66'nın %18 PTFE ve %25 cam elyaf katkılısı ve son olarak PA66'nın %25 cam elyaf ve %3 MoS₂ katkılısı malzemeleri incelendiğinde cam elyaf katkılı yatakların ısı iletkenliği, yük taşıma kapasitesi ve aşınma dayanımı özelliklerinde daha iyi performans gösterdiği sonucuna varmıştır. Cam elyaf ve MoS₂ katkısı kullanılan malzemelerin sürtünme katsayısı değerlerinin daha düşük çıktığını da tespit etmişlerdir. Sürtünme katsayısının kayma hızı ile arttığı görülmüştür.

Desale ve Pawar [12], karbon, MoS₂ ve cam elyaf takviyeli PTFE ve PEEK malzemeden üretilen kaymalı yatakların yüksek yük koşulları altında tribolojik özelliklerini hem kuru hem de yağlı koşullar için pin-on-disk düzeneğinde incelemiştir. Saf PTFE ile kıyaslandığında, kompozit malzemelerden yapılan dolgu maddelerinin kullanımının aşınma ömrünün olmadığını tespit etmişlerdir. Deney sonucunda sürtünme ve aşınma mekanizması nedeniyle tüm PTFE kompozitleri arasında %15 Cam elyaf + %5 MoS₂ katkılı PTFE malzeme için en düşük aşınma kaybı gözlenmiştir.

Cong ve ark. [13] poliamid 66, PPS ve PTFE malzemeden üretilmiş deney numunelerini aynı aşındırıcı yüzey malzeme kullanarak pin-on-disk düzeneğinde tribolojik açıdan incelemiştir. 0.2 m/s kayma hızında ve 4 farklı (0,5, 1, 1,5 ve 2 N) yüklerde deneyler yapılmıştır. Deney sonrasında en yüksek sürtünme katsayısının PPS malzemedede olduğu

görülürken, en düşük sürtünme katsayısı PTFE’de görülmüştür. Artan yük ile sürtünme katsayısının arttığı deneyler sonucunda tespit edilmiştir.

Ünal ve ark. [14] saf teflon (PTFE) numuneler ve bunların cam elyaf katkılı (%17 ve 35) ve %25 bronz katkılı numunelerini pin-on-disk test cihazında incelemişlerdir. Farklı yük koşulları (5, 10, 15 ve 20 N) ve farklı kayma hızlarında (0,32, 0,64, 0,96 ve 1.26 m/s) 1 saat boyunca numuneleri AISI 440C aşındırıcı malzeme ile test etmişlerdir. AISI 440C kullanılmışlardır. Deney sonrasında en yüksek sürtünme katsayısını saf PTFE malzemede elde ederlerken, en düşük sürtünme katsayısını %17 cam elyaf katkılı PTFE malzemede tespit etmişlerdir.

Tevrüz [15] %60 bronz katkılı PTFE malzemeden üretilen kaymalı yataklar ile çalışmıştır. AISI 440C paslanmaz çeliği aşındırıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Artan yük ile kaymalı yatak sürtünme katsayısı değerlerin arttığı görülürken, yaklaşık 33 saat sonunda bu katsayının stabil kaldığını gözlemlemiştir.

Kukureka ve ark. [16], saf poliamid 66 ve bunların katkılı malzemelerinin tribolojik özelliklerini (%20 aramid, %30 karbon ve %30 cam elyaf) yuvarlanma – kayma test cihazında incelemiştir. 50 – 300N yük koşullarında ve 1000 devir/dakika hızında deneyler tamamlanmıştır. Saf poliamid malzeme için sürtünme katsayısı değerleri 0.30 – 0.45 aralığında bulunurken, %20 aramid numune için 0,20 – 0,35 aralığında, %30 karbon elyaf takviyeli numune için 0,20 – 0,30 aralığında ve %30 cam elyaf takviyeli numune için de 0,10 – 0,15 aralığında bulmuştur.

Tevrüz [17], saf teflon (PTFE) malzemeden ve %25 ve 35 karbon elyaf takviyeli PTFE malzemeden imal edilmiş yatak numunelerinin tribolojik karakteristiklerini incelemiştir. Kaymalı yatak test cihazında gerçekleştirilmiş deneylerde saf PTFE’den imal edilmiş numunelerin sürtünme katsayılarının %35 karbon elyaf katkılı numunelere kıyasla 1,2 – 1,6 kat fazla, %25 katkılı numunelere kıyasla ise 1,1 kat daha fazla olduğu sonucunu çıkarmıştır.

Conte ve Igartua [18], saf PTFE ve 6 PTFE kompozitin (ağırlıkça PTFE + %25 karbon, PTFE + %60 bronz, PTFE + %15 Grafit, PTFE + %25 cam fiber, PTFE + %20 cam fiber + %5 Grafit, PTFE + %15 cam fiber + %3 MoS₂) tribolojik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Deneyler aşınma cihazında, 60 Hz frekans hız ve 2 mm strok olarak 30 saniye 50 N ve ardından 100 N yük uygulanmış 30 dakika boyunca uygulanmıştır. Aşındırıcı olarak CrVNiMo eksenel kayar mil kullanmışlardır. Deneyler sonucunda en

yüksek sürtünme katsayısı olarak PTFE + %60 bronz ve PTFE + %15 Grafit olan kompozitlerde (0,33), en düşük sürtünme katsayısı olarak da PTFE + %15 cam fiber + %3 MoS₂'yi (0,19) tespit etmişlerdir. En yüksek aşınma kaybı olarak da PTFE + %60 bronz (13 mg) ve saf PTFE (5,3 mg) diğer kompozitlerin ise birbirine yakın daha düşük değerlerde (0,4 – 1,1) olduğunu bulmuşlardır. Polimer matrisi içinde hem de yumuşak ve hem de sert fazların kullanımı PTFE tribolojik özellikleri geliştiren matrisin, kendini yağlama ve yük taşıma özelliklerini arttırdığını belirtmişlerdir.

Khoddamzadeh [19], kaymalı yatak uygulamaları için yeni bir grup PTFE esaslı kompozit malzeme geliştirmiştir. Konvansiyonel triboalaşımlarla karşılaştırmada, daha iyi elastikiyete sahip olan yeni geliştirilmiş T401 (%59,8 Co, %17 Cr, %22 Mo, %1,2 Si) triboalaşımla birlikte, öğütülmüş grafit, kesilmiş karbon fiberler, küresel bronz partikülleri gibi katkıları kullanarak, çeşitli PTFE esaslı kompozit malzemeleri, farklı şekillendirme ve sinterleme çevrimlerinde, basınçlı kalıplama tekniği ile üretmişlerdir. Bu kompozitlerin mekanik, tribolojik özelliklerini ve korozyon direncini incelenmişlerdir. Bu özellikleri, katkıların oranı ve cinsinin etkilediğini ve PTFE kompozitlerin aşınma dirençlerinin çok düşük, sürtünme katsayılarının ise saf PTFE' den yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Geliştirdikleri kompozitler arasında %40 PTFE + %15 T401 (Co + Cr + Mo + Si) + %45 bronz karışımın daha iyi bir bileşim özelliği sunduğunu belirlemişlerdir.

Hui Wang ve ark. [20], kendinden yağlamalı anotsal filmi, ultrasonik emdirme ve sonrasında ısıtıl işlem tekniği ile alüminyuma kaplamışlardır. Kaplamada fosforik asit elektrotuna alüminyumun anotlanması ile ultrasonik emdirmeyi gerçekleştirmişler, böylece alüminyum oksitin (alümina) deliklerine bir miktar PTFE dolduğunu ve yüzey sertliğinin ultrasonik zaman içerisinde bir miktar azaldığını tespit etmişlerdir. Sonrasında uyguladıkları ısıtıl işlemin, kaplama sertliğini büyük ölçüde artırdığını bulmuşlardır. Böylelikle, bu üretim metoduyla, kendinden yağlamalı kaplamaların abrasyon direncini ve aşınma önleyici özelliklerini büyük oranda geliştirebildiklerini göstermişlerdir.

Lewis [21], PTFE emdirilmiş kumaş malzemeyi, kam silindiri ile hidrolik motor pistonlarının ara yüzeylerinde, yüzey katmanı olarak kullanımı için test etmiştir. Testleri standart Bowden & Leben kayar sürtünme test cihazının kullanımıyla yapmıştır. Kumaş malzeme, hali hazırda kullanılan PTFE emdirilmiş sinterlenmiş bronz malzemeyle hem kuru hem de yağlı ortamda benzer sonuçlar verdiğini bulmuştur.

Dearn ve ark. [22], PA66, PEEK 450G ve PEEK 450CA30 polimer dişli çarkların temas yüzeylerine dört farklı katı yağlayıcı (MoS₂, Grafit, Bor nitrit ve PTFE) kaplama uygulamışlardır. Dişli çarkların birlikte çalıştırıldığı deneyler sonucunda PTFE ve grafitle kaplı numunelerin aşınma kayıpları ve sıcaklık artışlarını diğer kaplamalara göre daha düşük bulmuşlardır. Bu durumun dişli ömrü ve güç iletiminde artış sağladığını vurgulamışlardır.

Sahip oldukları yüksek aşınma direnci, yüksek rijitlik, düşük sürtünme katsayısı, esnek yapıları ve boyutsal dayanıklılık değerleri sebebiyle POM ve UHMWPE yataklar da geniş kullanım alanlarına sahiptir. Bu malzemeler yağlama yapılmadığı durumlarda da iyi tribolojik özellikler sağlamaktadır. Bu malzemelerin kullanıldığı araştırmalar aşağıda sunulmuştur.

Ünlü ve ark. [23], polietilen, poliamid, POM, teflon (PTFE) ve bakalit malzemelerden üretilen yatak numunelerini, 2.5 saat boyunca kuru kaymalı yatak test cihazında 0,13 m/s kayma hızı ve 20N yük altında ve toplamda 1177,5 m kayma mesafesi boyunca çalıştırmışlardır. SAE 1050 mil ile tamamlanan deneylerin sonucunda sürtünme katsayısı değerlerini 0,15-0,25 aralığında ve yataklardaki sıcaklık değerlerini de 30-35 °C aralığında hesaplamışlardır. Polietilen yataklarda en çok sürtünme katsayısı elde edilirken bakalit ve teflon (PTFE) yatak numunelerinin sürtünme katsayısı en düşük bulunmuştur. Maksimum aşınma bakalit malzemede olurken minimum aşınma POM malzemede tespit edilmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü ölçümleri de tamamlanmış olup, polietilen ve poliamid malzemede R_a değerleri artarken bakalit, POM ve PTFE malzemede düştüğü görülmüştür.

Feyzullahoğlu ve Şafak [24], POM, PETP, döküm poliamid ve devateks malzemelerden üretilen yatak numunelerinin tribolojik performansını AISI 440C aşındırıcı malzeme ile değerlendirmiştir. Deney senaryoları olarak 4 farklı hız (0,5, 1, 1,5 ve 2 m/s) ve 7 farklı yük (60, 80, 100, 120, 140, 160 ve 180 N) seçilmiştir. Deney sonuçlarından sürtünme katsayısının kayma artan kayma hızı ile arttığını ve artan kayma mesafesi ile sıcaklık artışının da gözlemlendiğini elde etmişlerdir.

Temiz [25] döküm POM, döküm PA, UHMWPE, PTFE + %15 cam elyaf, PTFE + %25 karbon, PTFE + %35 karbon, PTFE + %40 bronz ve PTFE + %60 malzemelerden imal edilen numunelerin kaymalı yatak test düzeneğinde tribolojik performanslarını incelemiştir. Deneyler sonucunda %15 cam elyaf takviyeli PTFE' de artan kayma hızı ile

sürtünme katsayısının arttığını, %25 cam elyaf takviyeli PTFE’ de ise bazı yük koşullarında azaldığını gözlemlemiştir. %25 ve %35 karbon elyaf takviyeli PTFE kaymalı yatakta, kayma hızının artması ile sürtünme katsayısının çok azaldığını gözlemlemiştir. %40 ve %60 bronz dolgulu PTFE kaymalı yataklarda da artan hız ile sürtünme katsayısında daha az bir miktarda artış olduğunu tespit etmiştir.

Quaglini ve ark. [26], saf PTFE, PTFE + PETP, POM-H, UHMWPE, PA6 + mum, PA66 + MoS2, malzemelerinden üretilmiş yatak numunelerinin üzerinde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapmıştır. Deney sonucunda, UHMWPE ve PTFE malzemelerden üretilen numunelerin en düşük elastisite modülüne sahip olduğunu, PA66 + MoS2 ve POM-H malzemelerinin en yüksek elastisite modülüne sahip olduğunu bulmuştur. Ayrıca PTFE + PETP ve PA6 + mum malzemelerinin elastisite modülünün 1000 ve 3000 MPa arasında değişen bir değerde olduğunu belirtmişlerdir. Deneyler sonucunda minimum sürtünme şartında bu malzemelerin ideal yüzey pürüzlülüğünün farklı olduğu belirtilmiştir.

Uzuner ve Gediktaş [27], UHMWPE malzemelerin aşınma ve sürtünme performansını incelemiştir. Deneyde 0.03 – 0.44 m/s arasında kayma hızları uygulanmış ve 5 kademede yükler 94.5 ile 346.5N arasında uygulanmıştır. Deney sonucunda sürtünme katsayısı değerlerinin artan hız ile arttığı, artan yüzey basıncı ile ise düştüğü görülmüştür. Sıcaklığın ise her iki parametre ile de arttığı görülmüştür.

Ünal ve Yetgin, [28], UHMWPE ve PA6 yatak numunelerinin tribolojik performansını pin-on-disk cihazında incelemiştir. 3 farklı yük koşulu (50, 100, 150N) ve 4 farklı kayma hızı (0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 m/s) ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda yatak numunelerinin sürtünme katsayısının yük ile azaldığı görülürken, artan kayma hızı ile numunelerin sürtünme katsayısının arttığı tespit edilmiştir.

Sarı ve Nteziyaremye, [29], kestamid, kestamid/HS, kestoil, kestlub ve UHMWPE malzemeden üretilmiş yatak numunelerini mil malzeme olarak 316 paslanmaz çelik kullanarak kaymalı yatak test düzeneğinde incelemiştir. Deney senaryosu olarak üçer farklı kayma hızı, yük ve deney süresi kullanılmıştır. Deney süresinin artması ile sürtünme katsayılarının arttığını ve en düşük sürtünme katsayısının kestoil numunede çıktığını tespit etmişlerdir.

Nguyen ve ark. [30], PET ve UHMWPE malzemelerin Inconel paslanmaz çeliğin kuru ve yağlı durumda aşındırıcı olarak kullandığı ortamda tribolojik performansını değerlendirmiştir. Damıtılmış su, demineralize su, musluk suyu ve nehir suyu olmak

üzere 4 tip su yağlayıcı kullanılmıştır. Deneyler Stribeck konfigürasyonunda gerçekleşmiş olup, 0,3 MPa basınç ve 0 – 1.07 m/s aralığındaki kayma hızlarında tamamlanmıştır. Yağlayıcıların kullanıldığı deneylerde kuru şartlara kıyasla daha iyi sonuçlar edilmiştir. Ayrıca su yağlama ile, UHMWPE'nin başlangıçta düşük sürtünme gösterip testler boyunca fazla düşmediği, PET'in de başlangıçta yüksek sürtünme göstermesine rağmen devamında belirgin şekilde azalan bir sürtünme gösterdiği tespit edilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu projenin amacı, literatürde tribolojik özellikleri iyi olduğu görülen katkısız UHMWPE ve katkısız POM malzemelerden üretilen radyal kaymalı yatakların kuru şartlar altındaki ve farklı çalışma senaryolarındaki tribolojik performanslarını incelemektir. Bu amaç doğrultusunda, UHMWPE ve POM malzemedan farklı yüzey işleme kalitesinde numuneler hazırlanmış ve bunların sürtünme katsayısı, sıcaklık, yüzey pürüzlülüğü, ağırlık kaybı ve aşınma parametreleri deneysel olarak test edilmiştir. Projede, öncelikle kaymalı yatak numunelerinin imalatı yapılmış, ardından tüm numunelerin deneylerden önceki tribolojik ve fiziksel özellikleri ölçülmüş ve önceden belirlenmiş senaryolara göre kaymalı yatak testleri gerçekleştirilmiştir. UHMWPE ve POM malzemedan elde edilen yatak numunelerinin imalatı farklı iki yüzey kalitesinde (birbirine kıyasla iyi ve kaba yüzey kalitesinde) yapılmış ve bunların tribolojik özellikleri test edilmiştir. Bu sayede, belirlenen senaryolar içerisindeki en optimal malzeme tespit edilmiştir. Bu deneysel çalışma, radyal kaymalı yatak test düzeneği kullanılarak tamamlanmıştır. Bu düzeneğe ile 500m, 1000m, 1500m, 2000m kayma mesafesinde farklı hız ve yük senaryoları için sürtünme katsayısı (μ), yatak sıcaklığı (T) ve ağırlık kaybı (W) değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, SEM analizi ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ile de desteklenmiştir. Çalışmanın sonunda belirlenen senaryolara göre gerçekleştirilen yatak testlerinden elde edilecek sonuçlar karşılaştırılarak hem literatüre hem de endüstriyel uygulamalara katkı sağlanması hedeflenmiştir.

1.3 Hipotez

Yapılan çalışmalar ve deney şartları ele alındığında polimer kaymalı yatak numunelerinin her senaryoda değişen bazı parametrelere göre tribolojik performansının etkileneceği öngörülmüştür. Bu çalışma özelinde yapılan yüzey işleme kalitesi farklılığının da bu tribolojik özelliklerin değişimine etkisi olduğu düşünülüp, deney sonucunda alınan veriler incelenerek yorumlanacaktır.

Polimer kaymalı yataklar, kuru şartlar altında çalışırken sürtünme ve aşınma değerleri kayma hızı, kayma mesafesi ve yatak basıncına göre değişmektedir. Ayrıca yüzey işleme kalitesinin iyileştirilmesi bu parametrelere olumlu yönde etkiler sağlamaktadır. Bu şartlar altında numuneler çalışırken zamanla sıcaklık artışları gözlemlenmektedir.

Bu etkilerin deneysel çalışmalar yapılarak görülmesi ve ilgili deney parametreleri ile ilişkisinin kurulması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda deneyler 4 ayrı hız ve 2 ayrı yük koşullarını içeren senaryolarda yapılacak ve deney sonrası ölçümler ile bu etkiler ispatlanacaktır.

Bu bölümde önce triboloji bilimine ve triboloji ile ilgili temel bilgilere giriş yapılmıştır. Daha sonra bu konularda teorik bilgiler verilmiş, sürtünme ve aşınma kavramları çeşitlerine ayrılarak açıklanmıştır. Son olarak deneylerde kullanılan yatak malzemeleri hakkında ön bilgi verilmiştir. Bu ön bilgiler, daha sonraki bölümde görseller ile desteklenerek anlatılacaktır.

2.1 Tribolojiye Giriş ve Temel Kavramlar

Triboloji, rölatif hareket halindeki etkileşimli yüzeylerin aşınma, sürtünme ve yağlama konularını inceleyen bilim dalıdır. Hareketli arayüzde meydana gelen etkileşimlerin doğası ve sonuçları, sürtünme, aşınma ve yağlama davranışını kontrol eder. Bu etkileşimlerin doğasını anlamak ve arayüzey fenomeni ile ilişkili teknolojik problemleri çözmek tribolojinin özünü oluşturur. Triboloji; makine mühendisliği, malzeme bilimi, mekanik, yüzey kimyası, yüzey fiziği ve yüzey karakterizasyonu, sürtünme, aşınma, yağlama, yatak malzemeleri, yağlayıcılar gibi birçok konu hakkında çalışmaları ele alır. Yağlama sistemlerinin tasarımı ve mühendislik için çok önemli bir unsuru oluşturur.

Sürtünme ve aşınma kontrolünün önemi, ekonomik nedenler ve uzun vadeli güvenilirlik nedeniyle fazla vurgulanamaz. Tüm mekanik sistem tasarımcılarının, uygun yatak seçimi ve tüm etkileşimli yüzeyler için uygun yağlayıcılar ve malzemelerin seçimi yoluyla sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmak için uygun araçları kullanmaları önemlidir. İmalatla uğraşanların, ekipmanlarındaki istenmeyen sürtünme, aşırı aşınma ve yağlama arızasının tribolojik kökenlerini anlamaları da aynı derecede önemlidir. Tasarım ve imalatla tribolojik temellerin dikkate alınmaması, kısalmış ömür, aşırı ekipman arıza süresi ve büyük enerji harcamaları dahil olmak üzere büyük ekonomik kayıplardan sorumludur [31].

2.2 Sürtünme

Sürtünme, bir katı cisim ile bu cisme temas eden diğer bir cismin nispi hareketi veya hareketine karşı direnç olarak tanımlanır. Sürtünme kuvveti, göreceli hareket halindeki iki cisim arasındaki, cisimler arasındaki arayüze teğet olan, kuvvet yönü her zaman harekete karşı olan, korunumlu olmayan ve tüketen bir tepki kuvvetidir. Sürtünme kuvveti tarafından yapılan dış iş, iç enerji artışının arayüzde ve yakınında harcanan enerjinin toplamına eşit olmalıdır [32]. Güç kaybının başlıca nedeni olan sürtünme, kullanılabilir işi ısıya dönüştürür ve entropi üretir. Sürtünme termodinamik anlamda sönümleyicidir. Sürtünme kuvvetinin enerjisi tarafından yönlendirilen enerji tüketen süreçler, yüzey morfolojisinde ve bileşiminde geri dönüşü olmayan değişikliklere neden olur. Sürtünme kuvveti, yüzey yapışmasını takiben yüzey kopması veya yırtılması, yüzey ve yüzeye yakın deformasyon, yüzeyde oluk açma, yüzey sürme, pürüzlülük etkileşimi, film sürtünme ve aşınma çatlaması ve yağlayıcı kesme dahil olmak üzere birçok karmaşık ve çeşitli etkiden kaynaklanabilir. Sürtünme çok sayıda parametreye bağlı olabilir [33].

Kaymalı yataklar, çalışma şartları esas alındığında beraber çalıştığı mil ve destek yatağı arasında sürtünmeye maruz kalır. Uzun süreli bir kullanım sonrası bu sürtünmeler aşınmaya ve ısı oluşumuna sebep olmaktadır. Bu sebeple kaymalı yataklar hareketin sınırlı olduğu durumlarda kullanılmalıdır.

Kaymalı yataklar kuru ortamlarda çalıştığı gibi, aralarında bir yağ filmi oluşturularak da çalışabilir. Kaymalı yatağın beraber çalıştığı makine elemanlarının arasındaki ısınma, sürtünme ve aşınma değerlerini azaltmak amacıyla yağlama yapılabilir. İki çalışan yüzey arasına uygulanan her madde yağlayıcı olarak kabul edilebilir.

Yağlama için Stribeck eğrisi referans alındığında, sürtünme kuru olarak sınıflandırılmıştır; burada yüzeyler, araya giren yağlayıcılar olmadan kayarak pürüzler arasında doğrudan temasa izin verir. Sürtünme kuvveti kuru sürtünme için en büyüktür ve bu sırayla sınır yağlama, karışık film yağlama ve hidrodinamik yağlama ile azalır. Da Vinci ve Coulomb'a dayanan tarihi klasik modeller, sürtünmeyi görünen temas alanından bağımsız ve normal kuvvetle orantılı bulmuştur [34].

Birbirine temas eden parçaların temas yüzeylerindeki hareketlere karşı oluşan ve bu hareketlere ters yöndeki direnç kuvveti, sürtünme kuvveti olarak tanımlanabilir. Bu büyüklük sürtünen yüzeyin malzemesine ve yüzey yapısına göre değişirken, temas

alanına bağılı değişmemektedir. Bu fenomen ilk etapta statik yük kabulüne göre yapılmıştır.

Coulomb 1788'de, daha önceden geliştirilen sürtünme formüllerinin yeterli olmadığını ve cismin hareketli olup olmadığına göre iki farklı sürtünme kuvvetinin olduğunu belirtmiştir. Hareketsiz cisimler için sürtünme kuvveti statik sürtünme kuvvetini (F_s) ve hareketli cisimler için sürtünme kuvvetini de (F_k) kinetik veya dinamik sürtünme kuvveti olarak tanımlamıştır [35].

Coulomb statik ve dinamik sürtünme formülleri aşağıda gösterilmiştir:

$$F_s = \mu_s N \quad (2.1)$$

$$F_s = \mu_k N \quad (2.2)$$

Sürtünme, etki altındaki cisimler arasında yağlayıcı madde olup üç grupta incelenmektedir:

2.2.1 Kuru Sürtünme

Kuru sürtünme, nispi hareket halindeki yağlanmamış iki parçanın temas ettikleri yüzeyde sürtünme durumu olarak tanımlanabilir. Yüzeyler birbirini üzerinde pürüzleri temas ederek kayar ve aralarında üçüncü bir malzeme bulunmaz. Coulomb kanununa göre nispi hareket yapan ve F_N normal kuvveti etkisi altında olan iki cismin sürtünme kuvveti, aşağıdaki bağıntı ile bulunur:

$$F_s = \mu F_N \quad (2.3)$$

Coulomb sürtünme değeri 0 – 1 arasındadır ve sürtünme kuvvetinin yönü, yüzeyin sürtünme yokluğunda yaşayacağı harekete zıttır. Statik durumda yüzeyler arasındaki hareketi önlemek için sürtünme kuvveti, harekete neden olan net kuvveti dengeler. Bu durum için sürtünme kuvvetinin tahmini bir değerini bulmak yerine, Coulomb yaklaşımı, kuvvet için üzerinde hareketin başlayacağı bir eşik değeri elde ederek yaklaşım sağlar. Bu maksimum kuvvet, çekme olarak bilinir. Sürtünme kuvveti her zaman iki yüzey arasındaki harekete veya potansiyel harekete zıt yönde uygulanır. Örneğin, buzun üzerinde kayan bir taş, taşı yavaşlatan kinetik bir kuvvete maruz kalmaktadır. İvmelenen bir arabanın tahrik tekerlekleri, ileriye dönük bir sürtünme kuvvetine maruz kalması da örnek olarak gösterilebilir. Sürtünme kuvveti olmasaydı tekerlekler döner ve kauçuk kaldırım boyunca geriye doğru kayardı. Karşı çıktıkları aracın hareket yönü değil; lastik ve yol arasındaki kayma yönüdür [36].

2.2.2 Sınır Sürtünmesi

Yüzeyler arasında sıvı sürtünmesinin tam olarak oluşturulmadığında, aralarında film tabakası olmamaktadır. Sürtünen yüzeylerin arasında yağlayıcı maddelerin girişim yaptığı durumda yüzey artık kuru sürtünme etkisi altında değildir. Bu durum, sınır sürtünme (yarı sıvı sürtünme) olarak tanımlanır. Yüzeyler arasındaki yağlayıcı sıvı, yüzeylerdeki pürüzlerin sürtünmesine engel olamamaktadır [37].

2.2.3 Sıvı Sürtünme

Sıvı sürtünme, birbirine karşı rölatif hareket içerisinde olan malzemelerin arasında ince bir yağ filmi oluşturulduğunda görülen sürtünme tipidir. Bu sürtünme tipi, yağlayıcı sıvının tabakalarında görülür. Madeni yüzeyler ile temasta bulunan yağ tabakaları, adsorbsiyon ile yüzeye yapışarak bu sürtünme mekanizmasını oluşturur [38].

2.3 Aşınma

Tribolojinin ana konularından olan aşınma; bir yüzeyden malzeme kaybı, diğer yüzeye malzeme transferi veya tek bir yüzey üzerindeki hareketi olarak tanımlanabilir. Aşınma, katı bir yüzeyde, genellikle o yüzey ile temas eden bir madde veya maddeler arasındaki nispi hareket nedeniyle ilerleyen malzeme kaybını içeren hasardır.

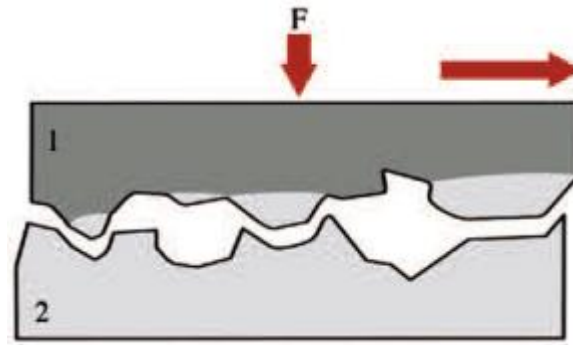
Aşınma bir malzeme özelliğidir demek yerine, bir sistem yanıtı olduğundan bahsetmek daha mümkündür. Bir malzemedeki aşınma, karşılık gelen malzeme, temas basıncı, kayma hızı, temas şekli, süspansiyon sertliği, çevre ve yağlayıcı gibi temas koşullarına bağlıdır. Aşınma oranı, sabit hız ve yük altında tekrarlanan temas süresi boyunca değişmektedir. Başlangıçtaki kararsız durumda genellikle yüksek iken kararlı duruma geçtiğinde nispeten daha düşük bir değere sahiptir. Aşınma, erken aşamada yüzey tanelerindeki kırılgan mikro kırıklardan, sonraki aşamada ise tribokimyasal etkileşim sebebiyle olmaktadır [39].

Yağlama, malzemeler arasındaki yapışmayı azaltarak aşınmayı düşürür. Fakat yağlama, sürtünmeyi azalttığı için abrasiv aşınmayı artırmaktadır. Yapışkan aşınma ve transfer tabakası, aşınmış yüzey ile havadaki transfer tabakası arasındaki sürtünme düşük olduğunda müteakip yapışkan aşınmasını azaltır. Erken oluşan korozif aşınma, aşınmış yüzeyler daha pürüzsüz bir hale geldiğinde daha sonraki korozif aşınmayı azalmaktadır. Bu olaylar düşünüldüğünde aşınmanın komplike ve birçok parametreye duyarlı bir durum olduğu anlaşılır.

Aşınma fenomeni farklı mekanizmalar şeklinde gerçekleşebilir. Aşınma mekanizmaları, daha geniş çapta şu şekilde sınıflandırılabilir:

2.3.1 Adhesiv Aşınma

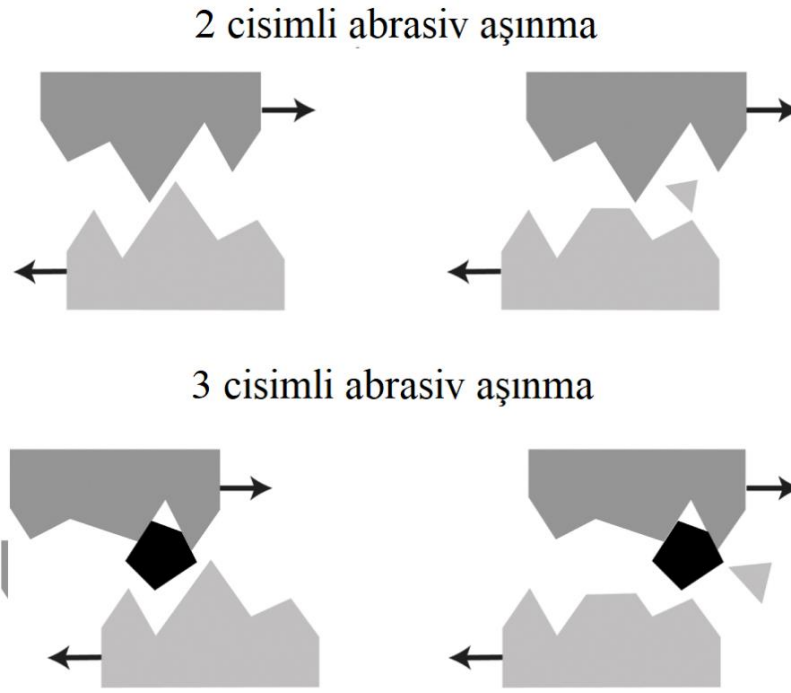
Birbirleri ile kayma sürtünmesi halindeki yüzeylerde soğuk kaynak ya da bölgesel bağlanmalar sonucu, bir yüzeyden diğer yüzeye malzeme transferi şeklinde ve daha sonra kayma hareketi ile malzeme kaybı olmasıyla adhesiv aşınma gerçekleşir. Birbirleriyle etkileşime girmiş yüzey pürüzleri plastik deformasyona uğrayarak bu aşınma mekanizması ile lokalize alanlarda birbirleriyle birleşebilir. Temas yüzeyinin pürüzlülükleri üzerindeki basınç, plastik deformasyona yol açacak kadar yükselir ise küçük pürüz tepelerine yüksek basınç biner. Bu noktalardaki gerilme değeri akma dayanımını aşınca plastik deformasyon etkisiyle pürüzler birbirini çizer ve kaynaklaşma başlar. Kayma hareketi esnasında bu noktalar koparak yenir ve aşınmaya neden olur. Adhesiv aşınmaya ait bir görsel Şekil 2.1’de sunulmuştur.



Şekil 2.1 Adhesiv aşınma [40].

2.3.2 Abrasiv Aşınma

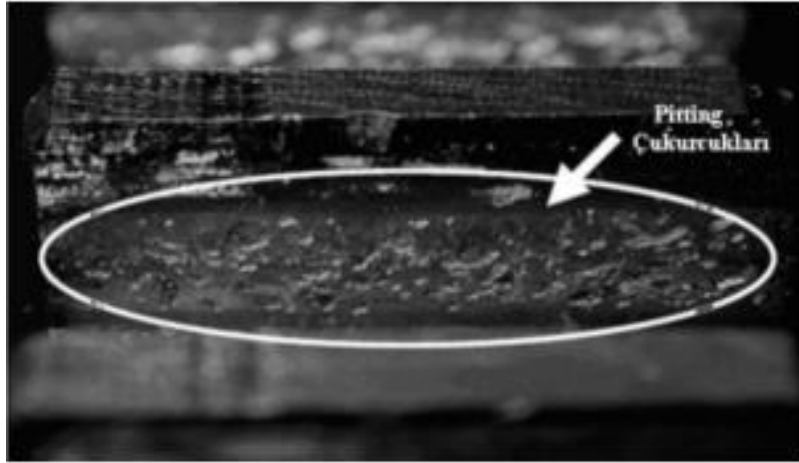
Yırtılma aşınması ya da çizilme aşınması olarak da bilinen bu aşınma türünde eş çalışan malzeme çiftinde hızlı ve büyük oranda hasar oluşumu görmek mümkündür. Malzemedeki yüzeylerin kendisinden daha sert olan parçacıklarla basınç altında etkileşimiyle yüzeylerden parça kaldırılması şeklinde gerçekleşir. [41] Çalışma koşulları nedeniyle malzemenin arasına giren toz parçacıklarının oluşturduğu aşınma da bu aşınmaya örnektir. Aşınma durumu, malzeme çifti arasındaki sertlik farkından meydana gelen bir aşınma var ise iki cisimli aşınma, ek aşındırıcı partiküller de aşınmaya etki ediyorsa da üç cisimli aşınma ismini alır. Şekil 2.2’de abrasiv aşınmaya ait bir görsel sunulmuştur.



Şekil 2.2 Abrasiv aşınma [42].

2.3.3 Yorulma (Pitting) Aşınması

Birbiriyle devamlı temas halinde olan yüzeylerde tekrarlı yüklere maruz kalma ile sıklıkla görülen bir aşınma türüdür. Dişli çarklar, rulmanlar ve kam mekanizmalarında bu aşınma türü sıklıkla görülür. Özellikle dişli çarklarda temas yüzeylerinde çukurcukların oluşması ile yorulma aşınması yaygın görülür. Diş dibinde kırılma ve temas yüzeyindeki pitting aşınması dişlilerin birbirini kavramaya başlaması sonucu tekrarlı yükler sonucu dişlerde ortaya çıkmaktadır. Temas alanının küçük olması ile bu bölgelerde Hertz basınçları oluşur. Böylece yüzeyin hemen altında kayma gerilmeleri meydana gelir. Bu gerilme değerlerinin maksimum olduğu noktada plastik deformasyon oluşur. Bu deformasyonun yüzeyde ilerlemesiyle pitting de denilen çukurcuklar meydana gelir. Şekil 2.3'te yorulma aşınmasına örnek bir görsel sunulmuştur.



Şekil 2.3 Yorulma (pitting) aşınması [43].

2.3.4 Korozyif Aşınma

Aşınmış yüzeyler korozyif etkilere de maruz kalırsa bu aşınma türü ile karşılaşılır. Kimyasal korozyon tek başına oluşabileceği gibi diğer aşınma türleriyle beraber de görülebilir. Temas yüzeyinde oluşturulan kimyasal reaksiyonlar yüzey aşınmasına engel olmaktadır. Ama bu yüzey kırılgan ve arayüzey bağı da zayıf ise sürtünme esnasında yüzey filmleri çatlar ve yüzeyden ayrılarak aşınma hızını artırır [44].

2.3.5 Erozyon Aşınması

Bu aşınma, malzeme yüzeyindeki gaz veya sıvı ortamdaki rölatif hızın çok yüksek olduğu durumlarda görülür. Sıvı ve gazlar temas sınır yüzeylerine çarparak yüzeyden parça koparır ve aşınma hızlanır. Bu aşınma mekanizması, aşındırıcı partiküllerin şekline, büyüklüğüne, hızına ve çarpma senaryosuna göre değişmektedir. Pompa, pervane, fan ve borularda görülebilmektedir [45].

2.4 Çalışmada Kullanılan Yatak Malzemeleri

Polimer malzemeler, monomer adı verilen yapıtaşlarının kimyasal bağ ile bağlanarak oluşan yüksek molekül ağırlığına sahip maddelerdir. Plastikler, kauçuklar ve fiberler olmak üzere fiziksel ve mekanik özelliklerine göre üç gruba ayrılırlar. Isıl özellikleri, kristal yapılarına göre farklılık göstermektedir. Tam kristal yapılar normal koşullarda sert iken, erime sıcaklığına geldiğinde kristal yapının yıkılması ile sertliğini koruyamayıp erime gösterir. Amorf yapılar sertliğini düşük sıcaklıkta da korur fakat kırılğan bir yapıdadır. Polimer malzemeler yalıtkan olup, şeffaf yapılarından ötürü ışığı çok fazla geçirmemektedir. Mekanik özellikler ele alındığında da kristal yapılar sert ve kırılğan yapıdayken, amorf yapılar tok ve yumuşaktır.

Bu çalışmada polimer malzeme olan polioksimetilen (POM) ve ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) malzemeler üzerinde deneyler yapılmıştır. POM malzeme, yüksek sertlik ve mukavemete sahip bir termoplastiktir. Bunun yanında sahip olduğu yüksek tokluk, darbe dayanımı, mükemmel işlenebilirlik, iyi sürtünme direnci, düşük nem emilimi gibi özelliklere sahiptir. Endüstriyel alanlarda; dişli, yay, zincir, vida gibi parçalarda kullanılabilir. Genel kullanım alanına kayar uygulamalar, yatak burçları ve makaralar, su ile temas eden bileşenler örnek verilebilir.

UHMWPE malzeme, düşük yoğunluğa sahip ($0,93 - 0,95 \text{ g/cm}^3$) ve yüksek molekül ağırlığı olan (2 – 6 milyon arasında değişen) termoplastik bir malzemedir. Çeliğe kıyasla yaklaşık 8-15 kat daha fazla mukavemet/ağırlık oranına sahip olan UHMWPE, korozyon direnci de yüksek olduğundan kimyasal direnç gerektiren birçok endüstriyel uygulama için kullanımı yaygın bir plastik haline gelmiştir. Sahip olduğu bu yüksek mekanik özellikler, sürtünme katsayısının düşük olması, yüksek aşınma direnci gibi özellikler sayesinde otomotiv parçaları, dişliler, fiber optik kablolar, yüksek hızlı konveyörler, aşınma şeritleri gibi parçalarda UHMWPE malzemeler tercih edilebilmektedir.

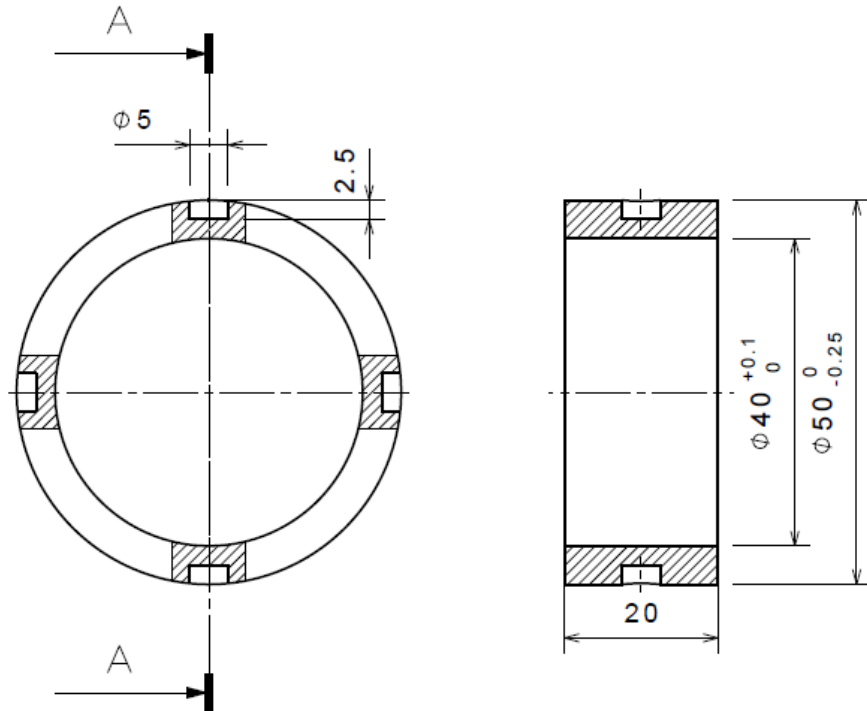
3

MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, deneyde kullanılan kaymalı yatak numuneleri gösterilmiştir. Bu numunelerin ölçüleri teknik resim ile açıklanmıştır. Daha sonra bu numunelerle yapılan kaymalı yatak test düzeneği gösterilerek deneyler tarif edilmiştir. Deney sonrasında yapılan yüzey pürüzlülük ve SEM ölçümleri de bir sonraki başlıkta belirtilmiştir. Önceden belirlenmiş deney senaryoları son başlıkta açıklanmıştır.

3.1 Deney Numuneleri

Deneylerde iki farklı yüzey hassasiyetinde üretilmiş (birbirlerine kıyasla iyi ve kaba yüzey kalitesinde) UHMWPE ve POM malzemeden oluşan yatak numuneleri kullanılmıştır. Malzemeler aynı tolerans ve ölçülerde olacak şekilde Temiz Serigrafi A.Ş firmasının desteği ile üretilmiştir. Yatak ölçüleri Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Yatak ölçüleri

Tasarlanan yataklar için yatak boşluğu hesapları yapılarak teknik resimdeki ölçülere göre parçalar imal edilmiştir. Polimer yataklar için kullanılan aşağıdaki formüller ile hesaplamalar yapılmıştır.

$$\Delta l = 6. s. (\varepsilon_f + \alpha. \Delta t^2) \quad (3.1)$$

$$l_{min} = 0,004. d \quad (3.2)$$

$$l = l_{min} + \Delta l = 0,004. d + 6. s. (\varepsilon_f + \alpha. \Delta t^2) \quad (3.3)$$

Aşağıda, deney yapılan numuneler gösterilmiştir. Şekil 3.2'deki beyaz malzemeler POM, yeşil malzemeler ise UHMWPE yataklardır.

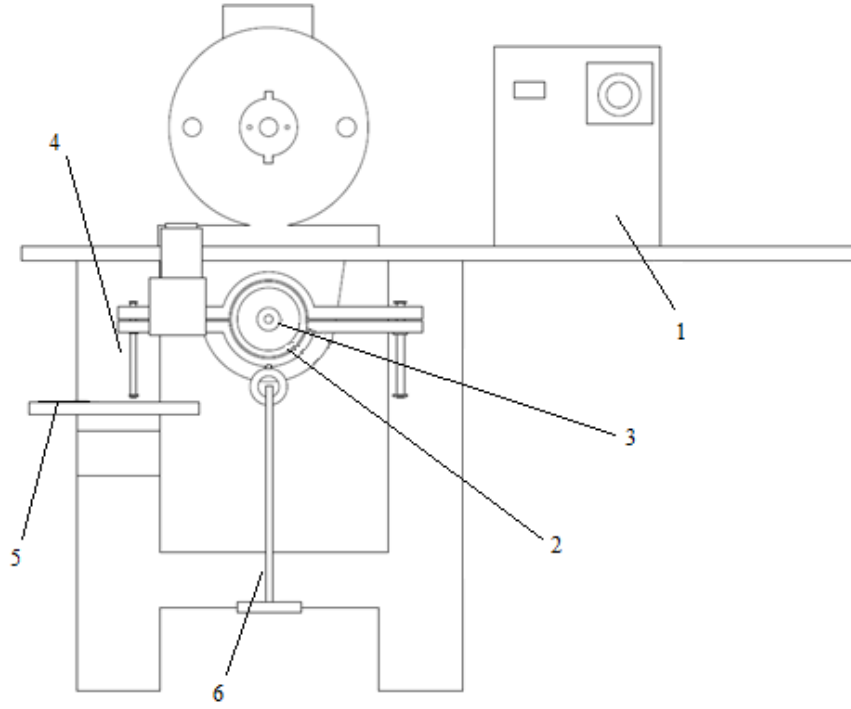


Şekil 3.2 Deney numuneleri

3.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar

3.2.1 Radyal Kaymalı Yatak Test Düzeneği

Deneyler, Yıldız Teknik Üniversitesi Konstrüksiyon Anabilim Dalı laboratuvarında bulunan radyal kaymalı yatak test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deney cihazı, 2.2 kW güç ve 1500 d/dk maksimum devre sahiptir. Yük askısı üzerine deney senaryolarına uygun olacak şekilde 10N ve 20N yükler asılmıştır. Yük askısına vida sabitlenerek temas edeceği yere bir hassas tartı koyularak kuvvet ölçümleri her ilgili zaman için yapılmıştır. Yatak üzerinde meydana gelen sürtünme kuvveti bu şekilde hesaplanmıştır. Tüm deneyler kuru ortamda yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.3'te gösterilmiştir:



Şekil 3.3 Kaymalı yatak deney düzeneği

1. Motor, 2. Kaymalı yatak numunesi, 3. Mil 4. Vida, 5. Hassas tartı, 6. Yük Asacağı.

Mil malzemesi olarak SAE 1050 çeliği seçilmiştir. Belirlenen senaryolara göre kaymalı yatak deneyleri gerçekleştirmeden önce mil numunesinin yüzey pürüzlülüğü değeri 0.582 μm ölçülmüştür. Kaymalı yatak deneylerinden sonra mil malzemesi üzerinde aşınma gözlenmemiştir.

3.2.2 Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

Tüm numuneler için deney öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Mahr yüzey pürüzlülük cihazı ile yapılmıştır. Ölçümler yapılmadan önce cihazın kalibrasyonu ve prob değeri düzeltmeleri yapılmıştır. Ölçüler birden fazla yapılarak daha doğru değerler elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri DIN EN ISO 4287 standardına göre yapılmıştır. Ölçüm cihazı Şekil 3.4’te gösterilmiştir:



Şekil 3.4 Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı

3.2.3 SEM Görüntüleme

Numunelerin uygun senaryolara göre deneyleri tamamlandıktan sonra SEM cihazı ile görüntüleri alınmıştır. Ölçümler, Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Bu ölçüm için EVO LS10 ZEISS adlı SEM cihazı kullanılmıştır. Numunelerin 1000 kat büyütülerek görüntüleri elde edilmiştir. Ölçüm cihazının resmi Şekil 3.5'te mevcuttur.



Şekil 3.5 SEM görüntüleme cihazı

3.3 Deney Senaryoları

UHMWPE ve POM yatak malzemelerinin her yüzey kalitesindeki numunesi için deneylerde 2 ayrı yük ve 4 ayrı kayma hızı belirlenmiştir. Deneylerde 10N ve 20N’luk yükler kullanılmış; 0.5 m/s, 1 m/s, 1.5 m/s ve 2 m/s olacak şekilde kayma hızlarında çalışılmıştır. Böylece 8 senaryo elde edilmiş olup, her bir malzeme için 2 ayrı yüzey kalitesi olduğundan 16, toplam 2 malzeme için 32 senaryo mevcuttur. 500m, 1000m, 1500 m ve 2000 m için sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri tek tek ölçülmüştür. Deneylerden önce ve sonra numunelerin ağırlıkları ölçülerek ağırlık kaybı ve özgül aşınma miktarı değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca her numune için deney öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değerleri de ölçülmüştür.

Yatak numunelerinin deneyler öncesi ve sonrası ölçüm ve analiz faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi için Yıldız Teknik Üniversitesi merkez laboratuvarının tecrübe ve imkanlarından da faydalanılmıştır.

4

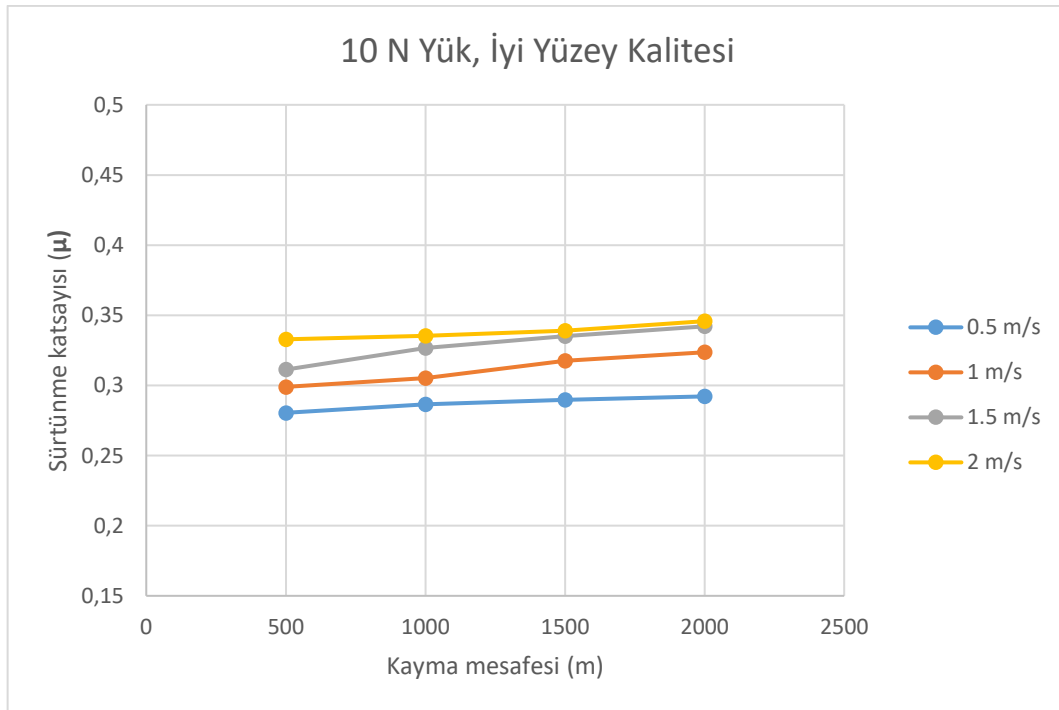
DENEY VERİLERİ

Yapılan kaymalı yatak testleri sonrasında tüm veriler; sürtünme katsayısı, sıcaklık, yüzey pürüzlülüğü, ağırlık kaybı ve özgül aşınma miktarı parametreleri özelinde ayrı ayrı başlıklar halinde sunulmuştur. Grafik ve tablolar halinde sunulan bu verilerin hepsi incelenmiş ve birbiriyle kıyaslanmıştır. Bu verilerin ardından deney sonrası SEM görüntüleri de tüm senaryolar için verilmiş ve yorumlanmıştır. Daha sonra tüm deney verileri sentezlenerek karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir.

4.1 Sürtünme Katsayısı Değerleri

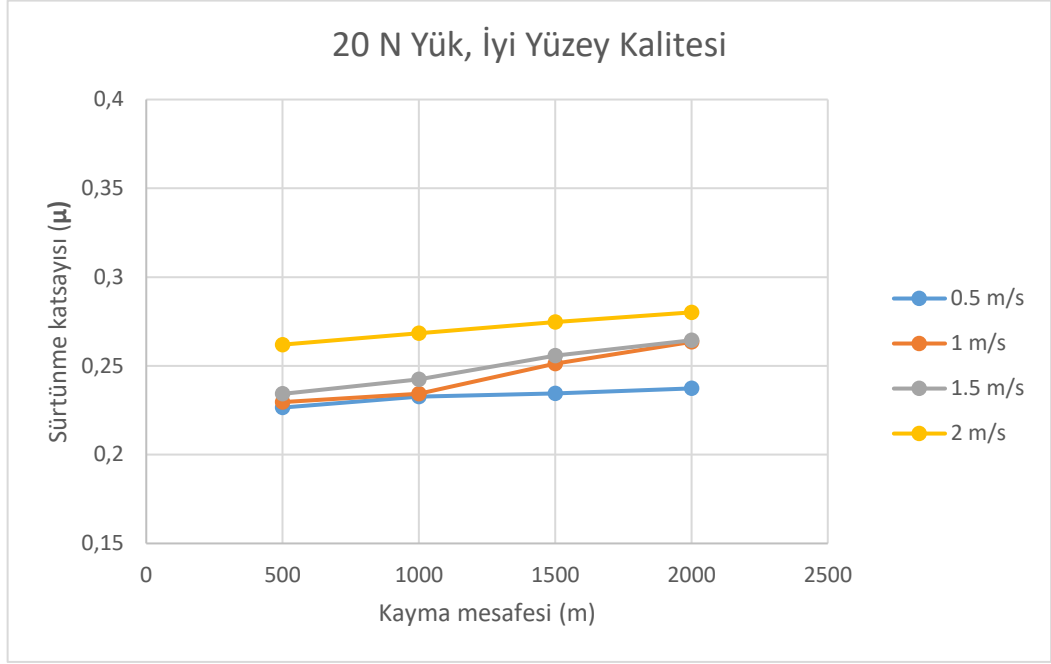
Deney sonuçlarından elde edilen verilerle sürtünme katsayısının kayma mesafesi boyunca değişiminin grafiği çizilmiştir. Grafiği elde etmek için 500 m, 1000 m, 1500 m ve 2000m kayma mesafeleri için sürtünme katsayıları verileri kullanılmıştır.

İyi yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numunenin 10N yük altındaki sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği, Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (iyi yüzey kalitesi, UHMWPE, 10N)

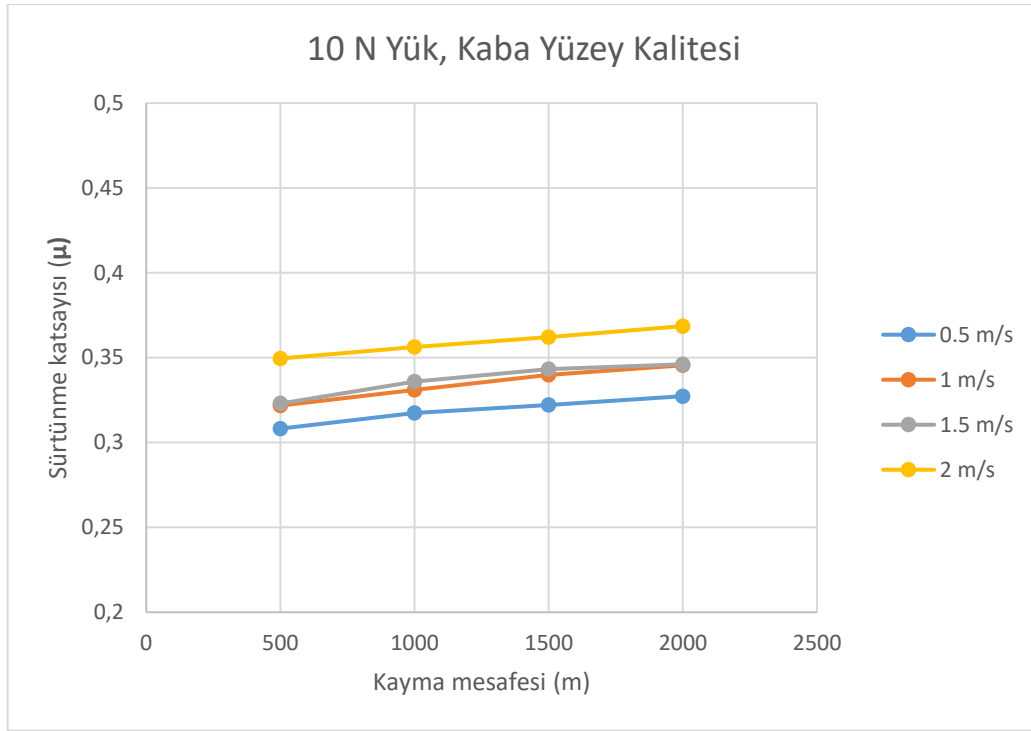
İyi yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numunenin 20N yük altındaki sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği, Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 Sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (iyi yüzey kalitesi, UHMWPE, 20N)

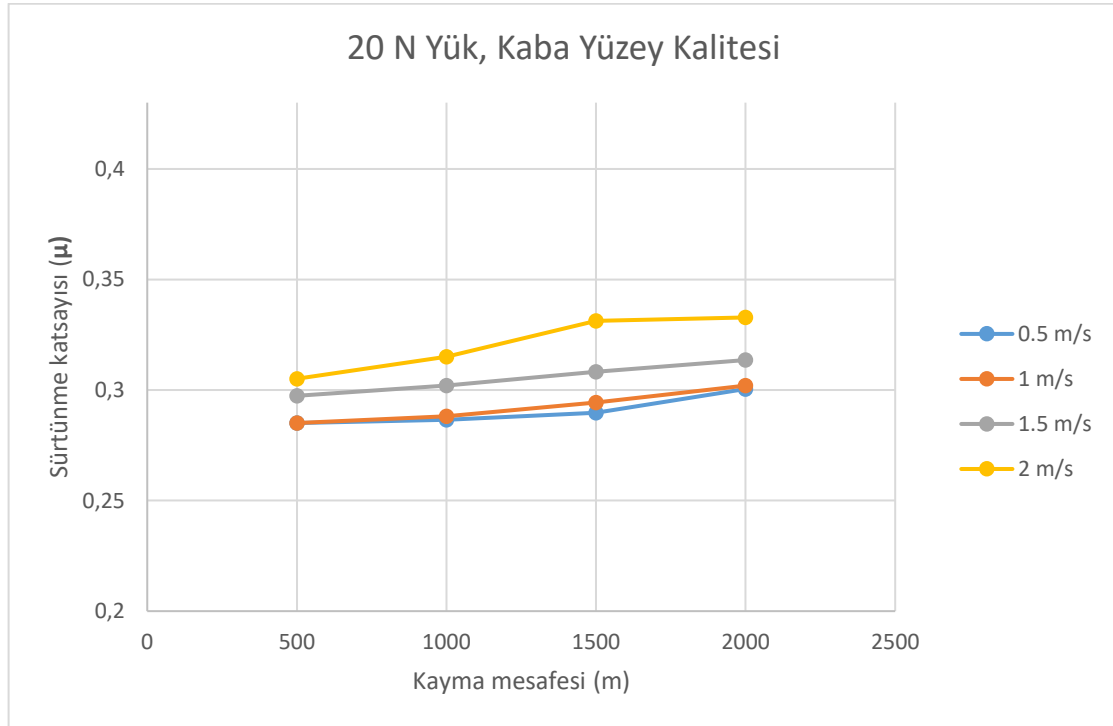
İyi yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE için 10N yük altında artan kayma hızıyla beraber sürtünme katsayısı değerlerinde % 5 – 10’luk bir artış görülmüştür. Bu değer 20N için %6 – 12 civarındadır. Her iki yük koşulu için de kayma mesafelerine göre sürtünme katsayısındaki artış 0.5 m/s hızlar için yaklaşık %4.5 bulunurken, diğer hızlar için %7 – 11 civarlarına ulaşmıştır.

Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numunenin 10N yük altındaki sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği, Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3 Sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (kaba yüzey kalitesi, UHMWPE, 10N)

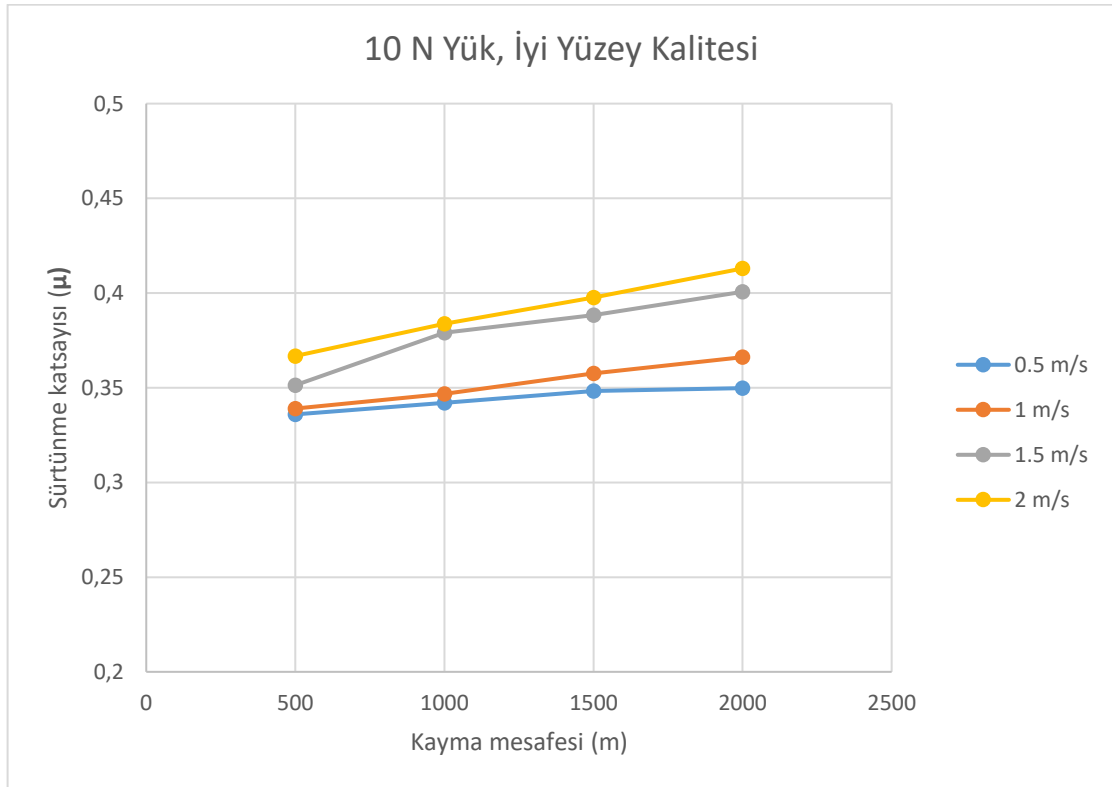
Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numunenin 20N yük altındaki sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği, Şekil 4.4’te verilmiştir.



Şekil 4.4 Sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (kaba yüzey kalitesi, UHMWPE, 20N)

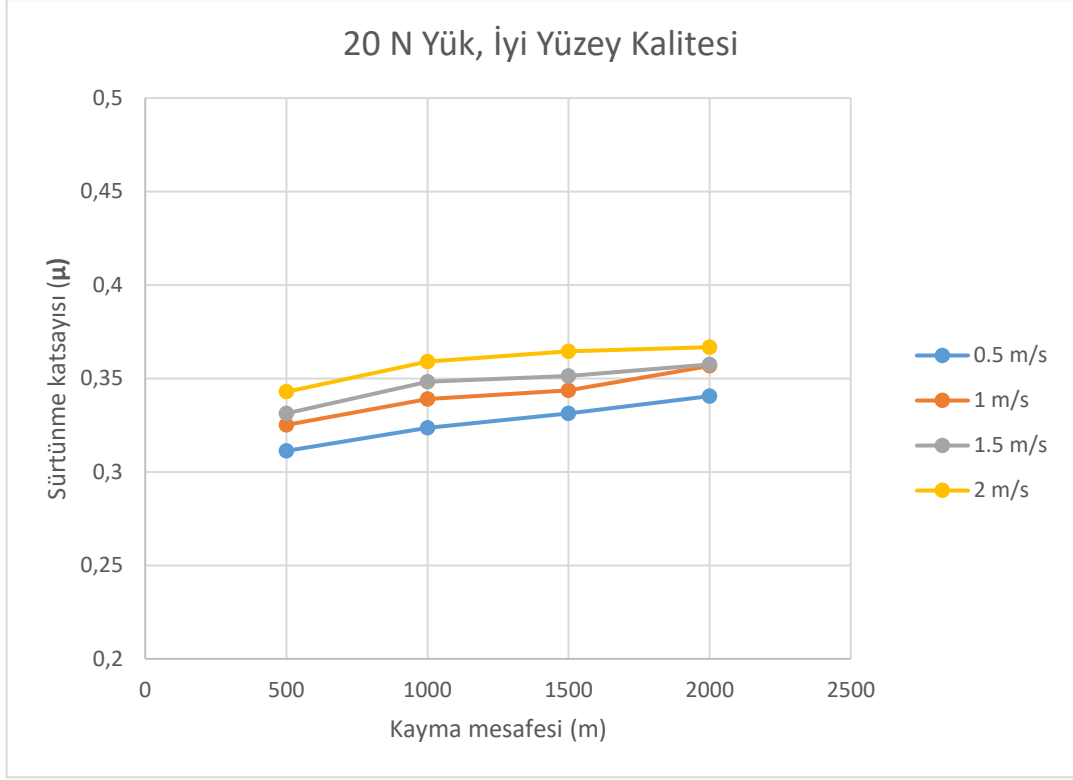
Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE için 10N yük altında artan kayma hızıyla beraber sürtünme katsayısı değerlerinde % 5 – 6’lık bir artış görülmüştür. Bu değer 20N için %4 – 6 civarındadır. 10N yük koşulu için de kayma mesafelerine göre sürtünme katsayısındaki artış %5 – 6 civarlarında bulunurken, 20N için bu artış %4 – 9 civarlarındadır.

İyi yüzey kalitesinde işlenmiş POM numunenin 10N yük altındaki sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği, Şekil 4.5’te verilmiştir.



Şekil 4.5 Sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (iyi yüzey kalitesi, POM, 10N)

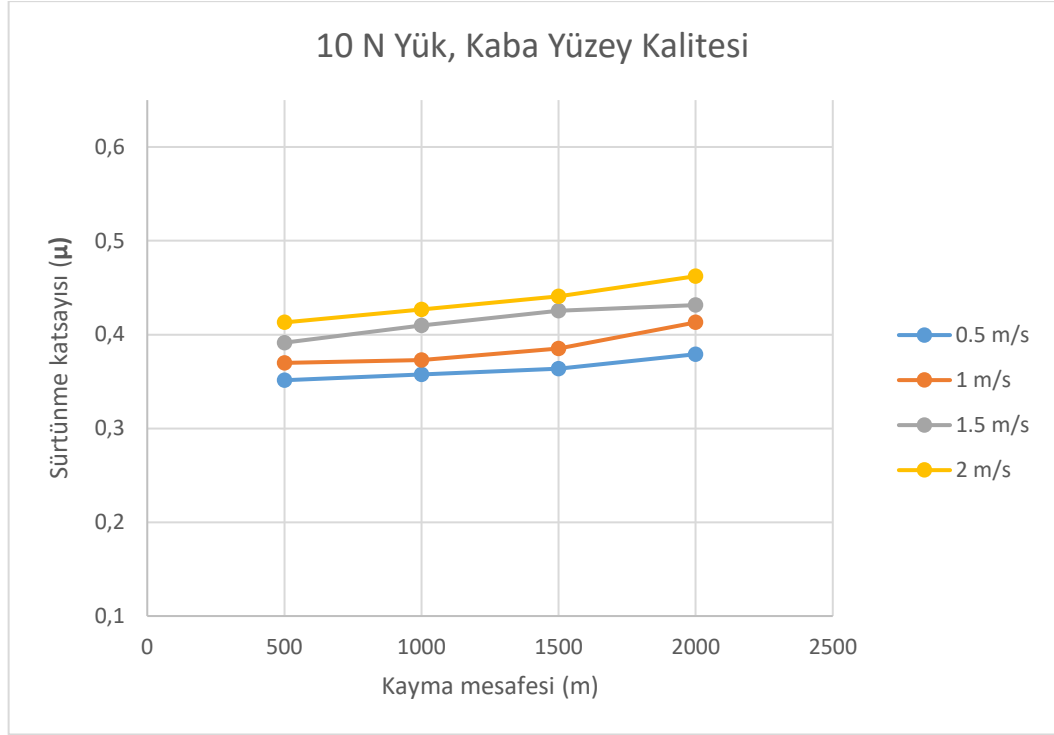
İyi yüzey kalitesinde işlenmiş POM numunenin 20N yük altındaki sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği, Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6 Sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (iyi yüzey kalitesi, POM, 20N)

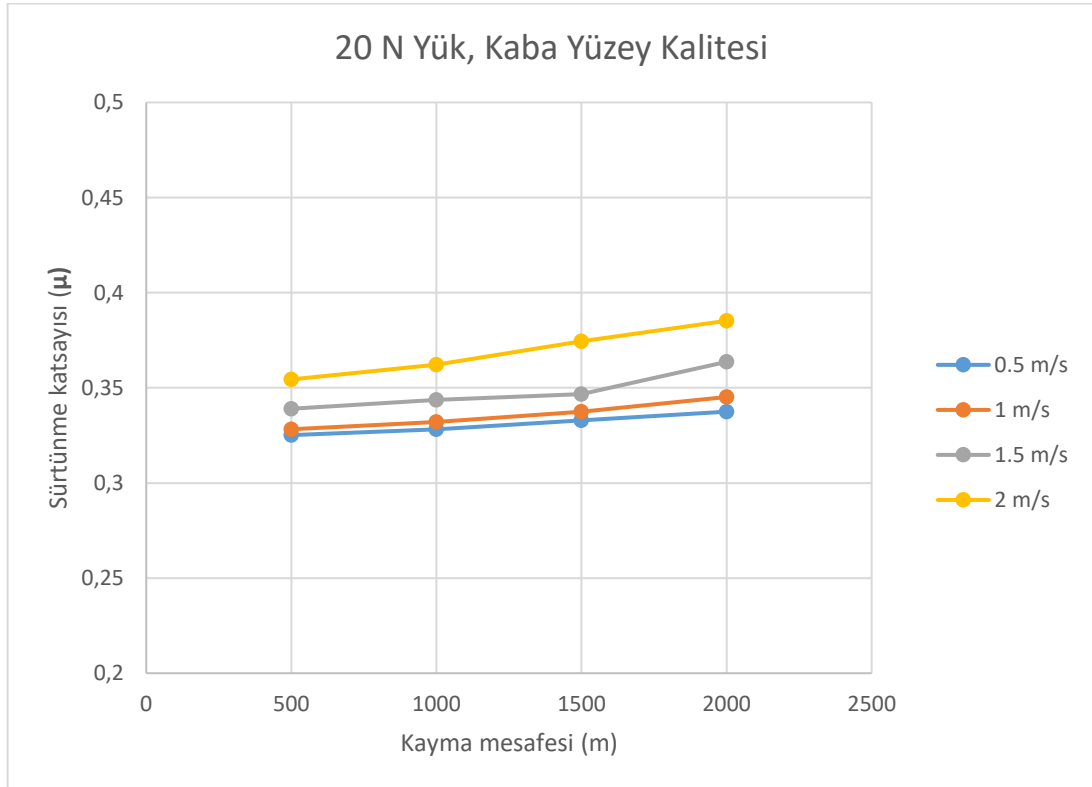
İyi yüzey kalitesinde işlenmiş POM için 10N yük altında artan kayma hızıyla beraber sürtünme katsayısı değerlerinde %4 – 9 artış görülmüştür. Bu değer 20N için % 3 – 5 civarlarındadır. 10N yük altında artan kayma mesafesine göre sürtünme katsayısında % 3 – 12’lik artış görülmüştür. Bu değer 20N için %7 – 9 civarındadır.

Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş POM numunenin 10N yük altındaki sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği, Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7 Sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (kaba yüzey kalitesi, POM, 10N)

Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş POM numunenin 20N yük altındaki sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği, Şekil 4.8’de verilmiştir.



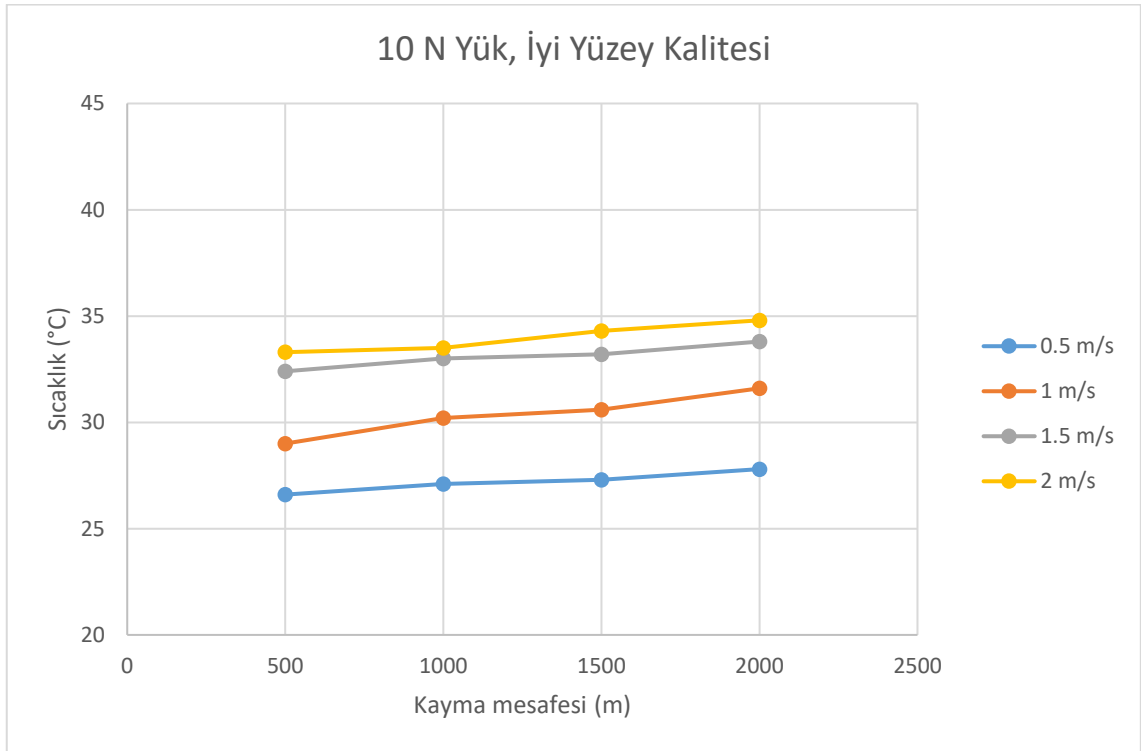
Şekil 4.8 Sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (kaba yüzey kalitesi, POM, 20N)

Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş POM için 10N yük altında artan kayma hızıyla beraber sürtünme katsayısı değerlerinde %4.5 – 8 artış görülmüştür. Bu değer 20N için % 2 – 6 civarlarındadır. 10N yük altında artan kayma mesafesine göre sürtünme katsayısında % 8 – 12’lik artış görülmüştür. Bu değer 20N için %3.5 – 9 civarındadır.

4.2 Sıcaklık Değişimi

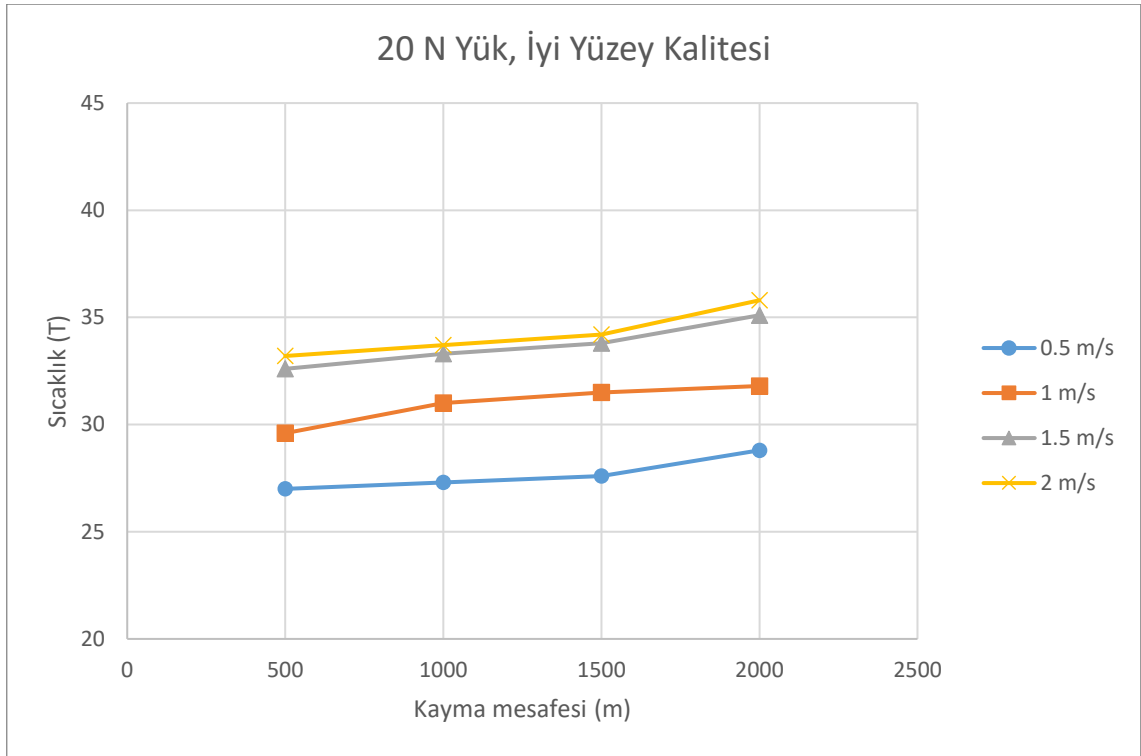
Deney sonuçlarından elde edilen verilerle sıcaklık değerlerinin kayma mesafesi boyunca değişiminin grafiği çizilmiştir. Grafiği elde etmek için 500 m, 1000 m, 1500 m ve 2000m kayma mesafeleri için sıcaklık verileri kullanılmıştır.

İyi yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numunenin 10N yük altındaki sıcaklığın kayma mesafesine göre grafiği, Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9 Sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (iyi yüzey kalitesi, UHMWPE, 10N)

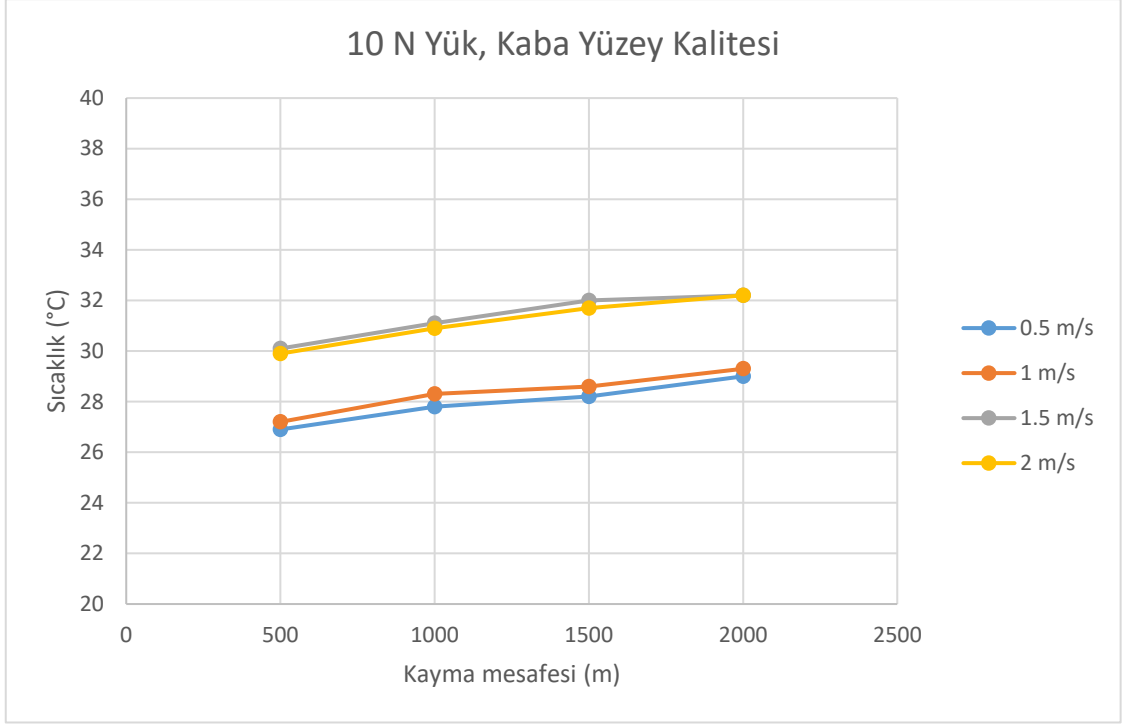
İyi yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numunenin 20N yük altındaki sıcaklığın kayma mesafesine göre grafiği, Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.10 Sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (iyi yüzey kalitesi, UHMWPE, 20N)

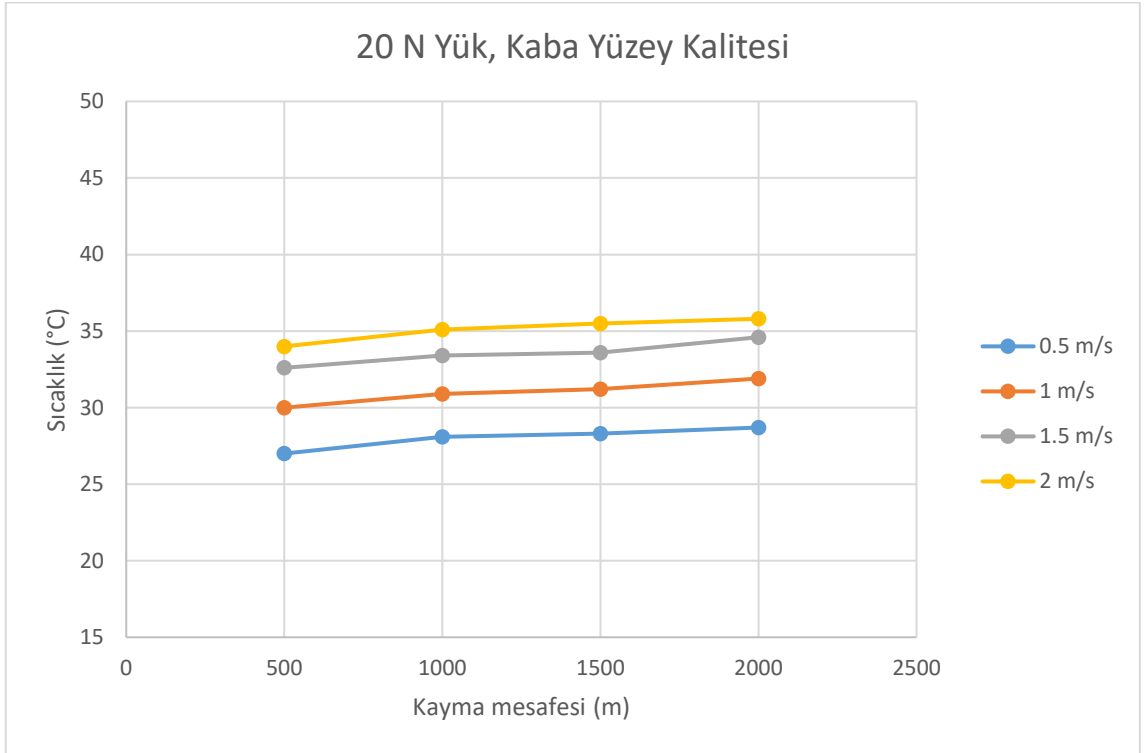
İyi yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numunelerin sıcaklığı hem kayma mesafesi hem de kayma hızı arttıķça yükselmiştir. 10N için kayma hızına göre sıcaklık artışı %3 – 14 civarındayken, bu değer 20N için %2 – 10 civarındadır. Kayma mesafesine göre sıcaklık artışı 10N için %4.5 – 8 civarı, 20N için %6 – 8 civarında bulunmuştur.

Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numunenin 10N yük altındaki sıcaklığın kayma mesafesine göre grafiği, Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11 Sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (kaba yüzey kalitesi, UHMWPE, 10N)

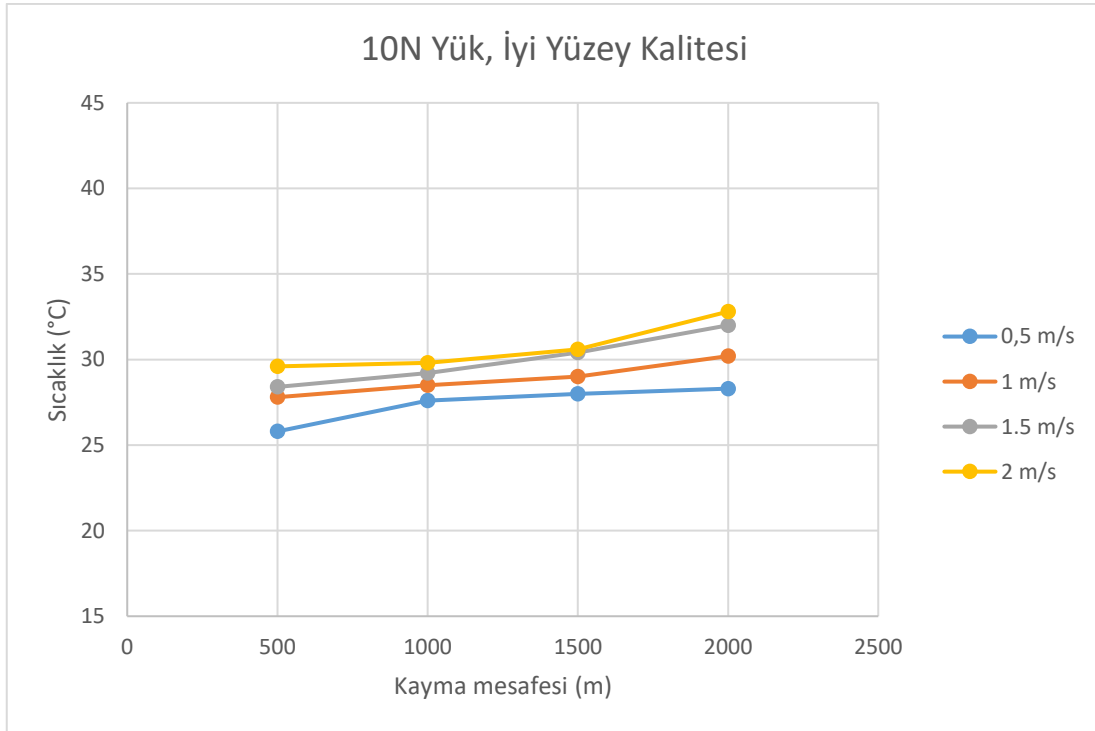
Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numunenin 20N yük altındaki sıcaklığın kayma mesafesine göre grafiği, Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12 Sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (kaba yüzey kalitesi, UHMWPE, 20N)

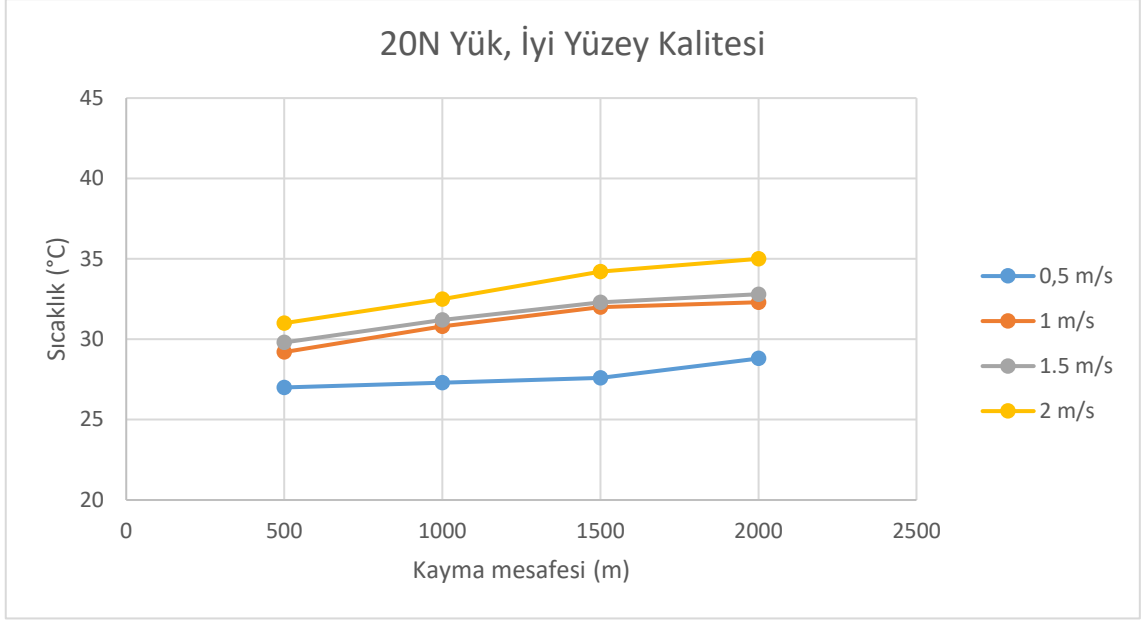
Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numunelerin sıcaklığı hem kayma mesafesi hem de kayma hızı arttıkça yükselmiştir. 10N için kayma hızına göre sıcaklık 0.5 – 1 m/s ve 1.5 – 2 m/s hızlar için birbirine yakın çıkmıştır. 1 ile 1.5 m/s arasındaki artış %10 civarı hesaplanmıştır. 20N için kayma hızındaki artışa göre sıcaklık artışı değerleri %4 – 11 civarında bulunmuştur. Kayma mesafesine göre sıcaklık artışı 10N için %7 – 8 civarı, 20N için %6 – 8 civarında bulunmuştur.

İyi yüzey kalitesinde işlenmiş POM numunenin 10N yük altındaki sıcaklığın kayma mesafesine göre grafiği, Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.13 Sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (iyi yüzey kalitesi, POM, 10N)

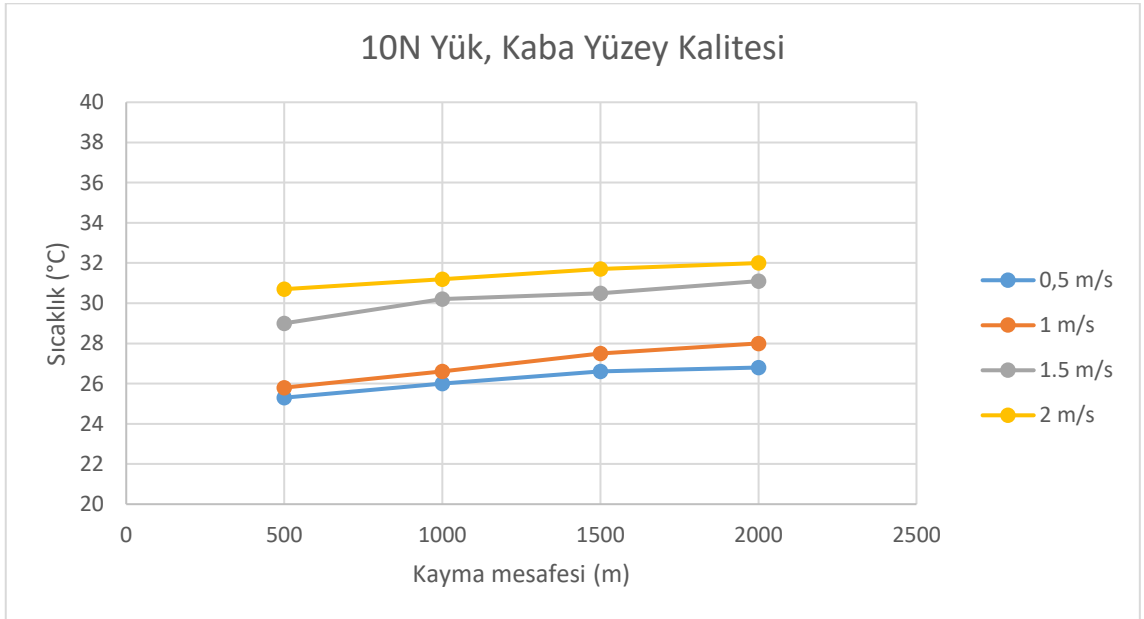
İyi yüzey kalitesinde işlenmiş POM numunenin 20N yük altındaki sıcaklığın kayma mesafesine göre grafiği, Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14 Sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (iyi yüzey kalitesi, POM, 20N)

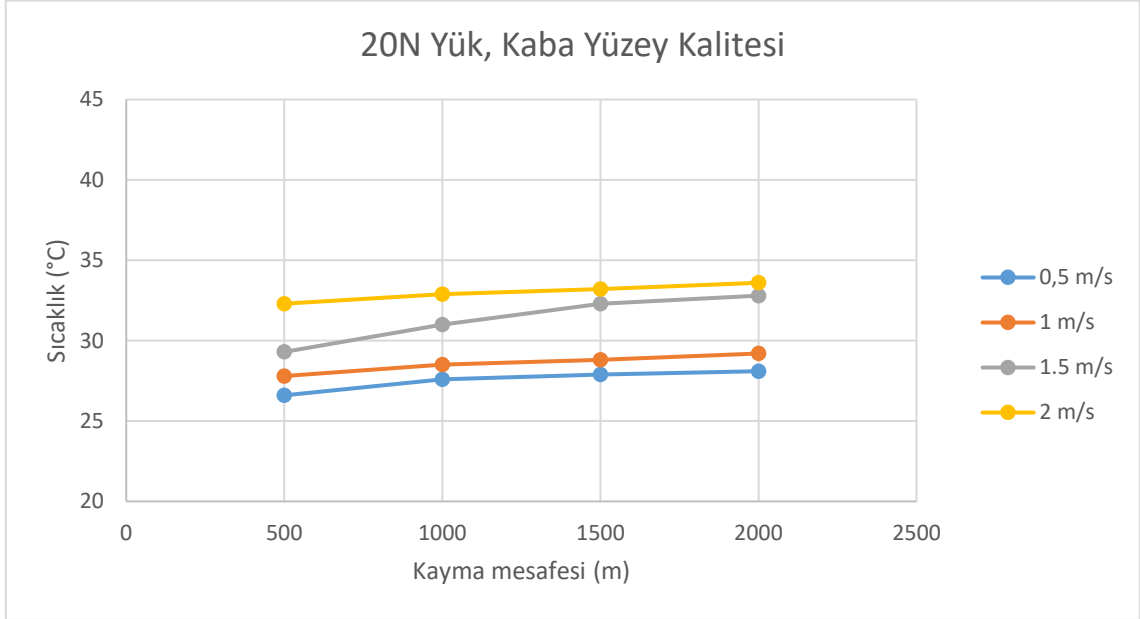
İyi yüzey kalitesinde işlenmiş POM numunelerin sıcaklığı hem kayma mesafesi hem de kayma hızı arttıkça yükselmiştir. 10N için kayma hızına göre sıcaklık artışı %2 – 12 civarındayken, bu değer 20N için %2.5 – 6 civarındadır. Kayma mesafesine göre sıcaklık artışı 10N için %8 – 13 civarı, 20N için %6 – 13 civarında bulunmuştur.

Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş POM numunenin 10N yük altındaki sıcaklığın kayma mesafesine göre grafiği, Şekil 4.15’te verilmiştir.



Şekil 4.15 Sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (kaba yüzey kalitesi, POM, 10N)

Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş POM numunenin 20N yük altındaki sıcaklığın kayma mesafesine göre grafiği, Şekil 4.16’da verilmiştir.



Şekil 4.16 Sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (kaba yüzey kalitesi, POM, 20N)

Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş POM numunelerin sıcaklığı hem kayma mesafesi hem de kayma hızı arttıkça yükselmiştir. 10N için kayma hızına göre sıcaklık artışı %4 – 11 civarındayken, bu değer 20N için %2.5 – 12 civarındadır. Kayma mesafesine göre sıcaklık artışı 10N için %6 – 8.5 civarı, 20N için %5 – 12 civarında bulunmuştur.

4.3 Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

UHMWPE ve POM malzemeden üretilmiş yatak numunelerinin deney öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür. Deney öncesi yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra_1) iyi yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numuneler için $3.438 \mu m$, kaba yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numuneler için $19.45 \mu m$ ölçülmüştür. UHMWPE yataklar için deney sonrası yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra_2) Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 UHMWPE malzemeler için deney sonrası yüzey pürüzlülüğü değerleri

Malzeme	Yüzey Kalitesi	V (m/s)	P (N)	R _{a2} (μm)
UHMWPE	İyi	0.5	10	2.87
UHMWPE	İyi	1	10	2.518
UHMWPE	İyi	1.5	10	2.394
UHMWPE	İyi	2	10	2.269
UHMWPE	İyi	0.5	20	3.161
UHMWPE	İyi	1	20	2.998
UHMWPE	İyi	1.5	20	2.813
UHMWPE	İyi	2	20	2.559
UHMWPE	Kaba	0.5	10	19.12
UHMWPE	Kaba	1	10	19.03
UHMWPE	Kaba	1.5	10	18.71
UHMWPE	Kaba	2	10	18.44
UHMWPE	Kaba	0.5	20	19.23
UHMWPE	Kaba	1	20	18.68
UHMWPE	Kaba	1.5	20	18.39
UHMWPE	Kaba	2	20	18.26

UHMWPE malzemeden üretilmiş numuneler için deney sonrası yüzey pürüzlülük değerleri, kayma hızının artması ile azalmıştır. Bu değerlerdeki azalma miktarı, yükün artması ile azalmıştır.

Deney öncesi yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra₁) iyi yüzey kalitesinde işlenmiş POM numuneler için 1.742 μm, kaba yüzey kalitesinde işlenmiş POM numuneler için 11.65 μm ölçülmüştür. POM yataklar için deney sonrası yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra₂) Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2 POM malzemeler için deney sonrası yüzey pürüzlülük değerleri

Malzeme	Yüzey Kalitesi	V (m/s)	P (N)	R _{a2} (μm)
POM	İyi	0.5	10	1.742
POM	İyi	1	10	1.277
POM	İyi	1.5	10	1.102
POM	İyi	2	10	1.059
POM	İyi	0.5	20	1.202
POM	İyi	1	20	1.187
POM	İyi	1.5	20	1.108
POM	İyi	2	20	1.077
POM	Kaba	0.5	10	9.402
POM	Kaba	1	10	9.142
POM	Kaba	1.5	10	8.556
POM	Kaba	2	10	6.903
POM	Kaba	0.5	20	8.903
POM	Kaba	1	20	8.049
POM	Kaba	1.5	20	7.008
POM	Kaba	2	20	5.545

POM malzemeden üretilmiş numuneler için deney sonrası yüzey pürüzlülük değerleri, kayma hızının artması ile azalmıştır. Bu değerlerdeki azalma miktarı, iyi yüzey kalitesindeki numunelerde yükün artması ile azalmış, kaba yüzey kalitesindeki numunelerde yükün artması ile artmıştır.

4.4 Ağırlık ve Aşınma Ölçümleri

Tüm yatak numunelerin ilgili senaryolara göre deney öncesi ve sonrası ağırlık ölçümleri yapılmıştır. UHMWPE malzemeden üretilmiş numuneler için deney sonrası ağırlık kayıpları hesaplandıktan sonra, aşağıdaki formül yardımıyla özgül aşınma miktarları (W_s) elde edilmiştir. Yol olarak(L) kayma mesafesi kullanılmıştır.

$$W_s = \frac{\Delta V}{F_N \cdot L} = \frac{\Delta m}{\rho F_N \cdot L} \quad (4.1)$$

UHMWPE malzemeden üretilen numuneler için ağırlık ve özgül aşınma miktarı değerleri Tablo 4.3'te sunulmuştur.

Tablo 4.3 UHMWPE malzemeler için ağırlık ve özgül aşınma miktarı değerleri

Malzeme	Yüzey Kalitesi	Deney Senaryosu	İlk Ağırlık (W_1)	Son Ağırlık (W_2)	Özgül Aşınma Miktarı (mm^3/Nm)
UHMWPE	İyi	0.5 m/s hız 10N yük	12.7108 gr	12.7016 gr	$5,21 \times 10^{-5}$
UHMWPE	İyi	1 m/s hız, 10N yük	12.7016 gr	12,6914 gr	$5,22 \times 10^{-5}$
UHMWPE	İyi	1.5 m/s hız, 10N yük	12.6914 gr	12.6805 gr	$5,27 \times 10^{-5}$
UHMWPE	İyi	2 m/s hız, 10N yük	12.6805 gr	12,6692 gr	$5,41 \times 10^{-5}$
UHMWPE	İyi	0.5 m/s hız, 20N yük	12.7348 gr	12.7256 gr	$2,99 \times 10^{-5}$
UHMWPE	İyi	1 m/s hız, 20N yük	12.7256 gr	12.7153 gr	$3,04 \times 10^{-5}$
UHMWPE	İyi	1.5 m/s hız, 20N yük	12.7158 gr	12.7053 gr	$3,09 \times 10^{-5}$
UHMWPE	İyi	2 m/s hız 10N yük	12,7053 gr	12,6938 gr	$3,2 \times 10^{-5}$
UHMWPE	Kaba	0.5 m/s hız, 10N yük	12,6231 gr	12,6129 gr	$6,36 \times 10^{-5}$
UHMWPE	Kaba	1 m/s hız, 10N yük	12,6129 gr	12,602 gr	$6,36 \times 10^{-5}$
UHMWPE	Kaba	1.5 m/s hız, 10N yük	12,602 gr	12,5904 gr	$6,75 \times 10^{-5}$
UHMWPE	Kaba	2 m/s hız, 10N yük	12,5904 gr	12,5776 gr	$6,9 \times 10^{-5}$
UHMWPE	Kaba	0.5 m/s hız, 20N yük	12,6739 gr	12,6633 gr	$3,13 \times 10^{-5}$
UHMWPE	Kaba	1 m/s hız, 20N yük	12,6633 gr	12,6521 gr	$3,29 \times 10^{-5}$
UHMWPE	Kaba	1.5 m/s hız, 20N yük	12,6521 gr	12,6402 gr	$3,35 \times 10^{-5}$
UHMWPE	Kaba	2 m/s hız, 20N yük	12,6402 gr	12,6275 gr	$3,36 \times 10^{-5}$

UHMWPE parçalardan üretilmiş numunelerde, kayma hızının ve yükün artması ağırlık kaybı değerlerini artırmıştır. Özgül aşınma miktarları ise kayma hızı ile artarken yükün artması ile azalmıştır.

POM malzemeden üretilen numuneler için ağırlık ve özgül aşınma miktarı değerleri Tablo 4.4'te sunulmuştur.

Tablo 4.4 POM malzemeler için ağırlık ve özgül aşınma miktarı değerleri

Malzeme	Yüzey Kalitesi	Deney Senaryosu	İlk Ağırlık (W1)	Son Ağırlık (W1)	Özgül Aşınma Miktarı (mm ³ /Nm)
POM	İyi	0.5 m/s hız 10N yük	19.3738 gr	19.3567 gr	5,34 x 10 ⁻⁵
POM	İyi	1 m/s hız, 10N yük	19.3567 gr	19.3387 gr	5,37 x 10 ⁻⁵
POM	İyi	1.5 m/s hız, 10N yük	19.3387 gr	19.3189 gr	5,4 x 10 ⁻⁵
POM	İyi	2 m/s hız, 10N yük	19.3189 gr	19.297 gr	5,79 x 10 ⁻⁵
POM	İyi	0.5 m/s hız, 20N yük	19.3718 gr	19.353 gr	3,01 x 10 ⁻⁵
POM	İyi	1 m/s hız, 20N yük	19.353 gr	19.3327 gr	3,11 x 10 ⁻⁵
POM	İyi	1.5 m/s hız, 20N yük	19.3327 gr	19.3118 gr	3,19 x 10 ⁻⁵
POM	İyi	2 m/s hız 10N yük	19.3118 gr	19.2894 gr	3,33 x 10 ⁻⁵
POM	Kaba	0.5 m/s hız, 10N yük	19.2432 gr	19.223 gr	5,82 x 10 ⁻⁵
POM	Kaba	1 m/s hız, 10N yük	19.223 gr	19.2007 gr	5,9 x 10 ⁻⁵
POM	Kaba	1.5 m/s hız, 10N yük	19.2007 gr	19.1773 gr	5,92 x 10 ⁻⁵
POM	Kaba	2 m/s hız, 10N yük	19.1773 gr	19.152 gr	5,98 x 10 ⁻⁵
POM	Kaba	0.5 m/s hız, 20N yük	19.2727 gr	19.2517 gr	3,4 x 10 ⁻⁵
POM	Kaba	1 m/s hız, 20N yük	19.2517 gr	19.2292 gr	3,56 x 10 ⁻⁵
POM	Kaba	1.5 m/s hız, 20N yük	19.2292 gr	19.2051 gr	3,62 x 10 ⁻⁵
POM	Kaba	2 m/s hız, 20N yük	19.2051 gr	19.1789 gr	3,71 x 10 ⁻⁵

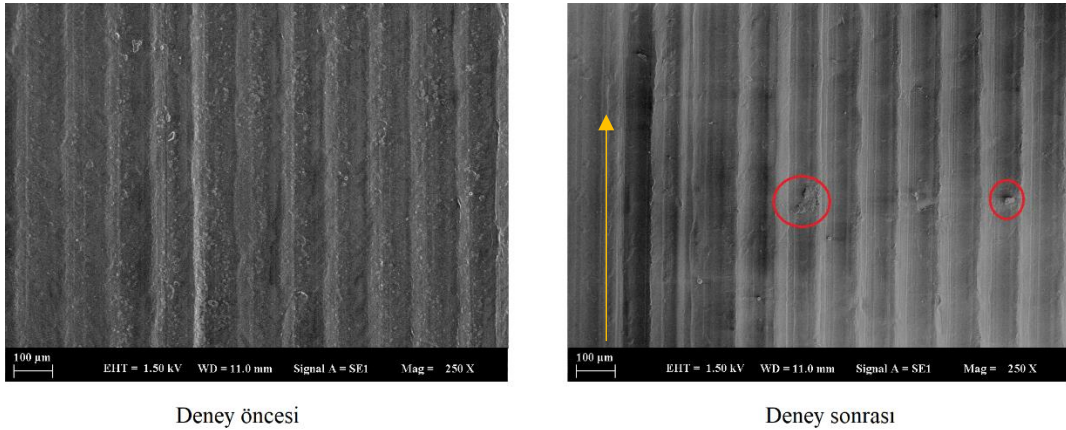
POM parçalardan üretilmiş numunelerde, kayma hızının ve yükün artması ağırlık kaybı değerlerini artırmıştır. Özgül aşınma miktarları incelendiğinde kayma hızının artmasının bu değeri artırdığı görülürken yükün artmasının bu değerde azalma meydana getirdiği görülmüştür.

Deney sonuçlarına göre, her iki malzemede de gözle görülür ağırlık kaybı meydana gelmemiştir. Tüm malzemeler için ağırlık kaybı %1'den daha az bir değerde bulunmuştur. POM malzemedeki ağırlık kaybı, UHMWPE malzemeye kıyasla daha fazla tespit edilmiştir.

4.5 SEM Görüntüleri

UHMWPE ve POM malzemeden üretilmiş deney numunelerinin iki farklı yüzey kalitesi için SEM görüntüleri alınmıştır. 0.5 m/s, 1 m/s, 1.5 m/s ve 2 m/s kayma hızında, 10N ve 20N yük altında numunelerin ilgili senaryolara göre deney öncesi ve sonrası 250 kat büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. Kayma yönleri sarı çizgiler ile gösterilmiştir.

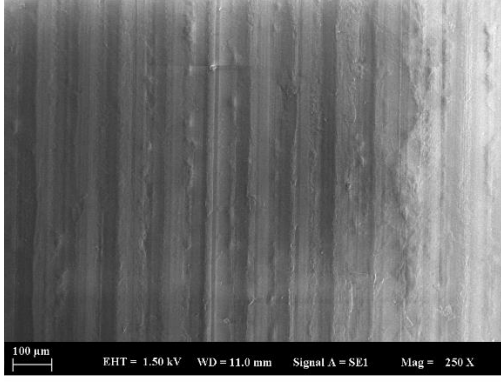
İyi yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE malzemeden üretilen numunelerin 10N'luk yük altında deney sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.17'de verilmiştir.



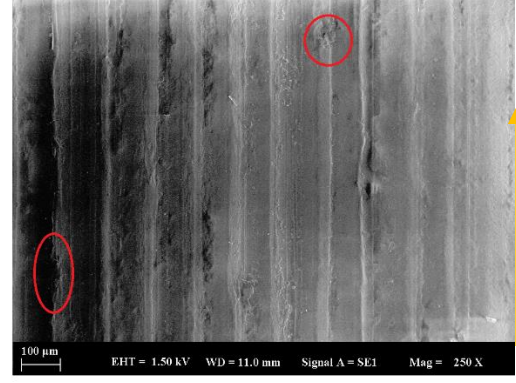
Şekil 4.17 250x SEM görüntüleri (iyi yüzey kalitesi, UHMWPE, 10N)

10N yük altında UHMWPE'den iyi yüzey kalitesinde üretilmiş numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde, adhesiv aşınma izleri görülmüştür. Düşük yüzey pürüzlülüğü ve UHMWPE malzemesinin sert olması bu izlerin az olmasına sebep olmuştur.

İyi yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE malzemeden üretilen numunelerin 20N'luk yük altında deney sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.18'de görülmektedir.



Deney öncesi

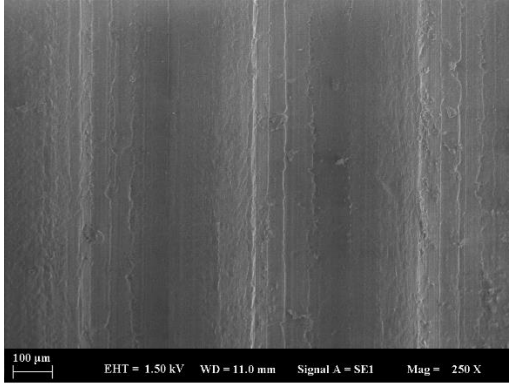


Deney sonrası

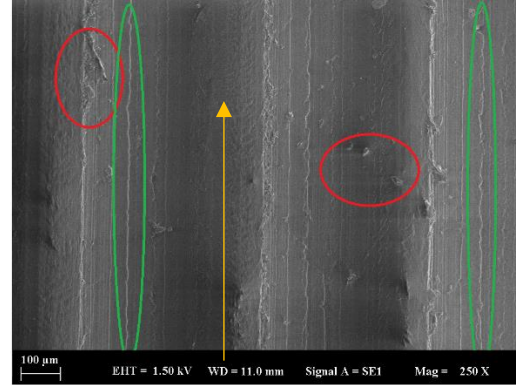
Şekil 4.18 250x SEM görüntüleri (iyi yüzey kalitesi, UHMWPE, 20N)

20N yük altında UHMWPE'den iyi yüzey kalitesinde üretilmiş numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde de adhesiv aşınma izleri görülmüştür. Düşük yüzey pürüzlülüğü ve UHMWPE malzemesinin sert olması bu izlerin az olmasına sebep olmuştur.

Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE malzemedan üretilen numunelerin 10N'luk yük altında deney sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.19'da verilmiştir.



Deney öncesi

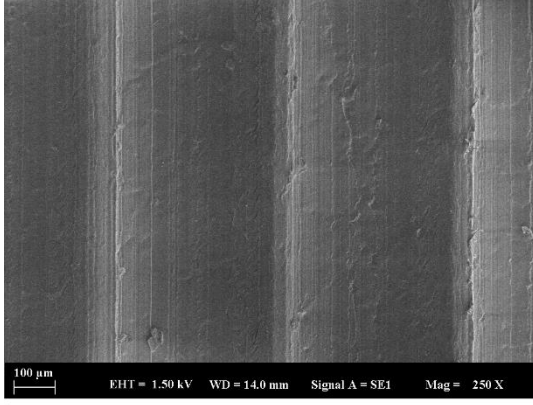


Deney sonrası

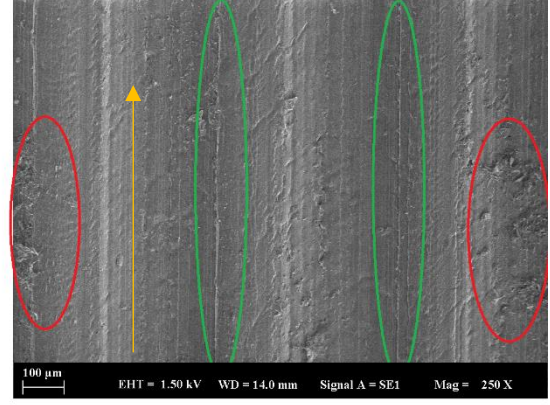
Şekil 4.19 250x SEM görüntüleri (kaba yüzey kalitesi, UHMWPE, 10N)

10N yük altında UHMWPE'den kaba yüzey kalitesinde üretilmiş numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde hem abrasiv (yeşil renkte) hem de adhesiv (kırmızı renkte) aşınma görülmektedir.

Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE malzemedan üretilen numunelerin 20N'luk yük altında deney sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.20'de sunulmuştur.



Deney öncesi



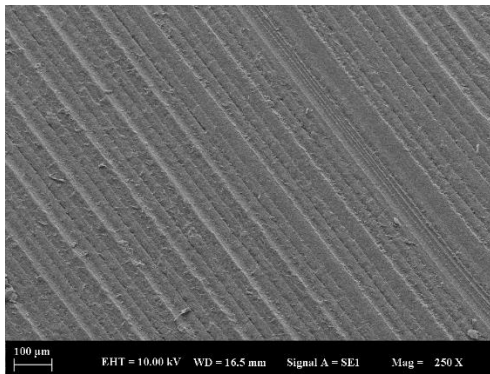
Deney sonrası

Şekil 4.20 250x SEM görüntüleri (kaba yüzey kalitesi, UHMWPE, 20N)

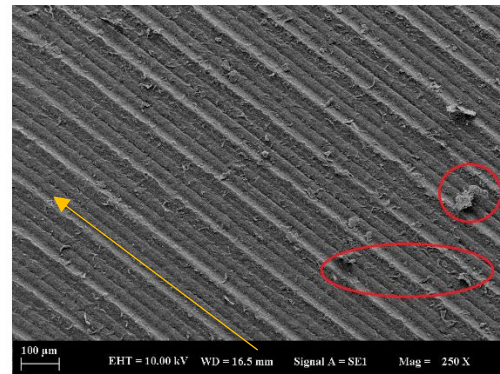
20N yük altında UHMWPE'den kaba yüzey kalitesinde üretilmiş numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde hem abrasiv (yeşil renkte) hem de adhesiv (kırmızı renkte) aşınma görülmektedir.

UHMWPE malzemeden üretilen numunelere bakıldığında kayma hızı arttıkça aşınma izlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde yük artışı ile de bu izler artmıştır. Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş numunelerin ince yüzey kalitesinde işlenmiş numunelere kıyasla aşınmaları gözle görülür şekilde daha belirgindir.

İyi yüzey kalitesinde işlenmiş POM malzemeden üretilen numunelerin 10N'luk yük altında deney sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.21'de görülmektedir.



Deney öncesi



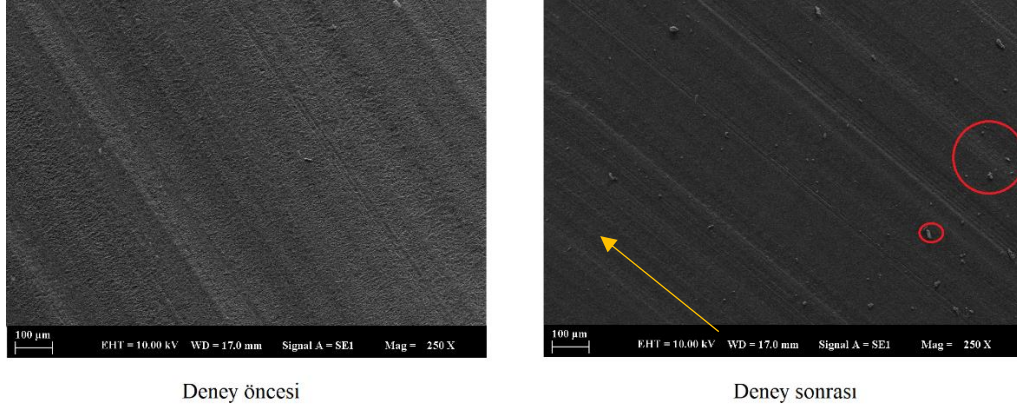
Deney sonrası

Şekil 4.21 250x SEM görüntüleri (iyi yüzey kalitesi, POM, 10N)

10N yük altında POM'dan iyi yüzey kalitesinde üretilmiş numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde ciddi bir miktarda aşınma görülmemiştir. Adhesiv aşınma izleri

mevcuttur. Ciddi miktarda aşınma olmamasında POM'un sert bir malzeme olmasının ve yüzey pürüzlülüğünün düşük olmasının etkisi vardır.

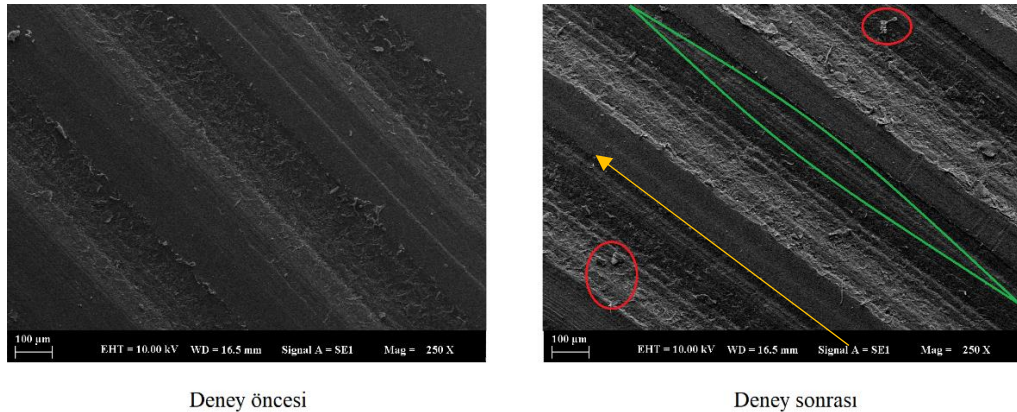
İyi yüzey kalitesinde işlenmiş POM malzemedan üretilen numunelerin 20N'luk yük altında deney sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.22 250x SEM görüntüleri (iyi yüzey kalitesi, POM, 20N)

20N yük altında POM'dan iyi yüzey kalitesinde üretilmiş numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde ciddi bir miktarda aşınma görülmemiştir. Adhesiv aşınma izleri mevcuttur. Ciddi miktarda aşınma olmamasında POM'un sert bir malzeme olmasının ve yüzey pürüzlülüğünün düşük olmasının etkisi vardır.

Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş POM malzemedan üretilen numunelerin 10N'luk yük altında deney sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.23'te sunulmuştur.

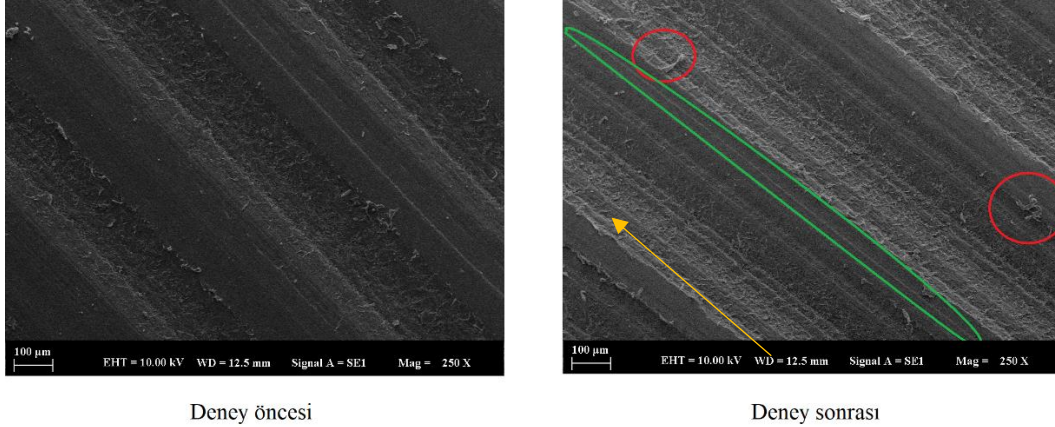


Şekil 4.23 250x SEM görüntüleri (kaba yüzey kalitesi, POM, 10N)

10N yük altında POM'dan kaba yüzey kalitesinde üretilmiş numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde, gözle görülür miktarda hem abrasiv (yeşil renkte) hem de adhesiv

(kırmızı renkte) aşınma meydana gelmiştir. Bu değerler artan hız ile daha çok belirginleşmiştir.

Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş POM malzemeden üretilen numunelerin 20N'luk yük altında deney sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.24'te görülmektedir.



Şekil 4.24 250x SEM görüntüleri (kaba yüzey kalitesi, POM, 20N)

20N yük altında POM'dan kaba yüzey kalitesinde üretilmiş numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde, gözle görülür miktarda hem abrasiv (yeşil renkte) hem adhesiv (kırmızı renkte) aşınma meydana gelmiştir. Bu değerler artan hız ile daha çok belirginleşmiştir.

POM malzemeden üretilen numuneler incelendiğinde kayma hızı arttıkça aşınma izlerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca yük artışı ile de bu izler artmıştır. Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş numunelerin ince yüzey kalitesinde işlenmiş numunelere kıyasla aşınmaları gözle görülür şekilde daha belirgindir.

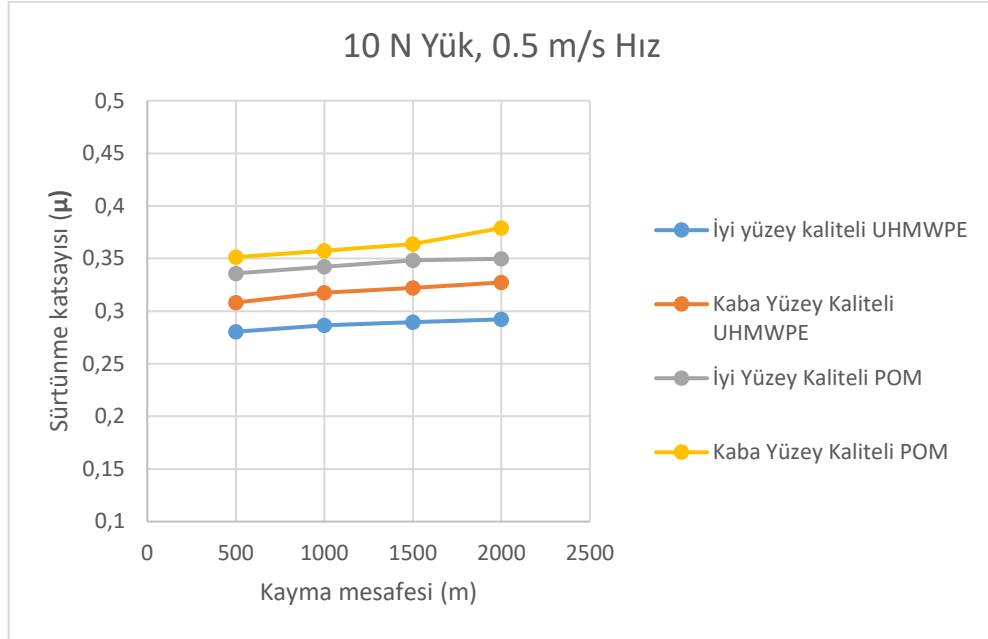
Tüm SEM görüntüleri incelendiğinde en çok aşınmanın kaba yüzey kalitesinde işlenmiş POM numunelerde olduğu görülmüştür. Bu numunelerde belirgin bir şekilde hem abrasiv hem adhesiv aşınma izlerine rastlanmıştır. Artan hız değerleri, aşınma izlerinin artmasına yol açmıştır. Yükün artması da bu aşınma izlerini artırmıştır.

Sonraki kısımda, başlıkta tablolar halinde sunulan tüm deney verileri incelenecek ve ilgili grafikler de değerlendirilecektir.

4.6 Tüm Deney Verilerinin Karşılaştırılması

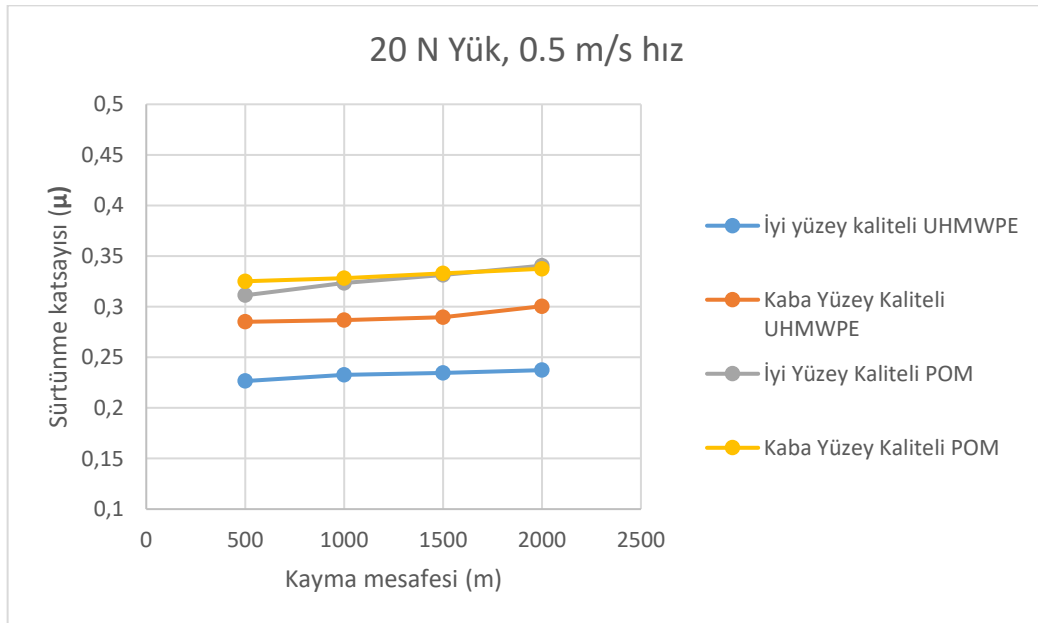
Deney verileri incelendikten sonra sürtünme katsayısı ve sıcaklık parametreleri için her numuneye göre sonuçlar verilmiştir. Bu verilen sonuçlar grafikler halinde sunulmuş ve yorumlanmıştır. Bu grafiklerden sonra, elde edilen tüm veriler tablolar halinde sunulmuş ve hem UHMWPE malzeme hem de POM malzeme için yorumlanmıştır.

Sürtünme katsayısı değerleri, her malzeme için ilgili ve hız senaryolarına göre düzenlenmiştir. Şekil 4.25'te 10N yük altında, 0.5 m/s kayma hızındaki deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği verilmiştir.



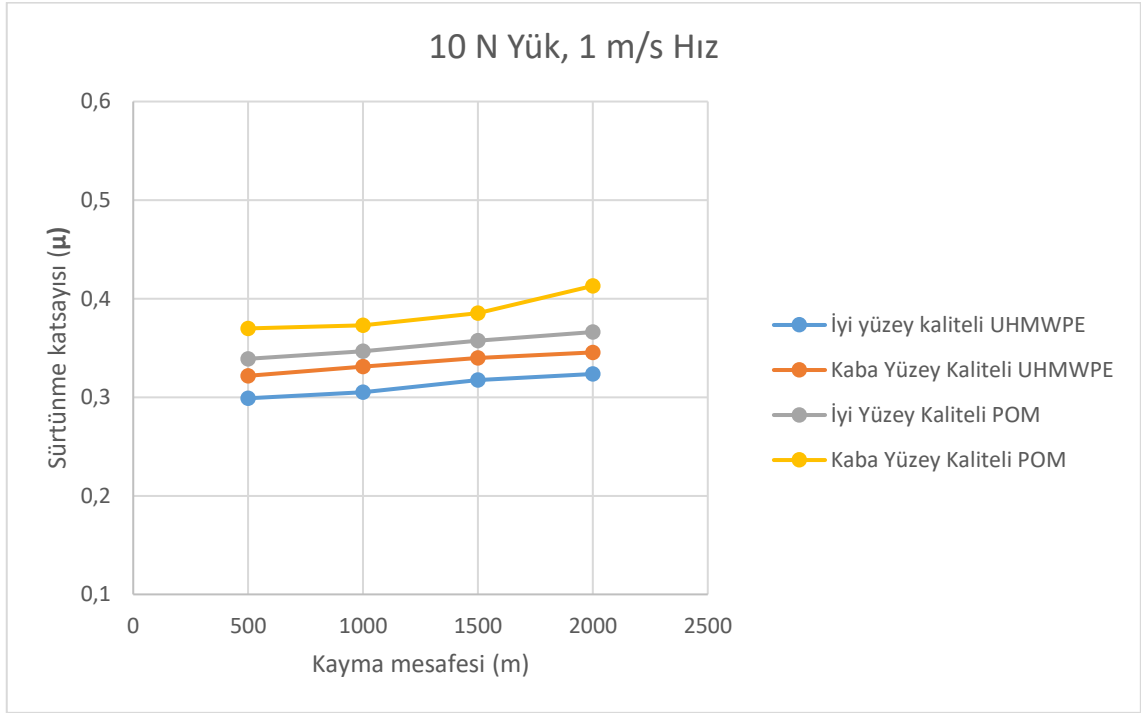
Şekil 4.25 Deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (10N yük, 0.5 m/s hız)

Şekil 4.26'da 20N yük altında, 0.5 m/s kayma hızındaki deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği verilmiştir.



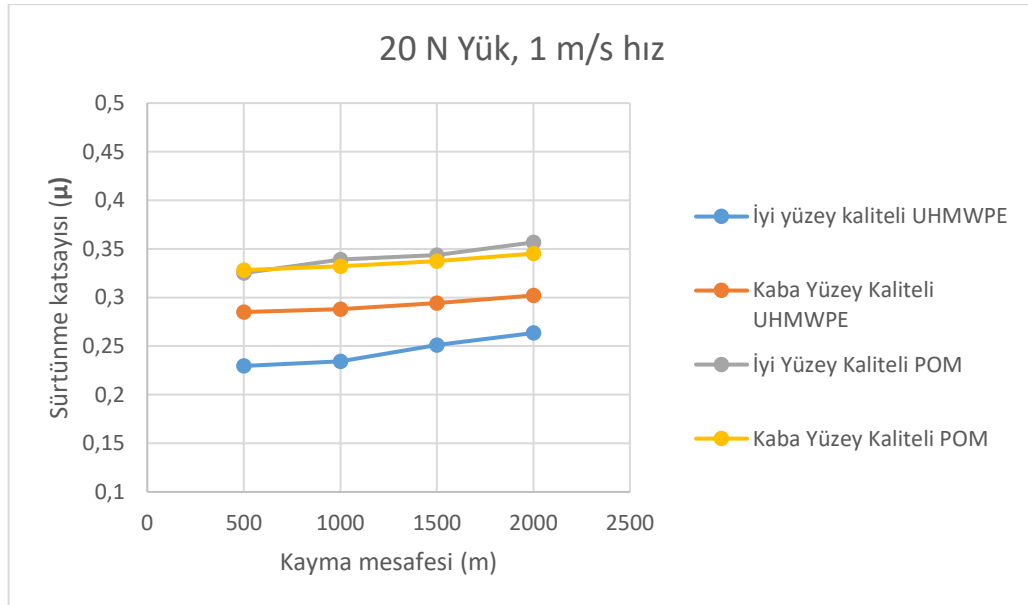
Şekil 4.26 Deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (20N yük, 0.5 m/s hız)

Şekil 4.27’de 10N yük altında, 1 m/s kayma hızındaki deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği verilmiştir.



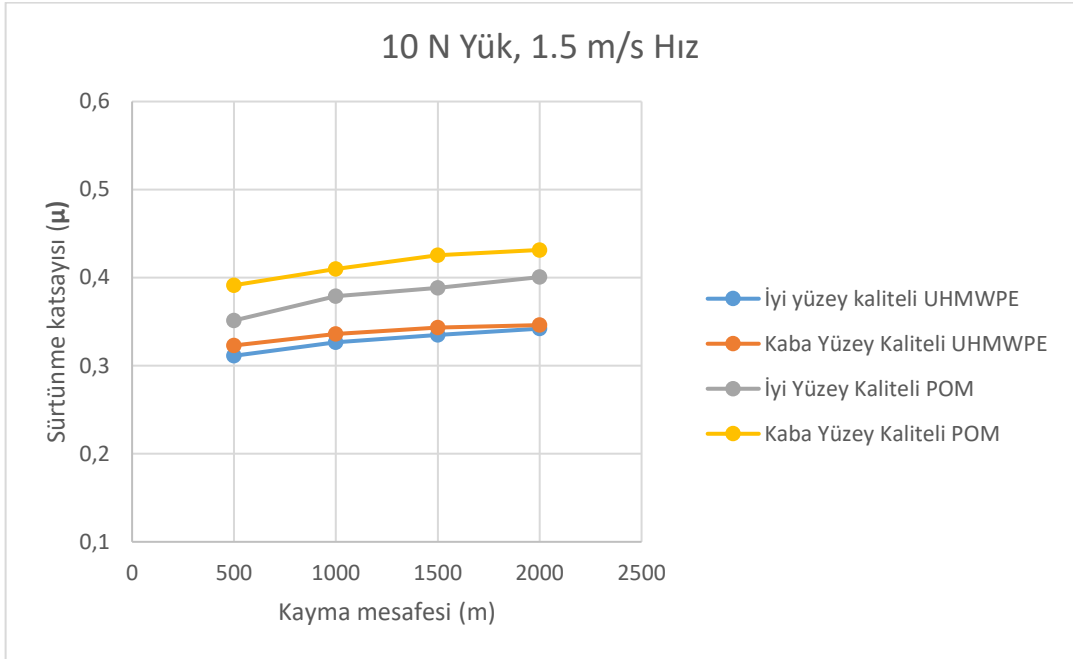
Şekil 4.27 Deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (10N yük, 1 m/s hız)

Şekil 4.28’de 20N yük altında, 1 m/s kayma hızındaki deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği verilmiştir.



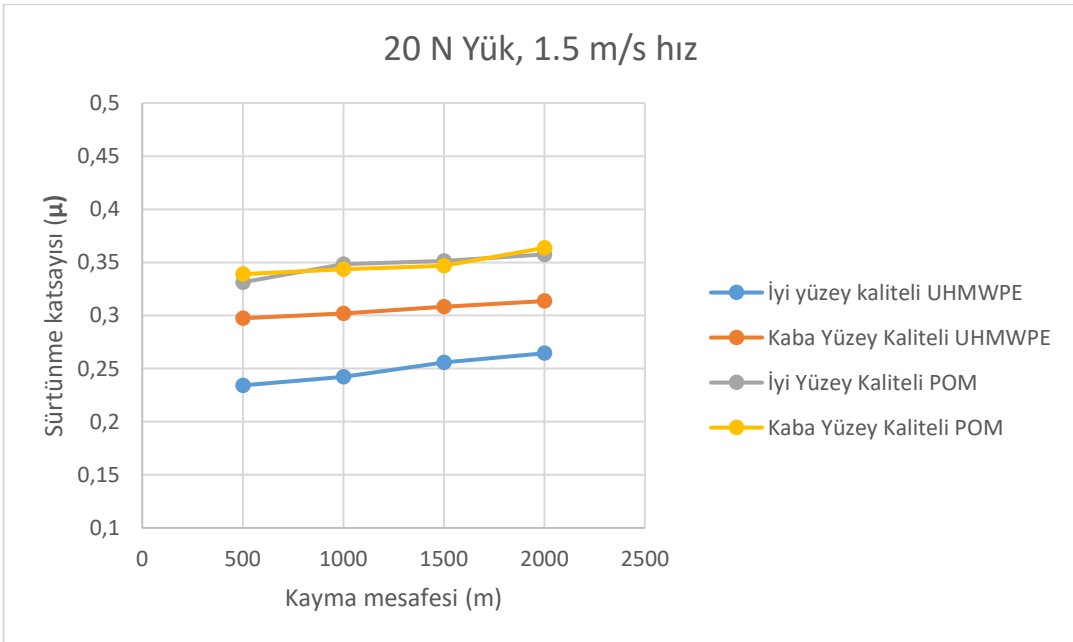
Şekil 4.28 Deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (20N yük, 1 m/s hız)

Şekil 4.29’da 10N yük altında, 1.5 m/s kayma hızındaki deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği verilmiştir.



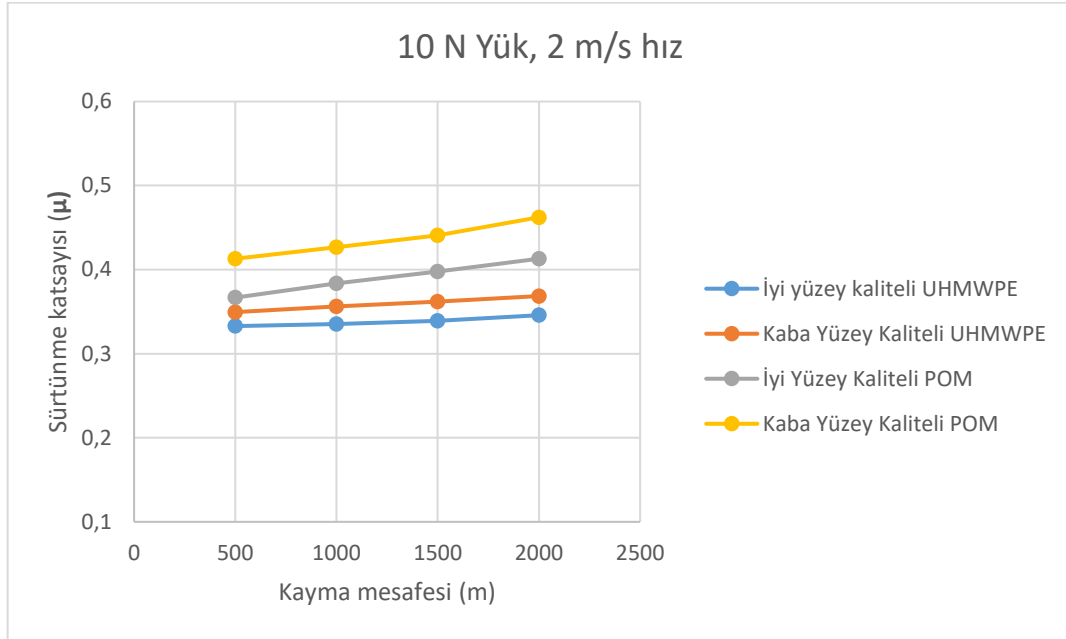
Şekil 4.29 Deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (10N yük, 1.5 m/s hız)

Şekil 4.30’da 20N yük altında, 1.5 m/s kayma hızındaki deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği verilmiştir.



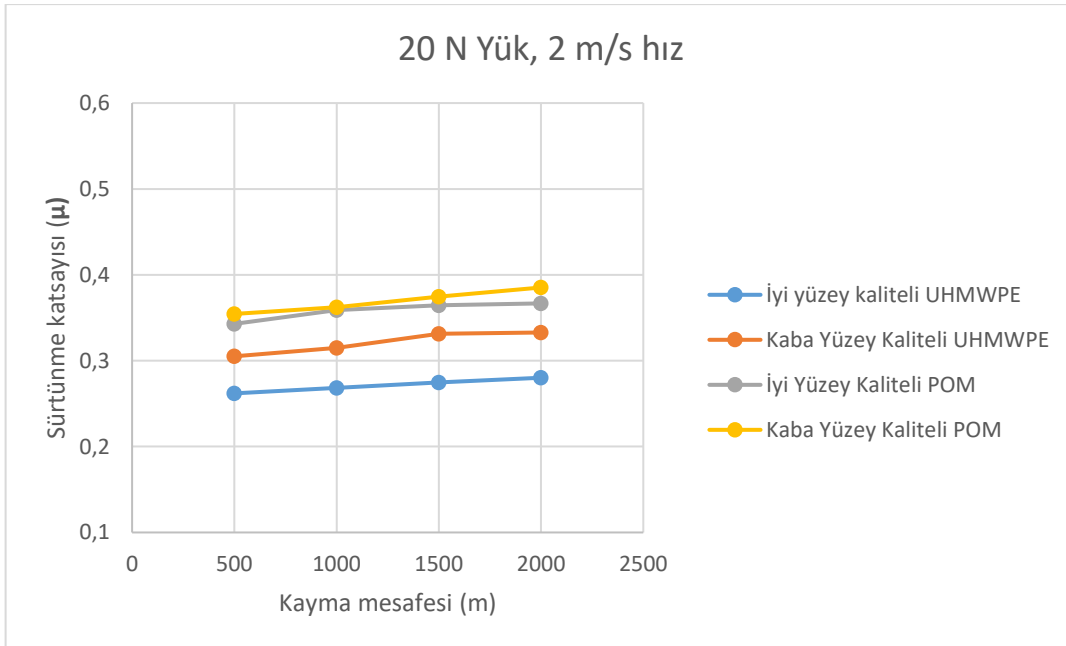
Şekil 4.30 Deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (20N yük, 1.5 m/s hız)

Şekil 4.31’de 10N yük altında, 2 m/s kayma hızındaki deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği verilmiştir.



Şekil 4.31 Deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (10N yük, 2 m/s hız)

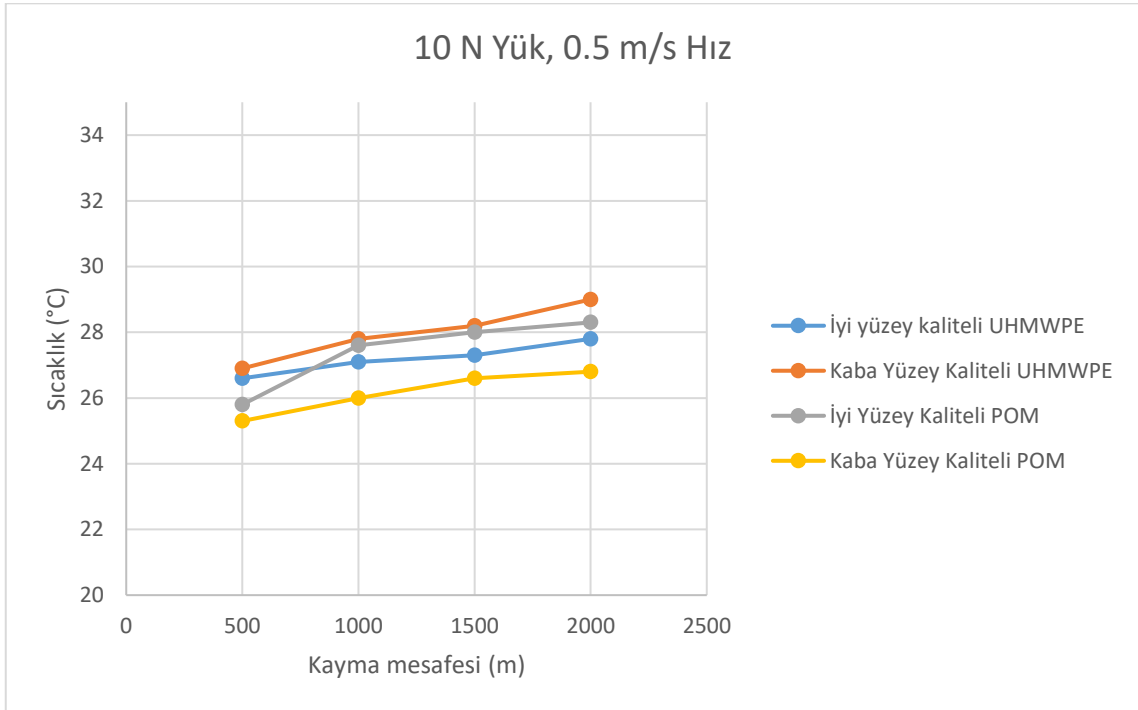
Şekil 4.32’de 20N yük altında, 2 m/s kayma hızındaki deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği verilmiştir.



Şekil 4.32 Deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği (20N yük, 2 m/s hız)

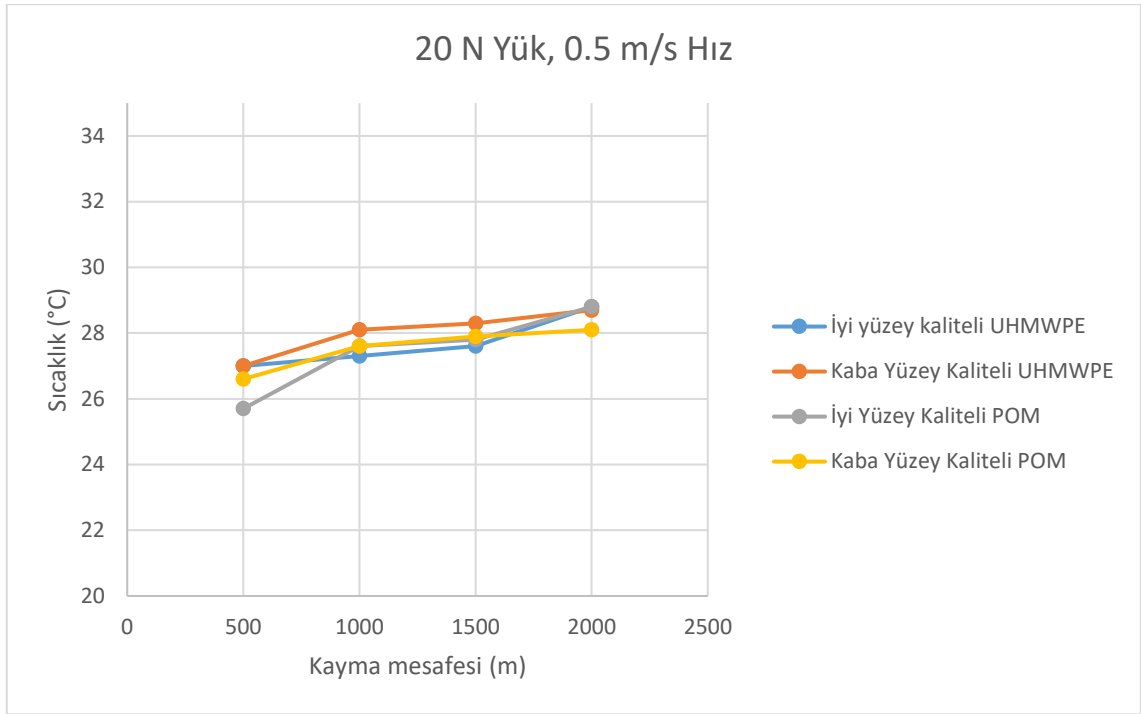
Deney numunelerinin sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafikleri incelendiğinde, en yüksek sürtünme katsayılarının kaba yüzey kaliteli POM malzemede olduğu görülmüştür. İki yüzey kalitesindeki POM numunelerin de UHMWPE numunelerden daha yüksek sürtünme katsayısı vardır. Kaba yüzey kaliteli numuneler, iyi yüzey kaliteli numunelerden daha fazla sürtünme katsayısına sahiptir. Kayma mesafesi arttıkça her malzeme için sürtünme katsayısı artmış, yük arttıkça sürtünme katsayısı değerleri düşmüştür.

Sıcaklık değerleri, her malzeme için ilgili ve hız senaryolarına göre düzenlenmiştir. Şekil 4.33'te 10N yük altında, 0.5 m/s kayma hızındaki deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği verilmiştir.



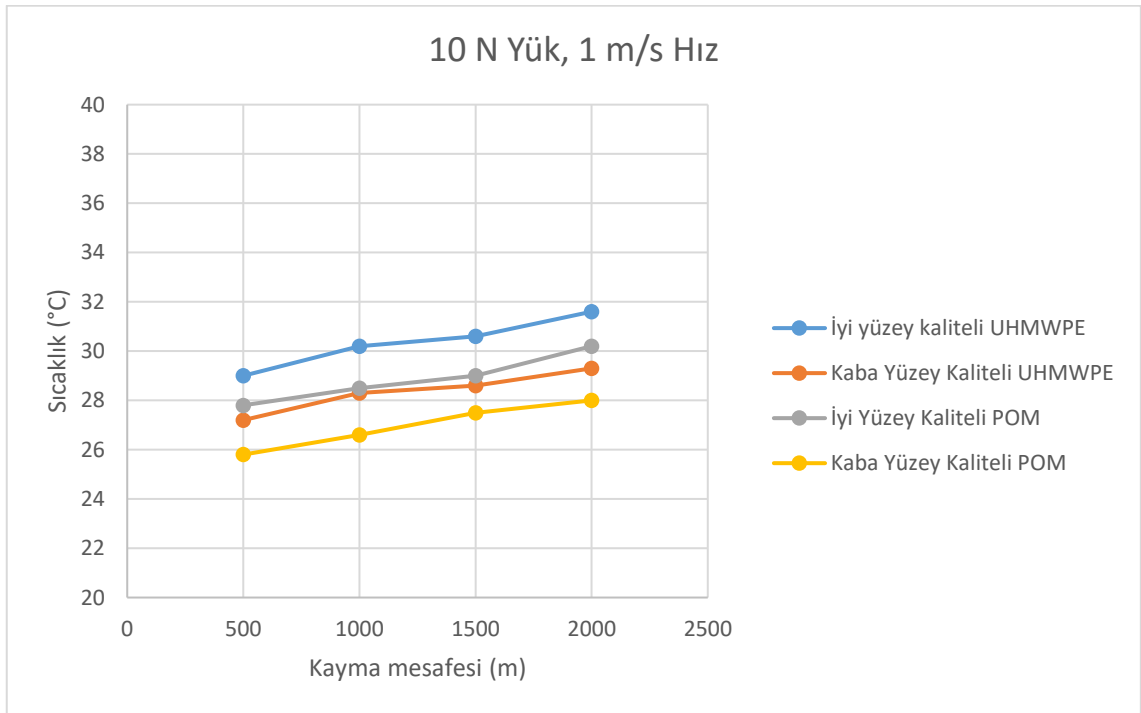
Şekil 4.33 Deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (10N yük, 0.5 m/s hız)

Şekil 4.34'te 20N yük altında, 0.5 m/s kayma hızındaki deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği verilmiştir.



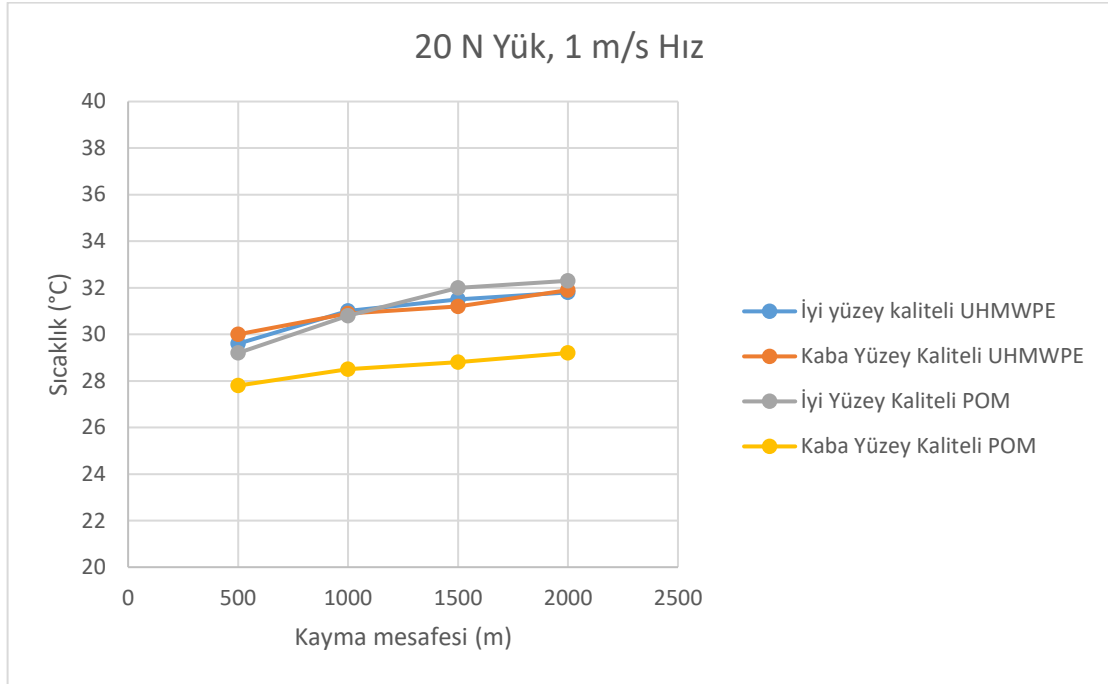
Şekil 4.34 Deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (20N yük, 0.5 m/s hız)

Şekil 4.35’te 20N yük altında, 0.5 m/s kayma hızındaki deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği verilmiştir.



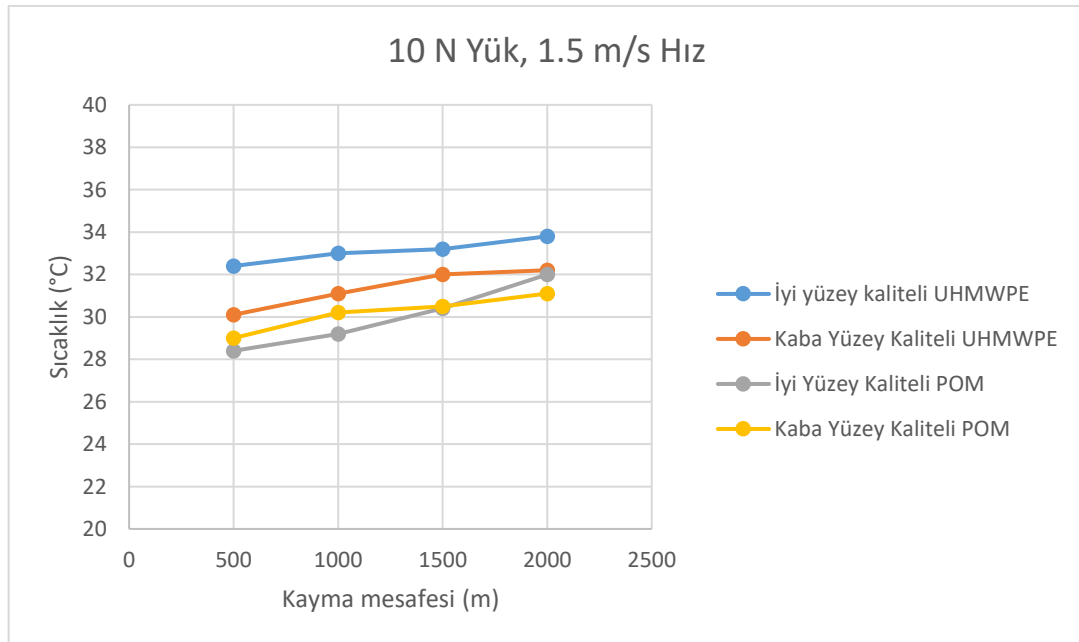
Şekil 4.35 Deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (10N yük, 1 m/s hız)

Şekil 4.36’da 20N yük altında, 0.5 m/s kayma hızındaki deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği verilmiştir.



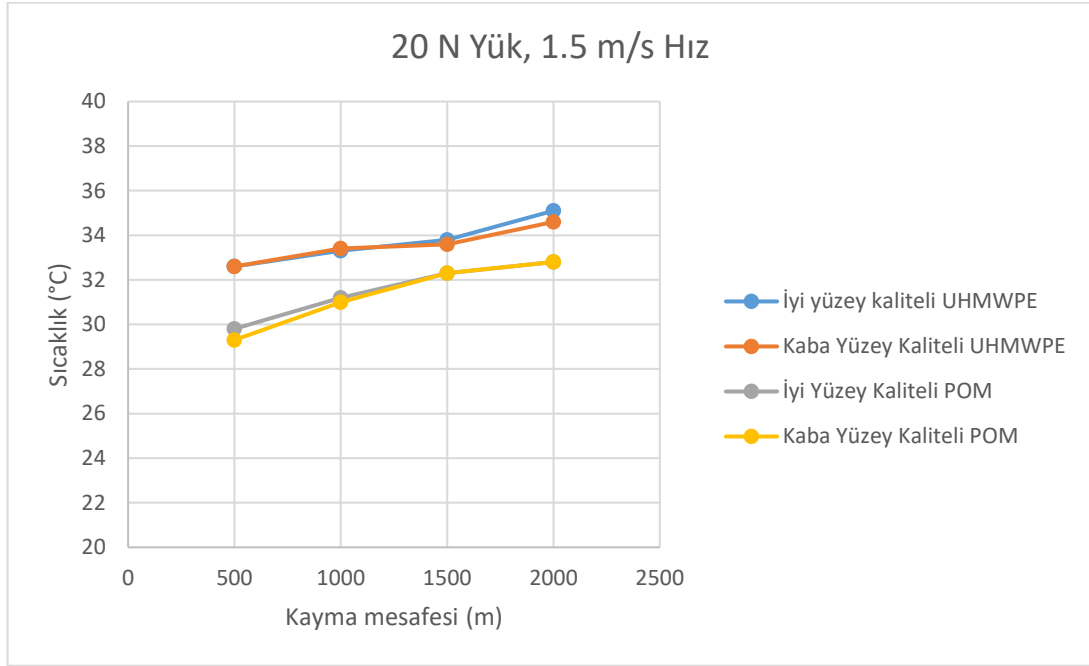
Şekil 4.36 Deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (20N yük, 1 m/s hız)

Şekil 4.37’de 20N yük altında, 0.5 m/s kayma hızındaki deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği verilmiştir.



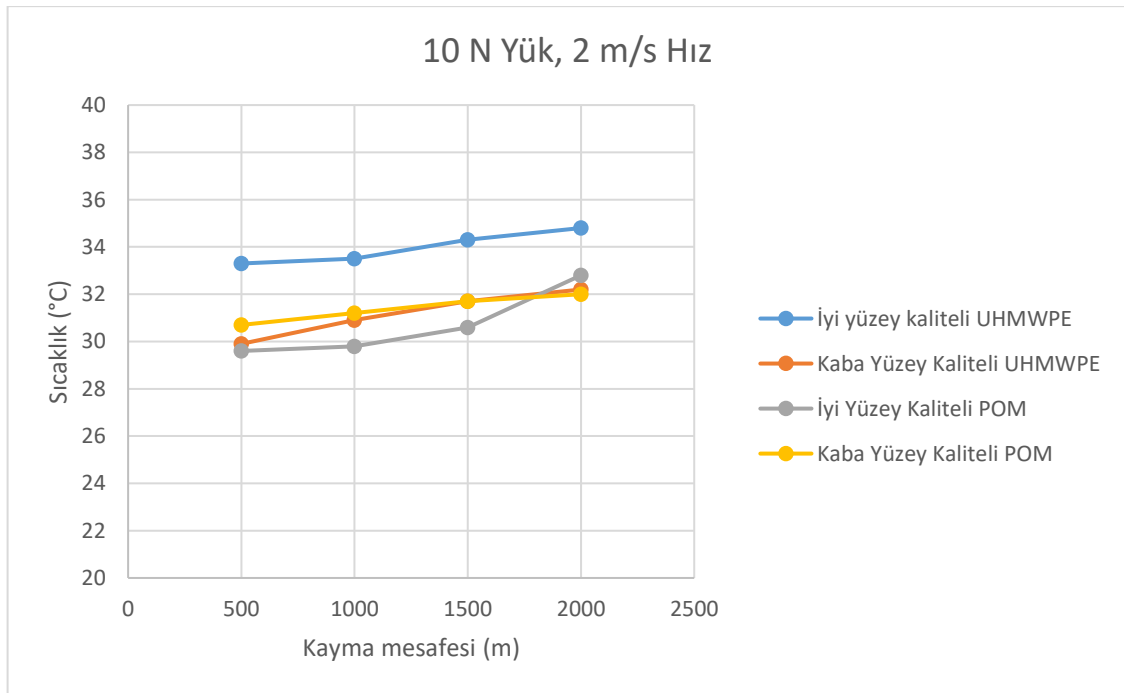
Şekil 4.37 Deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (10N yük, 1.5 m/s hız)

Şekil 4.38’de 20N yük altında, 0.5 m/s kayma hızındaki deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği verilmiştir.



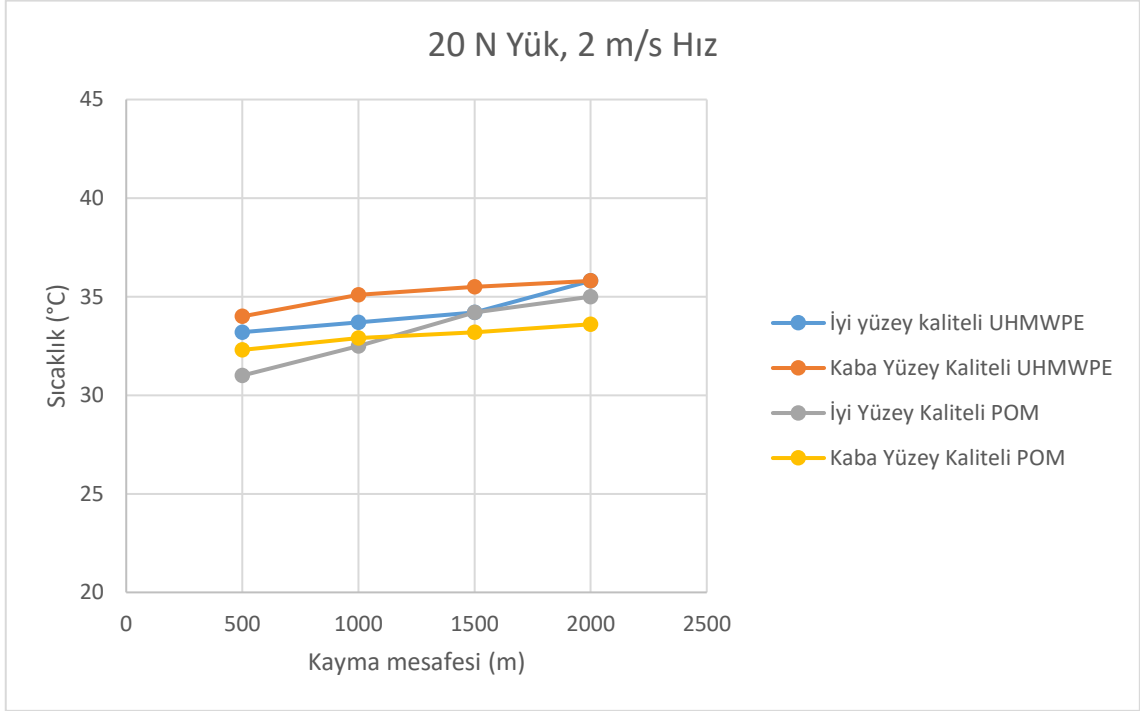
Şekil 4.38 Deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (20N yük, 1.5 m/s hız)

Şekil 4.39’da 20N yük altında, 0.5 m/s kayma hızındaki deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği verilmiştir.



Şekil 4.39 Deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (10N yük, 2 m/s hız)

Şekil 4.40'ta 20N yük altında, 2 m/s kayma hızındaki deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği verilmiştir.



Şekil 4.40 Deney numunelerinin sıcaklık – kayma mesafesi grafiği (20N yük, 2 m/s hız)

Sıcaklık – kayma mesafesi grafikleri incelendiğinde, her numune için artan kayma hızı ve kayma mesafelerinin sıcaklığı artırdığı görülmüştür. Sıcaklık artışının malzeme çeşidi veya yüzey kalitesi üzerinde anlamlı bir ilişkisine rastlanmayıp, değerler birbirine yakın bulunmuştur.

Tüm veriler incelenerek, her iki malzeme için aşağıda ayrı tablolar şeklinde sunulmuştur. Tüm değerler, deneyler tamamlandıktan sonra alınmıştır. UHMWPE malzemeler için değerler, Tablo 4.5'te sunulmuştur.

Tablo 4.5 UHMWPE malzemeler için tüm deney sonrası verileri

Malzeme	Yüzey Kalitesi	V (m/s)	P (N)	Sürtünme Katsayısı (μ)	Sıcaklık (°C)	Yüzey Pürüzlülüğü R_{a2} (μ m)	Özgül Aşınma Miktarı (mm^3/Nm)
UHMWPE	İyi	0.5	10	0.292	27,8	2.87	$5,21 \times 10^{-5}$
UHMWPE	İyi	1	10	0.323	31,6	2.518	$5,22 \times 10^{-5}$
UHMWPE	İyi	1.5	10	0.342	33,8	2.394	$5,27 \times 10^{-5}$
UHMWPE	İyi	2	10	0.345	34,8	2.269	$5,41 \times 10^{-5}$
UHMWPE	İyi	0.5	20	0.237	28,8	3.161	$2,99 \times 10^{-5}$
UHMWPE	İyi	1	20	0.263	31,8	2.998	$3,04 \times 10^{-5}$
UHMWPE	İyi	1.5	20	0.264	35,1	2.813	$3,09 \times 10^{-5}$
UHMWPE	İyi	2	20	0.280	35,8	2.559	$3,2 \times 10^{-5}$
UHMWPE	Kaba	0.5	10	0.327	29	19.12	$6,36 \times 10^{-5}$
UHMWPE	Kaba	1	10	0.345	29,3	19.03	$6,36 \times 10^{-5}$
UHMWPE	Kaba	1.5	10	0.346	32,2	18.71	$6,75 \times 10^{-5}$
UHMWPE	Kaba	2	10	0.368	32,2	18.44	$6,9 \times 10^{-5}$
UHMWPE	Kaba	0.5	20	0.3	28,7	19.23	$3,13 \times 10^{-5}$
UHMWPE	Kaba	1	20	0.302	31,9	18.68	$3,29 \times 10^{-5}$
UHMWPE	Kaba	1.5	20	0.313	34,6	18.39	$3,35 \times 10^{-5}$
UHMWPE	Kaba	2	20	0.332	35,8	18.26	$3,36 \times 10^{-5}$

UHMWPE numunelerin deney sonrası verileri incelendiğinde, sürtünme katsayısı değerlerinin artan hız ile arttığı, artan yük ile azaldığı görülmüştür. Kayma hızı ve yük değerlerinin artması ile sıcaklık da artmıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri artan hız ile azalmış, artan yük ile iyi yüzey kaliteli numunelerde artarken kaba yüzey kaliteli numunelerde azalmıştır. Özgül aşınma miktarı da kayma hızı değerlerinin artmasıyla artarken yük değerinin artmasıyla azalmıştır. Kaba yüzey kaliteli numunelerde sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülüğü, ağırlık kaybı ve özgül aşınma miktarı değerleri iyi yüzey kaliteli numunelere kıyasla daha yüksek çıkarken, sıcaklık değerleri birbirlerine yakın çıkmıştır.

POM malzemeler için değerler, Tablo 4.6’da sunulmuştur.

Tablo 4.6 POM malzemeler için tüm deney sonrası verileri

Malzeme	Yüzey Kalitesi	V (m/s)	P (N)	Sürtünme Katsayısı (μ)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Yüzey Pürüzlülüğü R_{a2} (μm)	Özgül Aşınma Miktarı (mm^3/Nm)
POM	İyi	0.5	10	0.349	28.3	1.742	$5,34 \times 10^{-5}$
POM	İyi	1	10	0.366	30.2	1.277	$5,37 \times 10^{-5}$
POM	İyi	1.5	10	0.4	32	1.102	$5,4 \times 10^{-5}$
POM	İyi	2	10	0.412	32.8	1.059	$5,79 \times 10^{-5}$
POM	İyi	0.5	20	0.340	28.8	1.202	$3,01 \times 10^{-5}$
POM	İyi	1	20	0.356	32.3	1.187	$3,11 \times 10^{-5}$
POM	İyi	1.5	20	0.357	32.8	1.108	$3,19 \times 10^{-5}$
POM	İyi	2	20	0.366	35	1.077	$3,33 \times 10^{-5}$
POM	Kaba	0.5	10	0.379	26.8	9.402	$5,82 \times 10^{-5}$
POM	Kaba	1	10	0.412	28	9.142	$5,9 \times 10^{-5}$
POM	Kaba	1.5	10	0.431	31.1	8.556	$5,92 \times 10^{-5}$
POM	Kaba	2	10	0.462	32	6.903	$5,98 \times 10^{-5}$
POM	Kaba	0.5	20	0.337	28.1	8.903	$3,4 \times 10^{-5}$
POM	Kaba	1	20	0.345	29.2	8.049	$3,56 \times 10^{-5}$
POM	Kaba	1.5	20	0.363	32.8	7.008	$3,62 \times 10^{-5}$
POM	Kaba	2	20	0.385	33.6	5.545	$3,71 \times 10^{-5}$

POM numunelerin deney sonrası verileri incelendiğinde, sürtünme katsayısı değerlerinin artan hız ile arttığı, artan yük ile azaldığı görülmüştür. Kayma hızı ve yük değerlerinin artması ile sıcaklık da artmıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri artan hız ile azalmış, artan yük ile iyi yüzey kaliteli numunelerde artarken kaba yüzey kaliteli numunelerde azalmıştır. Özgül aşınma miktarı da kayma hızı değerlerinin artmasıyla artarken yük değerinin artmasıyla azalmıştır. Kaba yüzey kaliteli numunelerde sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülüğü, ağırlık kaybı ve özgül aşınma miktarı değerleri iyi yüzey kaliteli numunelere kıyasla daha yüksek çıkarken, sıcaklık değerleri birbirlerine yakın çıkmıştır.

Bu çalışmanın amacı, katkısız UHMWPE ve katkısız POM malzemelerden üretilmiş radyal kaymalı yatak numunelerin kuru şartlarda belirlenen senaryolara göre tribolojik performanslarını incelemektir. Bu amaçla, UHMWPE ve POM malzemeden iki farklı yüzey işleme kalitesinde numuneler imal edilmiştir. Hazırlanan numuneler ile belirlenen senaryolara göre kaymalı yatak testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kaymalı yatak testlerinden sonra SEM analizleri ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri de yapılarak sonuçlar desteklenmiştir. Böylece; numunelerin sürtünme katsayısı, sıcaklık, yüzey pürüzlülüğü, ağırlık kaybı ve aşınma parametreleri deneysel olarak tespit edilmiştir. UHMWPE ve POM malzemelere ait deney öncesi ve sonrası veriler hem malzemelerin kendi içinde hem de iki malzeme arasında kıyaslanarak yorumlanmıştır. Bu sayede hem literatüre hem de çeşitli endüstriyel uygulamalara katkı sağlamak amaçlanmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde, öncelikle yapılan çalışma hakkında ön bilgiler sunulmuştur. Yataklar ve polimer yataklar özelinde karakteristik özelliklere ve kullanım amaçlarına değinilmiştir. Çalışmamızda kullanılan UHMWPE ve POM malzeme hakkında da bilgi verilmiş, malzemelerin üstün özellikleri ve kullanım avantajlarına değinilmiştir. Daha sonra çalışma için yapılan deneylerden bahsedilerek okuyucu için daha anlaşılır olması sağlanmış, tezin amacı ana hatlarıyla anlatılmıştır. Son olarak literatürde bu konulara ışık tutabilecek çalışmalar derlenmiş ve yorumlanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, kullanılan malzemeler ve yapılan deneylerin esas alındığı triboloji kanunları hakkında daha detaylı teorik bilgiler verilmiştir. Birinci bölümde değinilen ön bilgiler bu bölümde açıklanarak belirlenen senaryolara göre yapılan deneylerin fiziksel ve mekanik açıdan değerlendirilebilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, ilk etapta kullanılan deney numuneleri ve mil malzemesi hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra deney düzeneği başta olmak üzere kullanılan tüm cihazların çalışma şartları ve özelliklerine değinilmiştir. Radyal kaymalı yatak test düzeneğinin parçalarına değinilmiş, ölçüm yapılan cihazlar tanıtılmıştır. Son olarak yapılan testler için belirlenmiş kayma hızı ve yük senaryoları açıklanmıştır.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, deneylerden elde edilen veriler başlıklar halinde sunulmuştur. Elde edilen sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri grafik halinde; ağırlık kaybı, özgül aşınma miktarı ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ise tablolar halinde verilmiştir. Tüm sonuçlar tek bir tabloda toplanarak değerlendirilmiştir. Değerlerden sonra SEM görüntüleri de bölümün son kısmına eklenilerek yorumlanmıştır. Ayrıca sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri ilgili senaryolarda her malzeme için grafikler halinde gösterilerek kıyaslanmıştır.

Çalışmanın bu bölümünde ise elde edilen tüm veriler değerlendirilerek her parametre için yorumlar yapılacaktır. Yapılan tüm çalışmalar incelendiğinde, elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi değerlendirilebilir:

- Her iki malzemeden her iki yüzey kalitesinde işlenmiş numunelerin kayma hızları arttığında sürtünme katsayılarının arttığı görülmüştür. Fakat bu sürtünme katsayısı değerleri artan yük ile azalmıştır. Yüzey basıncının artması sürtünme katsayısı değerlerini düşürmüştür. Her iki malzeme için de iyi yüzey kalitesinde işlenmiş numunelerin sürtünme katsayılarının kaba yüzey kalitesinde işlenmiş numunelere kıyasla daha az çıktığı tespit edilmiştir. Deneylerde kullanılan mil ile POM malzemeden üretilmiş yatak numunelerinin arasındaki sürtünme katsayılarının, UHMWPE malzemeden üretilmiş yatak numunelerine göre yaklaşık %20 – 25 daha fazla olduğu hesaplanmıştır.
- Her iki malzemeden her iki yüzey kalitesinde işlenmiş numunelerin sıcaklık değerlerinin kayma hızları arttıkça arttığı görülmüştür. Artan yük ile bu sıcaklık artışı daha fazla olmuştur. Sıcaklık değerlerinin her iki yüzey kalitesindeki numuneler için de birbirine yakın çıktığı tespit edilmiştir. UHMWPE malzemeden üretilmiş numunelerde sıcaklık değerlerinin POM malzemeden üretilmiş numunelere göre %2 – 5 daha fazla olduğu hesaplanmıştır.
- Her iki malzemeden üretilmiş her iki yüzey kalitesinde işlenmiş numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin kayma hızları arttıkça azaldığı görülmüştür. Bu yüzey pürüzlülüğü değerlerinin iyi yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numuneler haricinde artan yük ile daha fazla azaldığı görülmüştür. POM malzemeden üretilmiş yatak numunelerinin yüzey pürüzlülüğünün UHMWPE malzemeden üretilmiş yatak numunelere kıyasla daha az bulunmuştur. Bu değerler iyi yüzey kalitesinde işlenmiş numuneler için yaklaşık %50, kaba yüzey kalitesinde işlenmiş numuneler için yaklaşık %60 daha az hesaplanmıştır.

- Her iki malzemeden her iki yüzey kalitesinde işlenmiş numunelerin deney sonraki ağırlık kaybı değerleri kayma hızları arttıkça artmıştır. Bu değerlerin artan yük ile de arttığı görülmüştür. Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş numunelerdeki ağırlık kaybı, iyi yüzey kalitesinde işlenmiş numunelere kıyasla daha fazladır. POM malzemeden üretilmiş yatak numunelerindeki ağırlık kaybı değerleri, UHMWPE malzemeden üretilmiş yatak numunelerine kıyasla %10 – 25 daha fazla hesaplanmıştır. Özgül aşınma miktarları ise kaba numunelerde %3 – 7 daha fazla görülürken, yükün artması ile bu değer %35 – 40 azalmıştır.
- SEM görüntüleri incelendiğinde, iyi yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numunelerde diğer numunelere kıyasla daha az miktarda aşınmalar gözlemlenmiştir. Bu aşınmalar adhesiv aşınma şeklinde görülmüştür. Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numunelerde ise hem abrasiv hem adhesiv aşınmalar görülmüştür. Artan yük ve kayma hızının da bu aşınmaları artırdığı görülmüştür. İyi yüzey kalitesinde işlenmiş POM numunelerde az miktarda adhesiv aşınma izlerine rastlanmıştır. Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş POM malzemelerde ise gözle görülür miktarda adhesiv ve abrasiv aşınmalar meydana gelmiştir. Kayma hızı arttıkça bu izler daha da belirginleşmiştir. Artan yüzey pürüzlülüğünün malzeme yüzeyinden parça koparmaya etkileri belirgin bir şekilde görülmüştür. Yapıca sert olan UHMWPE ve POM malzemelerde aşınma direncinin literatür araştırmalarında değinilen birçok malzemeye kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca iyi işlenmiş UHMWPE ve POM yatakların mil ile çalışması sonucu yüzeylerindeki pürüzler etkileşerek aralarındaki çekim kuvveti (adhezyon) sebebiyle adhesiv aşınmalar görülmektedir. Bu etkileşim, moleküllerin birbirlerine yaklaşması neticesinde oluşmuştur.
- Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, en düşük sürtünme katsayısının (2 m/s kayma hızı referans alındığında) 0,28 ile iyi yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE malzemede görüldüğü tespit edilmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı ise, 0,462 ile kaba yüzey kalitesinde işlenmiş POM malzemede bulunmuştur. İyi yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numunenin 10N yük altında 0.5 m/s – 2 m/s kayma hızları arasında sürtünme katsayısının %5 – 10 civarında arttığı, 500 m – 2000 m kayma mesafesi arasında ise 0.5 m/s için %4.5, diğer hızlar için %7 – 11 civarında arttığı görülmüştür. İyi yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numunenin 20N yük altında 0.5 m/s – 2 m/s kayma hızları arasında sürtünme katsayısının %6 – 12 civarında arttığı, 500 m – 2000 m kayma mesafesi arasında ise 0.5 m/s için %4.5, diğer hızlar için %7 – 11 civarında arttığı görülmüştür. Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numunenin 10N yük

altında 0.5 m/s – 2 m/s kayma hızları arasında sürtünme katsayısının %5 – 6 civarında arttığı, 500 m – 2000 m kayma mesafesi arasında ise yine %5 – 6 civarında arttığı görülmüştür. Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE numunenin 20N yük altında 0.5 m/s – 2 m/s kayma hızları arasında sürtünme katsayısının %4 – 6 civarında arttığı, 500 m – 2000 m kayma mesafesi arasında ise %4 – 9 civarında arttığı görülmüştür. İyi yüzey kalitesinde işlenmiş POM numunenin 10N yük altında 0.5 m/s – 2 m/s kayma hızları arasında sürtünme katsayısının %4 – 9 civarında arttığı, 500 m – 2000 m kayma mesafesi arasında ise %3 – 12 civarında arttığı görülmüştür. İyi yüzey kalitesinde işlenmiş POM numunenin 20N yük altında 0.5 m/s – 2 m/s kayma hızları arasında sürtünme katsayısının %3 – 5 civarında arttığı, 500 m – 2000 m kayma mesafesi arasında ise %7 – 9 civarında arttığı görülmüştür. Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş POM numunenin 10N yük altında 0.5 m/s – 2 m/s kayma hızları arasında sürtünme katsayısının %4.5 – 8 civarında arttığı, 500 m – 2000 m kayma mesafesi arasında ise %8 – 12 civarında arttığı görülmüştür. Kaba yüzey kalitesinde işlenmiş POM numunenin 20N yük altında 0.5 m/s – 2 m/s kayma hızları arasında sürtünme katsayısının %2 – 6 civarında arttığı, 500 m – 2000 m kayma mesafesi arasında ise %3.5 – 9 civarında arttığı görülmüştür.

- Yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde en düşük değişimin iyi yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE’de, en yüksek değişimin ise kaba yüzey kalitesinde işlenmiş POM’da olduğu görülmüştür. Bu değer farkı, aşınma direnci ile açıklanabilir.

Sonuç olarak, gerçekleştirilen testlerde yüzey kalitesinin sürtünme katsayısı ve aşınma direnci üzerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür. Hem UHMWPE hem POM malzemeler için iyi yüzey kalitesinde işlenmiş numunelerin sürtünme katsayısı ve aşınma dirençleri daha iyi bulunmuştur. Yüzey kalitesinin sıcaklık değişimleri üzerinde anlamlı bir etkisi görülmemiştir. Sürtünme katsayısı ve aşınma direnci açısından en iyi sonuçlar iyi yüzey kalitesinde işlenmiş UHMWPE yataklarda elde edilmiştir. Dolayısıyla bu çalışmadan elde edilen sonuçlar kıyaslandığında, bu yatakların daha avantajlı olduğu söylenebilir. Ayrıca çeşitli katkı malzemeleriyle bu yatakların tribolojik özellikler yönünden iyileştirilebileceği öngörülmektedir. Bu durum yazara ve danışmanına ilerideki çalışmalarda bu konuda araştırma yapmak üzere motivasyon sağlamıştır.

- [1] Ünlü, B.S., Köksal, N.S. (2004). "Saf Cu, Sn, Zn' den Üretilen Yatakların Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi", Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2: 37-42.
- [2] Rende H., Hanyaloğlu C. (2012). "Rulmanlarda ve Kaymalı Yataklarda Seramiklerin Kullanımı", Engineer & the Machinery Magazine, 53:28-35.
- [3] Ai, X., Moyer, C. A., Modern Tribology Handbook Vol. I & II, CRC Press, London, 2001.
- [4] Demirci, M. T, Polimer Esaslı Kaymalı Yatakların Tribolojik Özelliklerinin DeneySEL İncelenmesi. Selçuk Üniversitesi, Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, 2009.
- [5] Uzuner, F., Gediktaş, M., Salınım Hareketi Yapan Radyal Kaymalı Plastik Yataklarda Sürtünme. İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2004.
- [6] Ünal, H., Yetgin, S. H. (2010). "ÇYMAPE ve PA-6 Mühendislik Polimerlerinin Aşınma ve Sürtünme Davranışının İncelenmesi" TUBAV Bilim Dergisi, 3/2:145-152.
- [7] Ünlü, S. B., Köksal, N. S. (2004). "Saf Cu, Sn, Zn' den üretilen yatakların aşınma özelliklerinin incelenmesi", Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi 2:37-42.
- [8] Ünlü, S. B., Durmuş, H., Meriç, C. (2006). "SnPbCuSb (beyaz metal) yataktaki alaşım elementlerinin aşınmaya etkisinin incelenmesi", Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi 4:15-20
- [9] Baskar, S., Sriram G. (2014). "Tribological Behavior of Journal Bearing Material under Different Lubricants", Tribology in Industry, 36/2:27-133.
- [10] Nickchi, T., Ghorbani, M. (2009). "Pulsed electrodeposition and characterization of bronze-graphite composite coatings", Surfaces & Coatings, 203:3037-3043.
- [11] Demirci, M. T., Polimer esaslı kaymalı yatakların tribolojik özelliklerinin deneySEL incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [12] Desale D. D., Pawar H. B. (2018). "Performance Analysis of Polytetrafluoroethylene as Journal Bearing Material", Procedia Manufacturing, 20:414-419.
- [13] Cong, H. P., Liu, X. J., Li, T. S., Jia, B. B. (2007). "Tribological behaviors of several polymer-polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions", Wear 262:1353- 1359.
- [14] Ünal, H., Şen, U., Mimaroglu, A. (2004). "Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers against steel counterface", Tribology International 37:727-732.
- [15] Tevrüz, T. (1999). "Tribological behaviours of bronze-filled polytetrafluoroethylene dry journal bearings", Wear, 230:61-68.
- [16] Kukureka, S. N., Rao, M., Hooke, C. J., Liao, P., Chen, Y. K. (1998). "The effect of PTFE on the friction and wear behaviour of polymers rolling – sliding contact", Polymer Engineering and Science, 38:1946-1958.

- [17] Tevruz, T. (1998). "Tribological behaviours of carbon filled Polytetrafluororthylene (PTFE) dry journal bearings", *Wear*, 296:568-274.
- [18] Conte M., Igartua A. (2012). "Study of PTFE composites tribological behavior ", *Wear*, 296:568-574.
- [19] Khoddamzadeh, A., Development of Lead-free PTFE Based Sliding Bearing Materials, Master of Applied Science, Department of Mechanical and Aerospace Engineering Carleton University, Canada, 2007.
- [20] Wang H., Wang H. (2007). "Fabrication of self-lubricating coating on aluminum and its frictional behaviour", *Applied Surface Science*, 253:4386–4389.
- [21] Lewis R. (2009). "Friction in a hydraulic motor piston/cam roller contact lined with PTFE impregnated cloth", *Wear*, 266:888-892.
- [22] Dearn, K. D., Hoskins, T. J., Petrov, D.G., Reynolds, S.C., Banks, R. (2013). "Applications of dry film lubricants for polymer gears", *Wear*, 298:99-108.
- [23] Ünlü, S. B., Atik, E., Yilmaz, S. S. (2009). "Tribological behaviour of polymer based journal bearings manufactured from particle reinforced bakelite composites", *Materials and Design* 30:3896-3899.
- [24] Feyzullah, E., Saffak, Z. (2008). "The tribological behaviour of different engineering plastics under dry friction conditions", *Materials and Design*, 29:205-211.
- [25] Temiz, V., Çeşitli katkılı ve katkısız polimer yatakların sürtünme ve aşınma karakteristiklerinin deneysel tayini, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1998.
- [26] Quaglini, V., Dubini, P., Ferroni, D., Poggi, C., Influence of counterface roughness on friction properties of engineering plastics for bearing applications, *Materials and Design*, 30, 1650-1658, 2009.
- [27] Uzuner, F., Gediktaş, M. (2004). "Salınım hareketi yapan radyal kaymalı plastik yataklarda sürtünme", *İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi/d Mühendislik*, 3:91-98.
- [28] Ünal, H., Yetgin, S. H. (2010). "ÇYMAPE ve PA-6 mühendislik polimerlerinin aşınma ve sürtünme davranışlarının incelenmesi", *Türk Bilim Araştırma Vakfı Bilim Dergisi*, 3:145-152.
- [29] Sarı, A., Nteziyaremye, Ö. S., Polimer yatak malzemelerinin tribolojik özelliklerinin deneysel incelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, 2006.
- [30] Nguyen, TD., Sukumaran, J., De Pauw, J., De Baets, P., Tribological Behavior of Polymer Bearings Under Dry and Water Lubrication, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2003.
- [31] Bhushan, B., "Modern tribology handbook. Vol. 1, Principles of tribology", Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [32] Suh, N. P., Tribophysics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, Amerika Birleşik Devletleri, 1986.
- [33] Suh, N. P., Tribophysics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, ABD, 1986.

- [34] Halling, J., Principles of Tribology. Macmillan Press Ltd, Hong Kong, 1978
- [35] Beer P.F., Johnston. R., Mühendisler için Mekanik Statik, Birsen Kitapevi, İstanbul, 1983
- [36] Akça H., İyibilgin O., Gepek E. (2020). "Biyomalzemeler ile İmplant Üretimi Sürecinin Biyotriboloji Yönünden Değerlendirilmesi", Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8:667-692.
- [37] Soydan Y., Ulukan L., "Temel Triboloji Sürtünme- Aşınma Yağlama Bilimi ve Teknolojisi", Tagem Kopisan Ltd., Sakarya, 2013
- [38] Ezirmik, K. V., Mo-N-Ag Nanokompozit Kaplamaların Üretimi ve Tribolojisi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2008
- [39] Czichos, H., "Tribology-A System Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear", Elsevier, Amsterdam, 1978.
- [40] Emmanuel, D., Saulue, P., Understanding Dental Wear, J Dentofacial Anom Orthod, Volume 15, Number 1, 2012
- [41] T. Varol, "Nano Partikül Takviyeli Bakır Esaslı Fonksiyonel Derecelendirilmiş Elektrik Kontak Malzemelerinin Üretimi ve Karakterizasyonu" Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, 2016.
- [42] Singiseti, K., Banaszkievicz, P., Design of implants and factors associated with implant failure (wear, loosening): Tribology of natural and artificial joints, Postgraduate Orthopaedics, 2019.
- [43] Ünal, E., Taşdemir, V. (2018). "Helisel Dişlilerde Dişli Devir Sayısının Temas Gerilmesi Üzerine Etkisinin Araştırılması", Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 6/3:383-389.
- [44] K. Kato, K. Adachi, Wear Mechanism", Modern Tribology Handbook, CRC Press, 2000.
- [45] Varol, T., "Aşınma Deneyi", Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvar Föyü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2016

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Taylan G., Artun, Y., Azeloğlu, C. O., “Investigation of Tribological Properties of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Bearings” 1st International Conference on Advances in Engineering, Architecture, Science and Technology, ICA-EAST, 30, 625-632, Dec.15-17, 2021