T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI

ÇİFT MODÜLLÜ TRİBOTEST CİHAZI TASARIMI, ÜRETİMİ VE TESTLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Tuncay BİLGİN

Danışman
Prof. Dr. Enver ATİK



Manisa-2017

TEZ ONAYI

Tuncay BİLGİN tarafından hazırlanan **"Çift Modüllü Tribotest Cihazı Tasarımı, Üretimi ve Testlerinin Gerçekleştirilmesi"** adlı tez çalışması 28/09/2017 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman	**Prof. Dr. Enver ATİK** Celal Bayar Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	**Y. Doç. Dr. Can ÇİVİ** Celal Bayar Üniversitesi	
Jüri Üyesi	**Y. Doç. Dr. Ege Anıl DİLER** Ege Üniversitesi	

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Tuncay BİLGİN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ	IV
TABLO DİZİNİ	VI
TEŞEKKÜR	VII
ÖZET	VIII
ABSTRACT	IX
1. GİRİŞ	1
2. TRİBOLOJİ	2
2.1. Triboloji Bilimi ve Tribolojik Sistemin Temel Unsurları	2
2.2. Tribolojik Olay Sırasında Değişen Faktörler	3
2.3. Tribolojik Olay Sırasında Değişen Kavramlar	3
2.4. Sürtünme	3
2.4.1. Kuru Sürtünme	4
2.4.2. Sınır Sürtünme	5
2.4.3. Sıvı Sürtünme	6
2.4.3.1. Hidrodinamik Sıvı Sürtünmesi	7
2.4.3.2. Hidrostatik Sıvı Sürtünmesi	7
2.4.4. Yuvarlanma Sürtünmesi	8
2.4.5. Sürtünme Katsayısı ve Kanunları	9
2.5. Aşınma	11
2.5.1. Aşınma Türleri	11
2.5.1.1. Adhesiv Aşınma (Yapışma Aşınması)	12
2.5.1.2. Abrasif Aşınma (Yırtılma ve Çizilme)	13
2.5.1.3. Ablatif Aşınma	15
2.5.1.4. Reaksiyon Tabakası Aşınması (Tribooksidasyon)	15
2.5.1.5. Yorulma Aşınması (Pitting)	15
2.6. Yağlama	16
2.6.1. Katı Yağlayıcı Maddeler	17
2.6.2. Sıvı Yağlayıcı Maddeler	17
2.6.3. Yarı Katı Yağlayıcı Maddeler(Gresler)	17
2.6.4. Gaz Yağlayıcı Maddeler	18
2.7. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri	18
2.7.1. Deney Sistemleri	18
2.7.2. Ölçüm Yöntemleri	20
2.7.2.1. Ağırlık Farkı Metodu	21
2.7.2.2. Kalınlık Farkı Metodu	22
2.7.2.3. İz Değişimi Metodu	22
2.7.2.4. Radyoizotop Metodu	22
2.7.3. Aşınma Testlerinin Değerlendirilmesi	23
2.8. Tribotest Cihazları	24
2.9. Çalışılan Tribotest Cihazlarının Özellikleri	29
2.10. Test Cihazlarının Yazılımı	35
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	39
3.1. Materyal	39
3.2. Yöntem	39
3.2.1. Numunelerin Hazırlanması	39
3.2.2. Numunelerin Test Yüzeylerinin Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Alınması	39

3.2.3. Numunelerin Aşındırma Cihazına Bağlanması ve Testlerin Gerçekleştirilmesi 39
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 42
4.1. Bulunan Yüzey Pürüzlülük Değerleri 42
4.2. Aşındırma Testleri Gerçekleştirilen Numunelerin Ağırlık Kaybı Açısından Değerlendirilmesi 43
4.3. Aşındırma Testleri Gerçekleştirilen Numunelerin Sürtünme Katsayısı Açısından Değerlendirilmesi 46
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 51
KAYNAKLAR 53
ÖZGEÇMİŞ 55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

D: Yoğunluk

F: Kuvvet

F_n: Normal Kuvvet

F_s: Sürtünme Kuvveti

G: Ağırlık Kaybı

M: Yükleme Ağırlığı

Msr: Sürtünme momenti

R: Bağıl aşınma direnci

R_t: Yüzeyin Max. Pürüzlülüğü

s: Aşınma yolu

V_s: Bir km aşınma yoluna tekabül eden yükseklik kaybı

W_a: Aşınma Miktarı

W: Cismin ağırlığı

W_r: Aşınma direnci

μ: Sürtünme Katsayısı

μm: Mikrometre

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Tribolojik Sistem 2
Şekil 2.2. Sürtünme Çeşitleri 4
Şekil 2.3. Kuru Sürtünme Modeli 4
Şekil 2.4. Kuru Sürtünme Halinde Malzeme Yüzeylerinin Durumu 5
Şekil 2.5. Sınır Sürtünmesi 6
Şekil 2.6. Sıvı Sürtünmesi 6
Şekil 2.7. Hidrodinamik Sıvı Sürtünmesi 7
Şekil 2.8. Hidrostatik Sıvı Sürtünmesi 8
Şekil 2.9. Yuvarlanma Sürtünmesi 8
Şekil 2.10. Sürtünme Katsayısının Modellenmesi 9
Şekil 2.11. Statik ve Kinetik Sürtünme Katsayısının Farklılığı 10
Şekil 2.12. Aşınma Olayını Meydana Getiren Unsurlar 11
Şekil 2.13. Görünen ve Gerçek Temas Alanları 12
Şekil 2.14. Abrasif Aşınma 14
Şekil 2.15. Yüzey Yorulmasında Çatlağın Oluşumu ve İlerlemesi 16
Şekil 2.16. Model Deney Düzenekler 20
Şekil 2.17. Tribosistem Elemanları ve Tribosisteme Ait Giriş ve Çıkış Büyüklükleri 23
Şekil 2.18. Deney Düzeneği 25
Şekil 2.19. Cihazın Genel Görünümü 26
Şekil 2.20. Tribotest Cihazının Görünüşü 27
Şekil 2.21. Anton Paar Ölçüm Aletleri Tic. Ltd. Şti Tarafından Yapılan Tribotest Cihazı 28
Şekil 2.22. UTS Tribometer T30M-HT Pin-On-Disk ve Reciprocating Test Cihazları 29
Şekil 2.23. Palogram Konumları Şematik Gösterimi 31
Şekil 2.24. Pim-Disk Tribotest Cihazının Görünüşü 31
Şekil 2.25. Pim-Disk Tribotest Cihazının Karşıdan Görünüşü 32
Şekil 2.26. Pim-Disk Tribotest Cihazının Yandan Görünüşü 32
Şekil 2.27. Pim-Disk Tribotest Cihazının Üstten Görünüşü 33
Şekil 2.28. Gidip- Gelme Tribotest Cihazının Görünüşü 33
Şekil 2.29. Gidip- Gelme Tribotest Cihazının Karşıdan Görünüşü 34
Şekil 2.30. Gidip- Gelme Tribotest Cihazının Yandan Görünüşü 34
Şekil 2.31. Gidip- Gelme Tribotest Cihazının Üstten Görünüşü 35
Şekil 2.32. Program Arayüzü ve Kalibrasyon Ekranı 36
Şekil 2.33. Gidip- Gelme Tribotest Cihazı Test Veri Giriş Ekranı 37
Şekil 2.34. Pim-Disk Tribotest Cihazı Test Veri Giriş Ekranı 38
Şekil 3.1. Aşındırıcı Olarak Kullanılan Çelik Bilyanın Montajı 40
Şekil 3.2. Delrin Kısma Montaj 40
Şekil 3.3. Aşınma Deneyi Şematik Gösterimi 41
Şekil 4.1. Zımparalanarak Hazırlanan Test Numune Örneği 42
Şekil 4.2. Yüzey Pürüzlülüğü Şematik Gösterimi 43
Şekil 4.3. Aşınma Testi Gerçekleştirilen Numune Örneği 44
Şekil 4.4. V=10,12,15 m/dak ve 2N Yükleme Altında Kayma Hızı-Ağırlık Kaybı Değişimi Grafiği 44
Şekil 4.5. V=10,12,15 m/dak ve 3N Yükleme Altında Kayma Hızı-Ağırlık Kaybı Değişimi Grafiği 45

Şekil 4.6. V=10,12,15 m/dak ve 4N Yükleme Altında Kayma Hızı-Ağırlık Kaybı Değişimi Grafiği..... 45
Şekil 4.7. V=10 m/dak ve 2,3,4 N Yükleme Altında Kayma Hızı-Ağırlık Kaybı Değişimi Grafiği..... 45
Şekil 4.8. V=12 m/dak ve 2,3,4 N Yükleme Altında Kayma Hızı-Ağırlık Kaybı Değişimi Grafiği..... 46
Şekil 4.9. V=15 m/dak ve 2,3,4 N Yükleme Altında Kayma Hızı-Ağırlık Kaybı Değişimi Grafiği..... 47
Şekil 4.10. V=10 m/dak ve 2,3,4 N Yükleme Altında Zamana Bağlı Sürtünme Katsayısı Grafiği 47
Şekil 4.11. V=12 m/dak ve 2,3,4 N Yükleme Altında Zamana Bağlı Sürtünme Katsayısı Grafiği 47
Şekil 4.12. V=15 m/dak ve 2,3,4 N Yükleme Altında Zamana Bağlı Sürtünme Katsayısı Grafiği 48
Şekil 4.13. V=10,12,15 m/dak ve 2 N Yükleme Altında Zamana Bağlı Sürtünme Katsayısı Grafiği 48
Şekil 4.14. V=10,12,15 m/dak ve 3 N Yükleme Altında Zamana Bağlı Sürtünme Katsayısı Grafiği 49
Şekil 4.15. V=10,12,15 m/dak ve 4 N Yükleme Altında Zamana Bağlı Sürtünme Katsayısı Grafiği 49
Şekil 4.16. Test Süreleri Sonunda (300s) Ölçülen Sürtünme Katsayıları 50

TABLO DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Değişik Malzeme ve Malzeme Çiftleri için Kinetik Sürtünme Katsayıları 11
Tablo 2.2. Abrasif Aşınma Proseslerinin İçerdiği Tipik Aşınma Hızları 14
Tablo 2.3. Sürtünme ve Aşınma Testleri İçin Rapor Örneği 23
Tablo 3.1. Aşınma Testi Gerçekleştirilen Numunelerin Test Parametreleri 41
Tablo 4.1. Numunelerin Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri 43

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Enver Atik’e, test cihazı ile ilgili işlemlerde ve test aşamasında destek veren Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvar Sorumlusu Gökhan EYİCİ'ye, Test Cihazının Programsal ve Elektriksel İşlemlerinin tamamlanmasında 2015-008 no'lu projeme maddi desteğinden ötürü Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinatörlüğü Birimi' ne, öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

Tuncay BİLGİN
Manisa, 2017

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Çift Modüllü Tribotest Cihazı Tasarımı, Üretimi ve Testlerinin Gerçekleştirilmesi

Tuncay BİLGİN

Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Enver ATİK

Çift modüllü tribotest cihazının tasarlanması, üretimi ve testlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Pim disk (pin-on-disk) ve gidip gelme (reciproceter) olarak iki modül şeklinde tasarlanan tribotest cihazları üzerinde, tribolojik koşullar test edilebilmekte ve sonuçlar ölçülebilmektedir.

Tribolojik testlerde karşı sürtünme elemanı çelik rulman bilyesi ve temel sürtünme elemanı olarak A16013 T6 ısıl işlem görmüş alüminyum alaşımı kullanılarak aşınma testleri gerçekleştirilmiştir.

Sürtünme katsayısı malzeme çifti özelliği olduğu için çelik bilye- alüminyum alaşımı sürtünme çiftinde yükleme, sürtünme hızı gibi parametreler değişse bile belirli bir süreden sonra çiftin sürtünme katsayısının eşit olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tribotest, aşınma, malzeme çiftleri aşınma, aşınma davranışı

2017, 55 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Design, Products and Performing the Tests of Double Modules Tribotest Device

Tuncay BİLGİN

Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineer

Supervisor: Prof. Dr. Enver ATİK

İt is aimed to design, production and performing the tests of double modular tribotest device.

Tribological conditions can be tested and the results can be measured on tribotest devices, which are designed in two modules as pin-on-disc and come and reciprocator.

İn tribological tests, abrasion tests were carried out using the anti-friction steel ball bearing and the A16013 T6 heat treated aluminum alloy as the basic friction element.

Keywords: Tribotest, wear, material duplicates wear, wear behavior.

2017, 55 pages

1. GİRİŞ

Dünyada çeşitli kuruluşlarca yapılan araştırmalar da göstermiştir ki üretilen enerjinin yaklaşık üçte biri sürtünme sonunda harcanmaktadır. Diğer yandan makinelerin karşılıklı çalışan yüzeylerinde meydana gelen aşınmaların büyük oranda ekonomik kayıplara yol açtığı benzer araştırmalarda görülmüştür.

Makine parçalarının çalışma hızlarının artışı ve birbirleri üzerindeki baskıları üzerindeki zorlanmaları, makine sistemlerinin güvenilirlik ve ömür koşullarının daha az tolerans değerleri içerisine çekilmeye çalışılması, aşınma miktarının azaltılması ve kontrol altında tutulmasını zorunlu kılmaktadır.

İleri teknolojinin üretim sistemlerinin uygulandığı tüm durumlarda, aşınma ve bunlarla ilgili olarak aşınmayı azaltıcı etki olarak kullanılan faktörlerden biri olan yağlama en önemli boyutlandırma kriter ve parametrelerinin içine girmektedir.

Bu gereksinimlerin bir sonucu olarak yaklaşık son 30 yıl içinde sürtünme, aşınma ve yağlama konularını içeren yeni bir bilim dalı kurulmuştur. "Triboloji" veya "Tribo-teknik" olarak adlandırılan bu disiplin gerek üniversitelerde gerekse teknikte geniş bir ilgi görmüştür.

Uygulamalardaki sürtünme sistemlerinde (Motorlar, Yataklar, Ray/Tekerlek sistemi gibi) doğrudan doğruya muayene için gereken çok uzun sürtünme zamanı ve masraflar yanında gerçek sisteme etki eden unsurlar veya ölçme büyüklüklerinin kısmen hatta tümüyle kontrol edilemez veya ölçülemez oluşu, model deney stantlarında çalışmamızı, bazı sorunlara rağmen, kaçınılmaz kılmaktadır [1].

Bu çalışma ile tribotest test cihazının yazılımının yenilenmesi, ekipmanlarının düzenlenmesi ve belirlenen malzeme çiftleri üzerinde aşınma testlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanarak sürtünme sistemlerinde ortaya çıkan muayenede yaşanan sıkıntıları indirgemeyi amaçlamıştır.

2. TRİBOLOJİ

2.1. Triboloji Bilimi ve Tribolojik Sistemin Temel Unsurları

Birbirine göre izafi hareket yapan elemanlarda sürtünme oluşur. Gerçekleşen sürtünmenin sonucunda ise sürtünmeye etki eden birçok değişkenin etkisiyle "istenmeyen malzeme kaybı" olan aşınma ortaya çıkar. Malzeme çiftleri arasında gerçekleşen aşınma miktarını azaltmanın/önlemenin birçok yolu olmasına karşın, endüstriyel sistemlerde aşınmayı önlemek için en sık kullanılan yöntem ise yağlamadır. Sürtünme, aşınma ve yağlama ile bunların birbirlerinden etkileşimlerini inceleyen bilim dalı triboloji adı altında incelenmektedir [2].

Tribolojik sistemin temel unsurları:

Temel sürtünme elemanı: Tribolojik sistemdeki aşınması gerçekleşen ve gerçekleşen aşınmanın incelendiği elemandır.

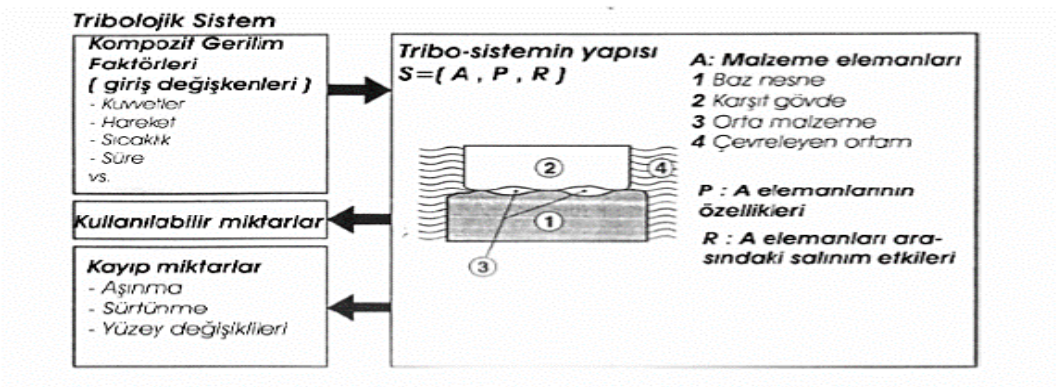
Karşı sürtünme elemanı: Temel sürtünme elemanının çalışma anında temas ettiği düşünülen malzemedir.

Ara maddesi: Temel ve karşı sürtünme elemanları arasında bulunabilecek katı, sıvı, gaz veya bunların birkaçının bir arada bulunduğu maddelerden oluşur.

Çevre: Deneyin yapıldığı ortam çevreyi oluşturur. Sürtünme sırasındaki ortamın sıcaklığı, nemi veya vakumlu bir ortam tribolojik sonuçları etkileyecektir.

Yükleme: Yükleme büyüklüğü ve şekli tribosistemin önemli parametrelerindendir.

Hareket: Sürtünme sistemlerinde hareket kayma, yuvarlanma veya kaymalı yuvarlanma şeklinde olabilir. Şekil 2.1.'de şematik olarak tribolojik sistem gösterilmiştir [1].



Şekil 2.1. Tribolojik Sistem [2].

2.2. Tribolojik Olay Sırasında Değişen Faktörler

Tribolojik olay sırasında değişiklik gösteren faktörler aşağıdaki gibidir.

- Yüzey pürüzlülüğü
- Ara maddesi özellikleri
- Sıcaklık
- Fiziksel ve Kimyasal Özellikler [1]

2.3. Tribolojik Olay Sırasında Değişen Kavramlar

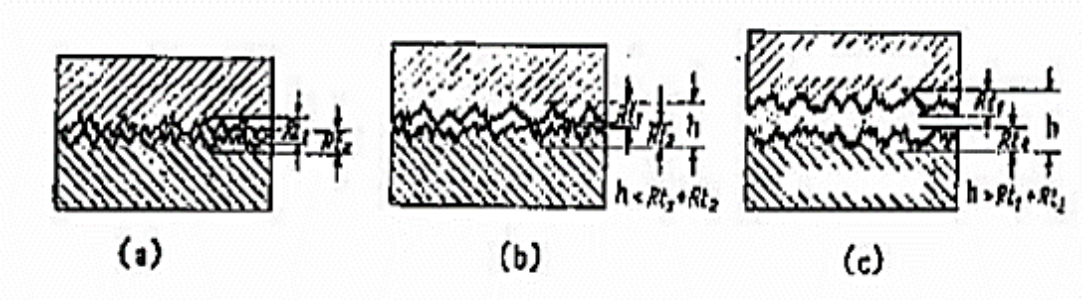
- Tribo-Teknoloji (DIN 50323): Bu kol tribolojinin aktif teknik uygulamasıdır.
- Tribolojik Gerilim/Zorlanma (DIN 50320): Katı ile katı, sıvı veya gaz formla temas sonucu oluşur.
- Aşınma (DIN 50320): Tribolojik zorlanma sonucunda oluşan, katı bir malzemenin yüzeyinden gittikçe artan istenmeyen malzeme kaybı aşınma olarak tanımlanabilir.

Aşınma, kazıyan partiküllerin boyutlarıyla Tribolojik zorlanmaya maruz kalan malzeme ve yüzey yapısının tümündeki değişimlerle karakterize edilir. Aşınmanın bu tipi genellikle arzu edilmez ve işlevselliği zayıflatır (rodaj işlemleri hariç). Buna benzer işlemlerle isteyerek yapılan malzeme kaybı, nesnenin çalışma değerini arttıran prosedürler aşınma olarak değerlendirilmez [1].

2.4.Sürtünme

Sürtünme en genel anlamıyla, birbirine göre bağıl hareket yapan ve temas halinde çalışan elemanların arasındaki harekete karşı ortaya çıkan direnç olarak tanımlanır [3].

Sürtünme olayı kuru, sınır ve sıvı olmak üzere üç halde incelenir. Genel anlamda kuru sürtünme birbirine göre izafi harekette bulunan ve birbirleriyle direk temas halindeki iki yüzey arasında oluşan sürtünmedir (Şekil 2.2.a). Temas halindeki yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde bulunduğu sürtünme olaylarında iki durum ortaya çıkabilir; esas sürtünme yağlayıcı maddenin tabakaları arasında oluşursa bu hale sıvı sürtünmesi denir (Şekil 2.2.c). Yüzeyler tamamıyla ayrılmadığı takdirde, sınır sürtünmesi hali vardır (Sekil 2.2.b) [4].



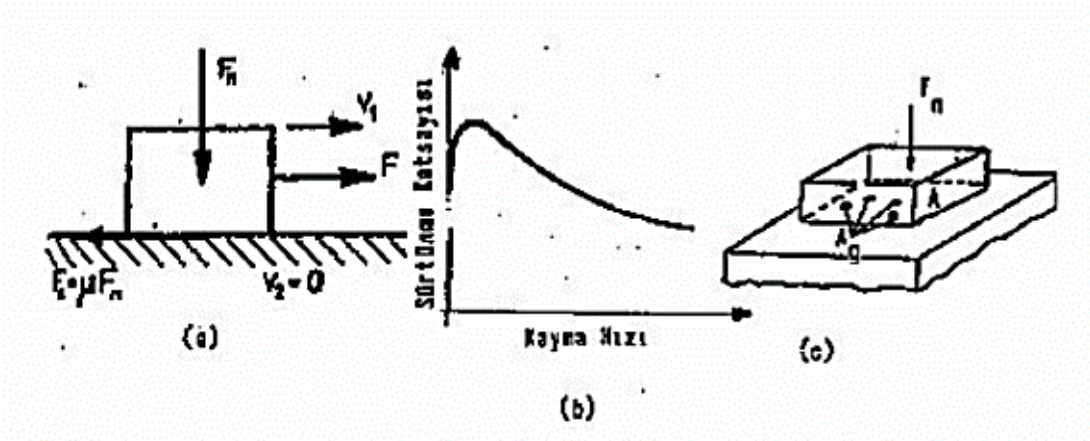
Şekil 2.2. Sürtünme Çeşitleri: a) Kuru, b) Sınır, c) Sıvı [4].

2.4.1. Kuru Sürtünme

Kuru sürtünme teorik olarak Şekil 2.3.a.'da gösterilen model kullanılarak ifade edilmektedir. Modelde de tanımlandığı gibi izafi hareket yapan ve normal bir kuvvetin (F_n) etkisi altında bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında harekete karşı

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

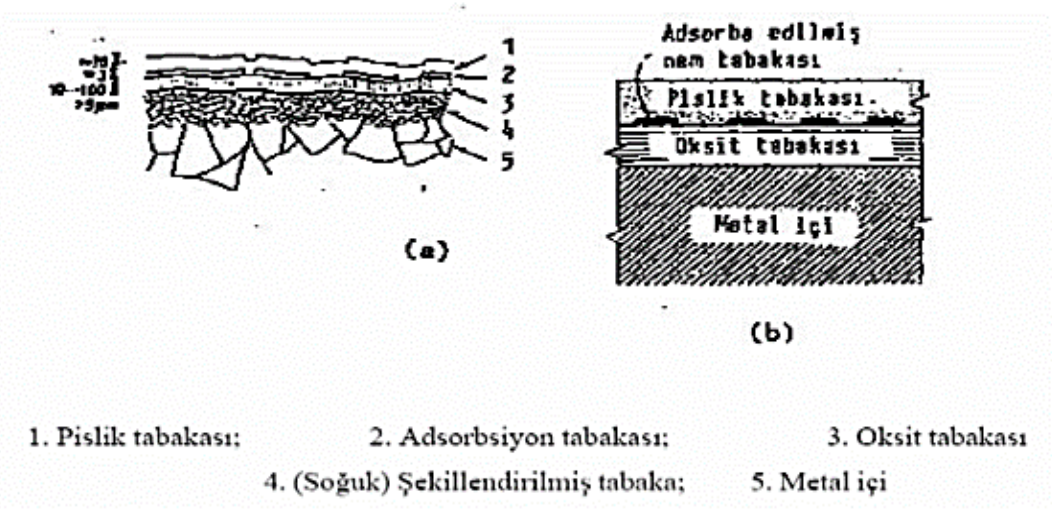
formülüyle tanımlanan bir sürtünme kuvveti oluşur. Burada μ- çarpanı sürtünme katsayısıdır.



Şekil 2.3. Kuru Sürtünme Modeli [4]

Yüzeylerin durumuna gelince, kuru olarak tarif edilen maddelerin yüzeylerinin aslında atmosferi teşkil eden elementlerin etkisi altında oksit, yağ, su buharı, pislik vs. gibi yüzey tabakaları ile kaplı olduğu yapılan inceleme ve deneylerle ortaya konulmuştur (Sekil 2.4.a-b). Adsorpsiyon yolu ile oluşan ve ancak elektronik mikroskoplarla varlığı kanıtlanabilen bu tabakalar madensel yüzeylere

kuvvetle bağlanabilmekte ve yalnız çok etkin fiziksel ve kimyasal yöntemlerle temizlenebilmektedir. Ayrıca yüzeylerdeki oksit tabakası ani olarak oluşmaktadır; şöyle ki talaş kaldırarak işlenmiş veya temizlenmiş yüzeyler atmosfere maruz kalırsa, yüzeylerde derhal bir oksit tabakası meydana gelmektedir [4].



Şekil 2.4. Kuru Sürtünme Halinde Malzeme Yüzeylerinin Durumu [4].

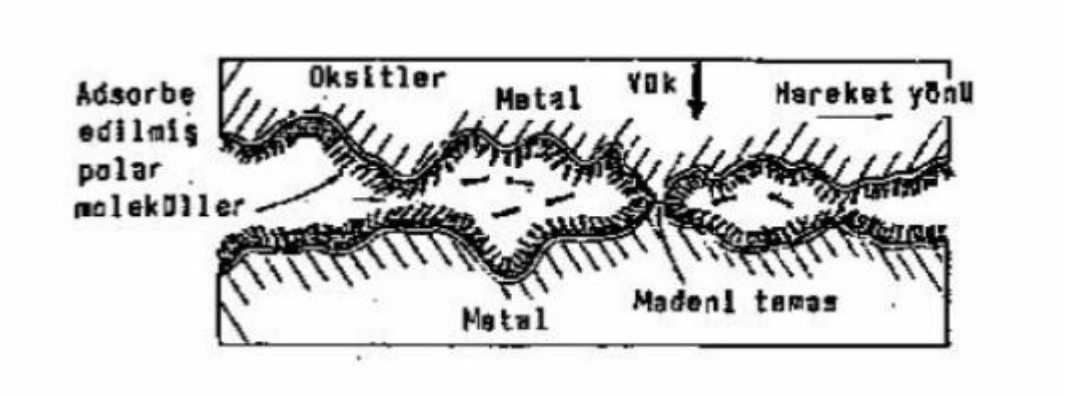
Sonuç olarak şu söylenebilir. Kuru sürtünme tekniğinde kullanılan sürtünme elemanların yüzeyleri aslında çeşitli kimyasal bileşikleri ihtiva eden doğal bir adsorpsiyon tabakası ile kaplıdır. Bunun sonucu olarak doğrudan doğruya temas eden yüzeyler arasında aslında bu tabakalar bulunur.

2.4.2. Sınır Sürtünme

Yüzeyler arasındaki aşınma durumu sırasında herhangi bir yağlayıcı madde bulunmasına rağmen sıvı sürtünmesi hali oluşturulamadığı durumda sınır sürtünmesi hali ortaya çıkar. Pratikte en çok rastlanan durumlardan biri olan bu sürtünme halinde sürtünme katsayısı genel olarak 0,02 ile 0,1 arasında değişim göstermektedir [4].

Yüzeyler arasına bir yağlayıcı madde bulunması halinde yağlayıcı maddenin molekülleri, gerçekleşen adsorpsiyon olayının sonucu olarak malzemelerin madensel yüzeylerine düzgün ve muntazam bir şekilde yapışırlar. Deneysel çalışmalar göstermiştir ki, polar karbonlu hidrojenlerin molekülleri aktif karboksil grupları ile

madensel yüzeylere bağlanmaktadır (Şekil 2.5.). Yüzeyler üzerindeki birkaç molekül tabakası kalınlığındaki adsorpsiyon tabakaları da bu şekilde oluşmaktadır [4].



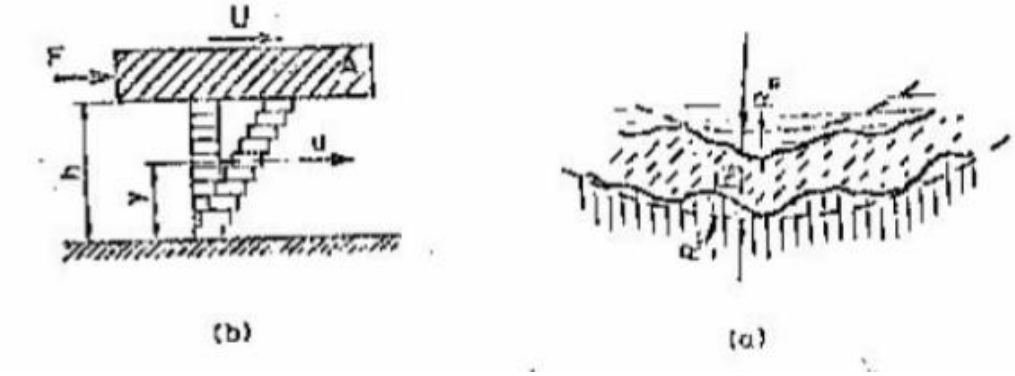
Şekil 2.5. Sınır Sürtünmesi [4].

2.4.3. Sıvı Sürtünme

Madeni yüzeylerin bir yağ tabakası ile birbirinden tamamen ayrılmış olduğu sürtünme halidir. Yüzeylerin pürüzlüğü göz önüne alınırsa, analitik bakımından sıvı sürtünmesi;

$$H_0 > R_{t1} + R_{t2} \quad (2.2)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada R_{t1} ve R_{t2} her iki yüzeyin maksimum pürüzlülüğüdür (Şekil 2.6.).

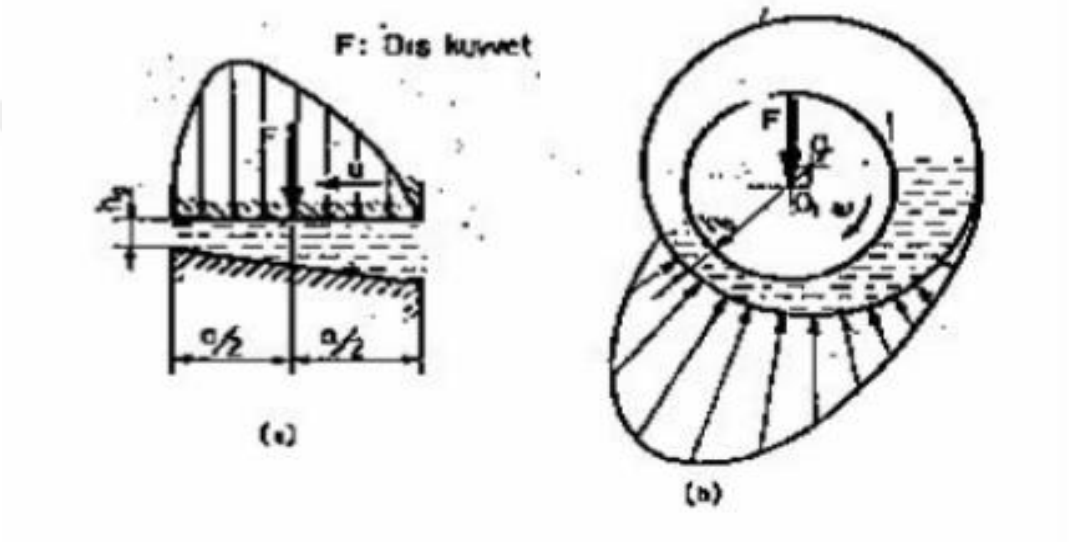


Şekil 2.6. Sıvı Sürtünmesi [4].

Sıvı sürtünmenin oluşmasında rol oynayan esas etken yağ tabakasında meydana gelen basınçtır. Basınç oluşumu Hidrodinamik ve Hidrostatik olmak üzere iki olaya bağlıdır.

2.4.3.1. Hidrodinamik Sıvı Sürtünmesi

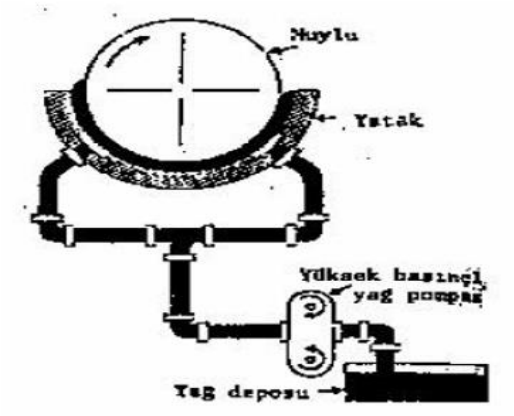
Yüzeylerin birbirleriyle temas halindeki şartlarına bağlı olarak yüzeyler arasındaki yağ tabakasında kendiliğinden bir basınç alanı oluşur. Aradaki bu basınçlı yağ filminin oluşabilmesi için gerekli olan kinematik ve geometrik şartlar, yüzeylerin birbirine göre belirli bir izafi hıza sahip olması ve yağ tabakasının hareket yönünde daralmasıdır. Pratikte bu iki şart, eğik düzlemsel yüzeylerde (eksenel yataklarda, Şekil 2.7.a) ve birbirine göre eksantrik bir durumda olan silindirik yüzeylerde (radyal yataklarda, Şekil 2.7.b) gerçekleşir [4].



Şekil 2.7. Hidrodinamik Sıvı Sürtünmesi [4].

2.4.3.2. Hidrostatik Sıvı Sürtünmesi

Hidrostatik sıvı sürtünmesi durumunda dış kuvvetin dengelenmesi ve yüzeylerin birbirinden ayrılması gerekir. Bu dengelenme ve yüzeylerin ayrılması için gerekli olan basınç yüksek basınçlı bir pompa vasıtası ile sağlanır ve yağ basınç ile sürtünme yüzeyleri arasına pompalanır (Şekil 2.8.). Hidrostatik sıvı sürtünmesinin oluştuğu bütün sistemlerde, yüzeylerin durumlarına bağlı olmaksızın sıvı sürtünmesi sağlanabilir. Yani hidrostatik sıvı sürtünmesi hareketsiz yüzeylerde de oluşturulabilir. Böylelikle bu gibi sistemlerde hareketin başlangıcında ve durma sırasında da sıvı sürtünmesi hali vardır. Kuru ve sınır sürtünmesinin bulunmadığı bu yağlama durumunda aşınma da oluşmaz [4].

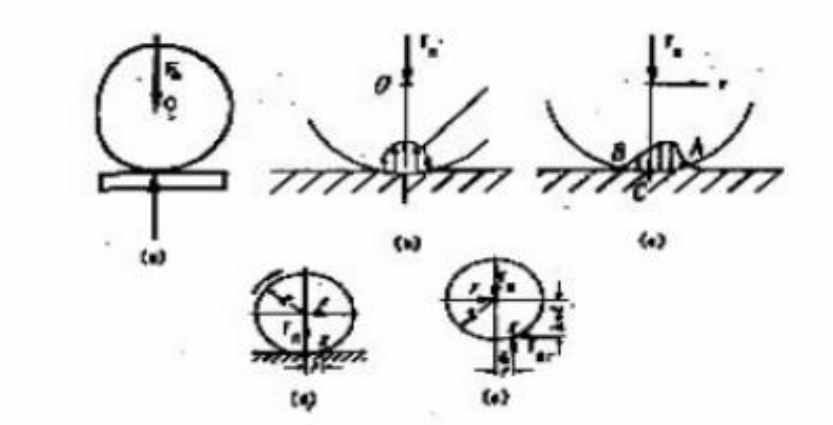


Şekil 2.8. Hidrostatik Sıvı Sürtünme [4].

2.4.4. Yuvarlanma Sürtünmesi

Yuvarlanma sürtünmesi, yuvarlanma hareketi sırasında birbiriyle temas halindeki yüzeylerde oluşan dirençtir. Tam rijit ve yüzeyi pürüzsüz olan tam silindirik veya küre şeklinde bir elemanın, rijit pürüzsüz bir düzlem üzerinde serbest yuvarlanmasında (Şekil 2.9.a) hiçbir sürtünme kuvveti meydana gelmez. Pratikte birbirleri üzerinde yuvarlanan elemanların temas yüzeylerinde Hertz tipi elastik ve daha az miktarda da plastik deformasyonlar oluşur (Şekil 2.9.b). Ayrıca hareket yönüne doğru temas alanında bir dalga meydana gelir (Şekil 2.9.c). Dolayısıyla F_n kuvvetine karşı basınçların tepkisi f değeri ile ileri kayar (Şekil 2.9.d). Bu durumda, elemanın yuvarlanmasında meydana gelen yuvarlanma sürtünme momenti (Şekil 2.9.e) [4].

$$M_{sr}=F_n.\ f\text{'dir} \quad (2.3)$$



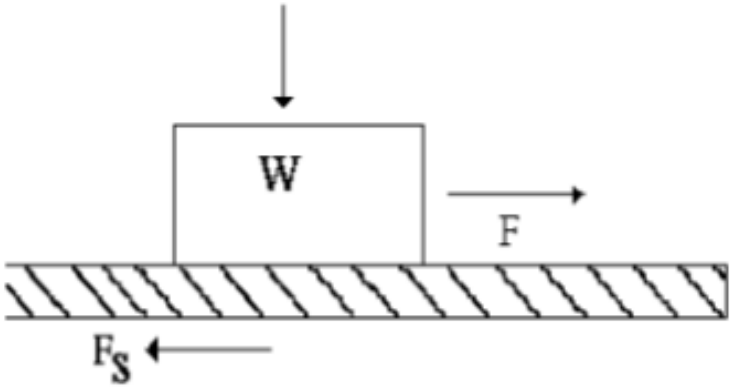
Şekil 2.9. Yuvarlanma Sürtünmesi [4].

2.4.5. Sürtünme Katsayısı ve Kanunları

Sürtünme olayı iki malzemenin temas yüzeylerinde oluşur. Birçok sistemde istenmeyen bir durumdur. Azaltmak için önlemler alınır. Fakat istenilen durumlarda mevcuttur. Örneğin; arabaların fren sistemlerinde, sürtünmeli kasnaklarda sürtünme katsayısının fazla olması istenir [5].

Sürtünme katsayısı ile ilgili ilk çalışmalara Leonardo Da Vinci öncülük etmiştir. Malzeme ağırlığı ve sürtünme katsayısı arasındaki ilişki0,25 olarak ilk kez Da Vinci tarafından belirlemiştir [6].

Sürtünme ile ilgili tarihsel gelişime bakıldığında, iki temel teori ön plana çıkmaktadır. Birincisi Fransız bilim adamı Amontons tarafından ortaya koyulmuştur. Amontons'a göre sürtünme kuvveti, cisimler arasındaki normal yük ile doğru orantılıdır. Yani bir cisim diğeri üzerinde kayarken normal yük iki katına çıkarılırsa, sürtünme kuvveti de iki katına çıkar. Coulomb tarafından açıklanan diğer teoriye göre, sürtünme kuvveti kayma hızına bağlı değildir. Ayrıca Coulomb'a göre bir cismi harekete geçirmek için gerekli olan kuvvet, hareketi devam ettirmek için gerekli olan kuvvetten daha büyüktür ve Coulomb bu olayı statik ve kinetik sürtünme katsayısı ile tarif etmiştir [7].

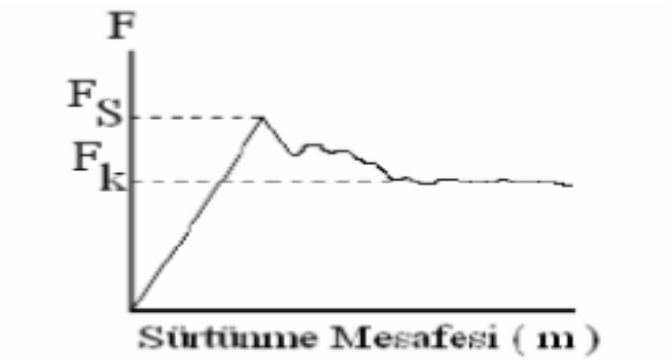


Şekil 2.10. Sürtünme Katsayısının Modellenmesi [3].

Şekil 2.10.'da W ağırlığındaki bir cismin düz ve yatay bir düzlem üzerinde hareketsiz durduğu varsayılabilir. Bu cisme küçük bir F kuvveti uygulandığında kayma olmadığı görülür, yani cisim sabit kalır. Bu durum Newton'un etki-tepki

prensibine göre temas bölgesinde oluşan statik sürtünmenin, cisme uygulanan F kuvvetine eşit ve ters yönde olduğunu açıklar (Şekil 2.10.) [3].

$$F=F_S \quad (2.4)$$



Şekil 2.11. Statik ve Kinetik Sürtünme Katsayısının Farklılığı [3].

F_S sürtünme kuvveti, bağıl hareket eden ve normal bir kuvvetin etkisi altında bulunan iki cismin temas eden yüzeyleri arasında hareketle oluşur.

$$F_S=\mu_k.W \quad (2.5)$$

Kinetik sürtünme katsayısı μ_k, statik sürtünme katsayısı μ_s'den daha küçük değerdedir. Bunun sebebi, dinamik haldeki yüzeylerde bulunan küçük çıkıntılar statik haldeki gibi yapışmak için gerekli zamanı bulamazlar. Bu nedenle geçilmesi gereken temas alanı azalır [3].

Tablo 2.1.'de değişik malzeme ve malzeme çiftleri için kinetik sürtünme katsayıları verilmiştir. Verilen değerlere bakıldığında en düşük kinetik sürtünme katsayısı hidrodinamik yağlamada görülmüştür.

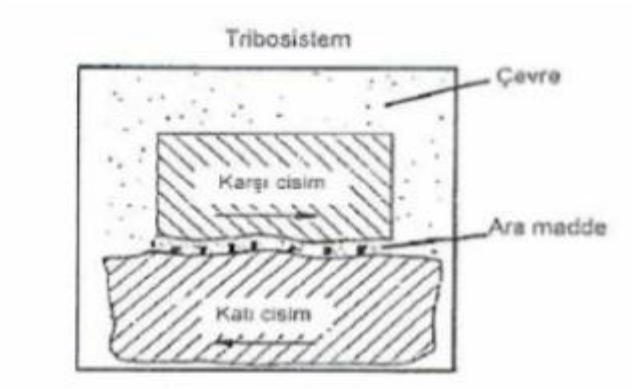
Tablo 2.1. Değişik Malzeme ve Malzeme Çiftleri İçin Kinetik Sürtünme Katsayıları [7].

Malzeme Çifti	μ_k
Vakumda temiz metaller	Yapışma, μ>5
Havada temiz metaller	0.8-2
Kuru yatak metali (kurşun) üzerinde/çelik	0.1-0.5
Seramik üzerinde (ör. Elmas) /çelik	0.1-0.5
Seramik üzerinde/seramik	0.05-05
Polimer üzerinde/polimer	0.5-0.1
Metallerin sınır tabaka yağlanması	0.5-2
Yüksek sıcaklık yağlayıcıları/grafit	0.5-2
Hidrodinamik yağlama	0.001-0.005

2.5. Aşınma

Genel ifade ile aşınma: iki malzemenin birbirine temas eden yüzeylerinde, tribolojik nedenlerden dolayı, küçük parçacıkların kopmasıyla meydana gelen istenmeyen malzeme kaybıdır [5].

DIN 50320 veya ASTM G40-93 de ise: "Aşınma: Kullanılan malzemelerin yüzeylerinin, daha çok mekanik etkenler ile küçük parçacıkların ayrılması sonucu istenilmeyen şekil değişikliğidir." şeklinde tanımlanmaktadır [5].



Şekil 2.12. Aşınma Olayını Meydana Getiren Unsurlar [2].

2.5.1. Aşınma Türleri

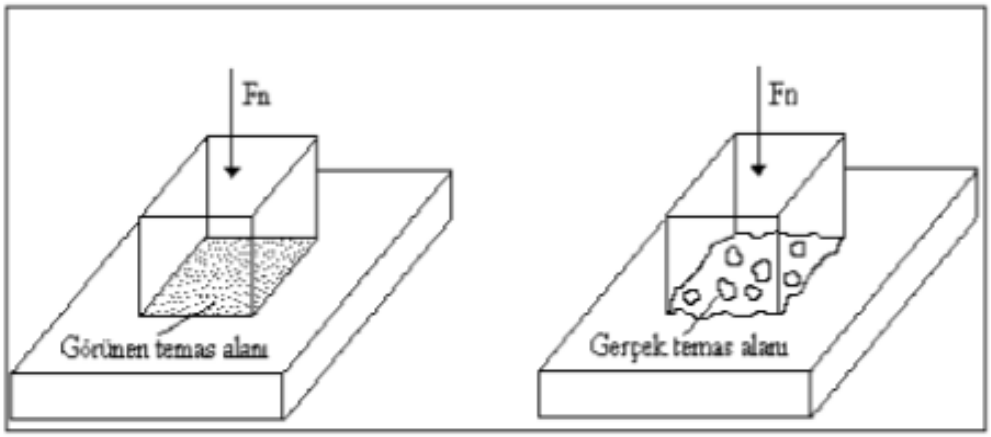
Aşınma, hareketli makine parçalarının ömürlerini, performanslarını azaltan ve birbirleriyle temas halindeki hareketli parçaların zarar görmesine neden olan çok

önemli bir faktördür. Aşınmanın sebep olduğu kayıplar ve hasarlar ekonomik açıdan çok büyük olmaktadır. Aşınma mekanizmaları tanımlanırken en fazla etkili olan aşınma türü dikkate alınarak tanımlama yapılır. Bu aşınma türleri genel olarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir [5]:

2.5.1.1. Adhesiv Aşınma (Yapışma Aşınması)

Bu aşınma türü en yaygın olarak rastlanan aşınma türü olmasına rağmen, genellikle bu aşınmada oluşan hasarların hızlandırıcı etkisi bulunmamaktadır. Bu tür aşınma iki malzemenin birbiri üzerinde hareket etmesi sırasında yapışması (mikro kaynamalar) ve kayması sonucunda küçük parçacıkların ayrılmasıyla oluşmaktadır. Temas yüzeylerinin gerçek alanının geometrik alana (Şekil 2.13.) oranı 1/500 ile 1/2000 arasında olduğu bilinmektedir. Düşük temas alanına etki eden basıncın gerçekte çok yüksek olması, metal-metal yüzeyler arasında mikro kaynamaların oluşmasına yol açar. Tribolojik sistem içerinde hareketin başlaması ve devam etmesiyle de bu kaynak noktalarında kayma mukavemeti düşük olan malzemeden parçacık kopmaları meydana gelir [1].

Rabinowicz ve Tabor aşınma ve yağlayıcılar üzerine bazı çalışmalar yapmışlar ve yüzeylerde yağlayıcı maddenin bulunmadığı durumlarda yüzeye dik olarak etki eden yükün artış miktarına bağlı olarak aşınmanın da lineer olarak arttığını bulmuşlardır. Yüzeye yağlayıcı uygulanması durumunda ise, malzeme kaybının azalması kadar, sürtünme katsayısının da düşürüldüğünü gözlemlemişlerdir [7].



Şekil 2.13. Görünen ve Gerçek Temas Alanları [3].

Araştırmalar ve deneyler sonucunda adhesiv aşınmanın azaltılmasında bazı uygulamaların faydalı olduğu görülmüştür. Bunlar:

•Mikro kaynamaları önlemek amacıyla farklı malzemelerden oluşan sürtünme çiftleri kullanılmalıdır [8].

• Metal yüzeylerin yağlama ile birbirine temas etmesini ve dolayısıyla mikro kaynamaları önlemek [8].

• Malzeme çiftleri düşük katı çözünürlüğe sahip olmalıdır. Roach, Goadzeit ve Hunnicut adhesiv yapışmada alaşımlamanın çok etkili bir parametre olduğunu belirtmişlerdir [8].

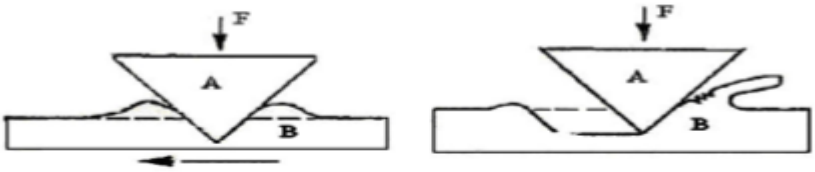
• Malzemenin diğer mühendislik özelliklerini bozmayacak şekilde mümkün olduğunca sert olması gerekmektedir. Genellikle sert özelliğe sahip metaller çok zor plastik davranış gösterirler ve daha düşük sürtünme katsayısına sahiptirler [7].

2.5.1.2. Abrasif Aşınma (Yırtılma ve Çizilme)

Sürtünme çiftlerinin yüzey pürüzlülüğüne sahip olması nedeniyle, sert olan malzeme yumuşak olan malzemenin yüzeyini çizer veya kazır. Bu esnada yüzeyden mikro talaşlar şeklinde istenmeyen malzeme kaybı gerçekleşir [5].

Benzer şekilde sert ve keskin köşeye sahip mineral tanelerinin, metal yüzeyini mikroskobik ölçekteki bölgede çizme yoluyla talaş kaldırması ve malzeme içerisinde derinlerde değişiklik yapması da abrasif aşınmaya yol açar. Burada, birbirinden çok farklı kristalografik yapıda olan aşınma çifti arasında kaynaklaşma olayı düşünülmez. Örneğin, hafriyat ve cevher öğütme, nakletme makinelerinde görülen aşınma bu türdendir [2].

Abrasif aşınmanın şematik ifadesi Şekil 2.14'de görülmektedir.



Şekil 2.14. Abrasif Aşınma [3].

Tablo 2.2.‘de tipik abrasif aşınma uygulamaları ve aşınma miktarları verilmektedir. Bir malzemenin önemli ölçüde abrasif aşınmaya tabi tutulabilmesi için, aşındırıcı malzeme olarak kullanılan malzemeden çok daha yumuşak olması gerekir. Genel olarak abrasif aşınma miktarını aşağı değerlere çekmek için aşınmaya uğrayan malzemenin aşındırıcı malzemeden çok daha sert olması önerilebilir [5].

Tablo 2.2. Abrasif Aşınma Proseslerinin İçerdiği Tipik Aşınma Hızları [7].

Mekanizma	Aşınma Miktarı (mils/h)
1.Oymalı sürtünme aşınmasında östenitik mangan çeliği	
A. Darbeyle toz üretiminde kullanılan çekişler	5-1000
B. İş makinelerinin dalıcı dişleri	5-500
C. Kaba cevher kazıyıcılarının aşındırıcı bıçakları	4-15
D. Top milli kepçe ağızları	2-20
E. Silis cevherlerinin kırılması için kırıcı bantlar	0.1-1.0
F. Kaba silis cevherlerinin tutulmasında kullanılan oluk bantlar	
2. Yüksek gerilmeli(öğütmeli) abrasif aşınmada düşük alaşımlı yüksek karbonlu çelikler	
A. Silis cevherlerinde kullanılan çubuk ve bilyeli mil bantları	0.5-5
B. Islak öğütülmüş silis cevherlerinin aşınma bilyelerinde	0.15-0.45
C. Islak öğütülen ham çimento çamurundaki öğütücü bilyeler	0.05-0.15
D. Kuru öğütülen çimento klinkerlerinde kullanılan öğütücü bilyeler	0.005-0.015
3. Düşük gerilmeli abrasif aşınma(Eroziv)’ da perlitik beyaz dökme demir	
A. Kum püskürtme nozülleri	100-1000
B. Kum taşıma bantları	50-250
C. Aşındırıcı mineral çözeltilerinin pompalanmasında kullanılan yükleyici vanalar	0.1-5 0.05-1
D. Abrasif mineral çözelti, ajitasyon ve flotasyon pervaneleri	0.05-0.2
E. Kum çözeltilerinde vida tipi sınırlandırıcıların aşınan papuçları	

2.5.1.3.Ablatif Aşınma

Ablatif aşınma, malzemenin bölgesel olarak aşırı zorlandığı noktalarda oluşan fiziksel ve kimyasal değişimler sonucunda ortaya çıkar. Bu mekanizmada yüksek sıcaklık etkisiyle malzeme yüzeyinden molekül mertebesinde ortama difüzyon gerçekleşir: bu, istenmeyen malzeme kaybıdır [5].

Örneğin: Uzay araçlarının kabuk kısmında bulunan sıcaklığa dayanıklı kısmında ve fren balatalarında ortaya çıkan aşınma ablatif aşınma türündendir [3].

2.5.1.4. Reaksiyon Tabakası Aşınması (Tribooksidasyon)

Aşınma çifti yüzeylerinde, çevrede bulunan ara malzeme ve gazlar etkisi ile tribo-kimyasal, tribo-adsorbsiyon ve benzeri diğer olaylar sonucunda ortaya çıkan sınır tabakası, aşınma sürecinin devamında yassı aşınma parçacığı şeklinde sıyrılarak yeniden oluşmakta ve aşınma olayını büyük ölçüde etkilemektedir [3].

Bu aşınma türünde tribolojik zorlanmalar, hem yüzey bölgesinde oksitlenmeye neden olur, hem de kırılgan olan bu oksit tabakasının yüzeylerden kopmasına yol açar. Daha önemlisi, yüzeyden kopan sert oksit parçacıkları yüzeyleri çizerek veya kazıyarak aşındırır [5].

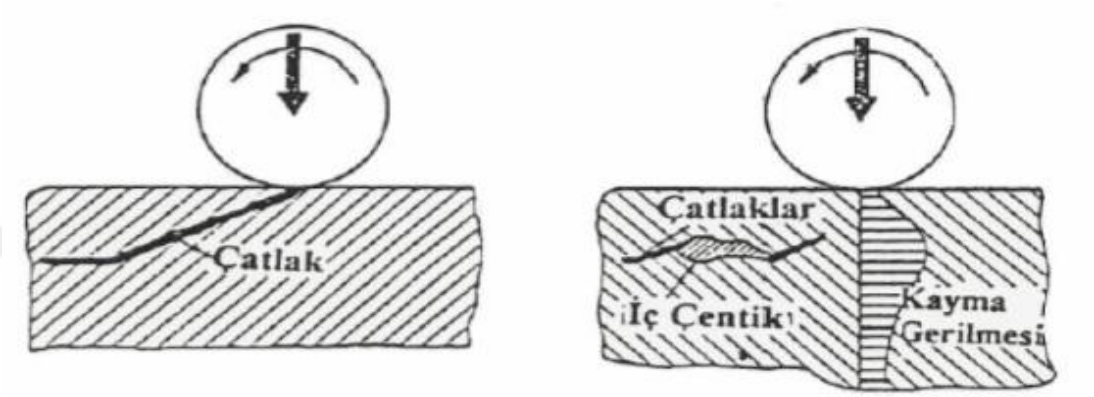
Tribooksidasyon aşınmasını önlemenin temel yollarından biri, yüzeylerin oksitlenmeye karşı dirençli olmasını sağlamaktır. Diğer bir yol da yüzeyleri oksitlenmeye karşı korumaktır: Bu amaçla yağlayıcıların oksitlenmeyi önleyici bileşime sahip olması, yüzeylerin oksitleyici ortamlardan izole edilmesi akla gelen önlemlerdir [8].

2.5.1.5. Yorulma Aşınması (Pitting)

Yorulma aşınması, genellikle malzemenin tekrarlı olarak zorlanması sonucunda malzemelerin temas yüzeyinin altında ve yüzeye yakın yerlerde, içyapının tekrarlı zorlanma sonucunda yorulmaya maruz kalarak hasara uğraması sonucu, yüzeyden yer yer ayrılmalar oluşmasıdır. Örneğin; dişli, rulman ve demir yolu raylarında görülen olay bu tür bir aşınmadır. Tekrarlı yüklemelerin yanında yüksek yüzey basınçları (Hertz Gerilmeleri) olması yorulma aşınmasının oluşması için gereklidir. Yukarıda ifade edilen örneklerde noktasal veya çizgisel temaslar vardır.

Yüzeye etki eden kuvvetin bu temas alanlarına oranlanmasıyla yüksek değerde gerilmeler ortaya çıkar. Ortaya çıkan bu gerilmeler sonucunda yüzeyin bir miktar altındaki kısımlarda çatlaklar oluşmaya başlar. Yükün her tekrarlanmasında oluşan bu çatlaklar yüzey tabakasına doğru ilerler ve bir süre sonra yüzey üzerinde küçük çukur oluşumları şeklinde malzeme kaybı gerçekleşir [8].

Şekil 2.15'de yorulma aşınması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Yüzey yorulmasında çatlağın oluşumu ve ilerlemesi [9].

2.6. Yağlama

Yağlayıcı maddeler; sürtünmeyi azaltmak, aşınmayı minimuma indirmek ve sıcaklığı düşürmek için kullanılır. Sürtünme bakımından, farklı sürtünme durumları için yağlayıcı maddenin fonksiyonu da farklıdır. Sıvı sürtünmesinde yüzeyler arasında oluşturulan yağ tabakası malzeme yüzeylerinin temas alanlarını tamamen ayırdığından yağlamada önemli olan konu yağın viskozitesidir. Bu nedenle sıvı sürtünmesi halinde genellikle sıvı, bazı hallerde gaz yağlayıcı maddeler kullanılmaktadır. Sınır sürtünmesi halinde yağlayıcı maddenin yapışma kabiliyeti ve buna bağlı olarak kimyasal bileşimi önemlidir. Bu nedenle sınır sürtünmesi halinde katı ve katkılı sıvı yağlayıcı maddeler kullanılmaktadır. Yağlayıcı maddelerin ve bilhassa sıvı yağların önemli bir fonksiyonu, sürtünmeden dolayı yüzeylerde oluşan ısının, yağın akması ile dışarıya taşınmasıdır [4].

Yağlayıcı maddeler fiziksel hallere göre katı yağlayıcılar, sıvı yağlayıcılar, yarı katı yağlayıcılar ve gaz yağlayıcılar olmak üzere dört gruba ayrılabilir.

2.6.1. Katı Yağlayıcı maddeler

Katı yağlayıcılar yalnız başlarına veya sıvı yağlar veya greslerin içine karıştırılarak kullanılır. Bu son durumda katı yağlayıcılar katkı rolünü oynamaktadır. Pratikte en çok kullanılan katı yağlayıcılar grafit veya molibden disülfittir. Grafitin başlıca yağlama özelliği, madensel yüzeylerin üzerinde, kayma gerilmesi küçük ve kopma mukavemeti yüksek bir tabaka oluşturmasından ileri gelmektedir [5].

Molibden disülfit, madensel yüzeylerin üzerinde grafite benzer olarak bir tabaka oluşturur. Bu tabakanın oluşması hava veya suya bağlı değildir. Bu nedenle vakumda veya oda sıcaklığında molibden disülfit çok iyi bir yağlama özelliğine sahiptir [4].

2.6.2. Sıvı Yağlayıcı Maddeler

Sıvı yağlayıcı maddeler 3 gruba ayrılabilir.

- Hayvansal ve bitkisel yağlar: Yağlama özellikleri yüksektir ancak ömürleri çok kısadır [4].

- Sıvı mineral yağlar: Sürtünme halindeki yüzey tabakaları arasına kolayca girip çıkabilirler; oluşan ısıyı dışarıya aktarabilirler, kolayca depolanabilirler; basit mekanizmalarla yüzeylerin arasına temiz ve soğutulmuş halde sürekli olarak gönderilebilirler. Tüm bu sayılan özellikleri sebebiyle bu yağlar, diğer yağlara nazaran daha sık kullanılırlar [4].

- Sentetik yağlar: Kimyasal maddelerden suni yollarla imal edilen yağlardır. Sentetik yağlar tek başlarına kullanılabilmekle birlikte madensel yağların mevcut özelliklerini iyileştirmek için katkı olarak da kullanılmaktadır [4].

2.6.3. Yarı Katı Yağlayıcı Maddeler (Gresler)

Gresler, sıvı yağların içinde katılaştırıcı madde bulunan yarı katı yağlayıcı maddelerdir. Alüminyum, baryum, kalsiyum, lityum, sodyum, gibi madensel sabunlar ve bunların yanı sıra bentonit, mika veya organik esaslı sabun olmayan maddeler genellikle katılaştırıcı madde olarak kullanılabilir [4].

2.6.4. Gaz Yağlayıcı Maddeler

Yüksek hız ve yükleme miktarının fazla olmadığı sıvı sürtünmeli sistemlerde, gaz niteliğini taşıyan bu tür yağlayıcı maddeler kullanılmaktadır. İlk zamanlarda hava, hidrojen ve azot gaz yağlayıcıların ana malzemeleri olduğu halde günümüzde kükürt heksafloridler, sıvı nitrojen, buhar ve organik buhar kullanılmaktadır [4].

2.7. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri

Sürtünme ve aşınmaya maruz makine ve parçaların tribolojik olaylarını incelemek için yıllardan beri çeşitli deney düzenekleri geliştirilmiştir. Günümüzde de çok sayıda yeni araştırmalar yapılmaktadır. Çünkü malzemelerin özellikleri hakkında karar vermek için, kullanılmadan önce çeşitli veriler toplamak gerekir. Bu bilgiler ışığında, malzemelerin kullanım yerlerine uygunluğu belirlenebilir [5].

1976 yılında yayınlanan bir raporda 200'ün üzerinde deney düzeneğinin varlığı belirtilmiştir. Günümüzde ise bu sayının daha yüksek olduğunu düşünebiliriz [Demirci, 1987]. Tribolojik sorunların çözümünde, bir deney düzeneğinin seçimi, simüle edilecek gerçek sistemin özellikleri göz önüne alınarak yapılır veya o doğrultuda geliştirilir. Gerçek sistem özelliklerine ne derece yaklaşılırsa, laboratuvarda bulunan deney sonuçlarının teknik sistemlere aktarılması sorunu o kadar azaltılmış olur. Kontakt geometrisi (nokta, çizgi veya yüzey temasları), hareket şekli ve sıcaklık gibi unsurlar doğru bir simülasyon için gerçek sistemle aynı şekil ve büyülükte olmalıdır. Hız, sürtünme süresi ve yükleme miktarı gibi unsurların belirli oranlarda küçültülerek deney standında uygulanması sonuçların gerçek sistemlere aktarılmasında ek sorunlar doğurmadığı gibi ayrıca uygulama kolaylığı sağlayacaktır [1].

2.7.1. Deney Sistemleri [10].

Deney sistemleri 6 değişik kategoride sınıflandırılmıştır;

- Makine alan deneyleri: Pratikte karşılaşılan durumların modellenmesi ile gerçek makineyle yapılan deney türüdür. Yapılan bu deneyler, pratikte kullanılan nesnenin gerçekteki performansını ortaya koymakla birlikte bu yöntem pahalı bir yöntemdir.

- Makine tezgâh deneyleri: Pratiğe yöneltilmiş (basitleştirilmiş, benzetilmiş ya da ivmelendirilmiş) işletme koşulları oluşturularak yapılan deney türüdür.

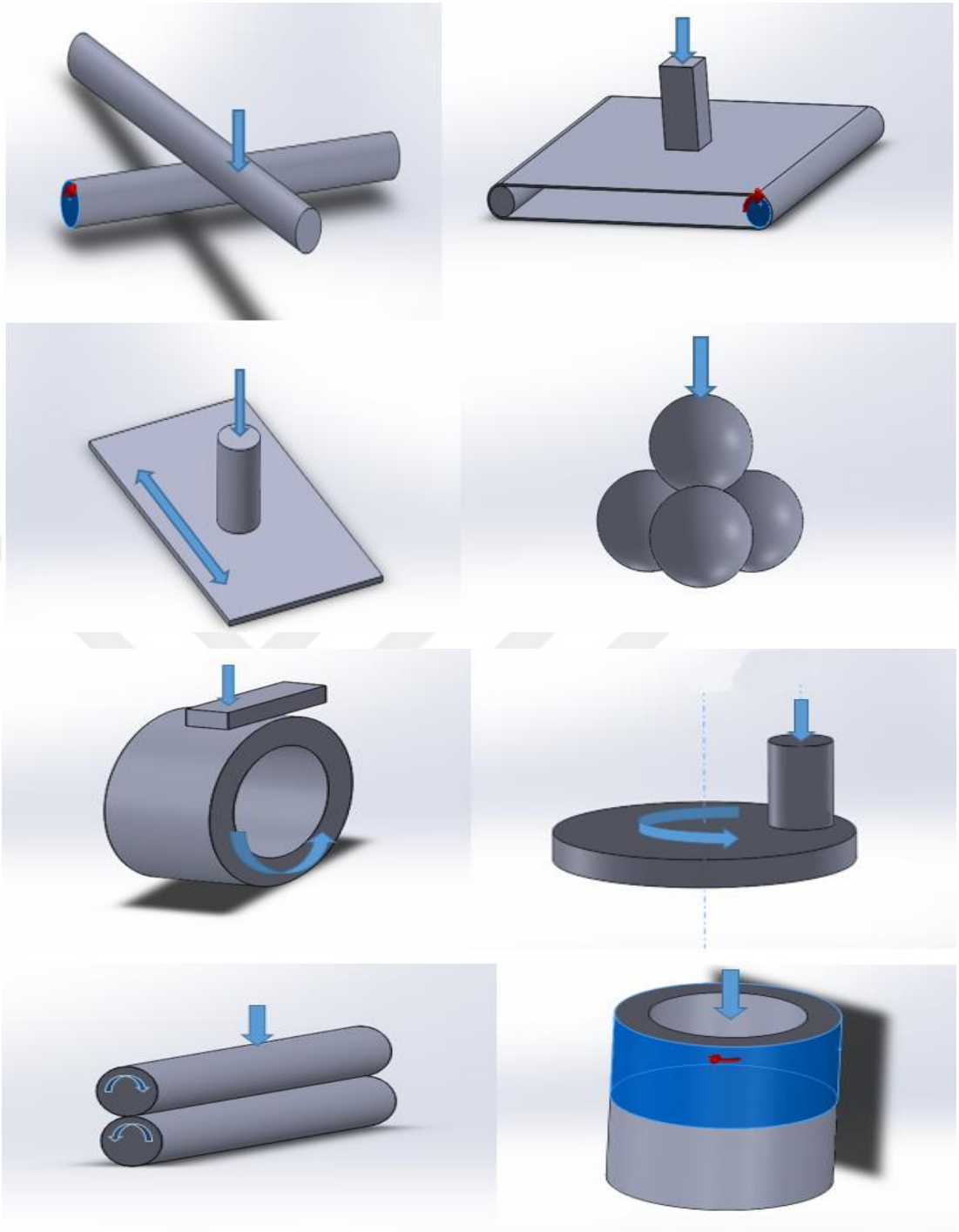
- Sistem tezgâh deneyleri: Pratiğe yöneltilmiş işlem koşulları oluşturularak özel işlemlerin denendiği deney türüdür.

- Eleman tezgâh deneyleri: Pratiğe yöneltilmiş işlem koşulları oluşturularak özel işlemlerin denendiği deney türüdür.

- Model deneyleri: Pratiğe yöneltilmiş işlem koşulları oluşturularak modellenen ve oluşturulan deney numunelerinin kullanıldığı deney türüdür. Model deney numuneleri gerçek elemanlardan fazla kullanılır.

- Laboratuvar deneyleri: Laboratuvar işlem koşullarında pratiğe yöneltilenlerin dışında bağımsız olarak belirlenen numunelerinin denendiği deney türüdür. Sürtünme ve aşınma işlemlerinin temel çalışmalarında öncelikle kullanılır.

Sürtünme direncinin ve aşınmanın ölçülmesinde kullanılan model deney yöntemlerinin sayısının fazla olmasının nedeni, sürtünme ve aşınma mekanizmalarının ve tribolojik sistemlerin fazla olmasındandır. Bu sebeple günümüzde sürtünme ve aşınma üzerine yapılan çalışmaların çok büyük bir kısmı uluslararası standartlarla belirlenmiş test teknikleri ve parametreleri kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 2.16.'da en yaygın olan deney sistemleri gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Model Deney Düzenekler [1].

2.7.2. Ölçüm Yöntemleri

Aşınma miktarı 3 farklı şekilde ölçülebilmektedir. Ağırlık farkı metodu, kalınlık farkı metodu, iz değişimi ve radyoizotop metotları ile aşağıda açıklandığı gibi ölçülmektedir [5].

2.7.2.1. Ağırlık Farkı Metodu

Ekonomik olması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Deney yapılan numuneler her ölçüm için yerinden çıkarılıp ölçüm yapılması, numune test düzeneği üzerindeyken ağırlık farkının ölçülememesi sebebiyle diğer yöntemlere göre avantajlı değildir [5].

Ağırlık kaybının ölçülmesi oldukça duyarlı hassas teraziler ile yapılır. Numunede oluşan aşınma miktarını gram veya miligram cinsinden ifade edecek olursak, metre veya kilometre cinsinden tespit edilen sürtünme yoluna göre, birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı, (gr/km), (mg/m) ile ifade edilebilir. Ağırlık kaybı, birim alan için hesap edilecek ise belirlenen alana düşen aşınma miktarı için (gr/cm^2) gibi bir birim kullanılabilir [7].

Bu tanımlamalara göre en çok kullanılan ağırlık kaybı ölçme metodunda kullanılan bağıntılar şunlardır.

$$W_a=G/d.M.S(mm^3/N.m) \quad (3.1)$$

Burada;

W_a: Aşınma oranı ($mm^3/N.m$),

G: Ağırlık kaybı (mg),

M: Yükleme ağırlığı (N),

S: Aşınma yolu (m),

d: Yoğunluk (gr/cm^3) olarak verilmiştir.

Aşınma oranının (W_a) ters değeri de aşınma direnci (W_r) olarak gösterilir [7].

$$W_r=1/W_a\,(N.m/mm^3) \quad (3.2)$$

Başka bir bağıntı olarak da bir kilometre kayma yoluna tekabül eden yükseklik kaybı bağıntısı vardır ki, bu bağıntı genellikle iki elemanlı abrasif aşınmasının hesaplanmasında kullanılır [7].

$$V_s=104.G/F.d.s(\mu m/km) \quad (3.3)$$

Burada; V_s: Bir km aşınma yoluna tekabül eden yükseklik kaybı (µm), G: Ağırlık Kaybı (mg), F: Aşınma yüzeyi (cm^2), d: Yoğunluk (gr/cm^3), s: Kayma yolu (km) olarak alınır.

Deney malzemesi yükseklik kaybının, mukayese malzemesinin (örneğin Fe 37 çeliği) yükseklik kaybına oranı, aşınma orantı sayısını (W_s) verir [7].

$$W_s = V_g \text{ (deney numunesi)} / V_s \text{(Fe37çeliği)} \quad (3.4)$$

Bu orantı sayısının ters değeri de bağıl aşınma direnci R olarak kullanılır.

$$R = 1/W_s \quad (3.5)$$

2.7.2.2. Kalınlık Farkı Metodu

Aşınma esnasında ortaya çıkacak olan boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıçtaki boyut değeri ile karşılaştırılarak elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değer esas alınarak, hacim olarak kaybedilen değer ve birim hacime düşen aşınma miktarı hesaplanır, kalınlık değeri, hassas ölçüm aletleri ile ±1µm hassasiyette ölçülmelidir [7].

2.7.2.3. İz Değişimi Metodu

Aşınma testi yapılacak numunenin sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon ile geometrisi belirli bir iz oluşturur. Deney boyunca sürekli değişen bu izin karakteristik bir boyutunun (çapının) değişimi ölçülür. Uygulamalarda genellikle iz bırakıcı olarak Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucu kullanılır. Bu metotta Elmas piramit ve bilyenin bıraktığı iz boyutlarındaki değişme mikroskop vasıtası ile ölçülür [3].

2.7.2.4. Radyoizotop Metodu

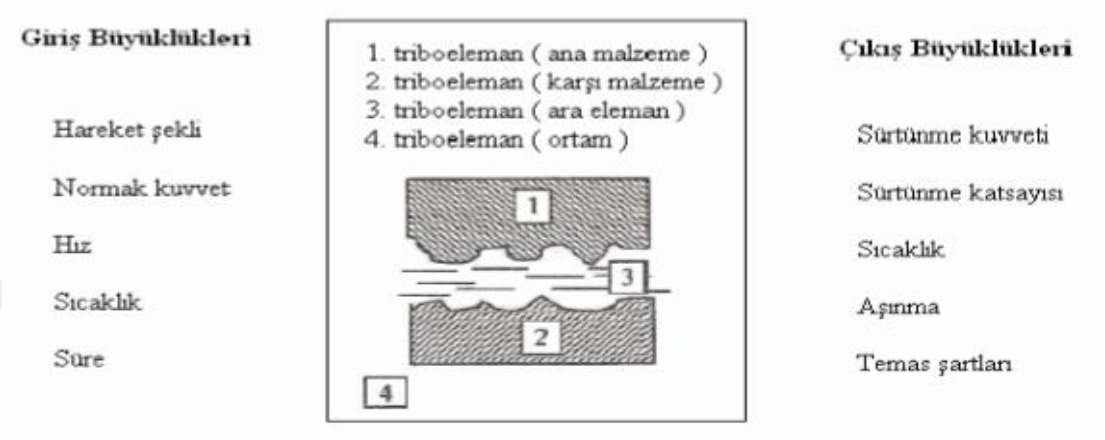
Sürtünme yüzey bölgesi proton, nötron veya α parçacıklarıyla bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilir.

Aşınmanın büyük hassasiyetlerle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarının değiştirilmeden ölçü alınabilmesi yöntemin avantajıdır. Fakat ekonomik

olmaması nedeniyle ancak özel amaçlar için kullanılır [3].

2.7.3 Aşınma Testlerinin Değerlendirilmesi

Şekil 2.17.' de Tribotest cihazlarında olması gereken giriş ve çıkış bilgileri yer almaktadır. Tablo 2.3.'de ise sürtünme ve aşınma testleri için örnek rapor verilmiştir.



Şekil 2.17. Tribosistem elemanları ve tribosisteme ait giriş ve çıkış büyüklükleri [7].

Tablo 2.3. Sürtünme ve Aşınma Testleri İçin Rapor Örneği [11].

Tribolojik Sistemin Tanımlanması					
Özellik	Bileşim	Yoğunluk	Hacim	Şekil	Boyut
1.Triboeleman					
2.Triboeleman					
Yağlayıcı					
Ortam					
Giriş Büyüklükleri	Normal Kuvvet	Temas Alanı	Temas Basıncı	Sıcaklık	Süre
1.Triboeleman					
2.Triboeleman					
Çıkış Büyüklükleri	Sürtünme Katsayısı	Aşınma Yolu	Aşınma Alanı	Aşınma Hacmi	Aşınma Katsayısı
1.Triboeleman					
2.Triboeleman					

Sürtünme ve aşınma testlerinde bu raporda bulunması gereken önemli bir bilgi de test cihazıdır. Tribotest cihazının modeli ve çalışma prensibi mutlaka verilmelidir [8].

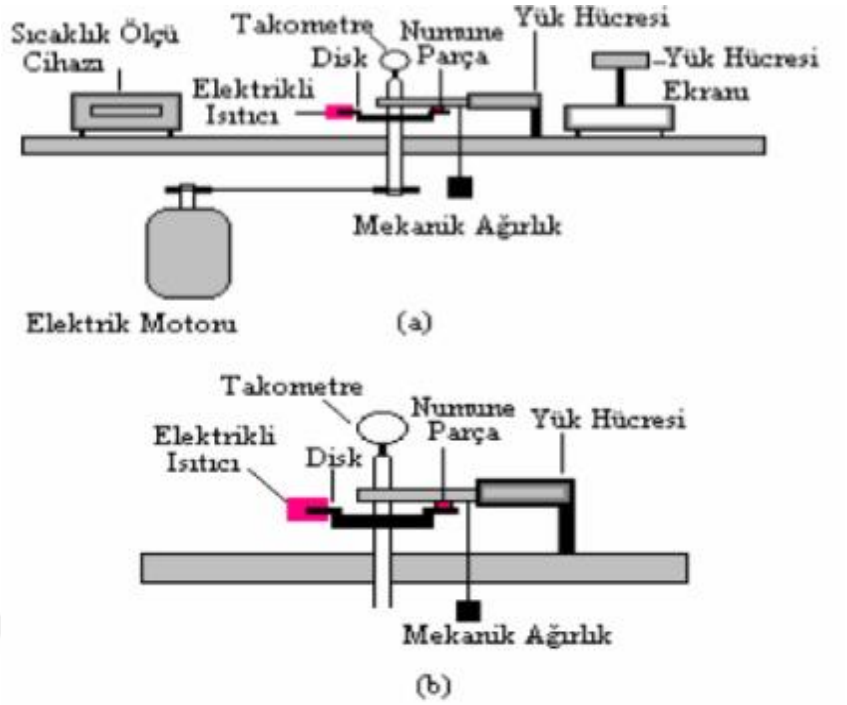
2.8. Tribotest Cihazları

Triboloji bilimi, her zaman makine ve otomotiv sektöründe önemli bir yer tutmuştur. Bilindiği gibi, sürtünme sonucunda aşınmanın meydana gelmektedir, bunu önlemek için de bilim adamları yeni çalışmalar yapmaktadırlar. Özellikle son yıllarda, laboratuvar ortamında yapılan tribolojik deneyler, tüm dünyada ve ülkemizde gelişme göstermektedir. Her türlü aşınmayı inceleyebilmek için, birbirinden farklı test cihazları tasarlanmış ve üretimi yapılmıştır [5].

Otomotiv sektörüne bakıldığında, bir otomobilin en önemli mekanizmalarından biri fren sistemleridir. İnsanların can güvenliği bu tür sistemlere bağlıdır. Bir taşıtın ani bir fren yaptığında, kısa mesafe de durması gerekir. Bu da fren disklerinde meydana gelen sürtünme katsayısı ile ilgilidir [5].

Sürtünme katsayısı hakkında bilgi edinmek ve fren disklerinin yapıldığı malzemenin tribolojik özelliklerini öğrenmek için, çeşitli test düzenekleri geliştirilmiştir. Ülkemizde bu çalışmalara örnek göstermek mümkündür [5].

İbrahim Mutlu ve Recep Koç tarafından ‘Otomotiv fren balataları için sürtünme katsayısı test cihazı tasarımı’ yapılmıştır. Yapılan bu cihazda değerler istenilen aralıklarda algılanarak bilgisayar ortamında kaydedilebilmekte daha sonra sürtünme katsayısı-sıcaklık, sürtünme katsayısı- zaman, sıcaklık-zaman grafikleri oluşturulabilmektedir. Bu cihazda, aşınma deney parametrelerinden biri olan devir ve basınç mekanik olarak ayarlanmaktadır. Şekil 2.18.’ de bu cihazın şematik resmi gösterilmektedir [5].



Şekil 2.18. Deney düzeneği [12].

Şekil 2.18.'de görülen deney düzeneğinde fren diskini döndürmek için tahrik motoru olarak 2,2 kW gücünde 1400 d/d trifaze elektrik motoru kullanılmıştır. Elektrik motorunun çalışması sonucunda elde edilen dairesel hareket, kayış kasnak vasıtasıyla fren diskini 680 dev/dak 'da döndürür. Elde edilen dönme hızı sonucunda aşınma deneyi 6 m/s hız ile gerçekleştirilir [12].

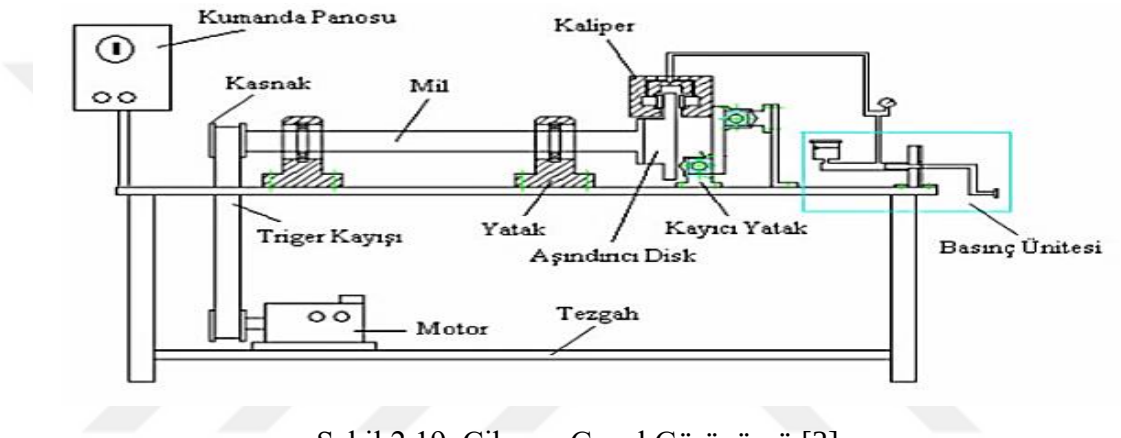
Ayrıca hız-sürtünme katsayısını farklı test parametrelerini değiştirerek inceleyebilmek için kasnak değişimi ile 3 m/s ve 9 m/s hız sağlanabilmektedir. TS 9076 Standardında belirtilen 1050 kPa ve 3000 kPa balata yüzey basıncının sağlanması için düzenekteki yük kolu üzerine uygun büyüklükte ağırlık asılarak deneyler yapılmıştır [12].

R. Dubrovsky ve A. Titov tarafından NJIT'daki Yüzey Mühendisliği laboratuvarında geliştirilen aşınma test metodolojisi hem nicelik hem de nitelik analiz deney çıktıları açısından çok çeşitli araştırma tekniklerinden meydana gelmektedir. Bu metotlar sürtünme katsayısını ve aşınma oranının değerlendirilmelerini ve deneyden önce ve sonraki yüzey deneylerini içermektedir [11].

Fren balatalarının tribolojik özelliklerini incelemek için yapılan başka bir çalışma, Y. KARAOĞLU ve O. ELDOĞAN tarafından yapılan Tribotest cihazıdır.

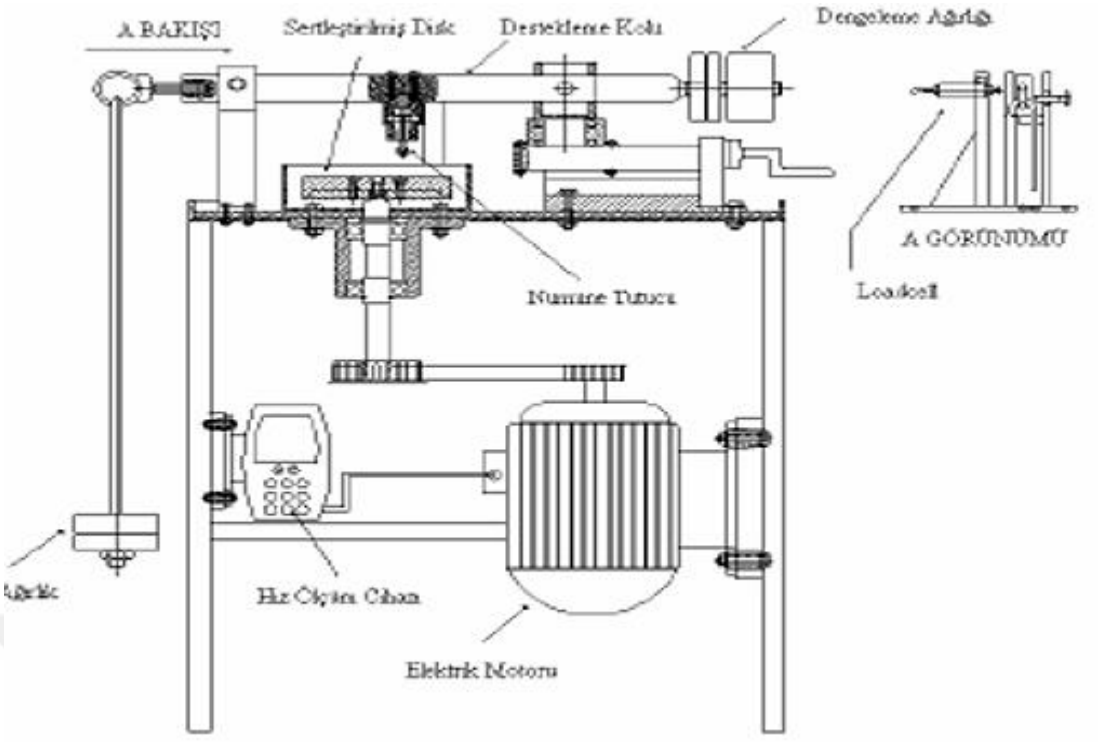
Bu projedeki amaç da ilk verilen örnek çalışmanın amacı ile aynıdır. Şekil 2.19.'da cihazın genel görünümü gösterilmiştir.

Aşındırıcı disk olarak günümüz taşıtlarında kullanılan fren diskleri kullanılmıştır. Diskin her iki yüzeyinden, hidrolik basınç uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar bilgisayar ortamında takip edilmiştir.



Şekil 2.19. Cihazın Genel Görünümü [3].

Alüminyum bronzlarının aşınma ve sürtünme özelliklerini incelemek için M. DEMİRAL ve M. YAŞAR tarafından pim-disk sistemi tribotest cihazı tasarlanıp, imal edilmiştir. Disk hareketi için 1.5 kW gücünde 1500 dev/dak AC elektrik motoru ve kayma hızını ayarlamak için hız kontrol cihazı kullanılmıştır. Şekil 2.20.'de tribotest cihazının görünüşü verilmektedir [5].



Şekil 2.20. Tribotest Cihazının Görünüşü [13].

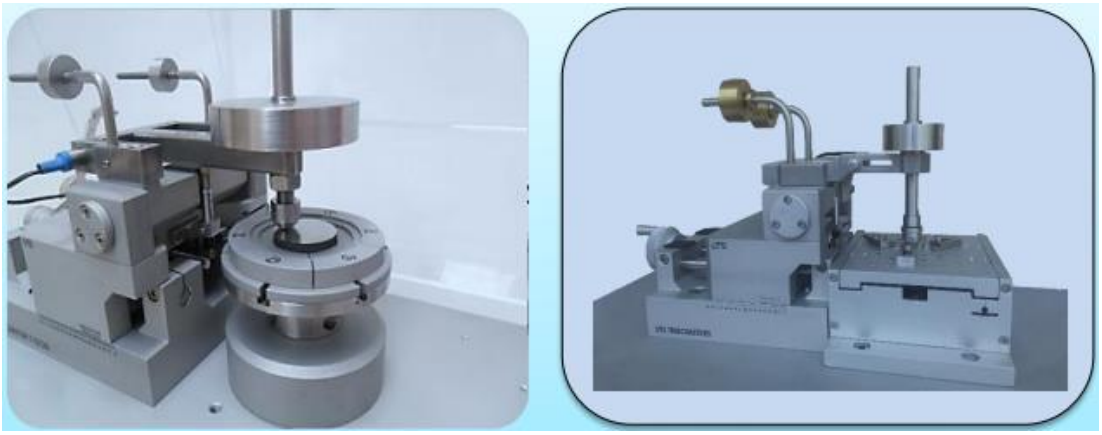
Katı haldeki metal, seramik, polimer, kompozit ve kaplama gibi malzemelerin aşınma ve sürtünme özelliklerini incelemek için Anton Paar Ölçüm Aletleri Tic. Ltd. Şti. tarafından tasarlanıp imal edilmiştir. Aşınma cihazı "ball-on-disc" ve "pin-on-disc" mekanizmaları ile çalışmaktadır. Farklı yükler (0,25N' dan 20N' a kadar) altında, farklı bilyeler (çelik, Si3N4, WC, Al2O3 gibi) ve farklı hızlar (0,5 cm/s' den 50 cm/s' ye kadar) kullanılarak aşınma deneyleri gerçekleştirilmektedir. Aşındırma işlemi farklı türde iki tip başlık kullanılabilmektedir. Birinci başlık salınım hareketli (reciprocating) lineer tipte hareket eden başlıktır. İkinci başlık dönme hareketi (rotation) yapan başlıktır [14].

Şekil 2.21.' de gösterilen Anton Paar Ölçüm Aletleri Tic. Ltd. Şti. tarafından yapılan Tribotest Cihazı; sürtünme ve aşınma ölçümleri yapılabilmektedir. Değişken boyutlardaki örnek boyutları ve şekillerde numuneler (maksimum çap 60 mm) kullanılabilmektedir. Sıvılar ve yağlama koşullarında test gerçekleştirilebilmektedir. Yazılımı sayesinde gerçek zamanlı grafik görüntüleri ve sürtünme-aşınma katsayıları elde edilebilmektedir. Test sırasında testi duraklatarak numunelerden aşınma izine ilişkin ölçü alabilme imkânı sunmaktadır.



Şekil 2.21. Anton Paar Ölçüm Aletleri Tic. Ltd. Şti tarafından yapılan Tribotest Cihazı [14].

Katı haldeki malzemelerden hazırlanan UTS Firması tarafından geliştirilen Şekil 2.22.' de 2 modülü gösterilen tribotest cihazı pin-on-disk ve reciprocating olarak çalışmaktadır. 1-60 N arasındaki yüklerde test gerçekleştirilebilmektedir. Pin-on-disk cihazında 75 mm çapına kadar numuneler test edilebilmekte, 50-1000 devir/dakika ile test gerçekleştirilebilmektedir. Reciprocating cihazında 60 mm strok ile çizgisel aşınma testleri gerçekleştirilebilmektedir. Test cihazında kullanılan yazılım sayesinde Sürtünme katsayısı- zaman/yol, Sürtünme kuvveti – zaman/yol, Aşınma derinliği- zaman/yol, Sıcaklık- zaman/yol grafikleri yazılım üzerinden elde edilebilmektedir. Ağırlık askı ağırlığı mantığı ile sabit miktarda numune üzerindeki ağırlık koluna bağlanmaktadır. Test sırasında anlık olarak değişimi ölçülmemektedir.



Şekil 2.22. UTS Tribometer T30M-HT Pin-On-Disk ve Reciprocating Test Cihazları [15].

2.9. Çalışılan Tribotest Cihazlarının Özellikleri

Kullandığımız pim-disk ve gidip-gelme modellerinde tasarlanıp imal edilen tribotest cihazları, sürtünme katsayısının deney sırasında sürekli ölçülebilmesine imkân vermektedir. Normal yükleme 0-500 N arasında hassas olarak ayarlanabilmekte ve dijital olarak görüntülenebilmektedir. Kayma hızı da geniş aralıkta değiştirilebilmektedir. Palogram sayesinde deneyin her aşamasında numune yüzeylerinin birbirlerine paralel olarak kalması sağlanabilmektedir.

Pim yerine aşınması ihmal edilebilecek, örneğin seramik/karbür bilye veya pimler kullanılırsa, numunenin aşınma kaybı mikron mertebesinde deney sırasında sürekli olarak ölçülebilmektedir [5].

Tribotest cihazlarında bütün parametreler bilgisayar yardımıyla kontrol edilebilmektedir. Sürtünme kuvveti ve normal kuvvet hassas olarak ölçülebilmekte ve alınan dijital bilgiler bilgisayara iletilmektedir. Tribotest cihazlarına uygun olarak yazılan bilgisayar programıyla normal kuvvet, sürtünme kuvveti verileri sürekli kaydedilmektedir. Cihazın diğer test cihazlarından en büyük farklılığı sürtünme katsayısı hesaplamasında kullanılan normal kuvvet değerinin değişimini de anlık olarak hesaba katmasıdır. Sonrasında bu veriler ele alınarak grafikler oluşturulmaktadır.

İki farklı deney düzeneği mevcuttur.

1- Pim-Disk (Pin-on-Disk)

2- Gidip-Gelme (reciproceter)

Her iki bölümde de üst numune sabittir. Alt numuneler hareketlidir. Hızları invertör yardımı ile istenilen düzeye ayarlanabilmektedir. Hem ana sürtünme numunesi hem de karşı sürtünme elemanı değiştirilebilmektedir.

Tribotest cihazının genel özellikleri aşağıda verilmiştir.

•Yük: 0 ile 500 N

• Sıcaklık: Çevre Sıcaklığı ve sıcak yağ havuzu ile ısıtma.

• Bilye Çapı: 6 ile 16mm (Kare ve Dikdörtgen numunelerde takılabilir.)

• Ortam: Kuru, yağlı.

Gidip-Gelme Cihazı

• Gidip gelme deney düzeneğindeki Plakanın Stroku: 18 ile 90 mm.

• Gidip gelme deney düzeneğindeki Plakanın Max. Lineer Hızı: 2.35 m/s

• Plakanın Max. Ölçüleri: 115x130x10 mm

Pim-Disk Cihazı

• Pim-Disk deney düzeneğindeki Diskin Max. Devri: 750 dev/dak

• Diskin Min. ve Max. Çapı: 60 ile 118 mm

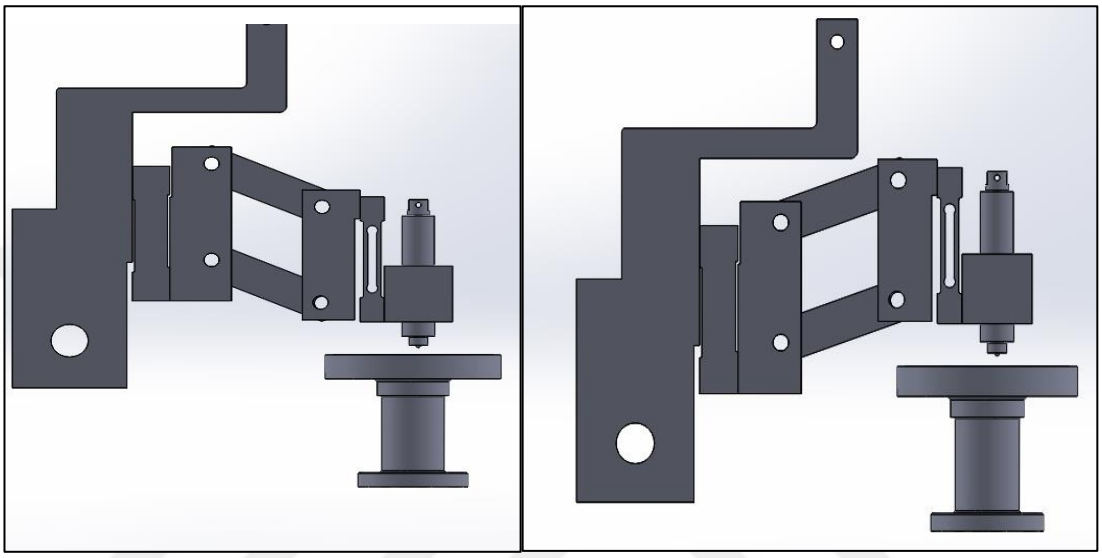
Diskin dönme hızı ve plakanın lineer hızı bilgisayar yardımıyla ayarlanabilmektedir. Tribotest cihazlarında yükleme 0-500 N arasında yük loadcell' inden dijital olarak görülüp ayarlanabilmektedir. Bu işlem için;

İlk önce, yük kolunun, loadcell 'in, pens takımının, numunenin ağırlığı dengelenir, yani sıfırlanır. Mekanizma denge halini aldıktan sonra, ağırlıkları belli olan yükler vidalı mil üzerinde yer değiştirilerek mekanizmaya uygulanır.

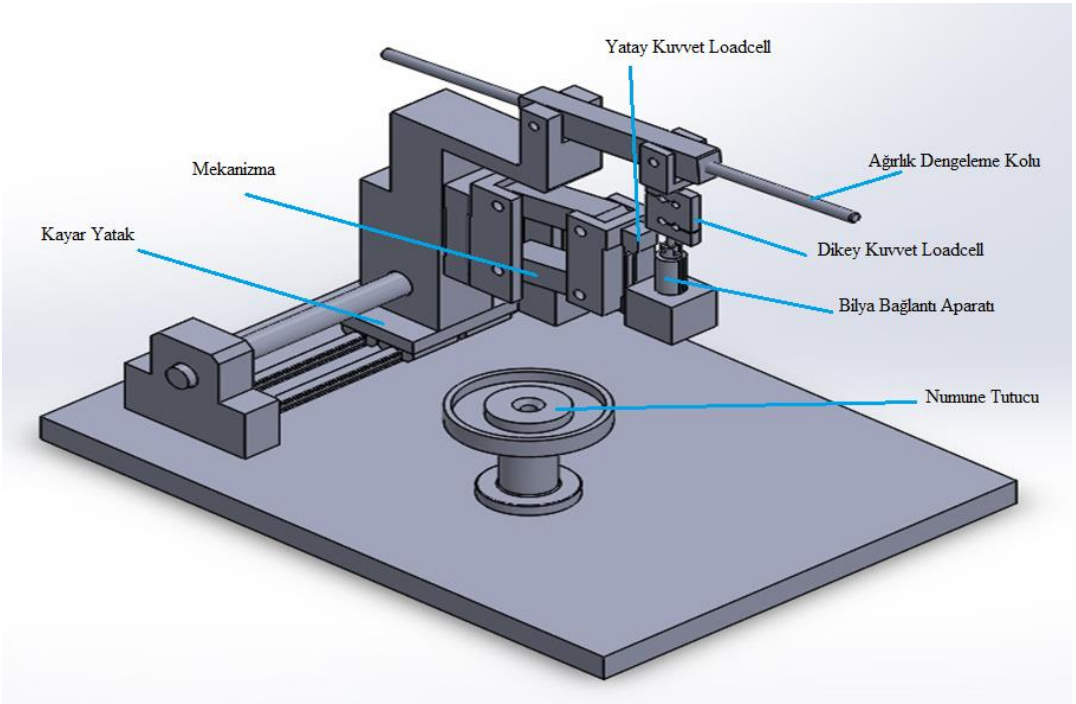
Kuvvet ölçümleri, iki loadcell yardımıyla yapılmaktadır. Normal yük, numune bağlantı takımı ile yük kolonu arasına yerleştirilmiş olan loadcell tarafından ölçülmektedir. Bu ölçüm bilgisi rahatlıkla bilgisayar ortamından okunabilmektedir.

Pim-disk ve gidip-gelme tribotest cihazlarının görünüşleri Şekil 2.24.-2.31.'de verilmiştir.

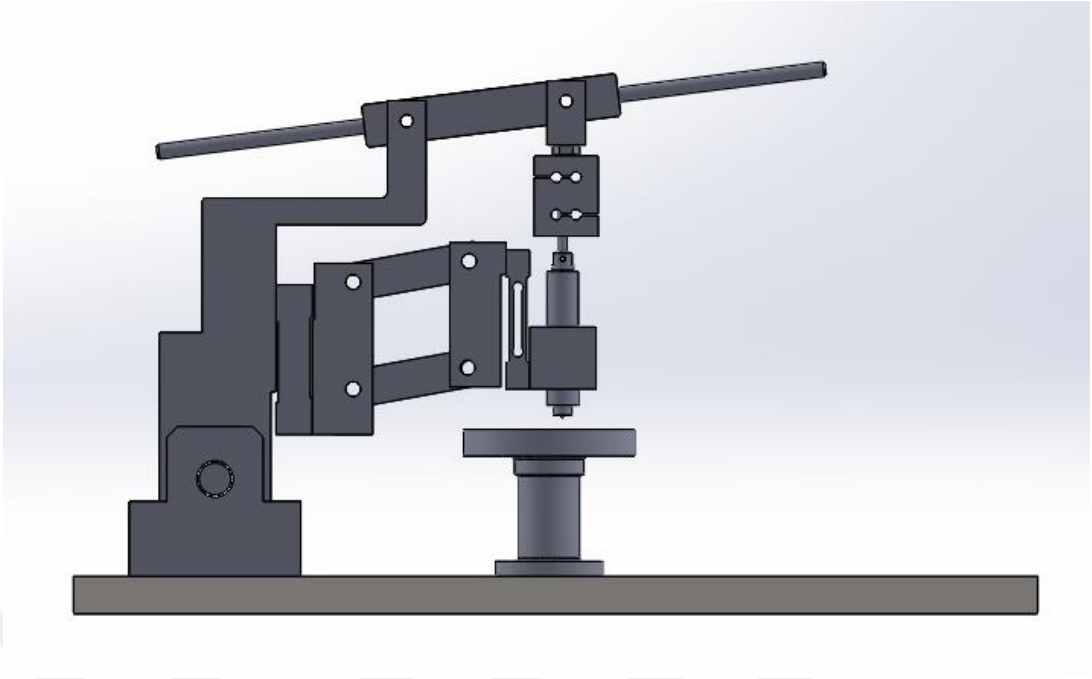
Şekil 2.23.'de gösterilen palogram sistemi sayesinde test sırasında numune yüzeyi ile aşındırıcı malzeme olarak kullanılan malzemenin yüzeyleri, testin her aşamasında aşınma derinliği arttıkça her zaman paralel olarak kalmaktadır.



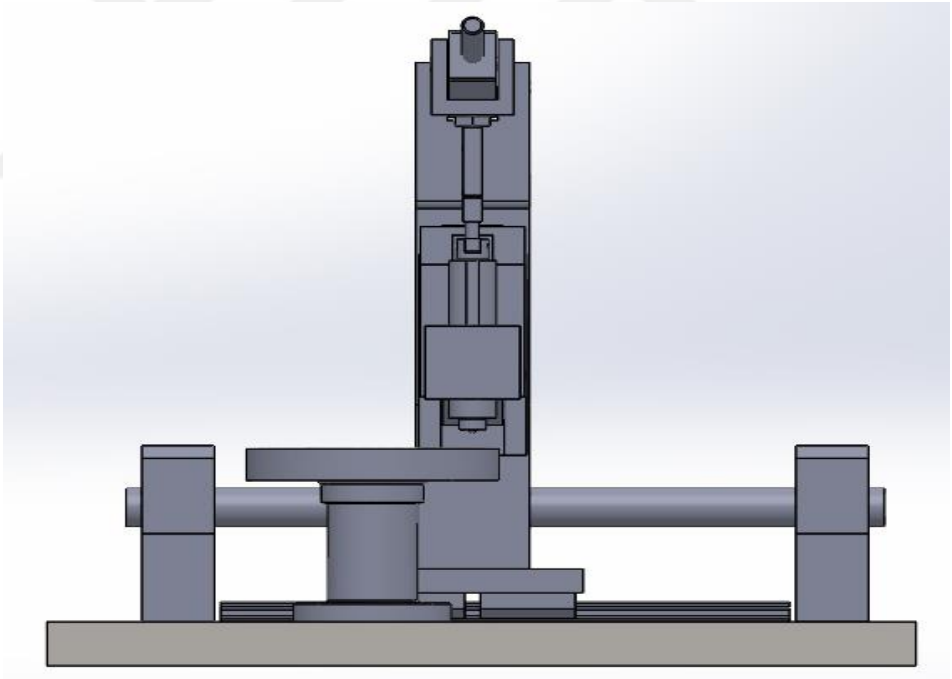
Şekil 2.23. Palogram Konumları Şematik Gösterimi



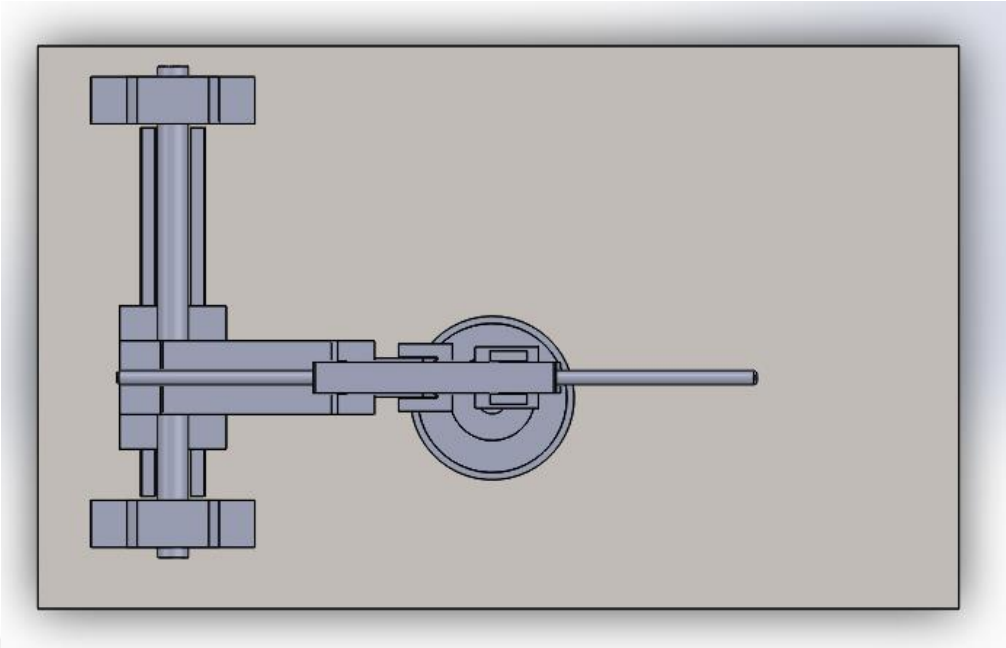
Şekil 2.24. Pim-disk Tribotest Cihazının Görünüşü



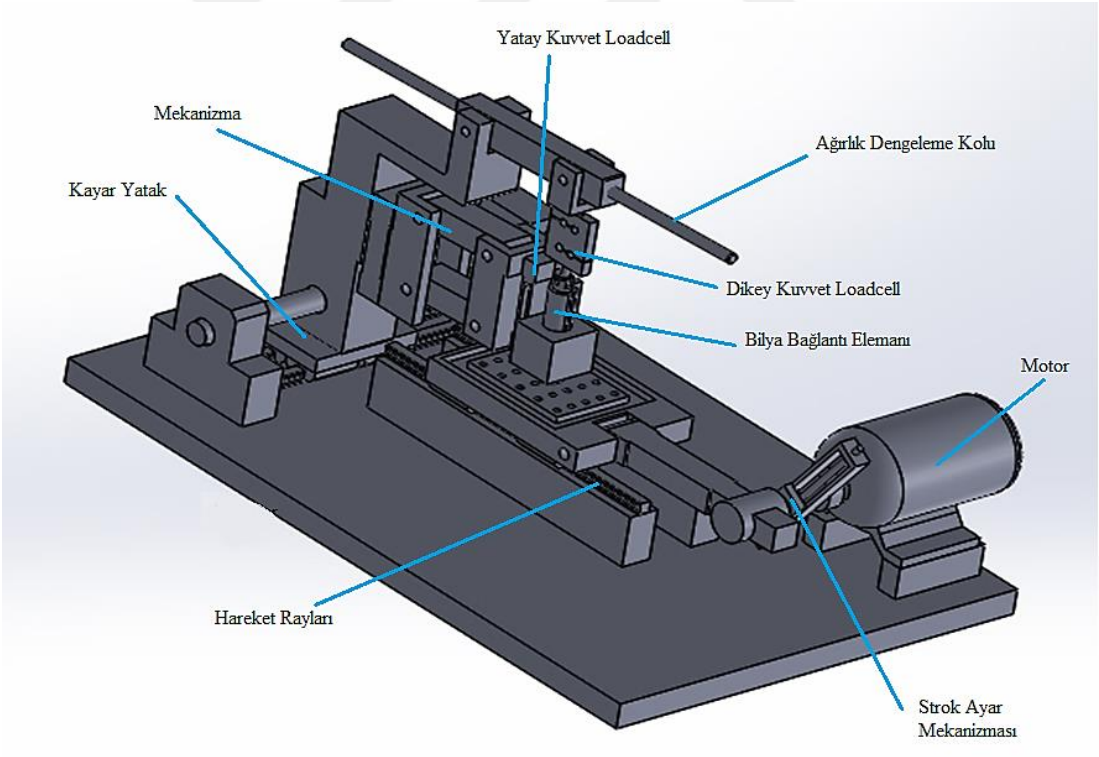
Şekil 2.25. Pim-disk Tribotest Cihazının Karşıdan Görünüşü



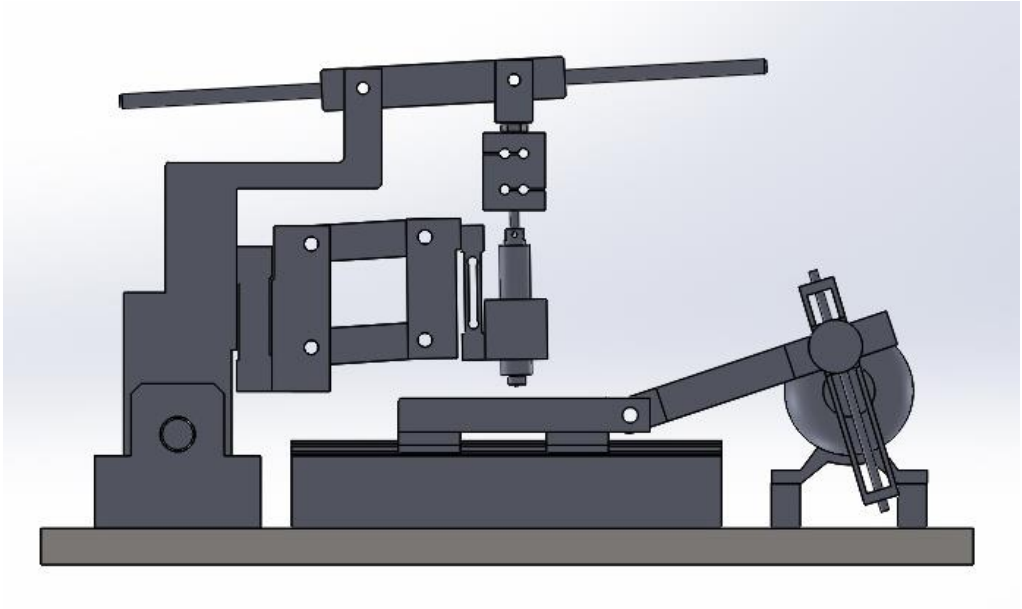
Şekil 2.26. Pim-disk Tribotest Cihazının Yandan Görünüşü



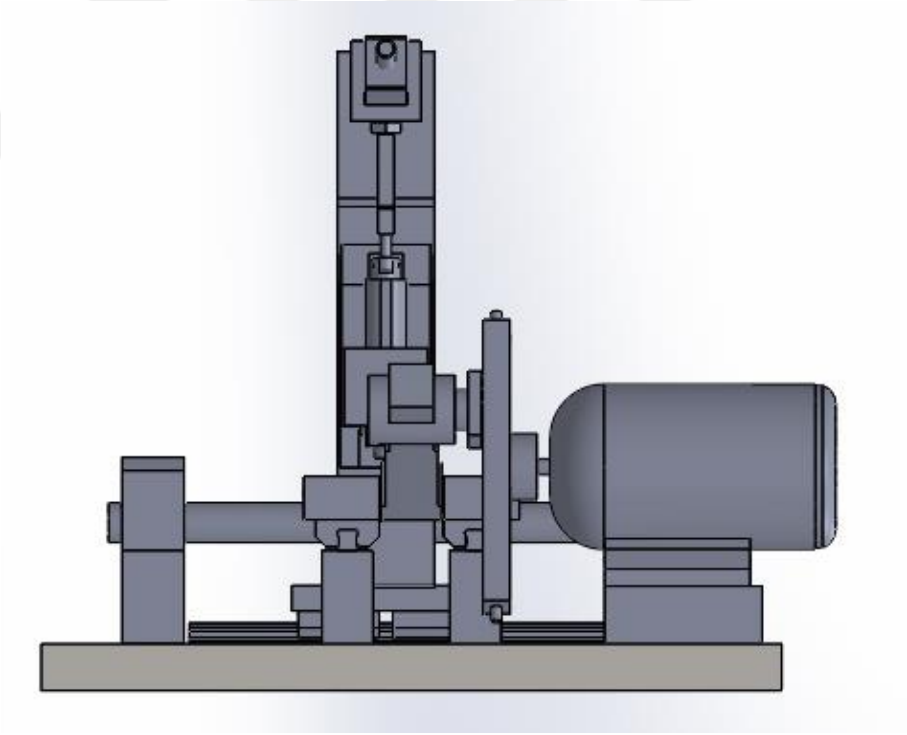
Şekil 2.27. Pim-disk Tribotest Cihazının Üstten Görünüşü



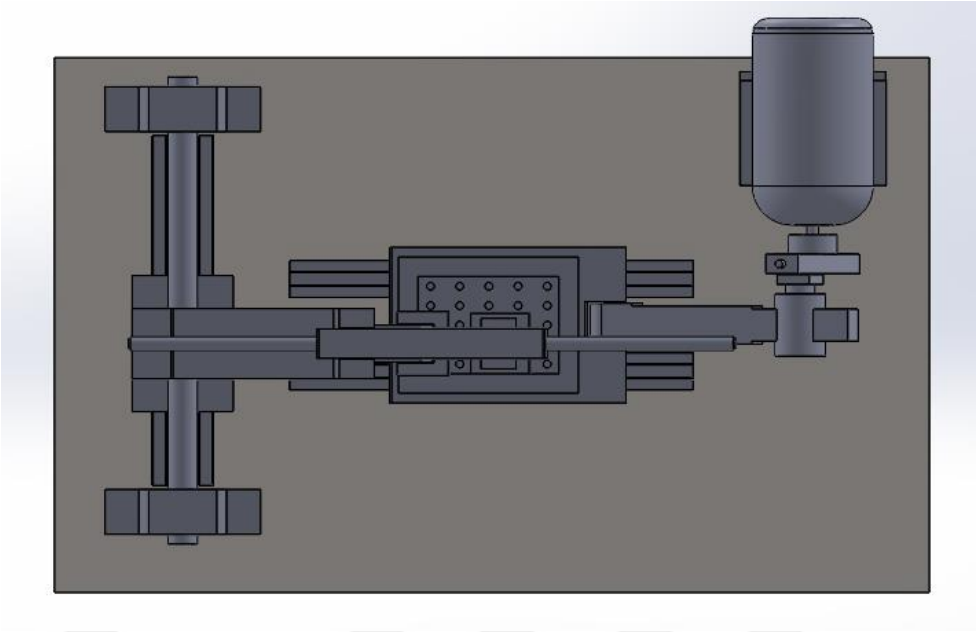
Şekil 2.28. Gidip-gelme Tribotest Cihazının görünüşü



Şekil 2.29. Gidip-gelme Tribotest Cihazının Karşıdan Görünüşü



Şekil 2.30. Gidip-gelme Tribotest Cihazının Yandan Görünüşü



Şekil 2.31. Gidip-gelme Tribotest Cihazının Üstten Görünüşü

2.10. Test Cihazları Yazılımı

Her iki test cihazı için kullanılan ortak yazılım sayesinde aynı anda her iki cihazda da test işlemi gerçekleştirilerek elde edilen veriler filtrelenip kullanılması gerekli veriler seçilebilmektedir.

Öncelikli olarak loadcellere, belirlenen ağırlıklar etki ettirilerek Şekil 2.32.'de verilen yardım ekranı üzerinden loadceller ve mesafe sensörlerinin kalibre işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu işlemin kurulum sırasında başlangıçta yapılması yeterlidir. Sonrasında elde edilen veriler test sırasında malzeme çiftleri üzerindeki normal kuvvet, yatay kuvvetleri doğru olarak verecektir.



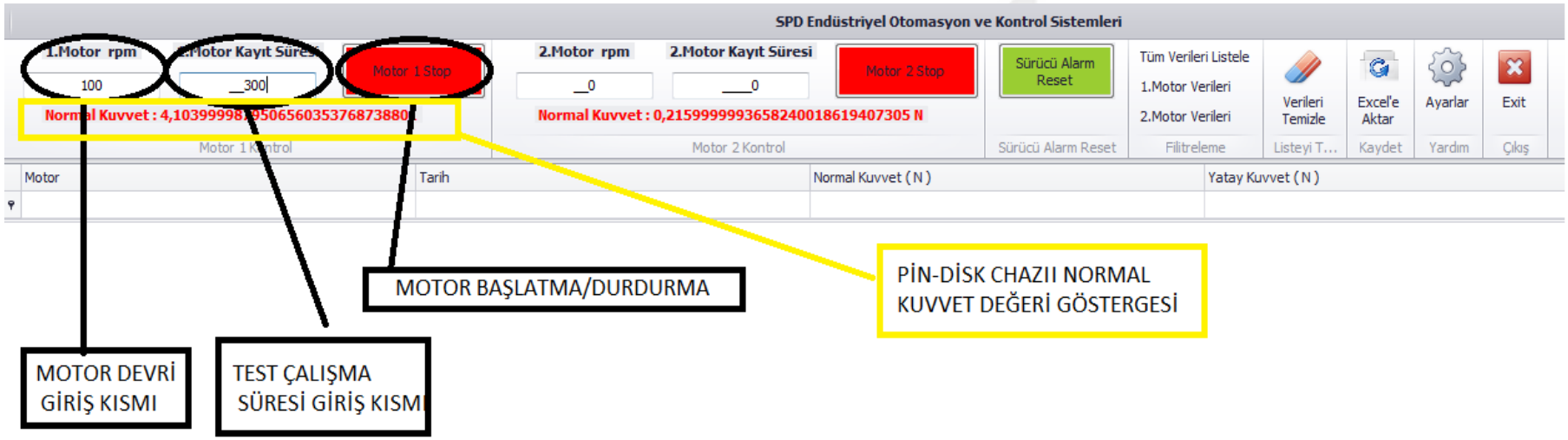
Şekil 2.32. Program Arayüzü ve Kalibrasyon Ayar Ekranı

Veriler girilip gerekli ayarlamalar yapıldıktan sonra Şekil 2.33. ve Şekil 2.34.'de gösterilen kullanıcı ekranına test için gerekli olan motor çalışma süresi(s), motor hızı(dev/dak) değerleri girilmiştir. Normal kuvvet kısmında aşınma işlemi için numune üzerine uygulanacak kuvvet mekanik aksam üzerinde ayarlanıp istenilen değer tablo üzerinde Newton cinsinden görüldükten sonra motor start kısmından cihaz çalıştırılmıştır.

Tabloda normal kuvvet, yatay kuvvet, aşınma derinliği değerleri anlık olarak listelenir. Bu kısımda gerekli veriler elde edildikten sonra Excel'e aktar kısmından veriler Excel formatında dosyaya kaydedilmiştir. Böylelikle istenilen değerler filtrelenerek, istenilen formatta, istenilen birim sisteminde çevirme işlemleri ve hesaplamaları yapılmıştır.



Şekil 2.33. Gidip-Gelme Tribotest Cihazı Test Veri Giriş Ekranı



Şekil 2.34. Pim-Disk Tribotest Cihazı Test Veri Giriş Ekranı

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Materyal

Cihazın tamamlanmasından sonra aşınma testi için kullanılan materyal, silindirik şekilde 20 mm kalınlığında kesilerek 60 mm çapında malzemelerden hazırlanmıştır. Test işlemi için 3 adet numune hazırlanmıştır.

3.2. Yöntem

Yapılan aşınma testlerinde işlemlerin yapılış sırası ve numunelerin hazırlanış biçimi aşağıda anlatılmıştır.

3.2.1. Numunelerin Hazırlanması

50 mm çapında 15 mm kalınlığında 3 adet test numunesi kesilerek hazırlanmıştır. Hazırlanan silindirik alüminyum malzemelerin test düzeneğine bağlanabilmesi için orta kısımlarına 8,5 mm çapında boydan boya delik delinmiştir. Kesim ve delik delme işlemi yapılarak istenilen boyutlara getirilen numunelerin yüzeyleri zımparalama işleminden geçirilerek yüzeylerin pürüzlülük değerleri düşürülmüş ve daha düzgün yüzeyler elde edilmiştir. Her numune sırasıyla 120, 200, 400, 800 ve 1200'lük zımparalar ile yüzey zımparalama işlemine tabi tutulmuştur.

3.2.2. Numunelerin Test Yüzeylerinin Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Alınması

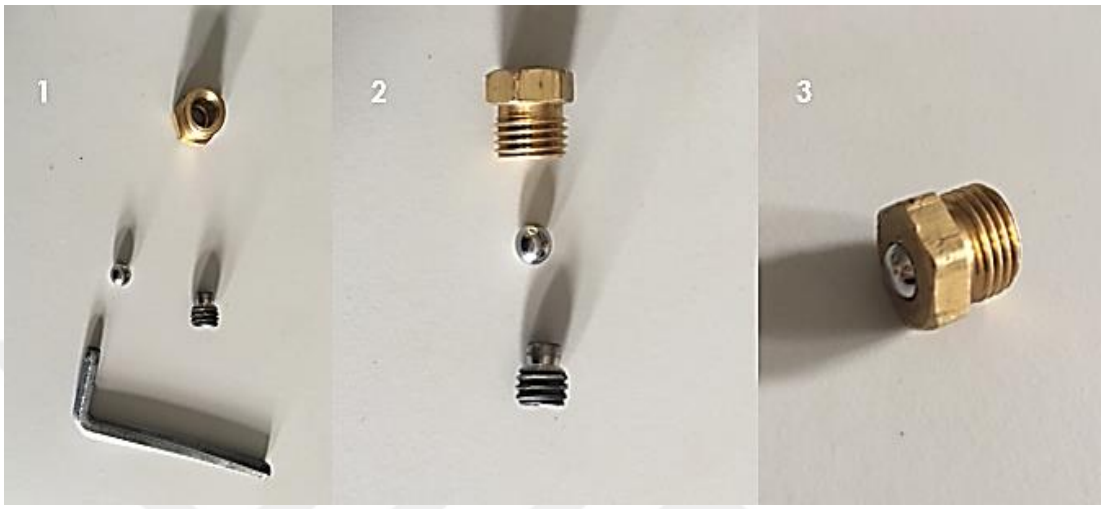
Yüzeyleri zımparalanan ve parlatılan numuneler üzerinden zımparalama yönüne dik ve yatay olmak üzere yüzey pürüzlülüğü değerleri alınmıştır.

3.2.3. Numunelerin Tribotest Cihazı Bağlanması ve Testlerin Gerçekleştirilmesi

Hazırlanan numuneler sırasıyla Tribotest cihazının haznesine M8 havşa başlı cıvata kullanılarak ortalarında önceden delmiş olduğumuz delik yardımıyla test haznesine bağlanmıştır.

Aşındırıcı malzeme olarak kullanılacak olan çelik bilye cihazın uç kısmındaki parça içerisine Şekil 3.1.'de gösterildiği şekilde yerleştirilerek Şekil 3.2.'de de

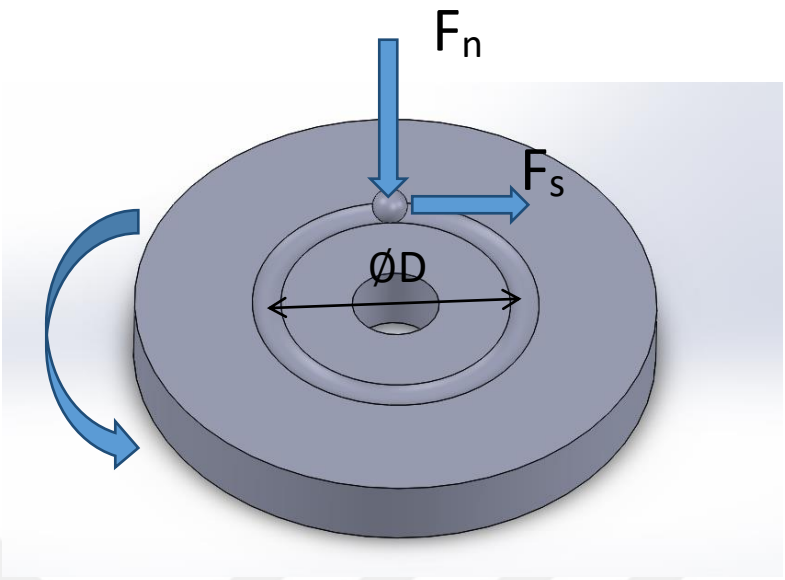
gösterilen şekilde delrin malzeme içerisindeki klavuzlu kısma yerleştirilmiştir. Kullanıcı Şekil 2.33. ve Şekil 2.34. de gösterildiği şekilde ekrandan test için gerekli olan motorun dönme hızı, testin süresi verileri girilerek motor start işlemi gerçekleştirilir. Test işleminin şematik gösterimi Şekil 3.1.' de verilmiştir.



Şekil 3.1. Aşındırıcı Olarak Kullanılan Çelik Bilyanın Montajı



Şekil 3.2. Delrin Kısma Montaj



Şekil 3.3. Aşınma Deneyi Şematik Gösterimi

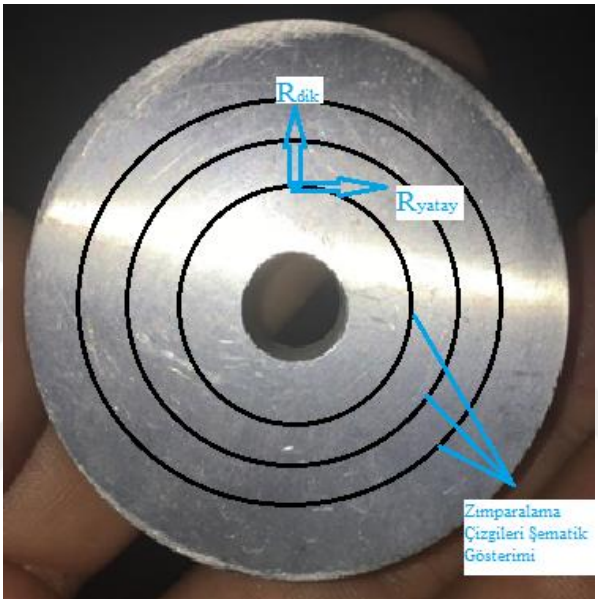
Tablo 3.1. Aşınma Testi Gerçekleştirilen Numunelerin Test Parametreleri

Test Numunesi	**Test**	**Test Süresi**	**Motor Dönme Hızı**	**Normal Yükleme Kuvveti**	**Çevresel Hız**
Numune 1	Test 1	300 s	100 dev/dak	2N	10 m/dak
	Test 2				12 m/dak
	Test 3				15 m/dak
Numune 2	Test 4			3N	10 m/dak
	Test 5				12 m/dak
	Test 6				15 m/dak
Numune 3	Test 7			4N	10 m/dak
	Test 8				12 m/dak
	Test 9				15 m/dak

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Bulunan Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Gerçekleştirilecek testler öncesinde numunelerin yüzeyleri sırasıyla 120, 200, 400, 800 ve 1200'lük zımparalar ile yüzey zımparalama işlemine tabi tutularak Şekil 4.1.'deki şekilde gösterildiği gibi hazırlanmıştır. Zımparalandıktan sonra ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri Tablo 4.1.'de verilmiştir. Şekil 4.2.'de yüzey pürüzlülüğünün parametreleri tanımlanmıştır.

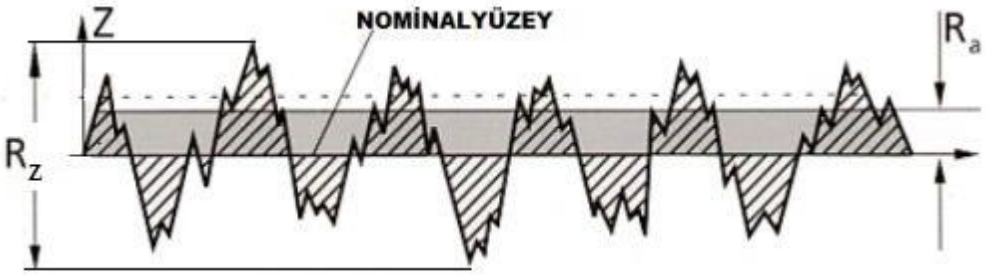


Şekil 4.1. Zımparalanarak hazırlanan test numune örneği

Numunelerin yüzeyleri aynı zımparalama işlemine tabi tutulduğundan, farklı numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Aşınma testi gerçekleştirilecek olan numunelerin normal yükleme kuvveti ve dönme çevresel hız faktörleri değiştirilerek testler gerçekleştirileceğinden yüzey pürüzlülüğü değerlerinin birbirine çok yakın olması istenilen bir durumdur. Böylelikle aşınma sonucunda elde edilen değerler, koşullarını değiştirdiğimiz durumlar için elde edilmiş olacaktır.

Tablo 4.1. Numunelerin Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri

	Yüzey Pürüzlülüğü			
Numune	R_{ax}	R_{ay}	R_{zx}	R_{zy}
1	1,20 µm	1,20 µm	8,25 µm	8,22 µm
2	1,19 µm	1,19 µm	7,99 µm	7,94 µm
3	1,21 µm	1,19 µm	8,34 µm	8,14 µm



R_a : Ortalama Pürüzlülük Değeri

R_z : Profilin Ortalama Maksimum Yüksekliği

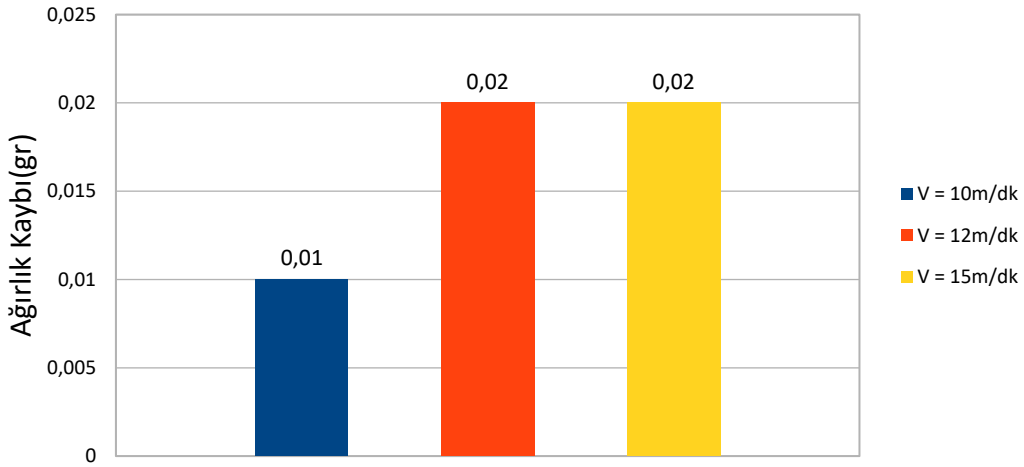
Şekil 4.2. Yüzey Pürüzlülüğü Şematik Gösterimi

4.2. Aşınma Testleri Gerçekleştirilen Numunelerin Ağırlık Kaybı Açısından Değerlendirilmesi

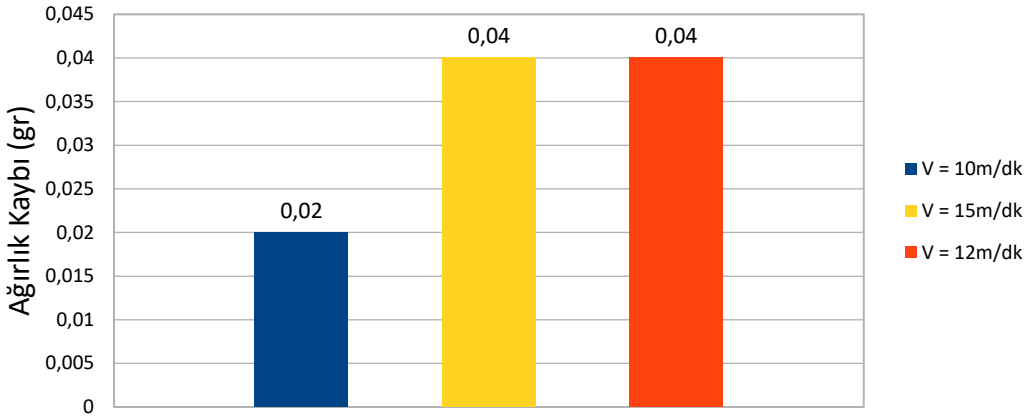
Hazırlanan 3 adet numune üzerinde normal yükleme kuvveti ve çevresel hızlar değiştirilerek yapılan aşınma testleri sonucunda elde edilen numunelerden bir örnek Şekil 4.3.' de gösterilmiştir. Testler sonucunda aşınma gerçeklemiş numunelerden alınan ağırlıklar, test öncesi numuneler tartılarak bulunan ilk ağırlıktan çıkarılarak bulunan ağırlık kayıpları Şekil 4.4.-4.9.'da gösterilmiştir.



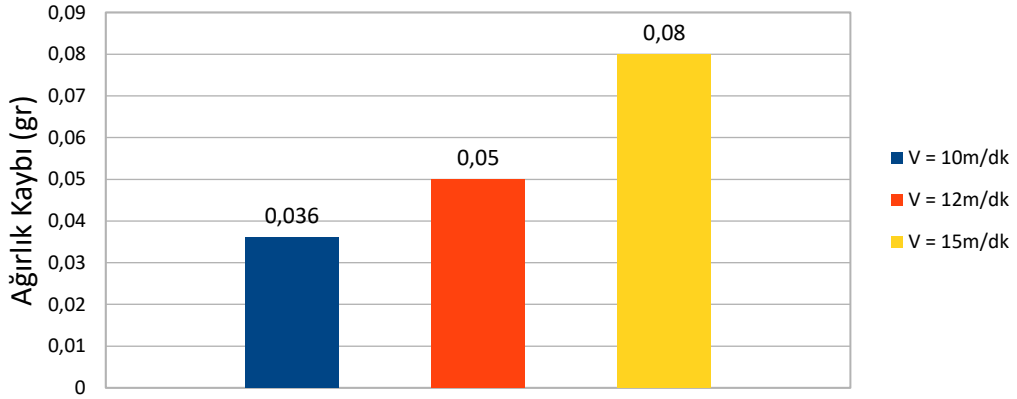
Şekil 4.3. Aşınma testi gerçekleştirilen numune örneği



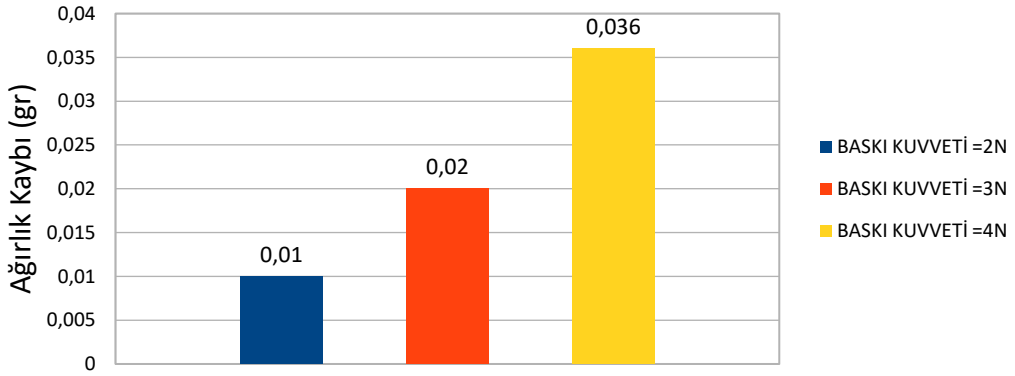
Şekil 4.4. V=10, 12, 15 m/dak ve 2 N Yükleme Altında Kayma Hızı-Ağırlık Kaybı Değişimi Grafiği



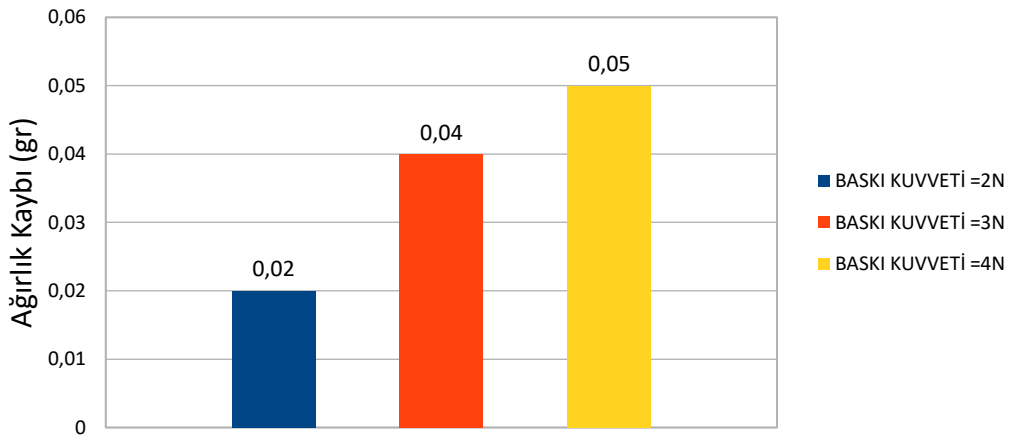
Şekil 4.5. V=10, 12, 15 m/dak ve 3 N Yükleme Altında Kayma Hızı-Ağırlık Kaybı Değişimi Grafiği



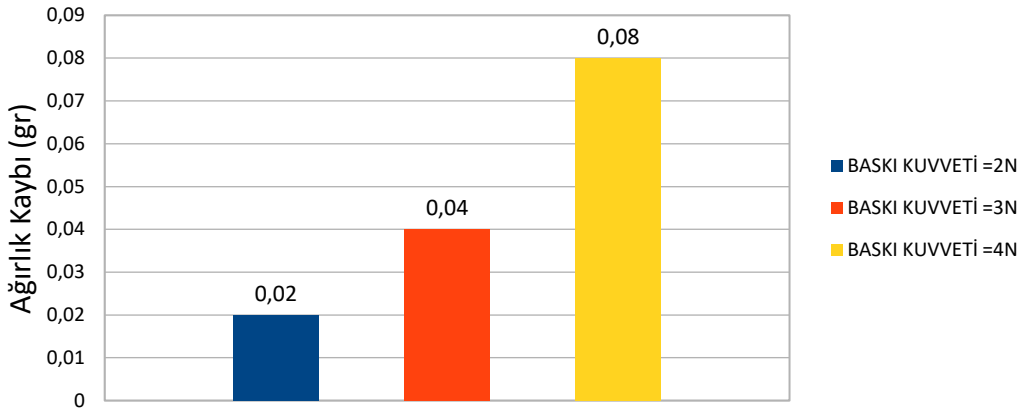
Şekil 4.6. V=10, 12, 15 m/dak ve 4 N Yükleme Altında Kayma Hızı-Ağırlık Kaybı Değişimi Grafiği



Şekil 4.7. V=10 m/dak ve 2, 3, 4 N Yükleme Altında Kayma Hızı-Ağırlık Kaybı Değişimi Grafiği



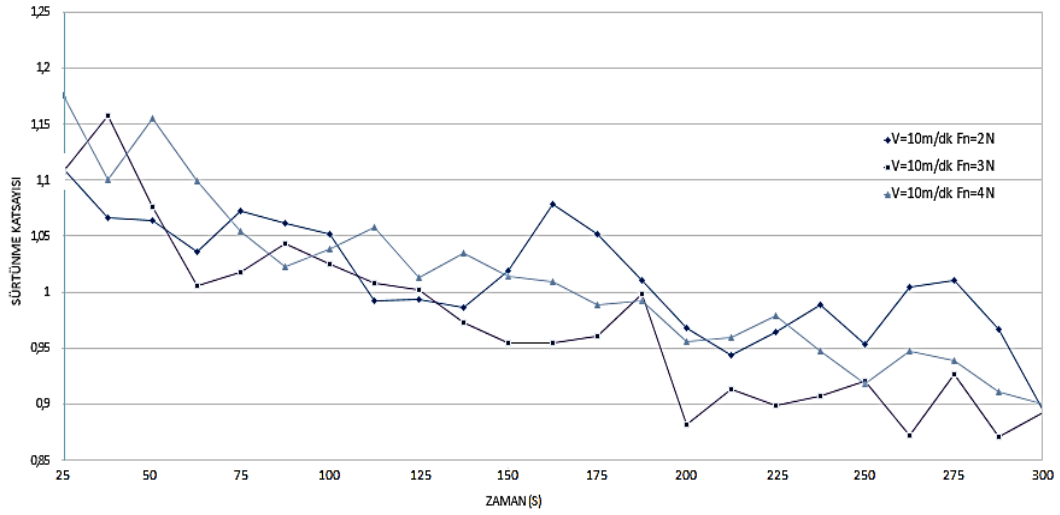
Şekil 4.8. V=12 m/dak ve 2, 3, 4 N Yükleme Altında Kayma Hızı-Ağırlık Kaybı Değişimi Grafiği



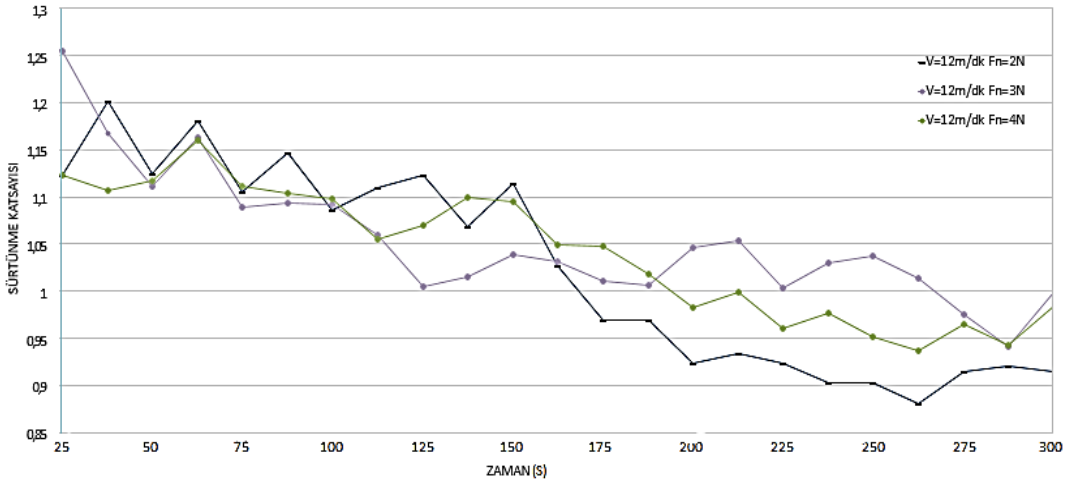
Şekil 4.9. V=15 m/dak ve 2, 3, 4 N Yükleme Altında Kayma Hızı-Ağırlık Kaybı Değişimi Grafiği

4.3. Numunelerin Sürtünme Katsayılarının Ölçülmesi

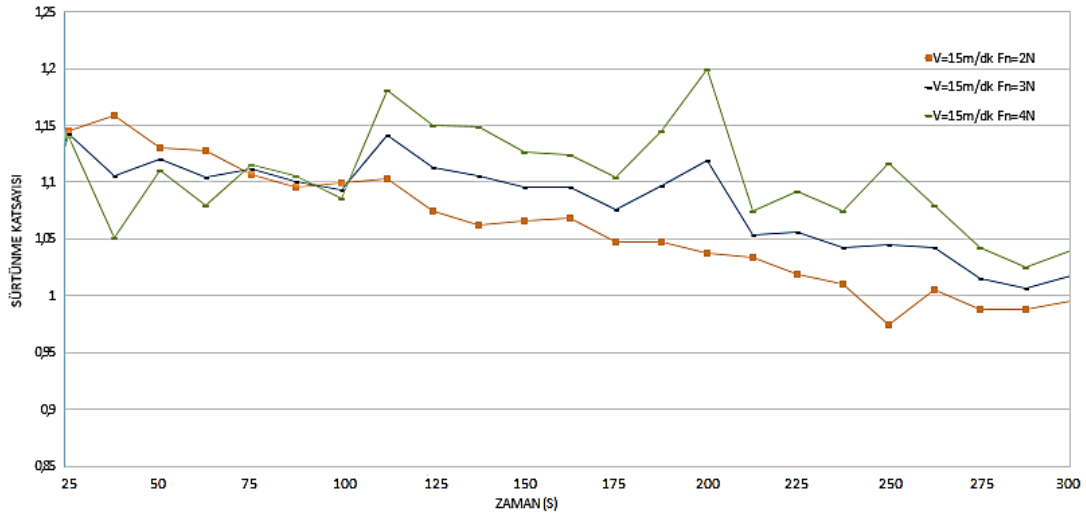
Hazırlanan 3 adet numune üzerinde normal yükleme kuvveti ve çevresel hızlar değiştirilerek yapılan aşınma testleri sonucunda elde edilen sürtünme katsayılarının zamana bağlı değişimleri Şekil 4.10.-4.15.' de gösterilmiştir. Grafiklerde kullanılan her bir sürtünme katsayısı değeri, elde edilen 50 değerin ortalamasından elde edilen değerlerdir.



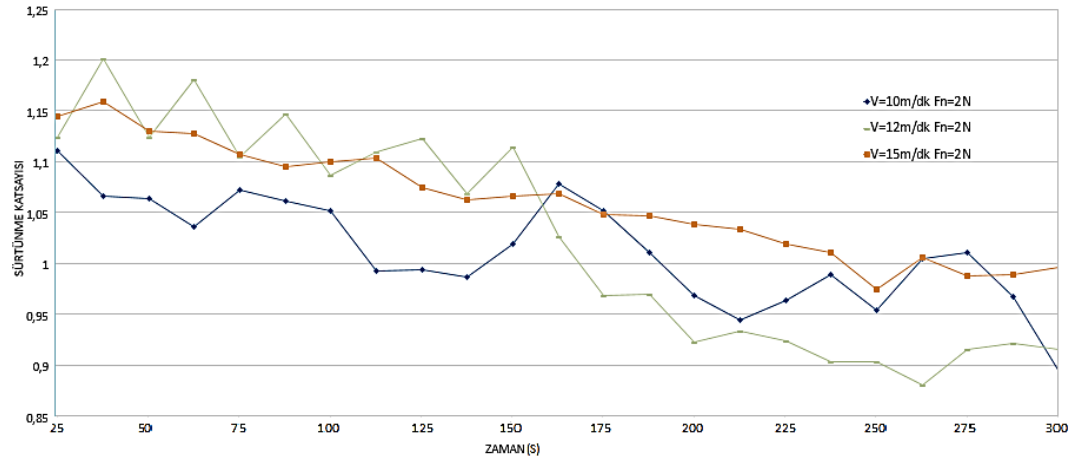
Şekil 4.10. V=10 m/dak ve 2, 3, 4 N Yükleme Altında Zamana Bağlı Sürtünme Katsayısı Değişimi Grafiği



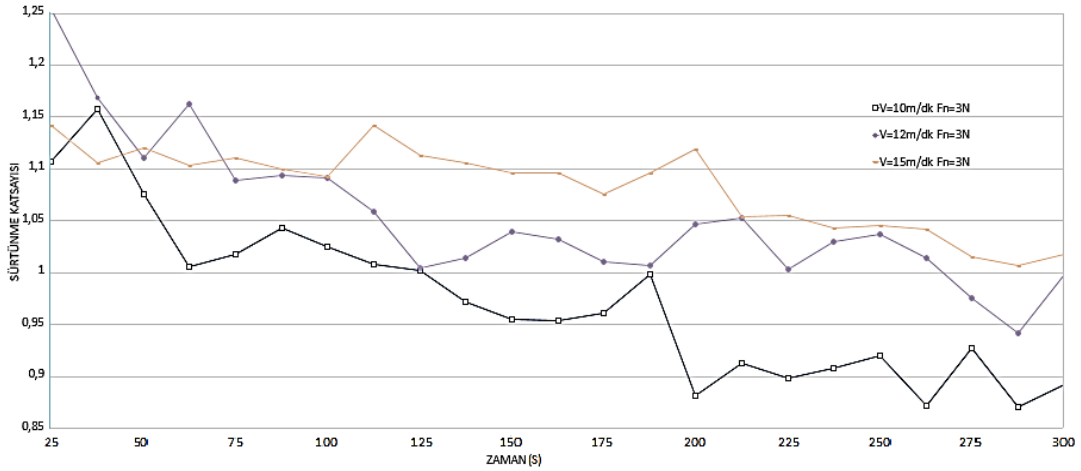
Şekil 4.11. V=12 m/dak ve 2, 3, 4 N Yükleme Altında Zamana Bağlı Sürtünme Katsayısı Değişimi Grafiği



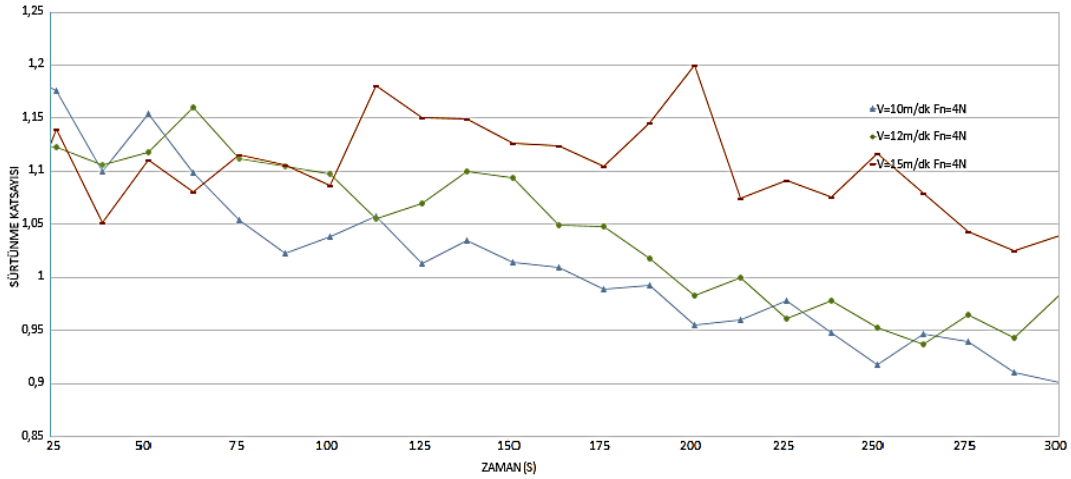
Şekil 4.12. V=15 m/dak ve 2, 3, 4 N Yükleme Altında Zamana Bağlı Sürtünme Katsayısı Değişimi Grafiği



Şekil 4.13. V=10, 12, 15 m/dak ve 2 N Yükleme Altında Zamana Bağlı Sürtünme Katsayısı Değişimi Grafiği

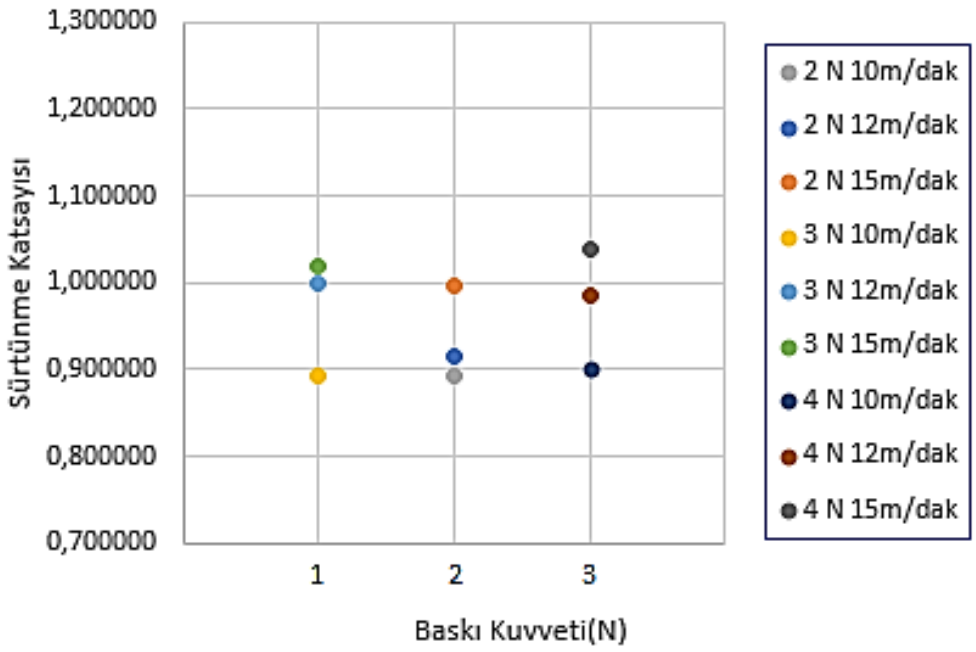


Şekil 4.14. V=10, 12, 15 m/dak ve 3 N Yükleme Altında Zamana Bağlı Sürtünme Katsayısı Değişimi Grafiği



Şekil 4.15. V=10, 12, 15 m/dak ve 4 N Yükleme Altında Zamana Bağlı Sürtünme Katsayısı Değişimi Grafiği

Gerçekleştirilen aşınma testlerinde, her test 300 s gerçekleştirilmiş olup bu süre içerisinde test cihazı üzerinde bulunan yatay ve dikey kuvvet loadcellerden yaklaşık 1500 veri okunmuştur. Okunan bu verilerek birbirine oranlanarak sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. Test süresi (300s) sonundaki elde edilen sürtünme katsayıları Şekil 4.16.' da verilmiştir.



Şekil 4.16. Test Süreleri Sonunda (300s) Ölçülen Sürtünme Katsayıları Grafiği

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Pim-disk (Pin-on-disk) ve gidip-gelme (reciproceter) modülleri tasarlanıp imal edilen ve bilgisayar ile kontrol edilebilen tribotest cihazlarında normal yükleme, kayma hızı, kayma zamanı, temel sürtünme elemanı (numune) karşı sürtünme elemanı, ara maddesi (yağlama) ve çevre değiştirilerek aşınma deneyleri yapılabilmektedir. Tribotest cihazında sürtünme katsayısının ve aşınma kaybının zamana, kayma hızına, normal yüklemeye ve aşınma süresine bağlı olarak değişimi ölçülebilmektedir.

Elde edilen ağırlık kaybı değerleri, sürtünme katsayısı değerleri ve grafikleri incelendiğinde;

- Değiştirilen tribolojik koşullarda sürtünme katsayıları birbirine yakın bulunmuştur. Bu sonuç da ‘‘Sürtünme katsayısı malzeme çifti özelliğidir.’’ Yargısına uygundur.
- Sürtünme katsayısının başlangıçta yüksek olduğu ve zamanla azalma eğilimi gösterdiği,
- Sistem rejim haline geldiği zaman (200-300s aralığında) sürtünme katsayısının birbirine yakın olduğu görülmektedir.
- Malzeme çiftleri yükleme değeri değişse bile, zamanla sürtünme yüzeylerinin pürüzlülüğü azalarak değerleri birbirine yakın hale geldiğinden, testin sonlanmasına doğru ölçülen sürtünme katsayısı değerleri birbirine yakındır.
- Malzemelerin yüzey pürüzlülüklerinin de aşınma miktarını etkilediği gözlenmiştir. Yüzey pürüzlülük değeri fazla olan malzemelerin aşınması sırasında sürtünme yüzey alanı az, basınç miktarı fazla olduğundan aşınma miktarı fazla olmaktadır. Sürtünme zamanı arttıkça yüzey pürüzlülük değeri düşmekte, alan artmakta ve basınç azalmakta olduğundan aşınma miktarı da azalmaktadır.

Bu tribotest cihazlarında yapılacak ön deneyler, birbirine temas eden ve göreceli (izafi) hızla sürtünen makine elemanlarının gerçek tribolojik şartlarda

testleri yapılarak aşınma dayanımlarının iyileştirilmesi ve sürtünme katsayılarının düşürülmesi çalışmalarına ışık tutulabilir.

KAYNAKLAR

1. DEMİRCİ A. H., ‘Teknik Kuru Sürtünmeli Bir Aşınma Deney Düzeneği Tasarım ve İmalatı’ U.Ü Makine Müh. Bölümü, Mühendis ve Makine Dergisi Cilt 29, Sayı 330, Temmuz 1987.

2. GÜRLEYİK M.Y., ‘Makine Mühendisliğinde Aşınma Olayları’ KTÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Mühendis ve Makine Dergisi, Cilt 27, Sayı 323, Aralık 1986

3. ELDOĞAN O.. KARAOĞLU Y.. ‘Bir Aşınma Test Cihazının Tasarımı ve İmalatı’ Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya 2006

4. AKKURT M., ‘Makine Elemanları Kitabı’ İ.T.Ü Makine Fakültesi, Birsen Yayınevi, İstanbul 2000.

5. ATİK E.. ÜRÜN R.. ‘Sürtünme ve Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı’ Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa 2008

6. BHUSHAN B., ‘ Tribology: Friction, Wearand Lubrication’, The Engineering Handbook, 2000.

7. YILMAZ, F., “Sürtünme ve Aşınma”, 9th International Metallurgy and Materials Congress, p 229-256, İstanbul, 1997.

8. ATİK, E., ‘Triboloji Ders Notları’ Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa 2006

9. ŞİŞMAN, L., “Bir Aşınma Deney Cihazının Tasarım ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Temmuz,1999.

10. ASM Handbook, Friction, Lubricationand Wear Technology, Vol. 18, Editedby Henry, S.D., ASM International, The Materials, Society, USA, 1992

11. SOYDAŞ S., YILMAZ M., ‘ Universal Aşınma Test Cihazı Tasarımı Ve İmalatı’ Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli 2006.

12. MUTLU İ., KOÇ R., ‘Otomotiv Fren Balataları İçin Sürtünme Katsayısı Test Cihazının Tasarımı’ Kahramanmaraş Sütçü İmam Ü. ve Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Dergisi, Cilt 8, Sayı 1, 79-84, 2005.

13. DEMİRAL M., YAŞAR M.,‘95200-95300 Cu-Al-Fe Alaşımlarının Aşınma Davranışlarının İncelenmesi’ Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Karabük 2006

14. Anton Paar Türkiye (2017). 01.09.2017 tarihinde https://www.anton-paar.com/tr-tr/ueruenler/detaylar/disk-uestuende-pim-tribometre-trb/ adresinden erişildi.

15. Uts Mühendislik. (2015). 01.09.2017 tarihinde http://www.uts-design.com/index.php?page=urundetay&uid=1 adresinden erişildi.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Tuncay BİLGİN

Doğum Yeri ve Yılı : Kars, 1988

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : tuncaybilgin35@hotmail.com.tr

Eğitim Durumu

Lise : İzmir İnönü Lisesi, 2005

Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2010

Mesleki Deneyim

Kurum bilgisi : Bilge Alüminyum, Master-Slide, Tuğsan Makine, BSS Boray, Teleset 2010-2015

Kurum bilgisi : İzmir Büyükşehir Belediyesi, 2015-……. (halen)