

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DENEYSEL AŞINMA MODELİ VERİLERİ İÇİN UYGUN PARAMETRE SEÇİMİ

FARUK SİREK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YARD. DOÇ. DR. İLYAS İSTİF**

İSTANBUL, 2015

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DENEYSEL AŞINMA MODELİ VERİLERİ İÇİN UYGUN PARAMETRE SEÇİMİ

Faruk SİREK tarafından hazırlanan tez çalışması 15.12.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yard. Doç. Dr. İlyas İSTİF
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yard. Doç. Dr. İlyas İSTİF
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ferhat DİKMEN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Kenan KUTLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanması ve gerekli aşınma deneylerinin gerçekleştirilmesi aşamasında tüm bilgi birikimi, zamanı, desteği ve yardımını esirgemeyen saygıdeğer hocam Yard. Doç. Dr. Sayın İlyas İSTİF ve aileme teşekkür ederim

Aralık, 2015

Faruk SİREK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez.....	3
BÖLÜM 2	
TRIBOLOJİ.....	4
2.1 Triboloji Tanımı ve Tarihçesi	4
2.2 Temas Yüzeyi.....	7
2.3 Sürtünme	7
2.3.1 Sürtünmenin Yüzey Gerilimi Üzerindeki Etkisi.....	8
2.3.2 Kinematik Sürtünme	9
2.4 Aşınma Mekanizmaları.....	9
2.4.1 Aşınma Zaman İlişkisi	11
2.4.2 Adhesiv Aşınma.....	11

2.4.3	Tribo-Oksidatif Wear	13	
2.4.4	Abrasif Aşınma	14	
2.4.5	Yorulma Aşınması	16	
2.5	Aşınmaya Etki Eden Faktörler	17	
2.5.1	Esas Sürtünme Elemanına Bağlı Olanlar:	17	
2.5.2	Karşı Elemana Bağlı Olanlar:	18	
2.5.3	Ortama Bağlı Olanlar:	18	
2.6	Aşınma Testleri ve Metotları	18	
2.6.1	Ağırlık Farkı Metodu	20	
2.6.2	Kalınlık Ölçme Metodu	20	
2.6.3	İz Değişiminin İzlenmesi Metodu.....	20	
2.6.4	Radyo İzotoplarla Ölçme Metodu.....	21	
2.6.5	Aşınma Testleri	21	
2.7	Malzemeler	26	
2.7.1	Alüminyum Malzemeler.....	26	
2.7.2	Karbon Nanotüp (CNT).....	27	
2.7.3	Karbon Nanotüp (CNT) Üretimi	29	
BÖLÜM 3			
PİN-ON-DİSK TESTLERİ VE SONUÇLAR			30
3.1	Test Düzenegi.....	30	
3.2	Ağırlık Ölçüm Ekipmanı	31	
3.3	Malzeme (Saf Alüminyum ve Al-CNT).....	32	
3.4	DeneySEL Çalışma	33	
3.4.1	Deney Numuneleri – Disk	34	
3.4.2	Deney Numuneleri – Pim	34	
3.5	Deney Yapılışı.....	35	
3.6	Deney Sonuçları	35	
3.6.1	Test -1) 0,0 wt% CNT – 10N kuvvet için	37	
3.6.2	Test -2) 0,5 wt% CNT – 10N kuvvet için	38	
3.6.3	Test -3) 1wt% CNT – 10N kuvvet için	39	
3.6.4	Test -4) 2wt % CNT – 10N kuvvet için	40	
3.6.5	Test -5) 0,0 wt% CNT – 15N kuvvet için	41	

3.6.6	Test -6) 0,5 wt% CNT – 15N kuvvet için	42
3.6.7	Test -7) 1 wt% CNT – 15N kuvvet için	43
3.6.8	Test -8) 2 wt% CNT – 15N kuvvet için	44
BÖLÜM 4		
	SONUÇ	45
	KAYNAKLAR	47
	ÖZGEÇMİŞ	48

SİMGE LİSTESİ

W	Ağırlık
W_r	Aşınma direnci
W_a	Aşınma miktarı
K	Aşınma oranı
gr	Gram
F	Kuvvet
μm	Mikronmetre
F_n	Normal kuvvet
F_s	Statik sürtünme kuvveti
μ	Sürtünme katsayısı
T	Teğetsel kuvvet
F_t	Teğetsel sürtünme kuvveti
A_r	Temas alanı
Δm	Toplam kütle kaybı
l	Toplam mesafe
ρ	Yoğunluk

KISALTMA LİSTESİ

DIN	Alman Standartları Enstitüsü
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASLE	American Society of Lubrication Engineers
DSRW	Dry Sand, Rubber Wheel (Kuru Kum – Kauçuk Teker)
CNT	Karbon Nanotüp
PAT	Pin Abrasion Test
RCF	Rolling Contact Fatigue (RCF) – Dönel Temas Yorulması
SEM	Scanning Electron Microscope
TSE	Türk Standartları Enstitüsü

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Aşınma prosesi.....	2
Şekil 2.1 Tribolojik sistem enerjisi.....	6
Şekil 2.2 Tribolojik sistemin şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.3 Temas eden iki yüzeyin hareket ettirilmesi için gerekli kuvvetin şematik gösterimi.....	8
Şekil 2.4 Düz yüzeyde sürtünme ile silindirik kayma. Düz yüzeydeki kontak alanlarındaki gerilme dağılımı	9
Şekil 2.6 (a) Aşınma mekanizmaları [5].....	10
Şekil 2.6 (b) Parçalar arasındaki bağıl hareket örnekleri a) kayma aşınması b) dönme aşınması c) aşındırma d) akışkanlı sert partikül.....	11
Şekil 2.7 Aşınma – zaman ilişkisi	11
Şekil 2.8 İlerleme mesafesi ve aşınma hacmi	12
Şekil 2.9 Aşınma yüzeyi, plastik deformasyonlar, alt yüzey hasarları, ölçek morfolojisi [6].....	13
Şekil 2.10 Dökme demir disk (a) kum tanecikleri tarafından aşındırılmış bronz yüzey (b) [4].....	15
Şekil 2.11 İki parçalı abrasif aşınma çizimi [5].....	15
Şekil 2.12 Abrasif Aşınma – microcutting ve microploughing [5].....	16
Şekil 2.13 Abrasif aşınma	16
Şekil 2.14 42L yataklama çeliği yorulma aşınması [5].....	17
Şekil 2.15 Pin on disk testi şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.16 Tipik aşınma eğrisi şeması	22
Şekil 2.17 Blok-on-ring test şematik gösterimi	23
Şekil 2.18 Disk-on-disk testi şematik gösterimi (A) ve 4 top tribometre (B)	24
Şekil 2.19 DSRW test şematik gösterimi	25
Şekil 2.20 Aşınma talaş morfolojisi ve aşınan parçalar	26
Şekil 2.21 Tek duvarlı karbon nanotüp	27
Şekil 2.22 Saf Al ve 2 wt% CNT elektron mikroskop görüntüsü [1]	28
Şekil 3.1 Çalışmalarda kullanılan Pin-On Disk test cihazı	30
Şekil 3.2 Pin-On Disk test cihazı Şematik Gösterimi	31
Şekil 3.3 Aşınma testlerinde kullanılan disk a) Aşınma test öncesi b) Aşınma test sonrası	34
Şekil 3.5 Yazılım üzerinden okunan kuvvet (N).....	35
Şekil 3.6 15N – 1000m için ağırlık farkı grafiği	36

Şekil 3.7 15N – 1000m için ağırlık farkı grafiği	36
Şekil 3.8 0,0wt% CNT – 10N kuvvet için Sürtünme Kuvveti – Yol Grafiği	37
Şekil 3.9 0,0wt% CNT – 10N kuvvet için Aşınma Oranı – Yol Grafiği	37
Şekil 3.10 0,5wt% CNT – 10N kuvvet için Sürtünme Kuvveti – Yol Grafiği	38
Şekil 3.11 0,5wt% CNT – 10N kuvvet için Aşınma Oranı – Yol Grafiği	38
Şekil 3.12 1,0wt% CNT – 10N kuvvet için Sürtünme Kuvveti – Yol Grafiği	39
Şekil 3.13 1,0wt% CNT – 10N kuvvet için Aşınma Oranı – Yol Grafiği	39
Şekil 3.14 2,0wt% CNT – 10N kuvvet için Sürtünme Kuvveti – Yol Grafiği	40
Şekil 3.15 2,0wt% CNT – 10N kuvvet için Aşınma Oranı – Yol Grafiği	40
Şekil 3.16 0,0wt% CNT – 15N kuvvet için Sürtünme Kuvveti – Yol Grafiği	41
Şekil 3.17 0,0wt% CNT – 15N kuvvet için Aşınma Oranı – Yol Grafiği	41
Şekil 3.18 0,5wt% CNT – 15N kuvvet için Sürtünme Kuvveti – Yol Grafiği	42
Şekil 3.19 0,5wt% CNT – 15N kuvvet için Aşınma Oranı – Yol Grafiği	42
Şekil 3.20 1,0wt% CNT – 15N kuvvet için Sürtünme Kuvveti –Yol Grafiği	43
Şekil 3.21 1,0wt% CNT – 15N kuvvet için Aşınma Oranı –Yol Grafiği	43
Şekil 3.22 2,0wt% CNT – 15N için Sürtünme Kuvveti –Yol Grafiği	44
Şekil 3.23 2,0wt% CNT – 15N için Aşınma Oranı –Yol Grafiği	44

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Basitleştirilmiş tribolojik testler, ilgili aşınma prosesleri ve simüle edilen aşınma mekanizmaları	20
Çizelge 2.2 Mühendislik malzemelerinin mekanik özellikleri	28
Çizelge 3.1 Ağırlık ölçümünde kullanılan hassas terazinin özellikleri	32
Çizelge 3.2 St52 Mekanik Özellikleri	33
Çizelge 3.3 Deney Malzeme Ağırlık Değişimleri	36
Çizelge 3.4 0,0wt% CNT – 10N kuvvet için test sonuçları	37
Çizelge 3.5 0,5wt% CNT – 10N kuvvet için test sonuçları	38
Çizelge 3.6 1,0wt% CNT – 10N kuvvet için test sonuçları	39
Çizelge 3.7 2,0wt% CNT – 10N kuvvet için test sonuçları	40
Çizelge 3.8 0,0wt% CNT – 15N kuvvet için test sonuçları	41
Çizelge 3.9 0,5wt% CNT – 15N kuvvet için test sonuçları	42
Çizelge 3.10 1,0wt% CNT – 15N kuvvet için test sonuçları	43
Çizelge 3.11 2,0wt% CNT – 15N kuvvet için test sonuçları	44

DENEYSEL AŞINMA MODELİ VERİLERİ İÇİN UYGUN PARAMETRE SEÇİMİ

Faruk SİREK

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yard. Doç. Dr. İlyas İSTİF

Sürtünme ve aşınma hareketli makine parçalarında mühendislik açısından önemli araştırma konularından biridir. Temas halinde çalışan mekanik parçalarda malzeme çiftine, yüzey pürüzlülüğüne, temas yüzeyinde yabancı madde olup olmadığına, uygulanan normal kuvvete bağlı olarak gelişen aşınma deformasyonu kaçınılmaz bir durum olup, belli bir sınırın üzerinde olması durumunda hasara yol açar. Makinalar üzerinde isteğe bağlı olmayan aşınma sonucu oluşan hasarlar ekonomik açıdan da kayıplara neden olur. Hasarı azaltmak, minimize etmek, çalışma ömrünü uzatmak için yağlama yapılabilir ya da kuru sürtünme durumunda çalışan parçalarda aşınma direncini arttırıcı tedbirler alınabilir. Bu tedbirlerden biri malzeme yapısı üzerinde yapılan iyileştirmelerle ilgilidir. Örneğin alüminyuma sinterleme yöntemiyle grafen, karbon nanotüp, katılarak mekanik özellikler ve aşınma direnci gibi özellikler arttırılabilir. Alüminyum sinterleme (metal matrisli kompozitler) sanayide yaygın bir kullanıma sahiptir.

Aşınma ile ilgili teorik bir hesaplama ve modelleme yapmak oldukça zordur. Grafen yağlayıcılığı, karbon nanotüp ise dayanım ve aşınma direncini yükseltir [1]. Bu çalışmada sinterleme yöntemiyle imal edilmiş, 0,5wt%- 1wt% ve 2wt% oranında karbon nanotüp (CNT) ilave edilmiş alüminyum karbon nanotüp malzemelerinin istatistiksel modelleme için gerekli olan aşınma verilerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Uygun parametrelerin seçimi (Normal kuvvet (F), Aşınma yolu (x), parçaların çizgisel hızı (w)) yapılarak modelleme çalışması için aşınma deneyi verileri düzenlenecektir. Ayrıca

normal kuvvetin değişmesi gibi farklı çalışma koşulları için aşınma karakteristikleri incelenecektir.

Bu tez çalışması 3 bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde triboloji ve sürtünme ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde aşınma mekanizmaları, test metodolojisi ve karbon nanotüp hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde ise pin on disk test prosedürü ve çalışmaya esas oluşturan deneyler ve sonuçları işlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma Karakteristikleri, Aşınma Deneyleri, Karbon Nanotüp, Triboloji, Aşınma, Pin-on Disk, Aşınma Oranı

**SELECTION OF APPROPRIATE WEAR PARAMETERS FOR EXPERIMENTAL
WEAR MODEL DATA**

Faruk SİREK

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assist. Prof. Dr. İlyas İSTİF

Friction and wear in moving machine parts is one of the most important research subjects in engineering. Wear deformation depends on pair of material, surface roughness, applied force and whether the impurity material contacted to the surface or not in mechanical parts. When deformation level exceed predetermined deformation level, damage occurs. Unexpected wear on machine parts, cause economical loses. To reduce the damage and extend the working life, lubrication or dry friction resistance enhancing measures can be taken in order to increase friction resistance. One of these measures is related to improvement of the materials structure. For example mechanical specifications and wear resistance can be increased by adding graphene or carbon nanotube to aluminium by sintering. Aluminum sintering (metal matrix composites) have a common use in the industry.

It is very difficult to calculate or find out a wear model because of wear mechanism is complex phenomenon. Graphene increases lubrication and carbon nano tubes increases strength and wear resistance [1]. This study has been done for aluminium carbon nanotubes (CNT) which manufactured by sintering method and the carbon content of 0.5 wt% - 1wt% and 2wt% of the CNT material, intended to obtain the wear data which is necessary for statistical modeling.

By selection of appropriate parameters (normal force (F) wear path (x) is the linear velocity (w)) for modeling of wear test data will be analyzed. Also wear characteristics for different operating conditions, such as changing the normal force will be investigated.

This thesis consists of three parts. General information regarding tribology and friction are given in the first section. In the second section, wear mechanisms, information about the test methodology and carbon nanotubes are given. In the third section, pin on disc test procedures and forms the basis of experimental studies and the results are processed.

Keywords: Wear Behavior, Wear Tests, Carbon Nanotubes, Tribology, Wear, Pin-on Disc, Wear Rate

1.1 Literatür Özeti

Aşınma ile ilgili teorik bir hesaplama ve modelleme yapmak zordur. Bunun nedeni aşınma mekanizmasının kompleks yapısıdır [1]. Kontak mekaniği teorik olarak belli durumlarda kullanılabilir olsa da genel anlamda hesaplama ve modelleme için yetersizdir. Malzeme çiftine bağlı olarak aşınma direncinin ortaya konmasında deneysel çalışmalar çok önemlidir. Standart aşınma deneyleri sonucunda malzemelerin aşınma dayanımları ve karakteristikleri hakkında bilgi sahibi oluruz ve konstrüktör olarak malzemenin aşınma direncini bilmemiz durumunda malzeme çiftinin çalışma koşullarına uygun olup olmadığına karar verebiliriz. Bu durumun bir adım ötesine geçerse, deneysel verileri kullanmak suretiyle istatistiksel ve yapay sinir ağ temelli modeller oluşturmak mümkündür. Bu modelleme teknikleri genelde prosese ait giriş ve çıkış verisine ihtiyaç duyar [1]. Bu çalışma ile deneysel modellemede aşınma verilerinin kullanımı için gerekli olan düzenlemeler ve uygun deney parametrelerinin seçimleri yapılacaktır.

Metal matrisli nanokompozitler yüksek mukavemet ve nispi sertlik başta olmak üzere, istenen termal genişleme katsayısı ve iyi sönümlenme özellikleri de dahil, yüksek mekaniksel özellikleri ile çeşitli uygulamalar için mükemmel bir adaydır. Karbon nanotüpler (CNT) takviye malzeme eklenerek düşük ağırlığı ile birlikte yüksek sertlik (970 MPa), yüksek mukavemet (63 GPa) ve yüksek ısı iletkenlik gibi eşsiz mekanik ve termal özellikler sunabilmektedir. Genellikle CNT ile güçlendirilmiş alüminyum matris kompozitler klasik toz metalürjisi yöntemi ile üretilebilir [2]. Takviye malzemesi olarak

çok duvarlı CNT kullanılan alüminyum matrisli bir kompozit malzemede, CNT oranının %0'dan %1'e yükseltilmesi ile sertliğin %40 kadar artması beklenebilir [3].

Aşınma prosesini aşağıdaki gibi ifade edersek,



Şekil 1.1 Aşınma prosesi

Pin-on disk deneyinde teğetsel kuvvet ve aşınma miktarları belli bir test yolu uzunluğunca ve süresince kaydedilir ve bu verilere dayanarak sürtünme katsayısı ve aşınma oranı hesaplanır. Böylece malzeme çiftine ait karakteristikler elde edilmiş olur. F_s sistem girişi, W_r sistem çıkışı olarak belirtilmektedir. Modellemede aşınma verilerinin kullanılabilmesi için anlık (t_1, t_2, \dots, t_n) teğetsel kuvvetler ile birlikte aşınan kütle miktarlarının da bilinmesi gerekmektedir. Sürtünme kuvveti doğrudan anlık olarak okunabilmekte ancak ağırlık kaybı deney başlamadan önce (t_1) yapılan ilk tartımla (m_1), deney sonunda (t_n) yapılan son tartım (m_2) arasındaki toplam fark olarak elde edilebilmektedir. Aşınmanın doğrusal olduğu varsayılarak (t_1, t_2, \dots, t_n) anlık aşınma miktarları kayıp kütle miktarının ölçülen veri sayısına bölünmesi ile elde edilmiştir. Ayrıca bu veriye dayanarak aşınma oranı hesaplanabilmektedir.

Bu veriler kullanılarak aşınma deney parametreleri olarak normal kuvvet, yol ve devir hızı belirlenmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada literatürde son dönemde incelenmekte olan sinterlenmiş alüminyum karbon nanotüp pimler ve St52 çeliğinden imal edilmiş karşı disk malzeme pin-on disk test cihazında test edilerek, aşınma testlerinin yapılması, bu test sonuçlarının istatistiksel modellenenebilir şekilde düzenlenmesi, deneysel modelleme için parametrelerin seçimi amaçlanmıştır. Test cihazında, saf Alüminyum - 0,5 wt% - 1 wt%

ve 2 wt% oranında karbon nanotüp içeren alüminyum malzemeler, 1000m mesafe için 10N ve 15N yükte sabit hızda aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Karşı malzeme olarak st52 malzemedan imal edilmiş disk kullanılmıştır.

1.3 Hipotez

Alüminyum karbon nanotüp malzemeler literatürde son dönemde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma ile birlikte saf alüminyum ile birlikte 0,5wt% - 1wt% ve 2wt% oranlarında sinterlenmiş alüminyum karbon nanotüp için pin-on disk testleri 10N ve 15N normal yük ve 1000m mesafe için gerçekleştirilmiştir. Deneysel aşınma modeli verileri için gerekli olan verilen istatistiksel modellenebilir şekilde düzenlenmesi ve deneysel modelleme için parametrelerin seçimi yapılacaktır.

BÖLÜM 2

TRİBOLOJİ

Triboloji; sürtünme, aşınma ve yağlama konularını inceleyen bilim ve teknoloji dalıdır.

2.1 Triboloji Tanımı ve Tarihçesi

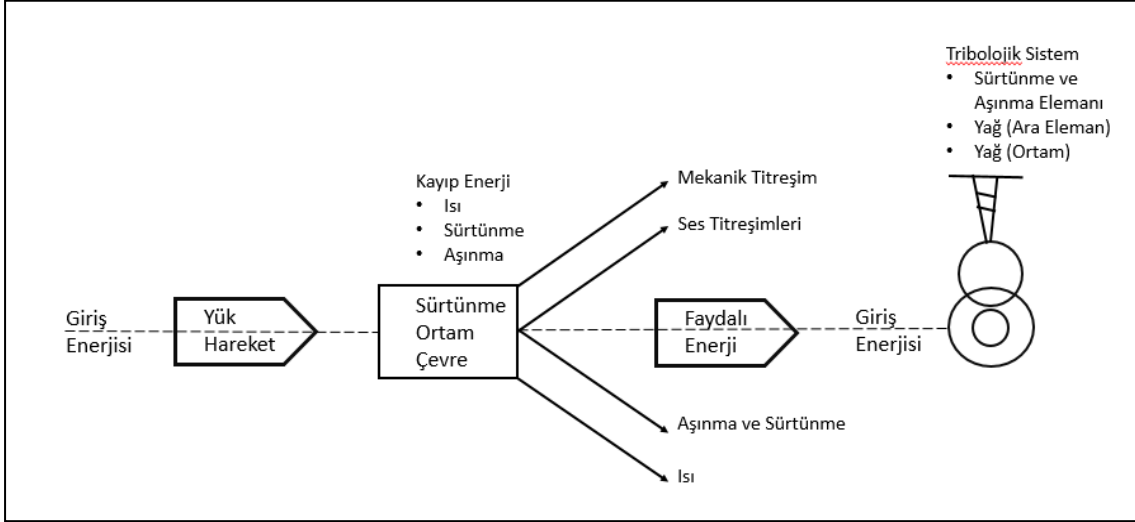
Triboloji kelimesi Yunanca sürtme anlamına “Tribos” kelimesinden türetilmiş ve literatüre Sürtünme Bilimi olarak girmiştir [4]. Alternatif olarak aşınma gibi kelimeler kullanılmıştır. Sözlük anlamı olarak triboloji, hareketli yüzeylerdeki bağıl hareket etkileşiminin bilim ve teknolojisi olarak tanımlanmaktadır. Birbiri ile temas halinde ve hareketli iki yüzeyin incelenmesi olarak söylenebilir. Triboloji uzay teknolojisinden ev gereçlerine kadar birçok alanda parçaların aşınmaları, bakım aralıkları ve dayanıklılıkları gibi birçok veriye ulaşmamızı sağlayarak müthiş bir ekonomik getiri sağlamaktadır. Sürtünmedeki yüzey etkileşimleri oldukça komplekstir ve sürtünme bilimini anlayabilmek için fizik, kimya, uygulamalı matematik, katı mekaniği, termodinamik, ısı transferi, makine tasarımı gibi birçok bilim alanı hakkında bilgi sahibi olmak gereklidir. Triboloji kelimesi oldukça yeni olmasına rağmen tribolojiyi oluşturan unsurlar, yazılı tarihinden daha eskidir. Paleolitik çağlarda delme işlemlerinin gerçekleştirilerek açılan deliklerin kemiklerle doldurulduğu, tahıl öğütme işlemlerinin buralarda yapıldığı bilinmekteydi. Kayıtlara göre milattan önce 3500 yılında hareket esnasındaki sürtünmeyi azaltmak için tekerlek kullanılmaya başlanmıştır.

Büyük kaya parçalarının taşınması, gerekli hareketin sağlanması için yağlı kızak gibi çeşitli aletler kullanılmış ve bir “*know how*” oluşturulmuştur.

Roma imparatorluğunda ve sonrasında askeri mühendisler, savaş aletlerini tasarlarken triboloji prensiplerini kullanmışlardır. Rönesans'ın ünlü sanatçılarından Leonardo da Vinci, yapmış olduğu resimler kadar sürtünmeye bilimsel yaklaşan ilk kişilerden olmuştur. Da Vinci düz bir yüzey üzerinde kayan bir dikdörtgen blok hareketini düzenleyen kuralları ortaya koymuştu. Normal yükün sürtünme kuvvetine oranı olan sürtünme katsayısı kavramını tanıttı. 1699 yılında Fransız fizikçi Guillaume Amontons iki düz yüzey üzerindeki kuru sürtünme çalışmalarından sonra sürtünme kurallarını yeniden keşfetti. İlk olarak, yüzeyde kaymaya direnen sürtünme kuvveti normal yük ile doğru orantılıdır. İkinci olarak sürtünme kuvvetinin miktarı temas alanından bağımsızdır. Bir diğer Fransız fizikçi Charles-Augustin Coulomb üçüncü kural olarak hareket başladığında sürtünme kuvveti hızdan bağımsızdır ilkesini ortaya koymuştur. Aynı zamanda kinetik ve statik sürtünme arasında ilişkiyi de açıklamıştır [4].

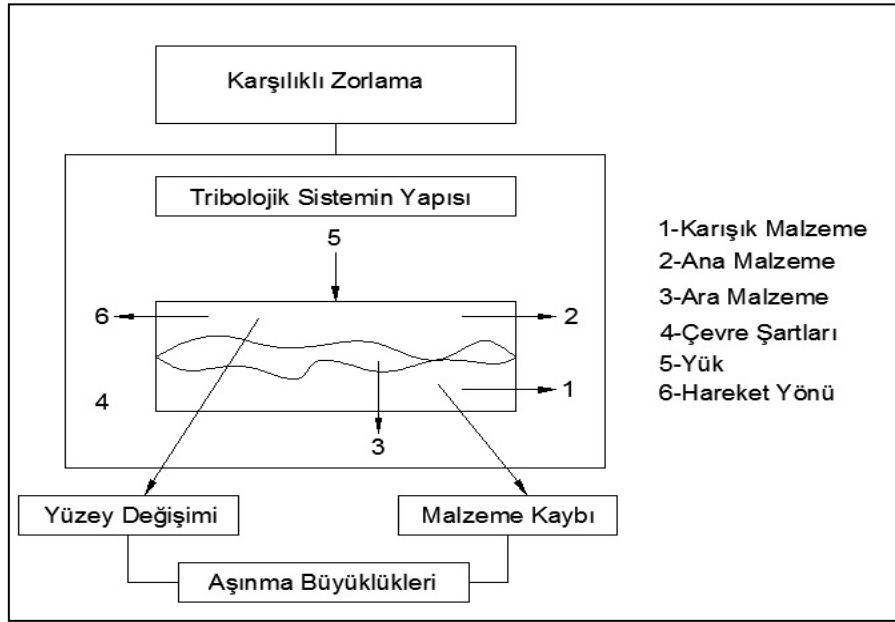
Diğer gelişmeler 1500'lü yıllarda yataklamaların ön plana çıkmasıyla gerçekleşmiştir. 1684 yılında Robert Hooke, lastik yataklamalarında demirli tahta yerine çelik şaft ve metal burç kullanımı önermiştir. Diğer gelişmeler endüstriyel gelişme ile birlikte 18. Yüzyılda gerçekleşmiştir.

Viskoz akışın temel yasaları 1688 yılında Sir Isaac Newton tarafından öne sürülmesine rağmen, bilimsel olarak yataklamalarda kullanımı on dokuzuncu yüzyılın sonlarına denk gelmektedir. Bizim bildiğimiz hidrodinamik yağlama prensipleri 1884 yılında Beauchamp Tower'ın çalışmalarıyla ve 1886 yılında Osborne Reynolds teorik yorumları sonrasında anlaşılmuştur. Ondan sonra hidrodinamik yataklama teorileri ve pratikleri oldukça sınırlı ve yeni makinalarda oluşan ihtiyaçlara göre şekillenmekteydi. Aşınma ile ilgili bilimsel çalışmalar 20. Yüzyılın ortalarında güçlükle geliştirilmiştir. Ragnar Holm aşınma konusunda erken dönemde önemli katkılar yapmıştır. Batıda buhar türbinlerinin kullanılması, 1830'larda demiryolunun gelişmesi, 1900'lerde arabaların yollara çıkması ve 1940'larda uçakların kullanılmaya başlanması daha stabil komponent kullanılması gerekliliğini meydana çıkarmıştır. Endüstriyel gelişime bağlı olarak triboloji alanında daha fazla bilgiye ulaşma ihtiyacı doğmuştur. Günümüzde Bhushan, Gupta ve Nosonovsky triboloji alanında çalışan ünlü bilim adamları olmuşlardır [4].



Şekil 2.1 Tribolojik sistem enerjisi

Şekil 2.1’de tribolojik bir sistem enerjisi şematik olarak gösterilmiştir. Sistem, sürtünme ve aşınma elemanları ve eğer mevcutsa yağlayıcılardan oluşmaktadır.



Şekil 2.2 Tribolojik sistemin şematik gösterimi

Şekil 2.2 de bir aşınma sisteminin çalışma prensibi şematik olarak verilmiştir. Malzeme kayıpları ve yüze değişimleri aşınma büyüklüklerine etki eden faktörlerdir.

2.2 Temas Yüzeyi

Sürtünme ve aşınma birbiri ile temas halindeki yüzeylerin karakteristikleri ile bağımlıdır. Sürtünmeyi açıklamanın zorluğu veya yüksek doğrulukla tahmini yüzeyin kompleksliği ile ilgilidir. Örneğin mikro yapıdaki değişiklikler, geometrik bozukluklar, oksitlenme, organik moleküllerin devreye girmesi veya çevreden gelen diğer etkiler aşınma ve sürtünmenin etkisinin tahminini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle iki yüzey sıkı bir temas kurduğunda, ilgili yüzeylerin temas bölgelerinde gerilme ve kontak yüzeyindeki gerilme alanında, fiziksel ve kimyasal bağlar oluşmasıyla fizikokimyasal değişimlerle doğal iletişim meydana gelmektedir.

Kontak gerilimini nicelik olarak değerlendirmek için, geometrik düzensizliklerden arındırılmış pürüzsüz bir yüzeyde çalışmalar yapılmalıdır. Moleküler düzeyde pürüzsüz yüzeyler elde etmek imkânsız olduğundan bu tabii ki ideal bir vizyondur. Kontak mekaniği ve bu varsayımlar altında lineer elastik gövde için özellikle Hertz tarafından geliştirilmiş teorik analizler kontak mekaniği ve deformasyonlar ile ilgili ilişkileri incelerken kullanılabilir. Bu analizleri uygulamak, gövdelerin elastik olduğu veya sürtünmesiz yüzeyleri bulunan kontak yüzeylerinde daha verimlidir. Kontak mekaniği ve kontak geriliminin malzeme üzerine etkisi ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

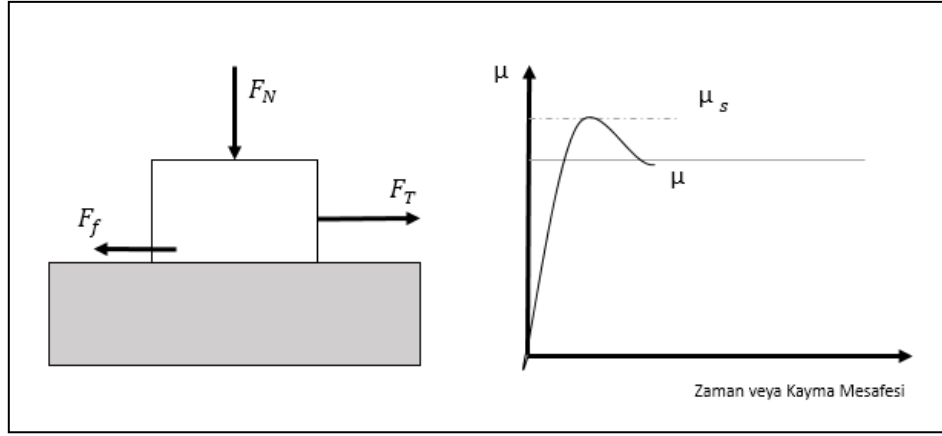
2.3 Sürtünme

F_N normal kuvvet ile bağlı iki parçayı birbirlerine göre izafi olarak hareket ettirmek için şekil 2.3'te gösterildiği gibi F_T teğetsel kuvvete ihtiyaç vardır. Bu kuvvete sürtünme kuvveti adı verilir ve hareketin tersi yönünde etki eden F_f statik sürtünme kuvvetinin üstesinden gelmelidir. F_T / F_N oranı μ_s statik sürtünme katsayısıdır. Sürtünme ise bağıl hareketteki diğer cismin hareketine karşı konulan direnç olarak tanımlanabilir. Genelde μ_s , kontak yüzeyinden bağımsızken F_N kuvvetine, sürtünen malzemelerin özelliklerine ve yüzeylerine bağlıdır. İki yüzeyi belirli bir hızda hareket ettirmek için gerekli kinetik sürtünme kuvvetini yenebilecek teğetsel kuvvet uygulamak gereklidir. Bu durumda $F_T / F_N = \mu_k$ kinetik sürtünme katsayısıdır. Bu katsayı genellikle, kontak yüzeyinden

bağımsızken, F_N , dönüş hızı, malzeme ve malzeme yüzeyine bağlıdır. Şekil 2.3'te görüldüğü üzere statik sürtünme katsayısı, her zaman olmasa bile genellikle kinetik sürtünme katsayısından daha yüksektir. Temas yüzeyi ve yüzeylerde meydana gelen deformasyonlar da sürtünmeye etki eden faktörler arasında yer almaktadır. Pürüzlülükler ve plastik deformasyonlar, adhesiv sürtünme üzerinde etkili olan bir diğer konu olarak göz önünde bulundurulmalıdır.

Kısaca belirtmek gerekirse sürtünmenin temel başlıkları;

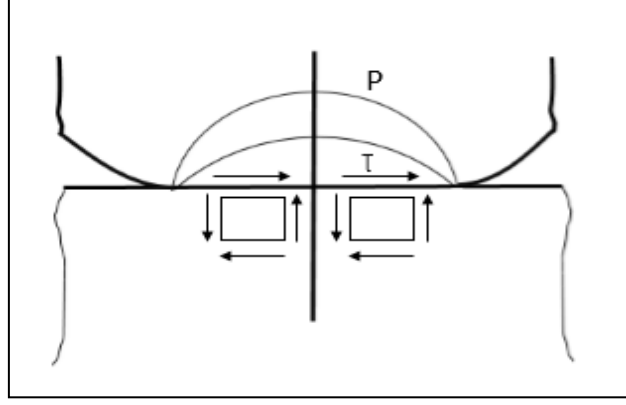
- 1-) Sürtünme temas alanından bağımsızdır.
- 2-) Normal kuvvet ile orantılıdır.
- 3-) Kinetik sürtünme kayma hızından bağımsızdır.



Şekil 2.3 Temas eden iki yüzeyin hareket ettirilmesi için gerekli kuvvetin şematik gösterimi

2.3.1 Sürtünmenin Yüzey Gerilimi Üzerindeki Etkisi

Temas eden iki yüzey arasındaki sürtünme, kontak noktalarındaki sürtünmesiz temas ve bağıl hareket değişimlerinin etkisinden bahsedilmiştir. İki pürüzsüz yüzey üzerinde elastik bir bağlantı olduğunu düşünelim. Şekil 2.4 elastik bir silindirin μ sürtünme katsayısına sahip elastoplastik bir yüzey üzerinde kayması esnasında yüzeyde oluşan kontak gerilimini göstermektedir. Düz yüzey üzerinde gerilmeler belirtilmiştir.



Şekil 2.4 Düz yüzeyde sürtünme ile silindirik kayma. Düz yüzeydeki kontak alanlarındaki gerilme dağılımı

2.3.2 Kinematik sürtünme

Sürtünme teknik olarak birbiriyle temasta olan ve birbirine göre izafi hareket yapan ya da yapma eğiliminde olan iki cismin harekete karşı gösterdikleri direnç olarak tarif edilir. İki cisim arasındaki izafi hareketi meydana getirmek isteyen kuvvete karşı, cisimlerin temas yüzeyleri arasında hareketi engelleyen ve sürtünme kuvveti olarak tanımlanan karşı kuvvet oluşur. Sürtünme kinematik olarak kayma, yuvarlanma ve kayma-yuvarlanma şeklinde olur. Birbirlerine temas eden yüzeyler arasında izafi hareket yoksa statik sürtünmeden söz edilir. İzafi hareket iki cisim yüzeyleri arasında mevcutsa bu durumdaki sürtünmeye dinamik veya kinetik sürtünme denir. Sürtünme kuvveti sabit değildir ve sürtünme katsayısına bağlıdır ve bu katsayının değişimiyle beraber değişir. Sürtünme katsayısı statik sürtünme durumunda en büyük değerini alır. Dolayısıyla sürtünme kuvveti de izafi hareketin başlangıcından hemen önce en büyük değerini almış olur.

2.4 Aşınma Mekanizmaları

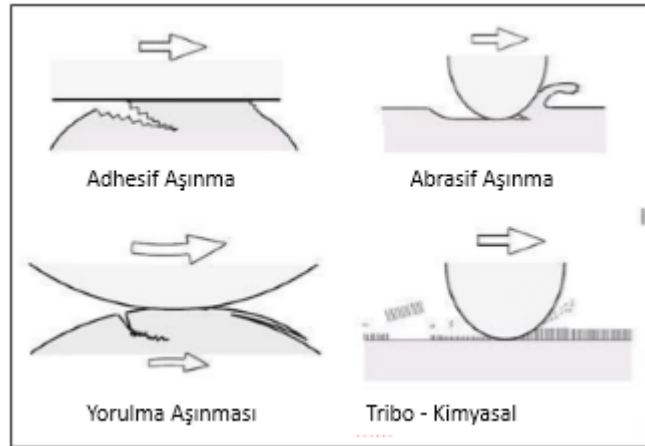
Aşınma, başka bir yüzey ile temas halindeki yüzeyde tribolojik sistemden çıkan talaşların yol açtığı zarardır. Başka bir deyişle dış etmenler altında temas yüzeyindeki fiziksel değişimlerdir. Aşınma direk bozulmalara sebep olabileceği gibi toleransların ve yüzey pürüzlülüğün yok olmasına ve yorulma ile komponentlerin bozulmasına neden olabilir. Aşınma prosesi iki parçanın bağlı hareketinin doğal karakteristiğidir. Şekil 2.6'da bazı örnekler şematik olarak gösterilmiştir. Eğer parça gövdesi bir diğerrinin üzerinde

hareket ediyorsa, sonuç kayma aşınmasıdır. Eğer bu parçalardan biri diğerinin üzerinde dönüyorsa, dönme aşınması oluşur. Eğer her iki hareket eş zamanlı uygulanıyorsa dönme – kayma aşınması oluşur. Çok küçük değişimlerle karşılıklı bir kayma meydana geldiğinde bu aşınma tipine aşındırma adı verilir.

Malzemelerden herhangi biri daha yumuşak olan diğer malzemeyi içerdiği sert partiküller aracılığıyla aşındırıyorsa buna abrazyon denir. Eğer bu aşındırıcı malzemeyi bir sıvı taşıyorsa buna aşınma şekline erozyon denilir.

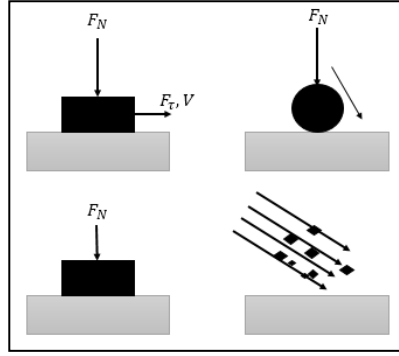
Pratikte aşınma prosesleri çok fazla sayıda isimle anılıyor olsa da, aşınma hasar oluşumu ve aşınma mekanizması hareketleri baz alınarak 4 ana karakterde adlandırılabilir

- (1) Adhesif aşınma;
- (2) Tribo-oksitatif aşınma;
- (3) Abrasif aşınma;
- (4) Değme yorulma aşınması;



Şekil 2.6 (a) Aşınma mekanizmaları [5]

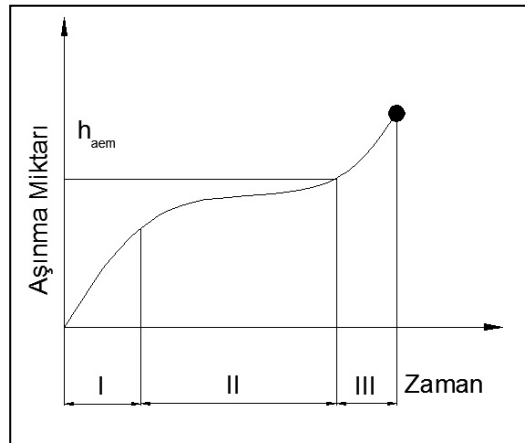
Bu dört ana aşınma mekanizmasının doğru anlaşılması, tüm aşınma süreçlerinin kontrolü için çok önemlidir. Bu kontrol gelişmiş hareketli aşınma mekanizması tanımlanmasının mümkün olduğu tasarım aşamasında yapılabilir. Bu kontrol, aşınma kaynaklı hatadan sonra, tribolojik sistemi yeniden tasarlanmasına gerek duyulduğunda sonradan da yapılabilir. Bu sorunun üstesinden gelmek için sürekli hata analizleri yapmak ve ana aşınma mekanizmasının doğru anlaşıldığından emin olmak gerekir.



Şekil 2.6 (b) Parçalar arasındaki bağıl hareket örnekleri a) kayma aşınması b) dönme aşınması c) aşındırma d) akışkanlı sert partikül

2.4.1 Aşınma Zaman İlişkisi

Şekil 2.7’de gösterildiği üzere toplam 3 bölümden oluşur. Birinci bölüm makinanın ilk çalıştırılması sırasında ki alıştırma esnasındaki aşınmadır. İkinci bölüm normal temas halinde meydana gelen aşınmadır ve parça ömrünü belirler. Üçüncü kısım ise parçanın kullanılamaz hale geldiği ve maksimum aşınmanın olduğu kısımdır.



Şekil 2.7 Aşınma – zaman ilişkisi

2.4.2 Adhesiv Aşınma

Adhesiv aşınma, adezyon kuvvetleri temas pürüzlülükleri arasında aşınma parçalarının oluşumuna baskın bir rol oynadığında meydana gelir.

Tarihsel olarak, Archard teorisi olarak tanımlanan bu mekanizma artık daha farklı yorumlanabiliyor olsa da gerçekte söz konusu olayların daha iyi anlaşılmasına yol açmıştır.

Adhesiv aşınma sünek malzeme (metaller, cam sıcaklığının üzerindeki polimerler) ve kırılğan (seramik, cam sıcaklığının altındaki polimerler) malzeme aşınmalarının ayırt edilmesinde oldukça faydalıdır.

2.4.2.1 Sünek Malzemelerde Adhesiv Aşınma

Sünek malzemelerde, dönüş esnasında temas pürüzlülüklerinde plastik bağlantılar oluşur. Adezyon kuvvet bazı durumlarda ana gövdeden daha dirençli bir bağlantı oluşturabilir. Bunun bir sonucu olarak, bazı pürüzlerdeki teğetsel yer değiştirmeler nedeniyle pürüzlülükler yerine ana kütlede kesilmelere neden olabilir. Şekil 2.8’de toplam aşınma hacmi gösterilmiştir.

$$W_r = \frac{\Delta m}{l \cdot \rho \cdot F} \quad (2.1)$$

W_r ; aşınma oranı (mm^3/Nm)

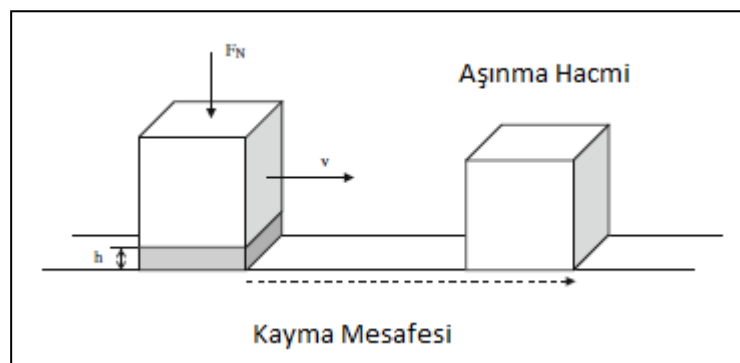
Δm ; Test esnasında toplam kütle kaybı (gr)

ρ ; test malzemesinin özgül ağırlığı (g/cm^3)

l ; toplam mesafe (m)

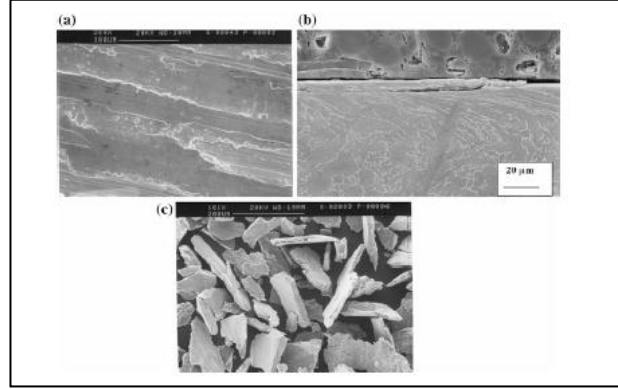
F ; pim üzerinde Normal kuvvet olarak alınmıştır.

Pürüzlülüklerde tekrarlanan plastik deformasyonlar lokal yorulma hasarı veya yorulma kaynaklı plastik deformasyon birikimine neden olmaktadır. Bu süreçler alt yüzey temas bölgelerinde oldukça geniş alanlarda etkili olur ve malzeme zayıflamasına katkıda bulunur. Bu nedenle, aşınan ufak parçalarda bu defa kritik bir hasar elde edilir.



Şekil 2.8 İlerleme mesafesi ve aşınma hacmi

Aşınma yüzeyleri morfolojisi, alt yüzey hasarları ve aşınma çerçeveleri şekil 2.9 'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Aşınma yüzeyi, plastik deformasyonlar, alt yüzey hasarları, ölçek morfolojisi [6]

Archard teorisinde, adhesiv aşınma en düşük sertlikte malzeme ile kısıtlamış olsa bile, tribolojik sistem aşınması iki malzemenin toplam aşınma hacmi olarak belirtilmektedir. Eğer bir malzeme diğerinden daha yumuşak ise, aşınmaya katkıda bulunur ve dönme sonrasında daha sert olan malzeme sayesinde temas yüzeyi genişler. Her iki malzemede benzer sertlikte ise toplam aşınma hacmine her iki malzemede katkıda bulunur.

2.4.2.2 Gevrek malzemelerde Adhesiv Aşınma

Gevrek malzemelerde adhesiv aşınmanın özel bir türü oluşur. Temas yüzeylerindeki pürüzlülüklerdeki adhesiv geçişkenlikler aslında dönüş esnasında çekme gerilmesinden kaynaklanmaktadır.

2.4.3 Tribo-Oksidatif Wear

Tribo-oksidatif aşınma oksijen içeren bir ortamda yüzeyler arası etkileşim sonucunda meydana gelmektedir. Tribo-oksidatif aşınmada temas pürüzlülüklerinde hem oksidatif hem de mekanik hareket meydana gelmektedir. Genel olarak, yüzeyde bir oksit tabaka oluşturularak, pürüzlerde metal teması önlenir ve oksit tabakası katı bir yağlayıcı gibi davranır, böylece sürtünme ve aşınmayı azaltır. Tribo-oksidatif aşınmaya neden olabilecek çok farklı durumlar mevcuttur.

2.4.3.1 Yüksek Sıcaklıkta Tribo-oksitatif Aşınma

Yüksek sıcaklıkta Tribo-oksitatif aşınma iki durumda meydana gelir;

(1) Yüksek kayma hızında (çeliklerde 1m/s'den hızlı)

(2) Temas eden malzemeler yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında

Her iki durumda da, yüzey sıcaklığı pürüzlerin doğrudan oksidasyonuna yol açmak için yeterlidir. Öncelikle yüksek kayma hızı kaynaklı tribo-oksidasyonu düşünelim. Buradaki model için genellikle Quinn'in çalışmaları baz alınmaktadır. Oksidasyon temas yüzey sıcaklığı(Tf) ve temas pürüzlerine bağlıdır. Örneğin çelik bir malzeme için 700 °C 'den daha yüksek sıcaklıkta olmalıdır.

2.4.3.2 Düşük Kayma Hızında Tribo-Oksitatif Aşınma

Araştırmalar tribo-oksitatif aşınmada aşınma çerçevesindeki oksit parçacıklarının düşük hızda bile yer alabileceğini göstermiştir. Aşınma parçaları, temas yüzeyinde kolayca tutulabildiği sürece bu aşınma kısmen ileri geri kaymada önem teşkil etmektedir. Bu tip bir tribo-oksitatif aşınma Stott tarafından genişçe incelenmiştir.

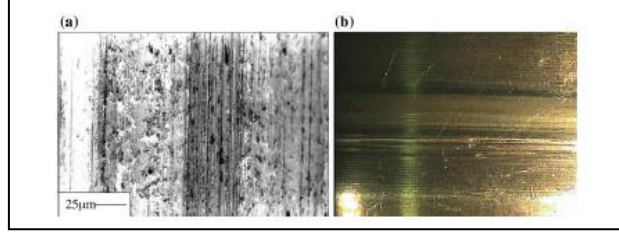
Aşınma aşağıdaki adımlarda ilerlemektedir.

- (a) Temas pürüzlülüklerinde adhesiv aşınmayla metalik parçacıklar oluşmaktadır. Bazıları tribolojik sisteme dahil olurken, bazıları birleşme yüzeyi arasında sıkışıp kalmaktadır.
- (b) Böyle küçük parçacıklar pekleşir ve oksitleşir (oksitlenme en üst tabakada meydana gelir)

2.4.4 Abrasif Aşınma

Sürtünen cisimler arasında tribolojik sistemde daha sert olanın diğerinden parça kopmasıdır. Bu kopma farklı hallerde bulunan malzemelerde görülmektedir.

İlk durumda, sert bir partikül ya da sert bir çıkıntı daha yumuşak olan karşı yüzeyde plastikimsi şekilde penetre olacak bir yiv açacaktır. Abrasif sert parçacıklar malzemeyle mikro yapısal düzeyde birleşebilir (seramik – güçlendirilmiş kompozit, çelik veya sert karbür içeren dökme demir) veya çevreleyen ortamdan gelebilirler (Tipik örnekleri tribolojik sistemi kirleten kum tanecikleri)

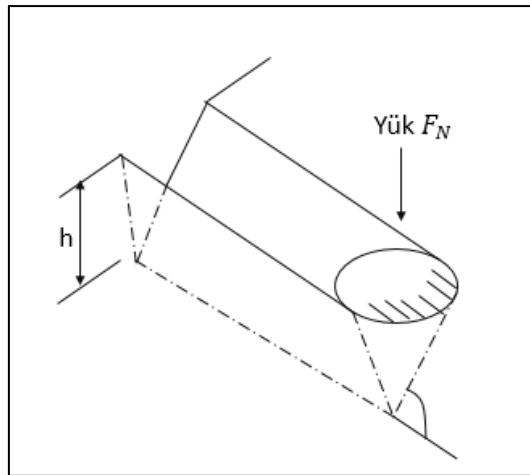


Şekil 2.10 Dökme demir disk (a) kum tanecikleri tarafından aşındırılmış bronz yüzey (b) [4]

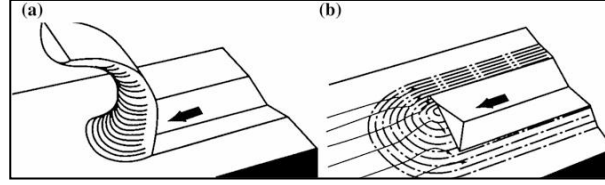
Şekil 2.10’de iki örnek verilmiştir. Üç parçalı abrazyonda sert parçacıklar iki temas yüzeyi arasında sıkıştıklarından dönemezler ve hareketleri oldukça kısıtlıdır. Her halükarda sadece sert yüzeyin yumuşak yüzeyden %20 - %30 daha sert olması durumunda abrasif geçişkenlik meydana gelmektedir.

2.4.4.1 Sünek Malzemelerde Abrasif Aşınma

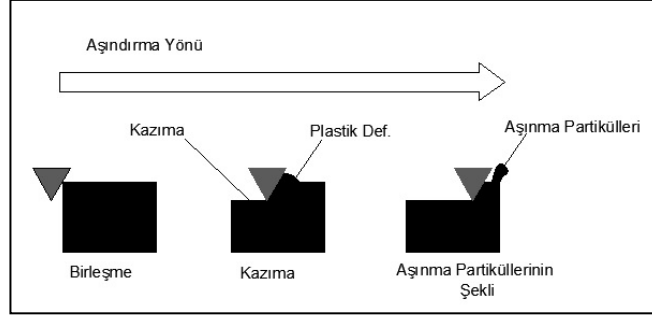
Şekil 2.11’de iki parçalı abrasif aşınma çizimi görülmektedir. Koninin hareketi esnasında abrasif parçacıkların yumuşak yüzey üzerinde oluşturduğu yiv gösterilmektedir. Eğer tüm plastik deformasyonlar kalkarsa, aşınma “microcutting” olarak adlandırılır ve maksimumdur. Tamamı yivin kenarında oluşursa, aşınma “microploughing” olarak adlandırılır ve neredeyse yüzeyde bile aşınmalar oluşur. Şekil 2.12’de her iki durum şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.11 İki parçalı abrasif aşınma çizimi [5]



Şekil 2.12 Abrasif Aşınma – microcutting ve microploughing [5]



Şekil 2.13 Abrasif aşınma

2.4.4.2 Gevrek Malzemelerde Abrasif Aşınma

Gevrek malzemelerde, düşük kırılma sertliğindeki abrasif geçişkenlikler Lawn ve Swain mekanizmaları ile açıklanmıştır. Aslında sert ve köşeli parçacıklar hareketli kırılğan yüzey üzerinde girintiler oluşturmaktadır. Daha sonra girintilerin oluşumu ve (aşındırılmış malzemenin yüzeyine hemen hemen paralel) yanal çatlaklarının yayılması ile aşınma parçalarının oluşumuna yol açabilir. Eğer sert parçacıklar fazlaca yuvarlatılmışsa, bunlar gevrek temas yüzeyinde gevrek bir kırılmayı tetikleyebilir.

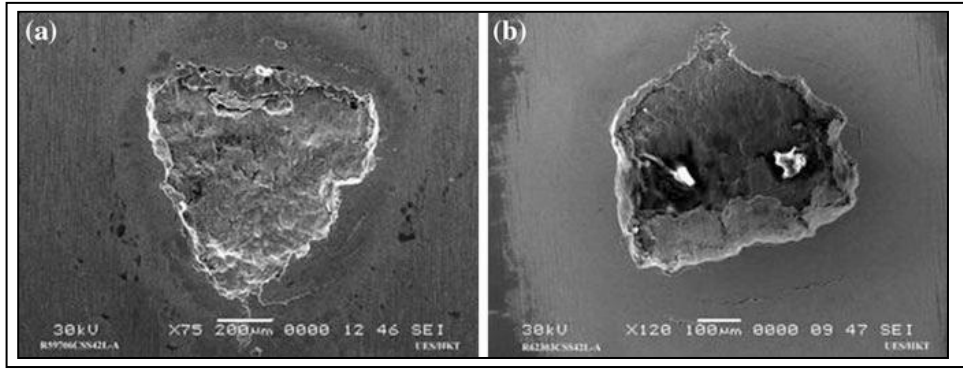
2.4.5 Yorulma Aşınması

Bu aşınma türünde malzeme ilk kontak noktasından itibaren kalkmaya başlar ve neredeyse düz bir şekilde ilerler. Buna ek olarak kontak mekanizması her zaman büyük plastik deformasyonlarla anlatılır. Diğer taraftan yorulma aşınması tipik bir yorulma hatasıdır (Döngüsel yükleme uygulamasında bir çatlak başlar ve sonuna kadar devam eder). Bu aşınma, yüklenen parçanın yorulma ömrüne karşılık gelen döngüsünden sonra üretildiği anlamına gelir. Ek olarak çoğu çalışmada uygulanan yükün şiddetine bağlı olarak, küçük ölçekli plastik deformasyona maruz kalır ve yıpranmış bölge büyük plastik deformasyonlar meydana gelmeden atlatılır.

Şekil 2.14'de bir yataklama elemanına ait yorulma aşınması gösterilmiştir. Çoğu durumda yorulma aşınması uyumsuzluk durumundadır ve en az iki parçanın birbiri

üzerine etki etmesi sonucu oluşur. Bu durumda aşınma mekanizması “Rolling Contact Fatigue (RCF) – Dönel Temas Yorulması olarak adlandırılır. Aşınma Hertzian etkisinin çevrimsel olarak sürekli etki etmesi sonucu oluşur. Aşınma mekanizması, temas gerilmesi, yağlayıcı rejimi, dönüş ve malzeme özelliklerinden etkilendiğinden diğer mekanizmalara göre daha komplekstir.

Plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak oluşan küçük boşluklarda kopma gerilmeleri maksimumdur. Bu boşluklar zamanla yüzeye doğru ilerlemekte, büyümekte ve nihayet yüzeyde küçük çukurlar meydana getirmektedir. Pitting adı verilen bu aşınma tipi, daha çok dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve kam mekanizmaları gibi yuvarlanma hareketi yapan elemanların yüzeylerinde meydana gelir.



Şekil 2.14 42L yataklama çeliği yorulma aşınması [5]

2.5 Aşınmaya Etki Eden Faktörler

2.5.1 Esas Sürtünme Elemanına Bağlı Olanlar:

- 1) Malzemenin Cinsi
- 2) Kimyasal Bileşimi
- 3) Mikro Yapısı
- 4) Hacimsel ve Yüzeysel Sertliği
- 5) Elastiklik Modülü
- 6) Akma ve Kırılma Özellikleri

- 7) Yüzeyin Pürüzlülük Durumu
- 8) Şekli ve Boyutları
- 9) Soğuk Şekillendirme Durumu
- 10) Gördüğü Isıl İşlem

2.5.2 Karşı Elemana Bağlı Olanlar:

- 1) Aşındırıcı Tane Büyüklüğü
- 2) Tane Şekli
- 3) Tane Dağılımı

2.5.3 Ortama Bağlı Olanlar:

- 1) Nem
- 2) Sıcaklık

2.6 Aşınma Testleri ve Metotları

Sürtünme katsayısı ve farklı aşınma mekanizmaları altındaki aşınma tepkileri, malzeme içyapısından farklı olarak tribolojik sisteme bağlıdır. Örneğin kontak şekli, eşleşen malzemeler, eşleşen malzemelerin yüzey karakteristikleri vs. gibi. Bu nedenle gerçekçi tribolojik davranışların belirlenmesi için saha testleri yapılması gerekmektedir. Testler daha sonra gerçek sistemler üzerinde de denenmelidir. Bu gibi testler, uzun süreli, karmaşık ve pahalıdır, aynı zamanda bireysel değişkenlerin etkisini çıkarmak çok zor olduğu için sonuçların yorumlanması genellikle zordur. Bu nedenle, çoğu çalışmada aşağıda belirtilen daha basit laboratuvar testleri yapılmaktadır;

- (1) Tezgah testleri
- (2) Gerçek sistemden izole edilmiş tekil komponent testleri
- (3) Aşınma mekanizmasını simüle eden basitleştirilmiş testler

Tezgah testleri, hızlandırılmış komponent testleri ve basitleştirilmiş testler, gerçek saha testlerine oranla çok daha uygun maliyetli ve daha kısa sürelidir. Ek olarak test

parametreleri daha iyi kontrol edilebilir (Birçok laboratuvar testi için özel standart prosedür geliştirilmiştir) ve çıkan sonuçlar çok daha basit bir şekilde yorumlanabilir. Basitleştirilmiş test sonuçları, belirli bir istatistiksel güven aralığında farklı malzemelerin performansları ile hatta literatürdeki benzer koşullarda yapılmış testlerle bile karşılaştırılabilir. Bununla beraber basitleştirilmiş testler büyük bir özenle seçilmeli ve gerçekleştirilmelidir. Aynı zamanda yorumlama yapılırken, gerçek tribolojik sistem bilgilerine bağlı kalarak dikkatlice yorumlanmalıdır. Doğru bir yaklaşımla, ön tahminler baskın aşınma mekanizmasının yapabileceği hasarın tahmin edilmesini, laboratuvar testleri aynı sistemde malzeme örneklerinin belirlenmesine yardımcı olur. Basitleştirilmiş laboratuvar testlerinin en kritik yönü, kontak yüzey sıcaklığının kontrol edilmesidir. Aslında testleri yapılan malzemeler genellikle gerçek malzemelere göre çok daha küçük boyutludur. Bu nedenle test malzemeleri benzer test koşullarında genellikle daha yüksek kontak sıcaklığına daha kolay ulaşmaktadır.

Farklı yüzey sıcaklıkları farklı aşınma mekanizmaları oluşturur (örneğin, Adezyonda tribo-oksidatif aşınma). Bunun izlenmesi ve kontrolü (özel kuvvetli soğutma sistemleri, hava kompresörler vs.) oldukça önemlidir.

Laboratuvar testlerinden elde edilen veriler, direk olarak kuru yataklamalarda aşınma katsayısı hesabı ve dişli çarklardaki S-N (Stress – number of contacts) (Baskı – temas sayısı) eğrilerinin hazırlanması gibi gerçek tribolojik sistemlerin tasarımında ve konfigürasyonunda kullanılabilir. Çoğu durumda bununla birlikte belirli bir uygulama ve ilgili seçim kriterleri için farklı malzemeler arasında sıralama yapmak için kullanılmaktadır. Farklı bir prosesle üretilmiş ve farklı bir kaplama tekniği uygulanmış yeni bir malzeme kullanımı belirsizlikler oluşturmaktadır.

Çok fazla sayıda test makinesi (Tribometreler) çeşidi bulunmaktadır ve bunların bazıları için spesifik standartlar belirlenmemiştir. Farklı aşınma mekanizmalarının simüle edilebildiği basitleştirilmiş testlerin en önemlileri Tablo 1’de gösterilmiştir. Tabloda test adı ile birlikte simüle edilen aşınma ve aşınma mekanizması belirtilmiştir. Aslında belirtilen testlerin geçerliliğinin kontrolü için, gerçek komponentlerin aşınma mekanizmalarının doğal hayattaki rolü incelenmelidir. Aynı örnekleme teknikleri,

gerçek komponentlerde hata analizlerinin yapılmasında da kullanılmaktadır ve bir sonraki adım hangi testin uygulanacağını karar verilmesidir.

Çizelge 2.1 Basitleştirilmiş tribolojik testler, ilgili aşınma prosesleri ve simüle edilen aşınma mekanizmaları

Test Makinası	Simüle Edilen Test Prosedürü	Simüle Edilen Aşınma Mekanizması
Pin-on disk	Kayma Aşınması	Adhesiv Aşınma - Tribooksidatif aşınma
Blok-on ring	Kayma Aşınması	Adhesiv Aşınma - Tribooksidatif aşınma
Disk - on disk	Yuvarlanma-Kayma Aşınması	Temas Yorulması / Adezyon-Tribooksidatif aşınma
4 Top	Yuvarlanma Aşınması	Temas Yorulması
PAT	Yüksek Baskı Abrazyon	Abrasif Aşınma
Kuru-kum, kauçuk lastik	Düşük Baskı Abrazyon	Abrasif Aşınma

2.6.1 Ağırlık Farkı Metodu

Maliyet olarak en uygun yöntemdir ve duyarlılık kapasitesi sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Aşınma kütle kaybını ölçmek için 10^{-4} ve 10^{-5} hassasiyetli teraziler kullanılır. Dezavantajı numunenin sürekli olarak çıkartılmasıdır.

2.6.2 Kalınlık Ölçme Metodu

Test öncesi ve sonrasında kalınlık olarak alınan değer ve malzeme hacmi tespit edilerek aşınma miktarı $\pm 1\mu\text{m}$ duyarlılıkta ölçülmektedir.

2.6.3 İz Değişiminin İzlenmesi Metodu

Aşınan yüzeydeki plastik deformasyon geometrisinin ölçümü ile belirlenir. İz bırakıcı olarak sert uç kullanılır.

2.6.4 Radyo İzotoplarla Ölçme Metodu

Sürtünen yüzeylere parçacık bombardımanı uygulanarak radyoaktif hale getirilir ve ölçüm yapılır. Yüksek hassasiyet söz konusudur.

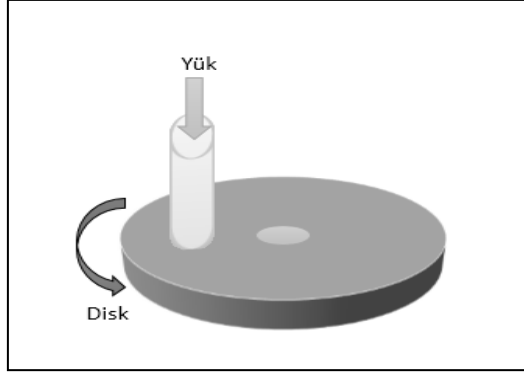
2.6.5 Aşınma Testleri

Bu bölümde pin-on disk cihazı başta olmak üzere tüm test cihazları açıklanmıştır.

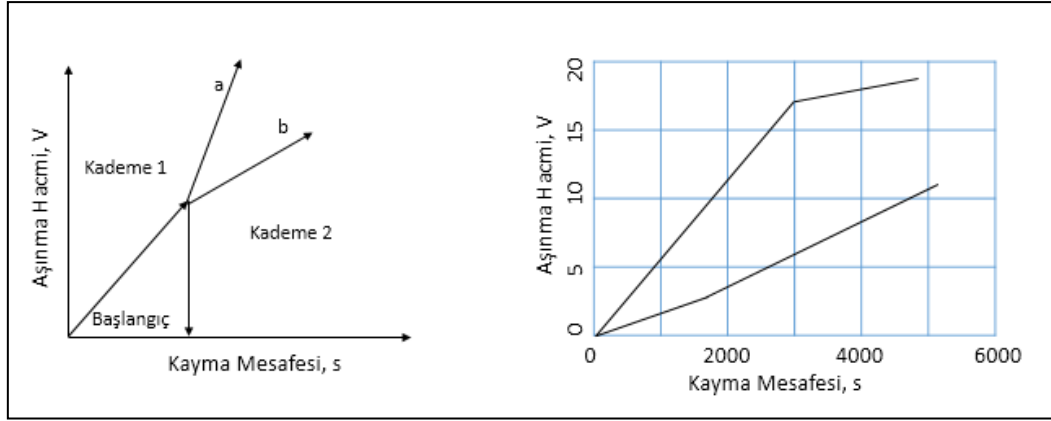
2.6.5.1 Pin-on-Disk Testi

Şekil 2.15'te şematik olarak gösterilmiştir. Bu test silindirik şekilli birkaç mm çapındaki bir pimin, dönel bir diske kuvvet uygulaması ile gerçekleştirilir. Bu temas yüzeyle uyumlu veya uyumsuz olabilir. Uyumsuz temas gibi durumlarda pim yerine küre kullanılabilir. Uyumlu temas durumunda, baskı altında kontrol dışı etkilere maruz kalmamak adına özellikle yağlayıcı testlerde temas yüzeyleri her zaman yuvarlatılmıştır. Temas sıcaklığı genellikle temas yüzeyinden belirli bir mesafe uzaklıkta pim üzerine yerleştirilen bir veya iki termokupl aracılığıyla kontrol edilir. Bu noktada disk üzerindeki aşınma parçalarının her bölgesi her bir dönüşte pim ile temas etmektedir. Eğer disk yeteri kadar ısı dağılımı gerçekleştiremezse, sıcaklık bir denge değerine kadar yükselecektir. Temas sıcaklığı bu yüzden beklenenden daha yüksek olabilir. Aşınma derinliği doğrusal bir transformatör kullanılarak sürekli kayıt altına alınabilir. Bu durumda kayıt diskin aşınma ölçümünün hesaplanmasına katkıda bulunabilir. Tabiki sıcaklık değişimine bağlı olarak pim üzerinde meydana gelen sürtünme azalmalarının transformatörün mesafesine etki edeceği göz önüne alınmalıdır.

Alternatif olarak aşınma, her bir test öncesinde ve sonrasında (ya da belirli aralıklarla) pim ağırlığı ölçülerek bulunur. Ana kütle kaybı aşınan malzemenin yoğunluğu kullanılarak hacim kaybına çevrilerek bulunabilir. Disk aşınması genellikle çok küçüktür. Eğer gerekirse profil metre ile aşınma profili ölçümlenebilir. Şekil 2.16 aşınma eğrisi örneği görülmektedir.



Şekil 2.15 Pin on disk testi şematik gösterimi



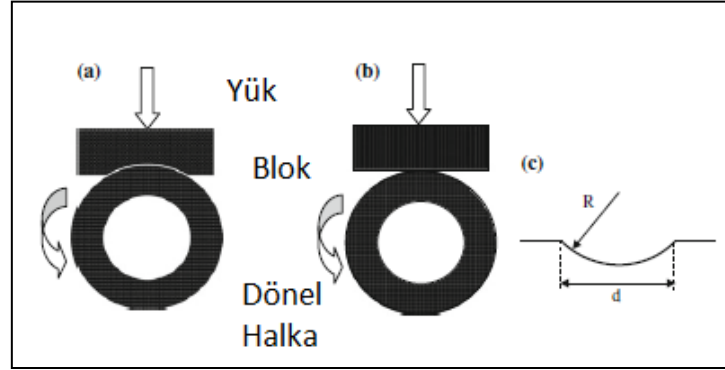
Şekil 2.16 Tipik aşınma eğrisi şeması

Kararlı bir durum aşaması referans alınarak Aşınma oranı (W), belirli bir andaki aşınma katsayısı (K_a) veya aşınma katsayısı (K) kolaylıkla değerlendirilebilir. Şekil 2.15'te test düzeneğinde gösterildiği üzere, pim aşınma parçaları temas yüzeyine etki etmektedir. Bu özellikle düşük hızda tribo oksidatif aşınmayı simüle ederken önem kazanmaktadır. Disk düzlemi dikey ise tüm talaşlar temas yüzeyinden uzaklaşmaktadır. Test konfigürasyonu, aşınma mekanizmasına atıfta bulunarak ve gerçek temas durumları çoğaltılarak hazırlanmalıdır. Her bir test sırasında sürtünme katsayısının değişimini de takip etmek mümkündür. Pimi baskı altına almak için uygulanan teğetsel kuvvet kayıt altına alınarak hesaplanmaktadır. Tüm test prosedürleri ASTM G99-05 Normunda standardize edilmiştir.

2.6.5.2 Blok-on-Ring

Bu test sabit bir bloğun, dönel bir halkaya baskı uygulaması ile gerçekleştirilir. Şekil 2.17'de gösterildiği üzere pim teması uyumlu veya uyumsuz olabilir (en azından test başlangıcında). Bu test pin-on-disk testine oldukça benzerdir.

Genellikle nominal temas yüzeyi büyük, dönel uyumlu temas ve talaşların temas alanından uzaklaştırılmasının mümkün olduğu aşınmaları simüle etmek için kullanılır. Bu tip testler aynı zamanda sürtünme olgusunu içeren, uyumsuz konfigürasyonlarda aşınmayı ölçmede kullanılırken yüksek basınç temas yüzeyi elde edilmesini sağlar. Uyumlu temas halinde, blok ve halka arasında meydana gelen hizasızlıkları bertaraf etmek için uzun süreli testler yapılmalıdır. Aşınma her bir blok ve halkanın ağırlığının ölçülmesi ile hesaplanabilir.



Şekil 2.17 Blok-on-ring test şematik gösterimi

Uyumsuz temas durumunda, Aşınma hacmi V , genellikle aşınma parçasının büyüklüğü ölçülerek hesaplanır. ASTM G77-9²e göre aşınma formülü olan aşağıdaki bağlantı kullanılabilir.

$$V = \frac{d^3}{12R} L \quad (2.2)$$

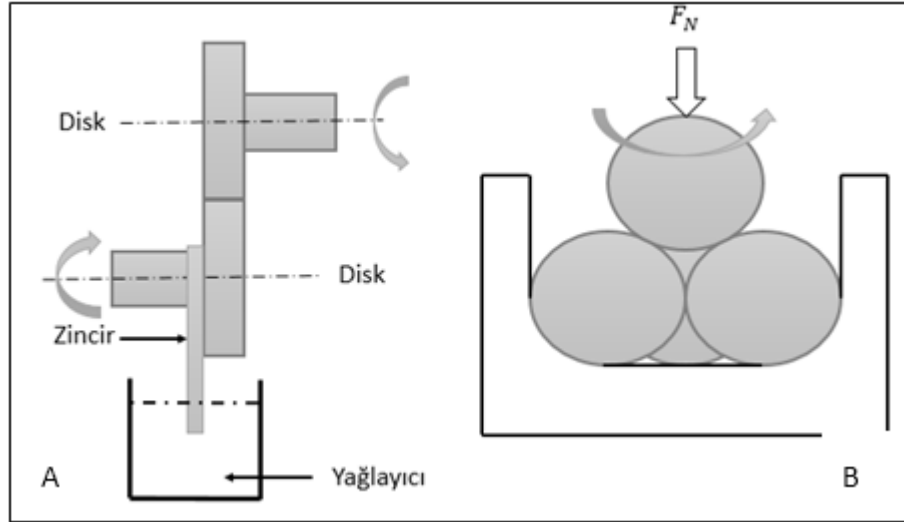
ASTM G77-93'e göre aşınma

2.6.5.3 Disk-on-Disk

Bu teste (Aynı zamanda ikiz disk testi olarak adlandırılır), iki disk ana doğru üzerinde uyumsuz bir temas alanı oluşturacak şekilde temas etmektedir. Şekil 2.18'te şematik olarak gösterilmiştir. Dönme hızları değiştirilerek, yuvarlanma-kayma testleri, farklı yüzeylerde gerçekleştirilebilir. Bu test kuru ve yağlamalı ortamda gerçekleştirilebilir. Bu uygulamada yağlayıcılar numunenin altına yerleştirilmiş tanktan zincirler vasıtasıyla temas yüzeyine alınır. (Amsler tip tribometre, genellikle 40 – 50 mm kalınlığında ve 10 cm yüksekliğinde diskler kullanılır). Yağlayıcı sıcaklığı kontrol altında tutulur ve sabittir.

Bu tip testler genellikle değme yorulmasını test ederler. Test koşulları değiştirilerek (geometriler şekillendirilerek, yzey sertliği ve uygulanan hız değiştirilerek) değişik lambda faktörü ve Hertzian basınç değeri ölçümlenebilir.

Kaplanmış numuneler kullanılarak, bir temas noktası elde edilir ve çok büyük temas basınçları elde edilebilir. Yorulma hasar başlangıcı genellikle kaydedilen sürtünme katsayısı veya gürültü ve titreşimin görünümüne göre belirlenir.



Şekil 2.18 Disk-on-disk testi şematik gösterimi (A) ve 4 top tribometre (B)

Aslında aşınma parçaları temas eden yüzeyler arasında sıkışarak, sürtünme katsayısının artmasına ve sistemde titreşimin oluşmasına neden olmaktadır. Yzey hasarı, düzenli aralıklarla numunelerin yzey durumu incelenerek anlaşılabilir. Ayrıca bu tribolojik test malzeme ve yağlayıcının sürtmeye karşı direncini ölçmek için kullanılır. Farklı test konfigürasyonları, test süresini azaltmak için geliştirilmiştir. Silindirik numuneler 3 farklı karşı disk tarafından yük altına alınarak, her bir devir için 3 farklı yük uygulanarak 4 silindir testinin uygulaması gerçekleştirilir.

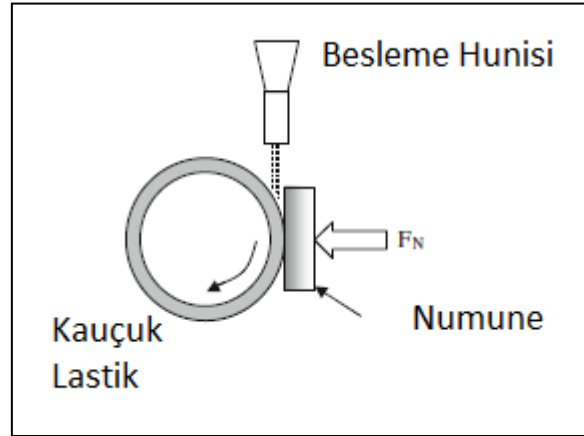
2.6.5.4 Dört Toplu Tribometre

Şematik olarak Şekil 2.18'te gösterilmiştir. Nokta teması gerçekleştirilir. Üst taraftaki küresel malzeme alt taraftaki yağa daldırılmış 3 malzemeye tek noktadan temas etmektedir. Yük (F_N) üst malzemeye etki eder ve bu yük her bir malzemeye $F_N/3 \cos\phi$ olarak uygulanır. Her bir dönüşte üst taraftaki küre alt taraftaki AISI 52100 çeliğinden yapılmış malzemelerle 3 temas noktası oluşturur. Malzemelerin nihai aşınma hacimleri,

yüzeý üzerinde oluşan aşınma izleri ölçüleriyle hesaplanır. Bu testler genellikle yağlayıcıların özellikleri üzerinde yapılan çalışmalarda kullanılır. Test prosedürü ASTM D 4172-92 standardında belirtilmiştir.

2.6.5.5 Kuru-Kum, Kauçuk-Lastik Testi (DSRW)

Bu test, düşük gerilmeli abrasif aşınma altındaki tribolojik hareketleri incelemek üzere tasarlanmıştır. Şekil 2.19'da şematik olarak gösterilmiştir. Kauçuk kenarlı lastiğın yerçekimi ile bir haznededen beslenen numuneye karşı dönmesiyle düzenek oluşturulmuştur. Test prosedürü ATSM G65 standardında belirtilmiştir. 200 µm boyutunda kum tanecikleri kullanılmıştır. Prosedürde 130N yük uygulanmış ve kayma mesafesi 1430m olarak alınmıştır. Aşınma numunenin test öncesinde ve sonrasında ölçümlenmesiyle bulunmuştur. İlgili aşınma oranı ve aşınma katsayısının bulunmasına izin verir. Blok-on-ring testte olduğu gibi aşınma nominal temas yüzeyinin sürekli artmasına neden olmaktadır. DSRW testi partiküllerin tribolojik durumlarında önemli rol oynayan spesifik parametrelerin değişimine izin vermektedir. Test aşındırıcı çamur veya korozif bir çevrede gerçekleştirilebilir



Şekil 2.19 DSRW test şematik gösterimi

2.6.5.6 Pin Abrasyon Aşınma Testi (PAT)

Bu tip testler malzemelerin yüksek gerilmeli abrasif hareketlerinin incelendiği testlerdir. Geometrik tasarım Şekil 2.15'te gösterilen pin-on-disk ile benzerlik göstermektedir. Silindirik bir pim, seramik partikül (genellikle silikon karpit) içeren bir abrasif kağıda karşı dönmektedir. Aşınan parçalar ve aşınma talaşı arasında etkileşimin

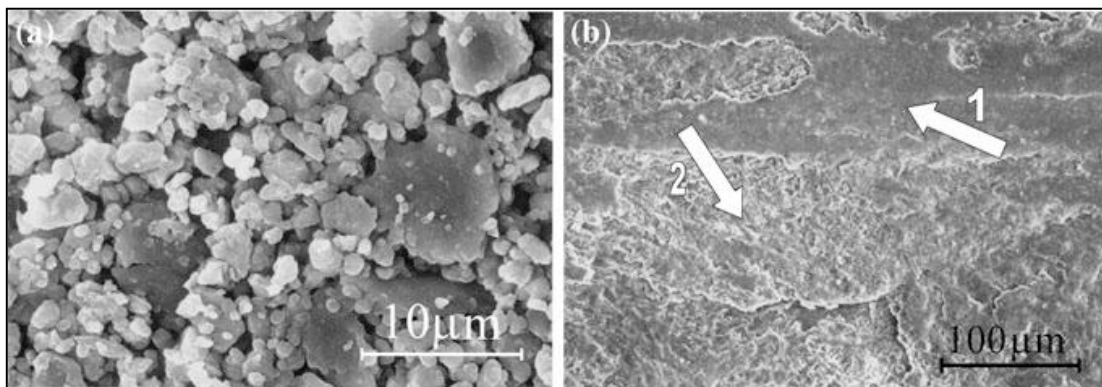
önüne geçmek için, spiral bir parça numuneyi diskin orta kısmına doğru hareketlendirir. Alternatif olarak pin-on abrasif tambur testi kullanılmaktadır. Bu testte dönel silindir, abrasif kağıt ile kaplanmış ve pim ana doğru hareket ederek, sürekli yeni aşındırıcılar oluşmasını sağlamıştır. Aşınma değişimi, test sürekli durdurularak ve pim ağırlığı ölçülerek bulunur.

2.7 Malzemeler

Bu bölümde test düzeneğinde kullandığımız alüminyum alaşımlar ve karbon nanotüp malzeme hakkında bilgi verilmiştir. Alüminyum alaşımların ve farklı kompozit malzemelerin otomotiv sektöründe kullanım oranı son yıllarda giderek artmaktadır. Literatürde endüstriyel olarak kullanılmakta olan yeni malzemelerin mekanik özellikleri deneysel çalışmalarla ortaya çıkmaktadır. Bu deneysel çalışmaların sonuçları yeni malzemelerin konstrüktörler tarafından tasarımlarında kullanılabilmesi açısından önemli katkılar sağlar.

2.7.1 Alüminyum Malzemeler

Alüminyum alaşımlar karakteristik yapıları nedeniyle özellikle mühendislik çalışmalarında ilgi çekici konumdadır. Görece daha düşük yoğunlukta olması (alüminyum alaşım için 2.7gr/cm^3) ve yüksek korozyon direnci birçok alanda kullanımın önünü açmıştır.



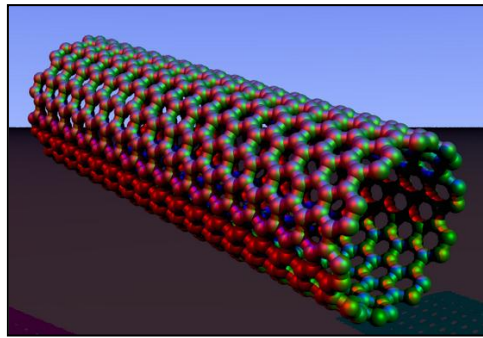
Şekil 2.20 Aşınma talaş morfolojisi ve aşınan parçalar

Bununla beraber alaşımlar neredeyse tüm aşınma mekanizmalarına karşı sınırlı bir direnç göstermektedirler. Alüminyum alaşımlar görece daha az sertlikte (sertlik değeri 250kg/mm^2 'ye ulaşmaktadır) ve daha yüksek sıcaklıkla azalacak şekildedir. Alüminyum

alaşımları, 100 ° C civarında bir sıcaklıkta, yoğun bir termal yumuşamaya başlar. Sonuç olarak bu sıcaklıklarda hem sürtünme katsayısı hem de spesifik aşınma katsayısı belirgin bir şekilde artmaya başlar. Hafif tribo-oksidatif aşınmadan sert adhesiv aşınmaya geçiş genellikle düşük basınç ve kayma hızlarında meydana gelir. Alüminyum alaşımlar, adhesiv aşınma karakteristiğinde yer alan yoğun aktarım özelliğinden dolayı çok şiddetlidir. Bu alaşımlar çok yüksek temas sıcaklıklarına ulaşabildikleri için kuru sürtünme uygulamaları için çok uygun değildir. Alüminyum alaşımlarının, genellikle kaymalı yataklar gibi yükleme durumlarının olduğu elemanlarda kullanımı uygundur.

2.7.2 Karbon Nanotüp (CNT)

Karbon elementinin uzunluk-çap oranı $28 \times 10^6:1$ olan allotropudur. Bu uzunluk-çap oranı başka herhangi bir malzemenin sahip olabileceğinden daha büyüktür. Allotrop; Aynı element atomlarının uzaydaki farklı dizilişleri sonucu oluşan fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı, sadece aynı madde ile verdikleri tepkime sonucu oluşan ürünlerin aynı olduğu maddelerdir. Örneğin grafit ve elmas her ikisi de karbon atomlarından oluşur. Tek katmanlı (tek duvarlı) ya da çok katmanlı (çoklu duvarlı) karbon nanotüpler mevcuttur. Karbon nanotüplerin yapısını açıklayabilecek en basit model tek duvarlı bir tüp için şu şekildedir: Tek sıra karbon atomundan oluşan bir grafen katmanının, silindir şeklinde bükülerek uçlarının birleştirildiği ve grafen içerisindeki bağların aynısından oluşturulduğu düşünülürse bu yapı tek duvarlı bir karbon nanotüple aynı yapı olur.



Şekil 2.21 Tek duvarlı karbon nanotüp

Karbon nanotüpler, karbondan üretilmiştir ve nanometre ölçüm cihazlarıyla ölçümlenebilir. Bir nanometre, metrenin milyarda biridir ve yaklaşık olarak insan saçının on binde biri inceliğindedir. Grafit katmanlar, altıgen şekilli olarak ve sürekli

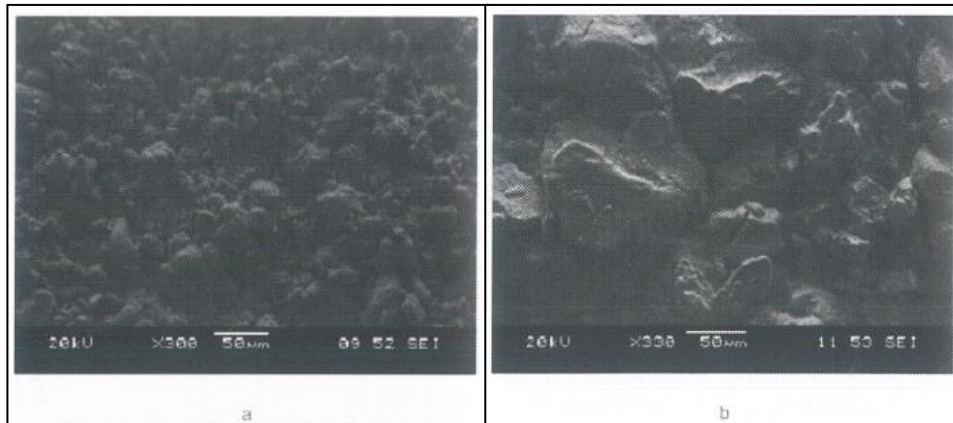
biçimdedir. Karbon nanotüpler uzunluk, kalınlık, katman adedi gibi farklı özelliklerden etkilenirler. Aynı grafit levhadan oluşmalarına rağmen, elektriksel özellikleri değişiklik gösterebilmektedir. Karbon nanotüpler mekaniksel ve elektriksel olarak diğer mühendislik malzemelerine oranla oldukça gelişmişlerdir.

Çizelge 2.2 Mühendislik malzemelerinin mekanik özellikleri

Malzeme	Ortalama Yoğunluk	Dayanım (GPa)	Kopma gerilmesi (%)
Karbon Nanotüp	1,3 -2	10,0- 60,0	10
HS Çelik	7,8	4,1	<10
Karbon Fiber - PAN	1,7 - 2,0	1,7 - 5,0	0,3 - 2,4
E/S - Cam	2,5	2,4 / 4,5	4,8
Kevlar* 49	1,4	3,6 / 4,1	2,8

Karbon nanotüp için potansiyel kullanım alanı örnekleri;

- Ultra kapasitörler
- Sinir uçları
- Ekstra güçlü fiberler
- Uzatılmış ömürlü bataryalar
- Hava, kara ve deniz taşıt ve uzay teknolojileri [7]



Şekil 2.22 Saf Al ve 2 wt% CNT elektron mikroskop görüntüsü [1]

Şekil 2.22'de saf alüminyum ve 2 wt% CNT içeren Alüminyum Metal Matris malzeme için elektron mikroskopunda çekilmiş olan görüntüler yer almaktadır. Bu çalışma esnasında mikroskop görüntüleri incelenmemiş olup, belirtilen görüntüler farklı çalışmalardan derlenmiştir.

2.7.3 Karbon Nanotüp (CNT) Üretimi

Karbon nano tüp sentezlenmesi için yıllar süren çalışmalar sonucunda belirli yöntemler ortaya çıkartılmıştır. Sentezleme yöntemlerinin her biri farklı uygulama ve kullanım istekleri doğrultusunda şekillendirilmiştir [7]. Karbon nanotüplerin üretimi günümüzde pahalıya mal olmakta; fakat gün geçtikçe daha seri sentezlenmesiyle ilgili çalışmalar ve firmalar çoğalmakta ve maliyet de düşmektedir.

Katı Hâlde Karbondan Sentezleme Yöntemleri

- Lazerle Aşındırma Yöntemi
- Ark Boşaltma Yöntemi
- Solar Fırın Yöntemi

Gaz Halde Karbondan Sentezleme Yöntemleri

- Kimyasal Buhar Çökeltme (KBÇ, CVD)
- Isıl Kimyasal Buhar Çökeltme (IKBÇ, Thermal-CVD)
- Plazmayla Güçlendirilmiş Kimyasal Buhar Çökeltme (PGKBÇ, PECVD)
- Mikrodalga Plazmayla Kimyasal Buhar Çökeltme (MDPGBÇ, MWPCVD)
- Buhar Fazında Büyütme

Diğer Sentezleme Yöntemleri

- Hidrotermal Sentezleme
- Elektroliz

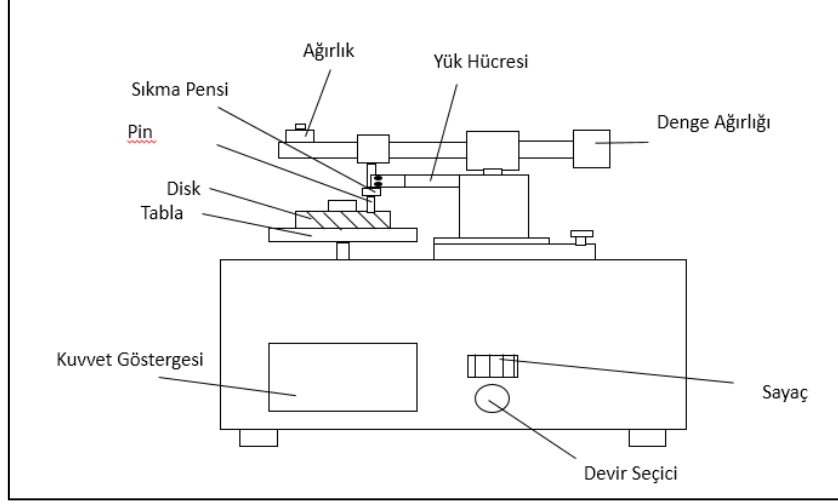
PİN-ON-DİSK TESTLERİ VE SONUÇLAR

3.1 Test Düzenegi

Bu çalışmada şekil 2.23’de gösterilmiş olan pin – on disk test cihazı kullanılmıştır. Test cihazına bağlı bulunan bilgisayar aracılığıyla test süresince elde edilen veriler kolaylıkla okunabilmekte ve kaydedilebilmektedir.



Şekil 3.1 Çalışmalarda kullanılan Pin-On Disk test cihazı



Şekil 3.2 Pin-On Disk test cihazı Şematik Gösterimi

3.2 Ağrlık Ölçüm Ekipmanı



ASTM G99-05 test standartlarında belirtilen şekilde ağrlık ölçümleri ultra hassas ölçüm aletleri ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz RS232 standart bağlantı aracılığıyla bilgisayara bağlanabilmektedir. A&D GR-202 serisi 0.01 mg hassasiyetle mikro ölçüm yapabilen terazi ile her test öncesinde ve sonrasında numunelerin ağrlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1 Ağırlık ölçümünde kullanılan hassas terazinin özellikleri

Ağırlık ölçüm kapasitesi	42 g/210 g
Minimum ölçüm	0.01 mg/0.1 mg
Yinelenebilirlik (Std Sapma)	0.02 mg/0.1 mg
Doğrusallık	±0.03 mg /±0.2 mg
Hassaslık aralığı	±2 ppm/°C
Ölçü kefesi	Ø85 mm

3.3 Malzeme (Saf Alüminyum ve Al-CNT)

Bu çalışmada ECKA Granulate GmbH & Co. KG'dan alınan alüminyum tozu ve Sigma-Aldrich Co. firmasından tedarik edilen çok çeperli karbon nanotüp kullanılmıştır. Alüminyum tozunun saflık derecesi 99.7% ve toz tane büyüklükleri 75µm ve 106µm aralığındadır. %95 saflıkta, 6-9nm çapında ve 5µm uzunluğunda çok çeperli karbon nanotüpler bu araştırmada kullanılmıştır. 0,5 wt% - %1 wt% ve 2wt% oranında homojen kompozit tozlar, mekanik öğütme, oda sıcaklığında sıkıştırma ve 630°C'de basınçsız sinterleme metoduyla elde edilmiştir. Tüm mekanik öğütme işlemleri FRITSCH-pulwerisette 5 planet bilyalı değirmen üzerinde gerçekleştirilmiştir. Alüminyum tozu ve karbon nanotüpler, çapı 10mm olan paslanmaz çelik bilyalarla birlikte 250ml'lik hacme sahip öğütme bölümüne konulmuştur. Bazı durumlarda öğütme elemanlarıyla kaynak oluşmasını önlemek adına, sitrik asit ve etanol toz yağlama işlemi görmesi için öğütücüye eklenmiştir. 30 gramlık Al – CNT karışımı için, 10'a 1 oranında çelik bilya (BTP) öğütücüye eklenmiştir.

Öğütme işlemi, aşırı ısınmanın önüne geçmek amacıyla 250d/dk sabit devirde her 20 dakikada bir 10dk durdurularak gerçekleştirilmiştir. Belirli bir öğütme süresinden sonra, küçük örnekler alıp tekrar yerine konulması yerine bütün numune pot dışına çıkarılmıştır. Toz karışımı, 475 MPa basınç altında ve 10mm çap ve 20mm uzunluğunda tek eksenli silindire preslenmiştir. Yeşil preformlar 630°C'de, ısıtma oranı 10°C/dk olan argon atmosfer altında tutulmuş ve sonrasında 1 saat boyunca 10°C/dk oranında gaz su verme işlemi yapılarak sinterlenmiştir.

Ayrıca St52 çelik malzemeden 8 cm çapında ve test cihazına oturtulmasını sağlamak amacıyla merkezinde 1cm çapında delik bulunan, çelik levhadan kesilmiş yuvarlak diskler kullanılmıştır. Malzeme çiftinde sürtünme etkisinin başlangıçta minimize edilmesi amacıyla manyetik özellikli satıh taşlama tezgahında 0,01mm hassasiyetle taşlama işlemine tabi tutulmuştur.

Çizelge 3.2 St52 Mekanik Özellikleri

Sınıf	Akma Mukavemeti Mpa(min)	Çekme Dayanımı Mpa	Uzama % (min)	Min Darbe Dayanımı KVJ		
				-20°	0°	20
A ST 52	355	510-650	20	27	34	40

3.4 Deneysel Çalışma

Bu çalışmada Alüminyum karbon nanotüp pim ve St52 çelik malzemelerin aşınma davranışları deneysel verilere dayanarak tanımlanmıştır. Malzeme aşınma oranı yukarıda şekli verilen Pin-On Disk test cihazında elde edilen verilerle hesaplanmıştır.

Aşınma testleri St 52 çelik malzeme gövdesine karşı yapılmıştır. Her bir malzeme 10N, 15N yük altında test edilmiştir. Aşınma testleri $4 \cdot 10^{-2}$ ms kayma hızında ve toplam 1000 metre mesafe için gerçekleştirilmiştir. Aşınma Oranı (K) aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$K = \frac{\Delta m}{l \cdot p \cdot F} \quad (3.1)$$

K; aşınma oranı (mm^3/Nm)

Δm ; Test esnasında toplam kütle kaybı (gr)

ρ ; test malzemesinin özgül ağırlığı (g/cm^3)

l; toplam mesafe (m)

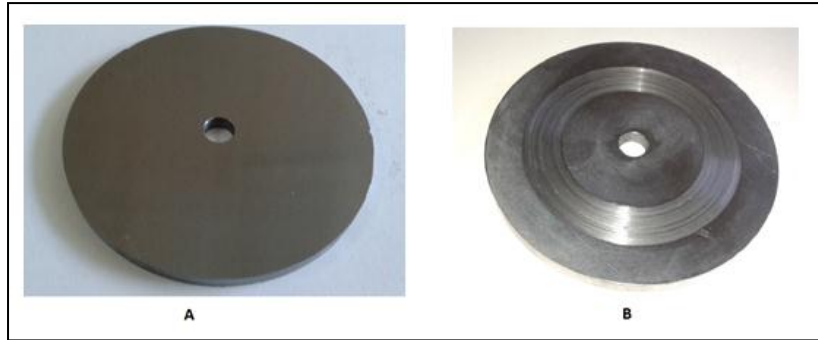
F; pim üzerinde Normal kuvvet olarak alınmıştır.

Aşınma testleri sırasıyla saf, 0,5 wt% - 1 wt% ve 2 wt% CNT ile güçlendirilmiş silindirik alüminyum aşınma numuneleri ile eş malzeme olarak kullanılan St 52 disk arasında gerçekleştirilmiştir. Sürtünme kuvveti ölçülmüş ve her iki saniyede bir kayıt edilmiştir.

1000 metrelik testler süresince 2000 adet sürtünme kuvveti kayıt edilmiştir. 10N ve 15N yük altında test edilen malzemeler için sürtünme kuvveti - yol grafikleri Şekil 3.8, Şekil 3.10, Şekil 3.12, Şekil 3.14, Şekil 3.16, Şekil 3.18, Şekil 3.20 ve Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Aynı yükler altında aşınma oranı – yol grafikleri Şekil 3.9, Şekil 3.11, Şekil 3.13, Şekil 3.15, Şekil 3.17, Şekil 3.19, Şekil 3.21 ve Şekil 3.23’te gösterilmiştir. Proses tanımlaması için sürtünme kuvveti giriş değeri ve aşınma oranı çıkış değeri olarak kabul edilmiştir. Her 2 saniyelik bir ölçümde elde edilen sürtünme kuvveti için aşınma ağırlık kaybı toplam kaybın ölçüm sayısına bölünmesiyle elde edilmiştir. Pim ağırlık kaybı, testin sadece en başında ve deney sonrasında ölçüm alındığı için lineer olarak kabul edilmiştir. Aşınma testlerinde kullanılan disk ve pimler için test öncesi ve sonrasında disk ve pim görselleri aşağıda gösterilmiştir. ASTM G99-05 test prosedürüne uygun olarak her test öncesinde ve sonrasında aşınma malzeme çifti 10 dk boyunca ultrasonik banyoda asetonla temizlenmiştir. Her temizleme sonrasında 2dk boyunca sıcak havaya maruz bırakılarak kurutulmuş ayrıca 2 dk boyunca soğuk hava tutulmuştur.

3.4.1 Deney Numuneleri – Disk

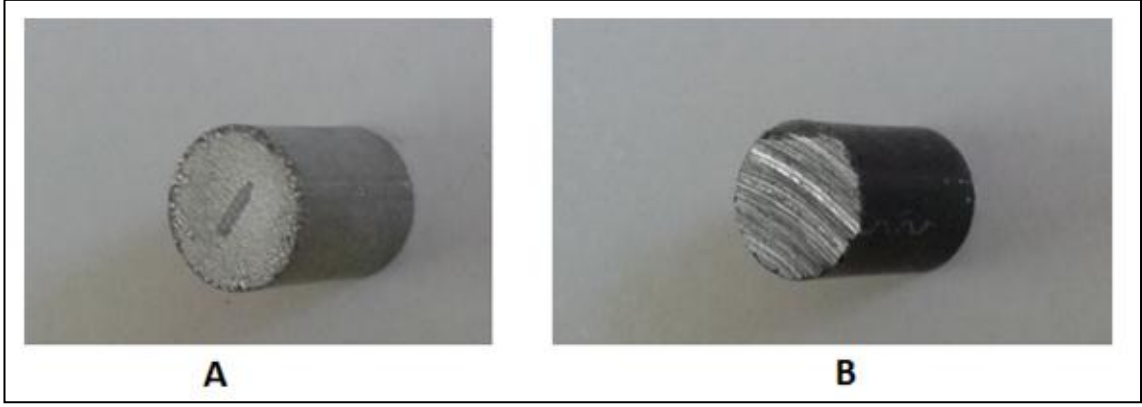
Disk deney malzemesi için manyetik taşlama tezgahında yüzey pürüzlülüğü alınmış St52 kullanılmıştır



Şekil 3.3 Aşınma testlerinde kullanılan disk a) Aşınma test öncesi b) Aşınma test sonrası

3.4.2 Deney Numuneleri – Pim

Pim deney malzemesi olarak %0wt - %0,5wt - %1wt - %2wt Al-CNT malzeme kullanılmıştır.



Şekil 3.4 Aşınma Testlerinde Kullanılan Pim a) Aşınma Test Öncesi b) Aşınma Test Sonrası

3.5 Deney Yapılışı

Deney pin-on disk deney cihazının oda sıcaklığında çalıştırılması esasına dayanmaktadır. Karşı malzeme olarak st52 çelik malzeme ve deney malzemesi olarak Al-CNT malzeme tezgaha bağlanmaktadır. Uygulanacak normal kuvvet karşı ağırlık üzerinden ayarlanmaktadır ve test devir hızı cihaz üzerinden ayarlanmaktadır. Cihaza bağlı olan yazılım aracılığıyla etki eden kuvvet sistem üzerinden okunmaktadır. Her bir malzeme test öncesinde ve sonrasında temizlenmekte ve kurumaya bırakılmaktadır. İki farklı normal kuvvet, Saf Al - %0,5wt %1wt ve %2 wt Al-CNT malzeme için test prosedürleri ayrı ayrı uygulanmıştır.



Şekil 3.5 Yazılım üzerinden okunan kuvvet (N)

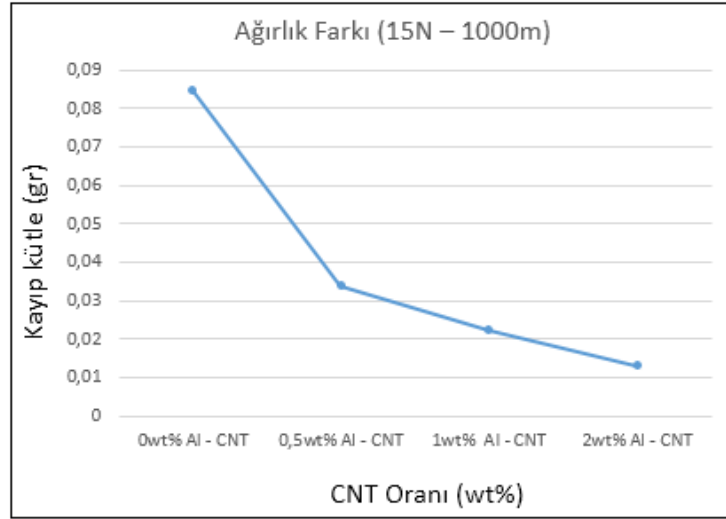
3.6 Deney Sonuçları

Her malzeme çifti ve kuvvet için sonuçlar aşağıda belirtilmiştir. Her bir malzeme çifti için çıkan sonuçlarla sürtünme grafikleri ve aşınma oranı grafikleri hazırlanmış, parametre değişimlerinin aşınma özellikleri üzerine etkileri belirtilmiştir.

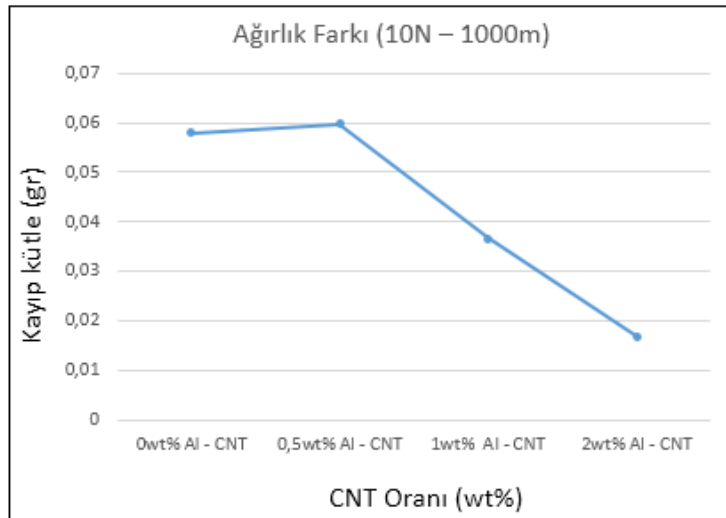
Çizelge 3.3 Deney Malzeme Ağırlık Değişimleri

Pim Ağırlık Ölçüm Tablosu							
Nisan 2014				Nisan 2015			
Test; 15N - 1000m				Test; 10N - 1000m			
Malzeme	İlk Tartım (gr)	Son Tartım (gr)	Ağırlık Farkı	Malzeme	İlk Tartım (gr)	Son Tartım (gr)	Ağırlık Farkı
0 wt% Al - CNT	4,5853	4,5007	0,0846	0 wt% Al – CNT	4,66	4,602	0,058
0,5 wt% Al - CNT	4,7153	4,6815	0,0338	0,5 wt% Al – CNT	4,7965	4,7368	0,0597
1 wt% Al - CNT	4,7732	4,7509	0,0223	1 wt% Al – CNT	4,811	4,7745	0,0365
2 wt% Al - CNT	4,6248	4,6118	0,013	2 wt% Al – CNT	4,7548	4,738	0,0168

Her deney öncesinde ve sonrasında prosedüre uygun olarak malzeme ağırlıkları ölçülmüş ve hesaplamalarda kullanılmıştır. Yukarıdaki tabloda alüminyum karbon nanotüp malzemelerin ağırlık değişimleri belirtilmiştir.



Şekil 3.6 15N – 1000m için ağırlık farkı grafiği

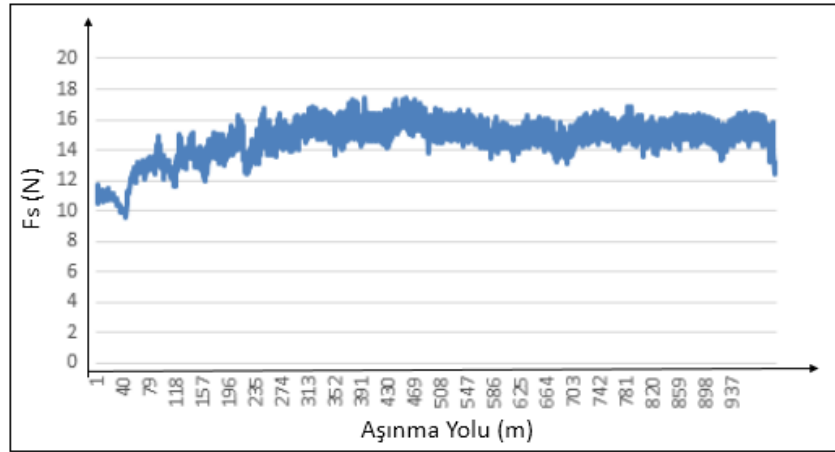


Şekil 3.7 15N – 1000m için ağırlık farkı grafiği

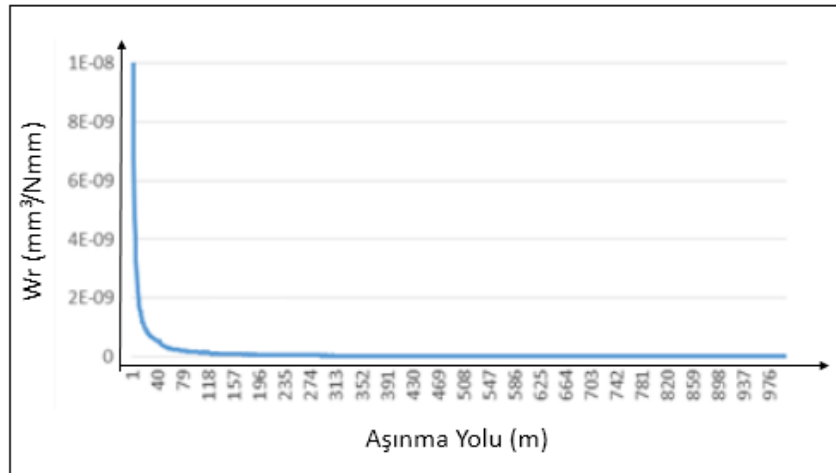
3.6.1 Test -1) 0,0 wt% CNT – 10N kuvvet için

Çizelge 3.4 0,0wt% CNT – 10N kuvvet için test sonuçları

Sürtünme Kuvveti (cN)	Deney Yolu (m)	Ağırlık Kaybı	Wear Rate (K)
1048	1	4,659942	2,04976E-08
1175	2	4,659884	9,14106E-09
1076	3	4,659826	6,65473E-09
1141	4	4,659768	4,70672E-09
1069	5	4,65971	4,01899E-09
...
...
...
1247	998	4,602116	1,72611E-11
1319	999	4,602058	1,63025E-11
1307	1000	4,602	1,64357E-11



Şekil 3.8 0,0wt% CNT – 10N kuvvet için Sürtünme Kuvveti – Yol Grafiği

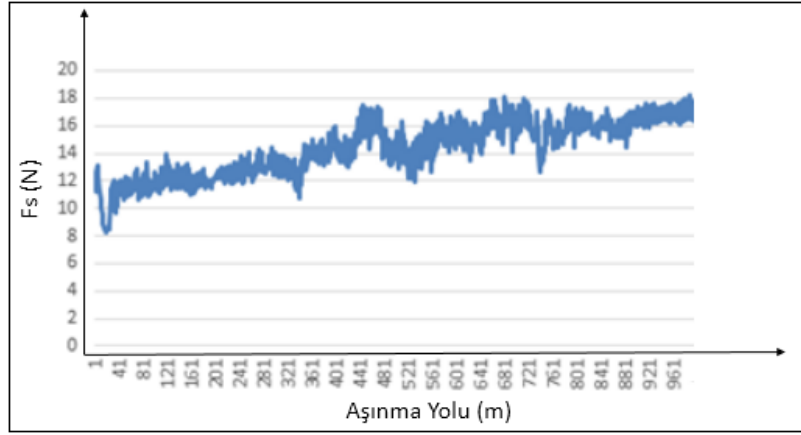


Şekil 3.9 0,0wt% CNT – 10N kuvvet için Aşınma Oranı – Yol Grafiği

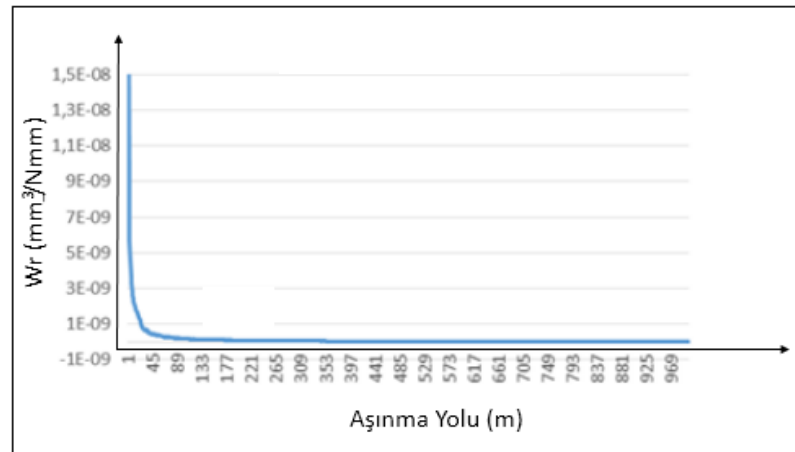
3.6.2 Test -2) 0,5 wt% CNT – 10N kuvvet için

Çizelge 3.5 0,5wt% CNT – 10N kuvvet için test sonuçları

Sürtünme Kuvveti (cN)	Deney Yolu (m)	Ağırlık Kaybı	Wear Rate (K)
1116	1	4,7964403	1,99607E-08
1264	2	4,7963806	8,81176E-09
1310	3	4,7963209	5,66822E-09
1241	4	4,7962612	4,48753E-09
1234	5	4,7962015	3,61039E-09
...
...
...
1677	998	4,7372179	1,3377E-11
1636	999	4,7371582	1,36984E-11
1748	1000	4,7370985	1,28078E-11



Şekil 3.10 0,5wt% CNT – 10N kuvvet için Sürtünme Kuvveti – Yol Grafiği

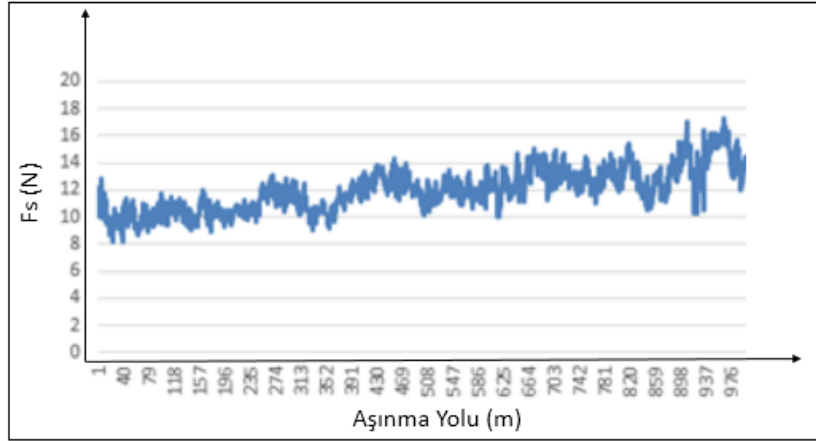


Şekil 3.11 0,5wt% CNT – 10N kuvvet için Aşınma Oranı – Yol Grafiği

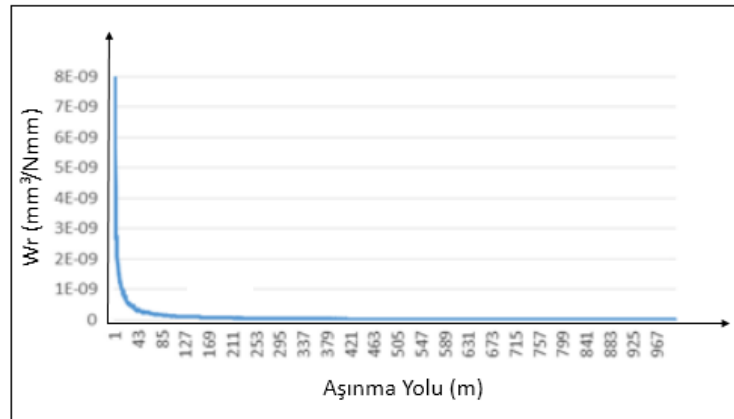
3.6.3 Test -3) 1wt% CNT – 10N kuvvet için

Çizelge 3.6 1,0wt% CNT – 10N kuvvet için test sonuçları

Sürtünme Kuvveti (cN)	Deney Yolu (m)	Ağırlık Kaybı	Wear Rate (K)
997	1	4,8109635	1,37115E-08
1227	2	4,810927	5,57067E-09
1068	3	4,8108905	4,26667E-09
1284	4	4,810854	2,66168E-09
992	5	4,8108175	2,75613E-09
...
...
...
1391	998	4,774573	9,84745E-12
1447	999	4,7745365	9,45687E-12
1391	1000	4,7745	9,82776E-12



Şekil 3.12 1,0wt% CNT – 10N kuvvet için Sürtünme Kuvveti – Yol Grafiği

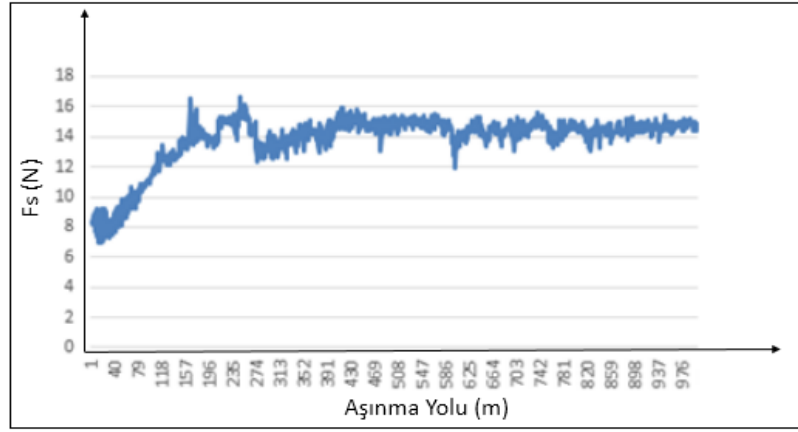


Şekil 3.13 1,0wt% CNT – 10N kuvvet için Aşınma Oranı – Yol Grafiği

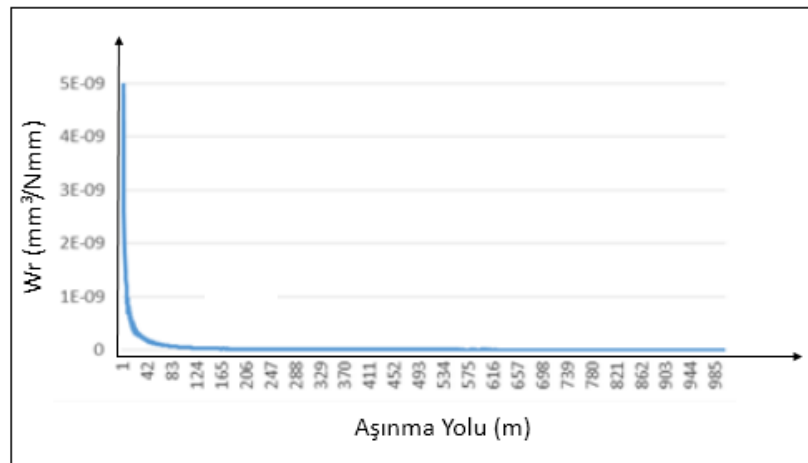
3.6.4 Test -4) 2wt % CNT – 10N kuvvet için

Çizelge 3.7 2,0wt% CNT – 10N kuvvet için test sonuçları

Sürtünme Kuvveti (cN)	Deney Yolu (m)	Ağırlık Kaybı	Wear Rate (K)
822	1	4,7547981	7,77109E-09
838	2	4,7547962	3,81136E-09
830	3	4,7547943	2,56539E-09
871	4	4,7547924	1,83348E-09
881	5	4,7547905	1,45013E-09
...
...
...
1437	998	4,7529038	4,45416E-12
1490	999	4,7529019	4,29143E-12
1468	1000	4,7529	4,35138E-12



Şekil 3.14 2,0wt% CNT – 10N kuvvet için Sürtünme Kuvveti – Yol Grafiği

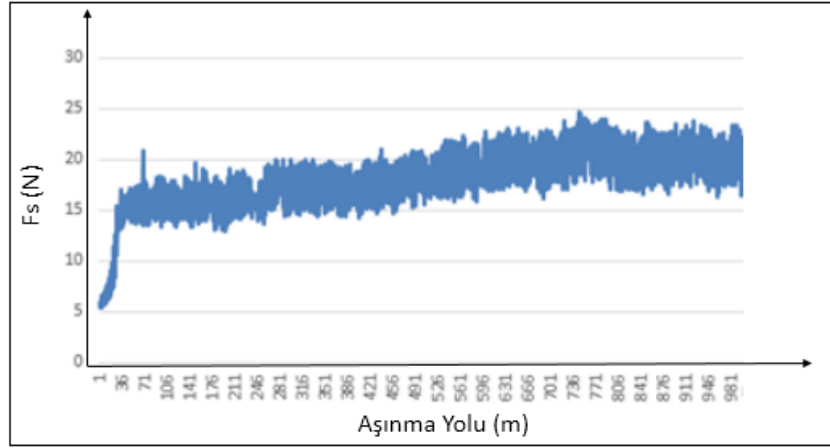


Şekil 3.15 2,0wt% CNT – 10N kuvvet için Aşınma Oranı – Yol Grafiği

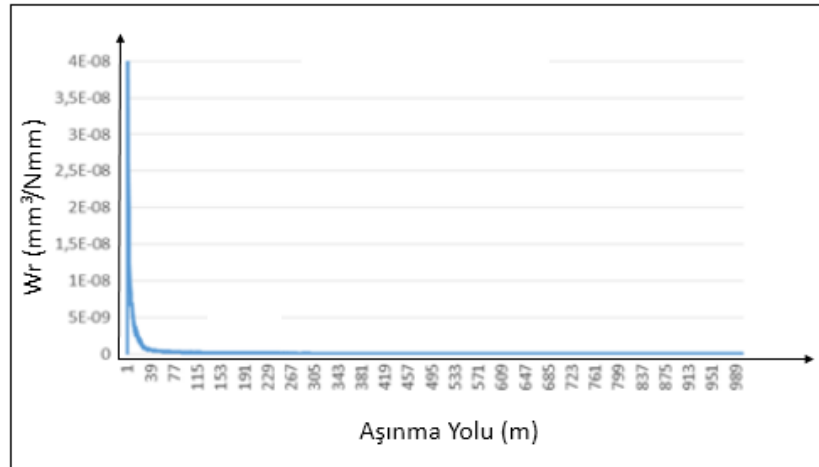
3.6.5 Test -5) 0,0 wt% CNT – 15N kuvvet için

Çizelge 3.8 0,0wt% CNT – 15N kuvvet için test sonuçları

Sürtünme Kuvveti (cN)	Deney Yolu (m)	Ağırlık Kaybı	Wear Rate (K)
550	1	4,5852154	5,69697E-08
602	2	4,5851308	2,60244E-08
551	3	4,5850462	1,89554E-08
638	4	4,5849616	1,2278E-08
657	5	4,584877	9,53831E-09
...
...
...
1686	998	4,5008692	1,86217E-11
2220	999	4,5007846	1,41282E-11
1696	1000	4,5007	1,84748E-11



Şekil 3.16 0,0wt% CNT – 15N kuvvet için Sürtünme Kuvveti – Yol Grafiği

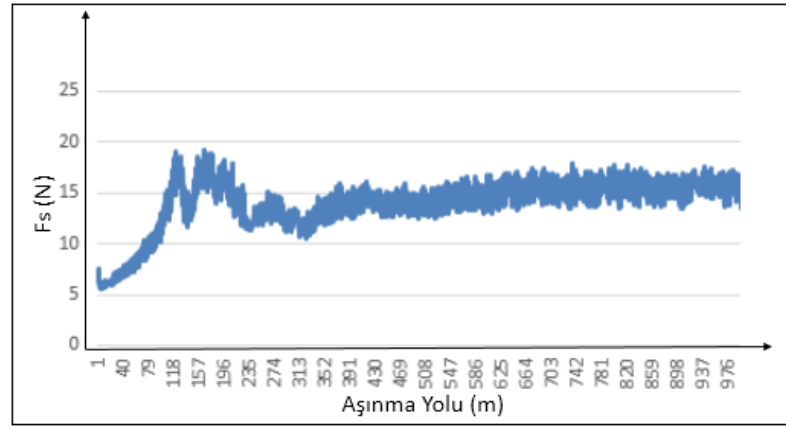


Şekil 3.17 0,0wt% CNT – 15N kuvvet için Aşınma Oranı – Yol Grafiği

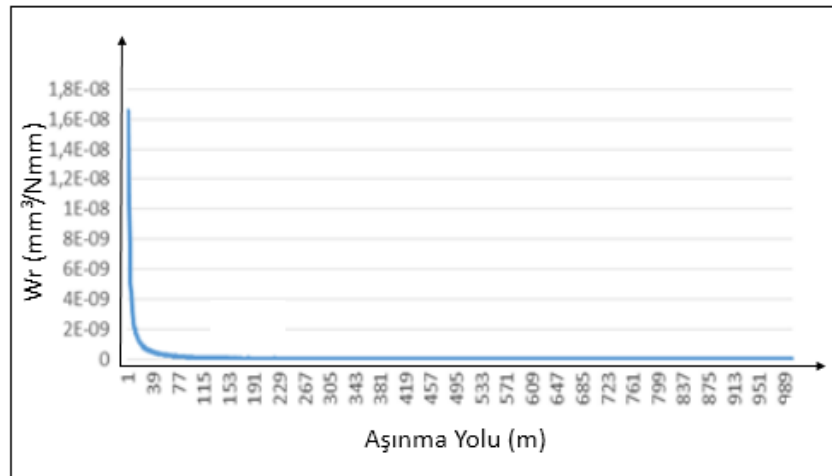
3.6.6 Test -6) 0,5 wt% CNT – 15N kuvvet için

Çizelge 3.9 0,5wt% CNT – 15N kuvvet için test sonuçları

Sürtünme Kuvveti (cN)	Deney Yolu (m)	Ağırlık Kaybı	Wear Rate (K)
763	1	4,7152662	1,65294E-08
617	2	4,7152324	1,02204E-08
553	3	4,7151986	7,60213E-09
627	4	4,7151648	5,02868E-09
563	5	4,715131	4,48026E-09
...
...
...
1665	998	4,6815676	7,58992E-12
1326	999	4,6815338	9,52079E-12
1624	1000	4,6815	7,76597E-12



Şekil 3.18 0,5wt% CNT – 15N kuvvet için Sürtünme Kuvveti – Yol Grafiği

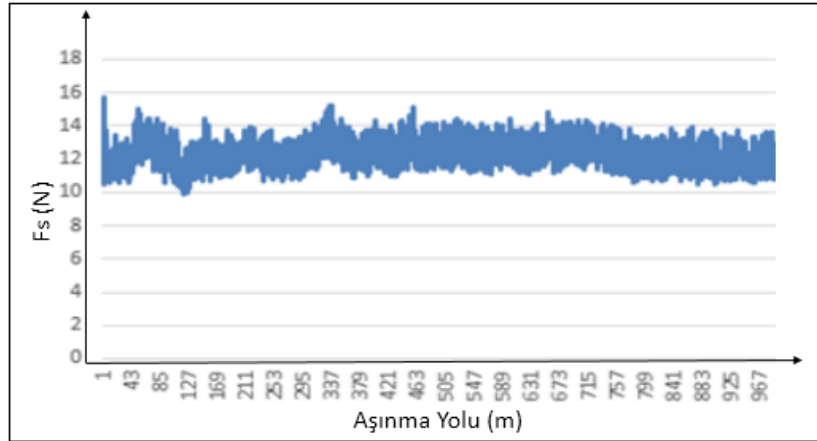


Şekil 3.19 0,5wt% CNT – 15N kuvvet için Aşınma Oranı – Yol Grafiği

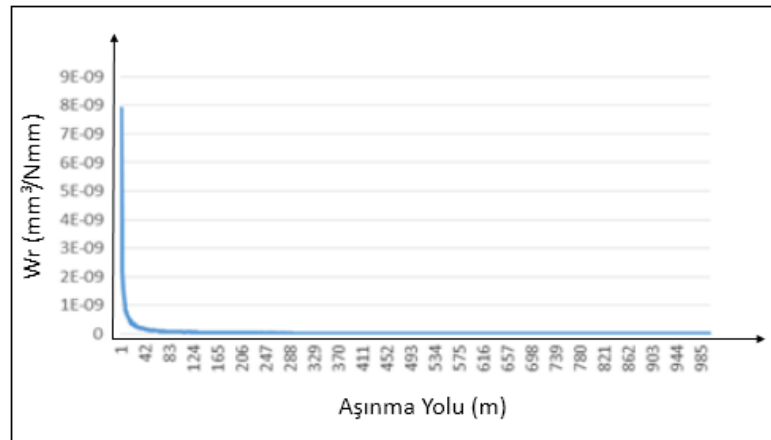
3.6.7 Test -7) 1 wt% CNT – 15N kuvvet için

Çizelge 3.10 1,0wt% CNT – 15N kuvvet için test sonuçları

Sürtünme Kuvveti (cN)	Deney Yolu (m)	Ağırlık Kaybı	Wear Rate (K)
1052	1	4,7731777	7,9096E-09
1212	2	4,7731554	3,43271E-09
1284	3	4,7731331	2,16015E-09
1317	4	4,7731108	1,57952E-09
1377	5	4,7730885	1,20855E-09
...
...
...
1260	998	4,7509446	6,61712E-12
1279	999	4,7509223	6,51229E-12
1076	1000	4,7509	7,73317E-12



Şekil 3.20 1,0wt% CNT – 15N kuvvet için Sürtünme Kuvveti –Yol Grafiği

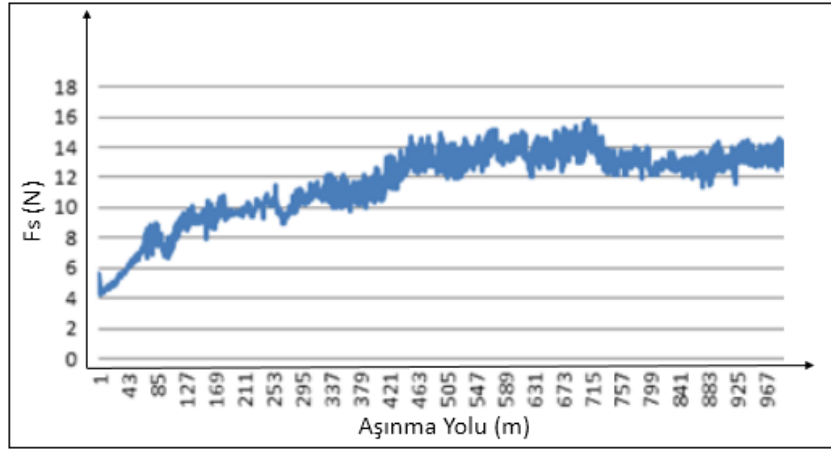


Şekil 3.21 1,0wt% CNT – 15N kuvvet için Aşınma Oranı –Yol Grafiği

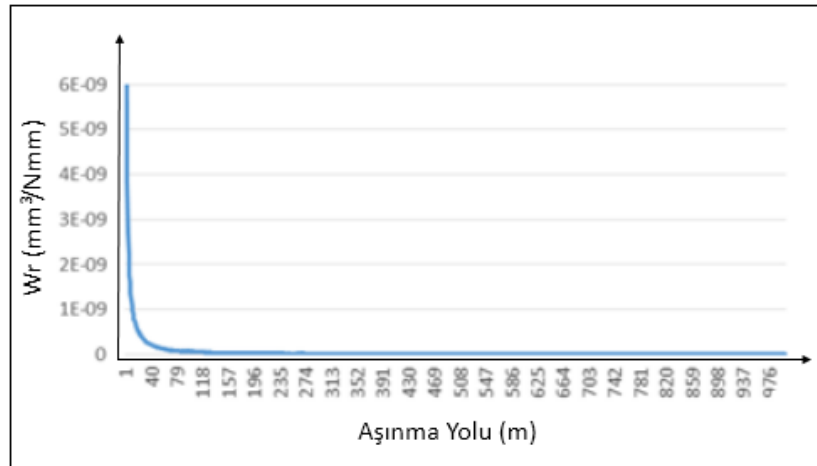
3.6.8 Test -8) 2 wt% CNT – 15N kuvvet için

Çizelge 3.11 2,0wt% CNT – 15N kuvvet için test sonuçları

Sürtünme Kuvveti (cN)	Deney Yolu (m)	Ağırlık Kaybı	Wear Rate (K)
558	1	4,624787	8,72565E-09
466	2	4,624774	5,22416E-09
427	3	4,624761	3,80087E-09
451	4	4,624748	2,69895E-09
439	5	4,624735	2,21818E-09
...
...
...
1411	998	4,611826	3,4576E-12
1259	999	4,611813	3,87116E-12
1404	1000	4,6118	3,46789E-12



Şekil 3.22 2,0wt% CNT – 15N için Sürtünme Kuvveti –Yol Grafiği



Şekil 3.23 2,0wt% CNT – 15N için Aşınma Oranı –Yol Grafiği

BÖLÜM 4

SONUÇ

Alüminyum kompozit malzemeler, saf alüminyum, 0,5 wt%, 1 wt% ve 2 wt% CNT alaşımlı olarak toz metalürjisi yöntemi kullanılarak hazırlanmış, bu kompozitlerin ve karşı malzeme olarak St52 çelik malzemenin kullanılması ile aşınma davranışları 10N ve 15N yük altında, 1000m boyunca ve sabit kayma hızı altında pin – on disk test cihazında test edilmiştir. Cihaz zamana bağlı teğetsel kuvveti ölçmektedir. Aşınma oranı formülü kullanılarak, saf alüminyum ve 0,5wt%, 1wt% ve 2wt% CNT içeren Alüminyum kompozitler için aşınma oranları hesaplanmış ve grafik olarak verilmiştir.

Malzeme çiftine bağlı olarak aşınma direncinin ortaya konmasında deneysel çalışmalar çok önemlidir. Deney sonrasında elde edilen veriler, farklı koşullar altında aşınma davranışlarının belirlenmesinde kullanılabilir. Deneysel verileri kullanmak suretiyle istatistiksel ve yapay sinir ağ temelli modeller oluşturmak mümkündür. Bu modelleme teknikleri genelde prosese ait giriş ve çıkış verisine ihtiyaç duyar. Bu çalışma ile deneysel modellemede aşınma verilerinin kullanımı için gerekli olan düzenlemeler ve uygun deney parametrelerinin seçimleri yapılmıştır. Bu veriler kullanılarak aşınma modeli için gerekli veriler elde edilmiştir. Burada belirlenen normal kuvvetler, aşınma yolu uzunluğu ve paçaların çizgisel hızları gibi parametreler, deneysel modelleme yapmak için farklı model yapılarında kullanılabilir.

Deneysel olarak ölçülen F_s (Sürtünme kuvveti) sistem girişi, yola bağlı olarak hesaplanan aşınma oranı sistem çıkışı olacak şekilde sistem tanımlama yapılabilir. Ayrıca kompozit malzemedeki CNT oranının artması ile CNT nin yağlama özelliğinden dolayı, saf alüminyuma göre sürtünme katsayısı düşmekte ve aşınma miktarı azalmaktadır. Aşınma direncinin yüksek olması nedeniyle Al-CNT kompozit malzemeler havacılık endüstrisinde ve otomotiv sanayinde kullanım alanı bulabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Istif İlyas, Işın Ovun ve Uzunsoy Deniz (2014). "Prediction of Wear Behavior of Aluminum Alloy reinforced with Carbon Nanotubes Using Nonlinear Identification", SAE International, 2014-01-0947.
- [2] E.M. Borteloto, A.Crovani, V. Seriacopi, F.J. Profito, D.C. Zachariadis ve I.F. Machado (2013). "Experimental and numerical analysis of dry contact in pin on disc test", Wear, 301(2013):19-26.
- [3] Gwidon W. Stachowiak ve Andrew W. Batchelor (2012). "Engineering Tribology", Butterworth Heinemann.
- [4] Giovanni Straffelini (2015). Friction and Wear Methodologies for Design and Control, Springer.
- [5] Bharat Bhushan (2013). Introduction to Tribology, Wiley A John Wiley & Sons, Ltd., Publication.
- [6] S.Simones, M.A.L. Reis, F.Viana ve M. Vieira. (2012). Microstructural Characterization of Carbon Nanotubes Reinforced Aluminum Composite.
- [7] Küçükıldırım, B. O ve Akdoğan, Eker, A. 2012. "Karbon Nanotüpler, Sentezleme Yöntemleri ve Kullanım Alanları," TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, 53(630):34-44.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Faruk SİREK
Doğum Tarihi ve Yeri : 20.10.1984 – İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : fsirek@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Mühendisliği	Y.T.Ü	2015
Lisans	Makine Mühendisliği	Y.T.Ü	2007
Lise	Fen Bilimleri	B.Fındıklı Lisesi	2002

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011 – Devam Ediyor	HMF Makina	Ürün Müdürü
2009 - 2011	Empa Elektronik	Satış Mühendisi
2007 – 2009	Mega Mekanik	Satış Mühendisi