

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MOLİBDEN KAPLI PİSTON SEGMANLARININ
AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ VE
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sezer KURGUN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA EĞİTİMİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Ferit FIÇICI

Haziran 2014

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MOLİBDEN KAPLI PİSTON SEGMANLARININ
AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ VE
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sezer KURGUN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA EĞİTİMİ

Bu tez 27/06/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Mesut DUDAT

Jüri Başkanı



Yrd. Doç. Dr. Ferit FİĞİCİ

Üye



Yrd. Doç. Dr. Murat KAPSIZ

Üye



ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince çalışmalarımı teşvik eden, her türlü yardımlarını esirgemeyen danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ferit FIÇICI' ya minnet borçluyum. Tez izleme jürimde bulunan değerli katkıları ile çalışmalarına yön veren Yrd.Doç.Dr. Mesut DURAT, Yrd.Doç.Dr. Murat KAPSIZ' a teşekkür ederim. Bu tez çalışmam, 2014-50-01-018 nolu BAPK projelerinin mali katkıları ile gerçekleştirilmiştir. Maddi katkılarından dolayı Sakarya Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür ederim. Tez çalışmamın her aşamasında desteklerini esirgemeyen Zekeriya Ayparçası, Teknisyen Hasan Gürel' e ve aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ÖZET... ..	xii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
SÜRTÜNME - AŞINMA - YAĞLAMA.....	4
2.1. Sürtünme	4
2.1.1. Sürtünme çeşitleri	7
2.1.1.1. Kuru sürtünme	7
2.1.1.2. Sıvı sürtünme	7
2.1.1.3. Sınır sürtünme.....	8
2.2. Aşınma	8
2.2.1. Aşınma çeşitleri	12
2.2.1.1. Adhesif aşınma.....	14
2.2.1.2. Abrasif aşınma	17
2.2.1.3. Erosif aşınma	21
2.2.1.4. Fretting aşınma	24
2.2.1.5. Korozif aşınma.....	26
2.2.1.6. Yorulma aşınma	28

2.3. Yağlama	29
2.3.1. Yağlama rejimleri	31
2.3.1.1. Hidrodinamik yağlama	31
2.3.1.2. Elastohidrodinamik yağlama	33
2.3.1.3. Karışık yağlama	33
2.3.1.4. Sınır yağlama	34
2.4. Katı Yağlayıcılar.....	35
2.4.1. Molibden	35
BÖLÜM 3.	
SEGMANLAR VE TRIBOLOJİSİ	37
3.1. Segman Malzemeleri.....	38
3.2. Segman Çeşitleri	39
3.3. Segman Tribolojisi	40
3.4. Segman Kaplamaları	42
BÖLÜM 4.	
MATERYAL VE METOD	45
4.1. Materyal.....	45
4.2. Kaplama Yöntemi.....	46
4.2.1. HVOF Kaplama Sistemleri	46
4.2.2. HVOF sisteminin uygulama prensibi	47
4.3. Metalografik İncelemeler	47
4.4. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) Analizleri.....	48
4.5. Sertlik Ölçümleri.....	48
4.6. Yoğunluk Ölçümleri	48
4.7. Taguchi Deneysel Optimizasyon Yöntemi.....	49
4.7.1. Sinyal/Gürültü oranı	50
4.7.2. Ortogonal diziler.....	51
4.7.3. Faktörlerin etkileşimi.....	53
4.7.4. Varyans analizi (ANOVA).....	54
4.7.4.1. Toplam kareler toplamı	54
4.7.4.2. Serbestlik derecesi.....	55

4.7.4.3. Varyans	55
4.7.4.4. F testi	56
4.7.4.5. Sonucu yüzde katkı (P)	56
4.7.5. Doğrulama deneyleri	56
4.7.6. Regresyon analizi	57
4.8. Sürtünme Ve Aşınma Deneyleri	58
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	60
5.1. Molibden Tozunun Özelliklerinin İncelenmesi	61
5.2. Metalografik Analizler	63
5.3. Sertlik Ve Yoğunluk Ölçümleri	64
5.4. Kontrol Faktörlerinin Etkisi	65
5.5. Anova	68
5.6. Regresyon Analizi	70
5.7. Doğrulama Deneyleri	70
5.8. Aşınma Haritaları	72
5.9. Aşınma Mekanizmaları	75
BÖLÜM 6.	
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	84

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Al	: Alüminyum
C	: Karbon
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
CH ₄	: Metan
C ₂ H ₄	: Etilen
C ₃ H ₆	: Propilen
C ₃ H ₈	: Propan
CrO ₃	: Kromik asit
ε	: Hata
F	: Fren terazi kuvveti
Fe	: Demir
F _n	: Normal kuvvet
F _s	: Sürtünme kuvveti
H ₂	: Hidrojen
H ₂ SO ₄	: Sülfirik asit
L(y)	: Hedef değerden sapma
l	: Yol, m
m	: Hedef değer
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
m _{Kuru}	: Kuru ağırlık
m _{Yaş}	: Yaş ağırlık
N	: Gözlemlerin toplam sayısı
Ni	: Nikel
n	: Motor devri, devir/dakika

N_e	: Etkin tekraralama sayısı
O_2	: Oksijen
P	: Basınç, bar
ppm	: Milyonda bir partikül
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
P_e	: Efektif güç, kW
R^2	: Regresyon katsayısı
Si	: Silisyum
SO _x	: Kükürt oksitler
T	: Tüm gözlemlerin toplamı
Ti	: Titanyum
V	: Hacim, cm ³
V _h	: Strok hacmi, m ³
DOF _A	: A faktörünün serbestlik derecesi
DOF _B	: B faktörünün serbestlik derecesi
DOF _T	: Toplam serbestlik derecesi
V _p	: Piston hızı, m/s
\bar{V}_p	: Ortalama piston hızı (m/s)
W	: Tungsten
WC	: Tungsten karbür
W _o	: Aşınma oranı
Z	: Çevrim başına devir sayısı
ρ	: Yoğunluk
μ	: Sürtünme katsayısı
θ	: Krank açısı, radyan
η_v	: Volümetrik verim
V	: Varyans
V_e	: Hata varyansı
ΔV	: Tüketilen yakıt hacmi
ANOVA	: Varyans analizi tablosu
AÖN	: Alt ölü nokta
APS	: Atmosferik plazma sprey

CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
DC	: Doğru akım
DIN	: Alman normu
DOF	: Serbestlik derecesi
E	: Young modülü
EHD	: Elastohidrodinamik
FMEP	: Ortalama sürtünme basıncı
G	: Gürültü
GIMEP	: Brüt ortalama indike basınç
H	: Sertlik
HV	: Vickers sertlik
HVOF	: Yüksek hızlı alev püskürtme
HFk	: Hava fazlalık katsayısı
H/Y	: Hava-yakıt oranı
MMK	: Metal matrisli kompozit
MoO ₃	: Molibden trioksit
Mo	: Molibden
PTFE	: Poly tetra flor etilen
S	: Kükürt
SDQ _T	: Kareler toplamı
SSAXB	: A ve B faktörlerinin etkileşim faktörüne ait kareler toplamı
SSe	: Hata kareler toplamı
ÜÖN	: Üst ölü nokta
VI	: Sanal enstrüman
Zn	: Çinko

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	MoS ₂ 'nin hekzagonal kristal yapısı.....	2
Şekil 2.1.	Sürtünme Esnasındaki Gerçek Temas Noktaları.....	5
Şekil 2.2.	Statik sürtünme katsayısının kontak süresiyle değişimi ve kinetik sürtünme katsayısının kayma hızıyla değişimi	6
Şekil 2.3.	Yüzeylerin mekanik ve moleküler etkileşimi	12
Şekil 2.4.	Abrasif aşınmanın aşamaları	15
Şekil 2.5.	Adhezyondan dolayı malzeme transferi	16
Şekil 2.6.	İki ve üç elemanlı abrasyon mekanizması	18
Şekil 2.7.	Katı bir yüzey ile konik abrasif partikülün teması	19
Şekil 2.8.	İki farklı abrasif aşınma modu, a) ploughing modu b) kesme modu.	20
Şekil 2.9.	Erozif aşınmada oluşabilecek muhtemel aşınma mekanizmaları	22
Şekil 2.10.	Erozif aşınmada partikül çarpma hızı ve açısının şematik gösterimi.	23
Şekil 2.11.	Gevrek-sünek malzemede erozif aşınmaya çarpma açısının etkisi...	24
Şekil 2.12.	Düz zemine doğru bastırılmış kürenin altındaki elastik gerilim dağılımı	25
Şekil 3.1.	Segmanın kısımları	37
Şekil 3.2.	Kompresyon ve yağ segmanlarının pistondaki yerlerinin gösterilişi	39
Şekil 4.1.	HVOF çalışma prensibi	47
Şekil 4.2.	Taguchi deney tasarımındaki işlem sırası	49
Şekil 4.3.	L27 ortogonal dizine ait lineer etkileşim grafiği	53
Şekil 5.1.	Molibden kaplama tozuna ait SEM görüntüsü.....	62
Şekil 5.2.	Molibden tozunun SEM görünüşü ve EDX analizi	62
Şekil 5.3.	Molibden kaplamanın SEM görüntüsü	63
Şekil 5.4.	Molibden kaplı kırık segman yüzeyi SEM görüntüsü	64
Şekil 5.5.	Molibden kaplı segmanın SEM görüntüsü ve EDX analizi	64
Şekil 5.6.	Segman aşınma kaybı için S/N grafiği	66
Şekil 5.7.	Segman aşınma kaybı için S/N etkileşim grafiği	67

Şekil 5.8.	Gömlek aşınma kaybı için S/N grafiği	67
Şekil 5.9.	Gömlek aşınma kaybı için S/N etkileşim grafiği	68
Şekil 5.10.	Sıcaklık ve yük değişimine göre segman aşınma haritası.....	72
Şekil 5.11.	Devir ve sıcaklık değişimine göre segman aşınma haritası	73
Şekil 5.12.	Sıcaklık ve yük değişimine göre gömlek aşınma haritası.....	73
Şekil 5.13.	Devir ve sıcaklık değişimine göre gömlek aşınma haritası	74
Şekil 5.14.	Dökme demir 100 N yük altında a) 60 b) 80 c) 120 dev/dak kayma hızı şartlarına ait aşınma mekanizmaları	75

TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1.	GG 20-30 dökme demir segmanın kimyasal bileşenleri.....	45
Tablo 4.2.	GG 20-30 dökme demir silindir gömleğinin kimyasal bileşenleri	45
Tablo 4.3.	HVOF kaplama parametreleri	46
Tablo 4.4.	Ortogonal L27 dizininin gösterimi	52
Tablo 4.5.	Taguchioptimizasyon metoduna göre deneysel şartlar	59
Tablo 5.1.	Kontrol faktörleri ve seviyeleri	60
Tablo 5.2.	L27 Taguchi ortogonal dizisine göre deneysel ve S/N sonuçları.....	61
Tablo 5.3.	Segman ve gömleklerin yoğunluk ve sertlik değerleri	65
Tablo 5.4.	Segman ağırlık kaybı için S/N cevap tablosu	65
Tablo 5.5.	Gömlek ağırlık kaybı için S/N cevap tablosu	65
Tablo 5.6.	Segman için ANOVA sonuçları	69
Tablo 5.7.	Gömlek için ANOVA sonuçları	69
Tablo 5.8.	Aşınma kayıpları için doğrulama deneyleri sonuçları.....	71

ÖZET

Anahtar kelimeler: Piston segmanı, Molibden tozu, Aşınma testi, Taguchi Metodu.

Bu çalışmada Molibden tozu kaplı piston segmanlarının aşınma davranışları incelenmiş ve aşınma parametreleri optimize edilmiştir. Aşınma deneylerinde minimum aşınma kaybı elde etmek için, yük, sıcaklık ve devir aşınma parametreleri Taguchi metodunun L_{27} dizisine göre optimize edilmiştir. Deney sonuçlarından hem segman hem de silindir gömleğinin minimum aşınma kaybı için en etkili faktörün yük olduğu tespit edilmiştir. Regresyon analizi kullanılarak matematiksel modeller elde edilmiştir. Optimizasyon yönteminin doğrulama deneyi sonucu ile deneysel sonuçlar birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Segman ve silindir gömleği için aşınma haritaları oluşturulmuştur. Aşınma yüzeylerinin analiz sonucu, abrasif aşınma mekanizmasının baskın olduğunu göstermiştir.

INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF WEAR BEHAVIORS OF PISTON RINGS COATED WITH MOLYBDENUM POWDER

SUMMARY

Key Words: Piston ring, molybdenum powder, Wear test, Taguchi Method.

In this study, wear behaviors of piston rings coated with molybdenum powder have been investigated and wear parameters optimized. Wear process parameters are optimized for minimum weight loss and friction based on L_{27} Taguchi method with three wear parameters, load, temperature and revolution. It is determined that the load has the most significant factor influence on minimum weight loss of both the piston rings and the cylinder liner. Mathematical models of weight loss have been obtained using Regression analyzes. The predicted weight loss in confirmation test has been found to lie close to that of the experimentally observed ones. Wear maps have been created for piston ring and cylinder liner. Analysis results of worn surfaces shows that abrasive wear mechanism is more effective.

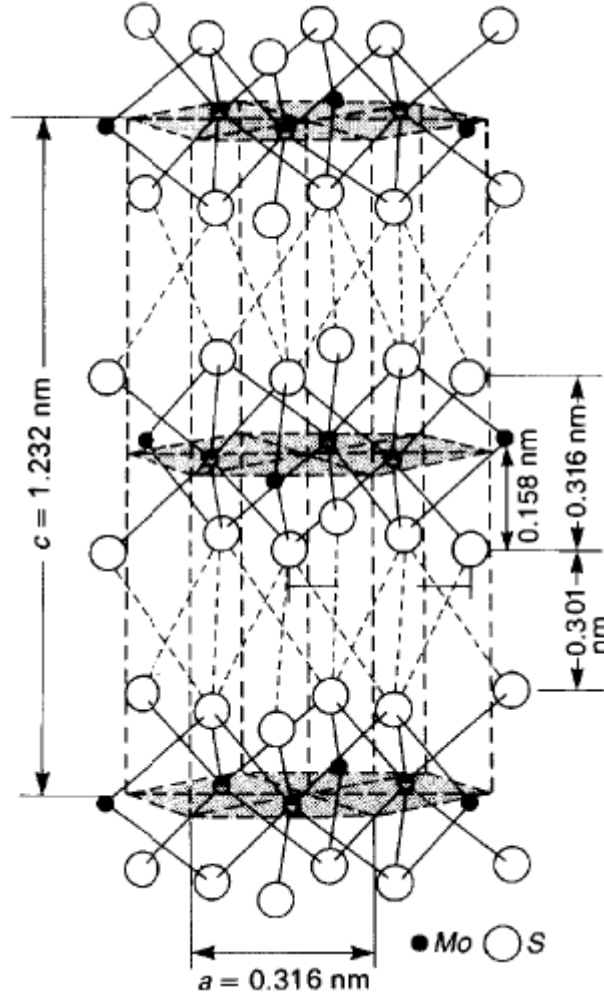
BÖLÜM 1. GİRİŞ

Aşınma birbirleriyle temas halinde olan iki cismin bağıl hareketi sonucu cisimlerin yüzeylerinde meydana gelen malzeme kaybıdır. Bundan dolayı cisimler ilk şekilleri ve boyutlarını kaybedip beklenen fonksiyonları yerine getiremezler. Aşınma, sadece bir malzeme özelliği değil, aynı zamanda aşınan yüzeyleri meydana getiren sistemin vermiş olduğu cevaptır (Bhushan, 2002). Aşınma endüstride korozyon ve yorulmanın haricinde en çok şikâyet edilen konuların başında gelmektedir. Bu yüzden endüstrideki çalışmalar sürtünme ve aşınmayı azaltma veya kontrol altında tutmaya yönelik olarak gerçekleştirilmektedir.

İçten yanmalı motorlarda sürtünme, toplam güç kaybının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. İçten yanmalı motorlarda motor içi sürtünmenin en önemli etkenlerden biri piston grubudur. Piston grubu sürtünmesi toplam motor sürtünmesinin yaklaşık % 40-55' ini oluşturmaktadır. Silindir gömleği-piston ve piston segmanı sürtünmesi, piston grubu sürtünme kaybının yaklaşık tamamıdır (Lin, 1993-Kapsız, 2011). İçten yanmalı motorlarda sürtünme ve aşınmayı iyileştirmek için, yağlama ve malzeme özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir.

Katı yağlayıcılar, belirli bir sıcaklığın üzerine çıkıldığı zaman yağlayıcılık özelliğini yerine getiren katı haldeki yağlayıcı türleridir. Bu katı yağlayıcılar, kayma esnasında çok düşük sürtünme ve orta şiddete aşınma davranışı sergileyebilirler. En yaygın katı yağlayıcı türleri, grafit, Molibden Disülfid (MoS_2) ve bunlara ilaveten PTFE olarak bilinmektedir.

MoS_2 hekzagonal bir yapıya sahiptirler ve sülfür atomlarının düzlemleriyle yer değiştirebilen Mo atomlarına sahiptir. Şekil 1.1' de MoS_2 ' ye ait kristal yapıyı göstermektedir.



Şekil 1.1. MoS₂'nin hekzagonal kristal yapısı (Bhushan, 2007)

MoS₂, madensel yüzeylerin üzerinde bir tabaka oluşturur. Bu tabakanın oluşması hava veya suya bağlı değildir. Bu nedenle vakumda veya oda sıcaklığında molibden disülfid çok iyi bir yağlama özelliğine sahiptir. Grafit ve molibden disülfid'in ısı stabiliteyi çok iyidir. MoS₂, endüstride yaygın olarak ve kaymalı işlemlerde kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Segman-silindir gömleği çifti arasında meydana gelen sürtünme-aşınmayı araştırmak ve azaltmak amacıyla literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Cho ve Ark (Cho, 2000), segman-silindir çifti arasındaki sürtünmeyi yağlama rejimlerine göre araştırmışlardır. Sürtünme katsayısını piston segmanın ölü noktalarda ve orta strokta ölçmüşlerdir. Sınır yağlama şartında sürtünme katsayısını 0,14 karma ve hidrodinamik yağlama şartlarında ise minimum sürtünme katsayısını 0,03 olarak belirlemişlerdir.

Sürekli çalışma durumlarında hidrodinamik yağlama rejiminde, minimum aşınma miktarı ve sürtünme gücü kaybını belirlemişlerdir.

Ryk ve Eitson (Ryk, 2006), piston segmanında meydana gelen sürtünmeyi azaltmak için kısmi lazer kaplama yöntemini (LST) kullanmışlardır. Deneyleri, kaplamalı ve kaplamasız segman kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Kısmi lazer kaplamalı segman sürtünmesinin, diğer standart segmana göre % 25 azaldığını tespit etmişlerdir.

Canale ve Ark (Canale, 2005), düşük sıcaklıklarda katı yağlama ile yüzey karakteristiklerini ve tribolojik özellikleri araştırmışlardır. Çelikten üretilen silindir gömleğine çift kaplı molibden tozunu iyon ve protonlu yüzey kaplama yöntemi uygulayarak sürtünme deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, çift kaplı molibdenin segman ve silindir gömleği motorun daha az sürtünme ve daha sınırlı aşınmanın meydana geldiğini rapor etmişlerdir.

Bu çalışmada, katı yağlayıcılardan biri olan Mo tozu kullanılarak segman HVOF yöntemi kullanılarak kaplama yapılmıştır. Ayrıca deneysel çalışmaların pahalı olmasından dolayı, aşınma testleri Taguchi deneysel optimizasyon yönteminin L₂₇ dizisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Optimum deney parametreleri belirlenmiş ve Regresyon yöntemi kullanılarak matematiksel denklemler oluşturulmuştur. Segman ve silindir gömleği için aşınma haritaları çizilmiştir. Son aşamada ise doğrulama testleri gerçekleştirilerek gerçek deney şartları ile kıyaslanmıştır.

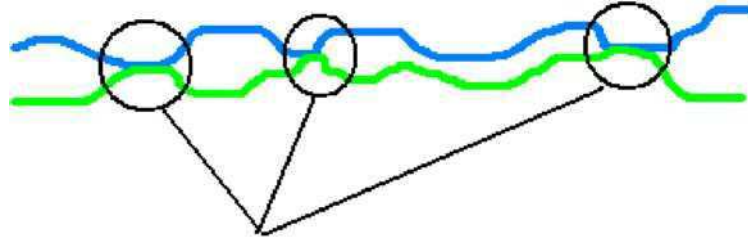
BÖLÜM 2. SÜRTÜNME-AŞINMA-YAĞLAMA

2.1. Sürtünme

Sürtünme; birbirine göre göreceli olarak hareket eden iki nesnenin arasında oluşan ve harekete karşı gösterilen dirençtir. Hareket yönünün tersindeki teğetsel direnç kuvvetine sürtünme kuvveti denir. Genellikle karşılaşılan iki ana tür sürtünme vardır; kuru sürtünme ve sıvı sürtünme (Yaman, 2009).

Sürtünme, temasta olan yüzeylerin durumuna da bağlıdır. Gerçekte, temas eden yüzeyler görünen geometrik yüzeyden daha küçüktür. Bu nedenle de sürtünme görünen yüzeyden bağımsız, fakat gerçek temas alanını oluşturan pürüzlere bağlıdır. Temas eden parçalarda oluşan basınç, birbirine değen pürüz noktalarında malzemenin akma sınırını aşabilmekte ve böylece de gerçek değme yüzeylerindeki pürüzler normal kuvvetin etkisi ile sıkışarak deforme olurlar. Bunun sonucu olarak da temas yüzeyleri de büyür. Temas eden yüzeylerin büyümesi ile birbirlerine yaptıkları basınç da o oranda büyür (Selçuk, 1991).

Yüzeyler ne kadar düz görünürse görünsün, mikroskobik boyutta girinti ve çıkıntılara sahiptir. İki yüzey üst üste geldiğinde, yüzeyler arasındaki temas her iki yüzeyin tepe noktaları arasında olur. Böylelikle gerçek temas alanı görüldüğünden çok daha küçük olur. Bu küçük temas noktalarına uygulanan yükten dolayı bu noktalarda yapışma ve bölgesel kaynaklar oluşur. Cisimler birbiri üzerinde hareket ettirilmeye çalışıldığında önce bu bölgesel kaynakları koparmak gerekecektir. Bu nedenle cisimlerin yüzeyleri ne kadar pürüzlü ise sürtünme kuvveti de o kadar fazla olacaktır (Şafak, 2008).



Şekil 2.1. Sürtünme esnasındaki gerçek temas noktaları (Sheffield Uni, 2008).

Aynı şekilde cismin ağırlığı arttığında cismin ve yüzeyin girinti-çıkıntıları daha fazla birbirine içine gireceğinden sürtünme de artar. Yani cismin hareketini engelleyen kuvvetin büyüklüğü de artar. Cismin hareket etmesini engelleyen bu kuvveti yenmek için, bu kuvvetten daha büyük bir kuvveti cisme uygulamak gerekir (Yaman, 2008).

Sürtünme genelde statik ve dinamik diye ikiye ayrılır. Birbirlerine temas eden yüzeyler arasında bağıl hareket yoksa statik sürtünmeden söz edilir (Babalık, 2000).

Eğer temas eden yüzeyler arasında bağıl hareket mevcutsa bu durumdaki sürtünmeye dinamik veya kinetik sürtünme denir. Bu durumda sürtünme kuvveti temas halindeki yüzeyleri oluşturan atom veya moleküllerdeki, zıt işaretli yerel elektrostatik yük dengesizliklerinin birbirini çekmesinden kaynaklanır (Belice, 2002).

Dinamik sürtünmede yüzeyler öteleme hareketi yapıyor ve birbiri üstünde kayıyorsa kayma sürtünmesinden, birbirleriyle nokta ya da çizgisel temaslı olup birbirleri üzerinde yuvarlanıyorsa yuvarlanma sürtünmesinden bahsedilir. Eğer yüzeyler birbiri üzerinde aynı zamanda hem dönme hem de kayma hareketi yapıyorsa bu da kayma ve yuvarlanmanın kombinasyonudur. Yuvarlanma sırasında iç içe giren kısımların ayrılması daha kolay olacağından, sürtünme katsayısı genellikle yuvarlanma halinde kayma halindeki daha küçüktür. Bunun bir sonucu olarak da yüzeyi iyi temizlenmiş metal yüzeyler arasındaki sürtünme kuvveti, iyi temizlenmemiş yüzeyler arasındaki sürtünme kuvvetinden fazladır (Babalık, 2000).

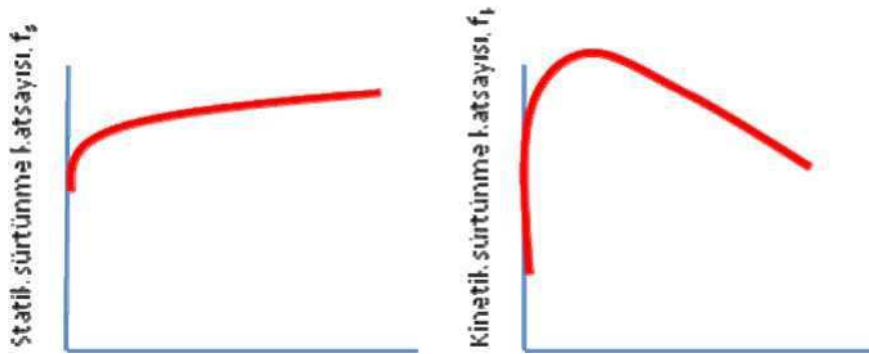
Sürtünme kuvveti tamamen malzemelerin özelliklerine bağlı değildir. Nem, sıcaklık, kayma hızı, temas basıncı gibi etkenlerle değişmektedir. Farklı yağlayıcılar, farklı temas bölgeleri ve farklı yüzey pürüzlülükleri için sürtünme katsayısı farklılık gösterir (Ludema, 1996).

Sürtünme yüzeyler arasındaki temas noktalarıyla ilişkili olduğundan yüzeyler arasındaki teması kesmek ya da azaltmak için yağlayıcı kullanmak sürtünmenin azaltılmasında kullanılan en yaygın yöntemdir (Şafak, 2008).

Metaller arasındaki sürtünme olayları, basit görünmekle beraber, aslında çok karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu olayları, izah ve formüle etmek için tarihsel gelişim içerisinde, birçok teori ileri sürülmüştür (Moore, 1975).

Amontons (1699), cisimleri rijit kabul ederek, sürtünmenin izahını, “Kayma esnasında parçaları, yüzey pürüzleri yüksekliğince kaldırmak için gerekli enerji” şeklinde yapmış ve bütün cisimler için sürtünme katsayısını 1/3 olarak vermiştir (Ulukan, 1993).

İki tür sürtünme katsayısı vardır: statik sürtünme katsayısı (duran yüzeyler için) ve kinetik sürtünme katsayısı (hareket halindeki yüzeyler için). Statik sürtünme katsayısı, kontak süresinin fonksiyonu iken (Şekil 2.2.a), kinetik sürtünme katsayısı hızın fonksiyonudur (Şekil 2.2.b) (Şenel, 2008).



Şekil 2.2. Statik sürtünme katsayısının kontak süresiyle değişimi (a) ve kinetik sürtünme katsayısının kayma hızıyla değişimi (b)

Kinetik sürtünme katsayısı düşük hızlarda pozitif, yüksek hızlarda negatif eğime sahiptir. Ancak hız değişim aralığı çok geniş alındığında, eğim iyice küçülür. Örneğin sürtünme katsayısı, hız 10 kat artırıldığında sadece % 1-2 artar. Belli bir limitte hız tutulmazsa, kinetik sürtünme katsayısı hızdan bağımsız olarak kabul edilebilir (Şenel, 2008).

Coulomb (1875), Amontons'un bulduğu sonuçları doğrulamış ve ayrıca s¼rt¼nme katsayısının hızdan bağımsız olduğunu da gözlemlemiştir. Bunlara ilaveten Coulomb, statik s¼rt¼nme katsayısını kaymaya başlatma kuvveti ile kinetik s¼rt¼nme katsayısını da hareketi devam ettirme kuvveti ile tarif etmiştir. "Coulomb Kanunu" adı verilen bu teoriye göre (Hutchings, 1992);

- a. S¼rt¼nme kuvveti, normal yük ile orantılıdır,
- b. S¼rt¼nme kuvveti, geometrik temas alanına bağlı değildir,
- c. S¼rt¼nme kuvveti, kayma hızına bağlı değildir,
- d. Statik s¼rt¼nme katsayısı, dinamik s¼rt¼nme katsayısından daha büyüktür.

2.1.1. S¼rt¼nme çeşitleri

2.1.1.1. Kuru s¼rt¼nme

Kuru s¼rt¼nme, iki kuru yüzey hareket ettiğinde oluşan temas kuvvetlerinin teğetsel bileşenlerini tanımlar. Aynı zamanda "Coulomb" s¼rt¼nmesi olarak da adlandırılır (Yaman, 2009).

En hassas işlemede bile yüzeyde p¼r¼zl¼l¼k olacağından, yüzeyler arasındaki temas noktalarında oluşan yüksek basınç kaynak bağlantısı oluşmasına sebep olacaktır. Bunun sonucu olarak da ortaya çıkan s¼rt¼nme kuvveti oldukça fazla olacaktır (Babalık, 2000).

2.1.1.2. Sıvı s¼rt¼nme

Sıvı s¼rt¼nme ise birbirine göre farklı hızlarda hareket eden bir sıvı içinde bitişik tabakalar arasında oluşan temas kuvvetlerinin teğetsel bileşenlerini tanımlar (Yaman, 2009).

Bu durumda s¼rt¼nmeyi oluşturan faktör yağın viskozitesidir (Babalık, 2000).

2.1.1.3. Sınır sürtünme

Yüzeyler arasındaki yağ filmi yeterli kalınlıkta oluşmadıysa bazı pürüz tepecikleri birbirlerine temas edebilir. Bu durum da yarı sıvı sürtünmesi olarak tanımlanır (Babalık, 2000).

2.2. Aşınma

Birbiriyle temas halindeki iki cismin arasında meydana gelen bağıl hareket ile cisimlerin yüzeylerinin birbirini etkilemesi sonucu aşınma meydana gelir. Mühendislik malzemesinde görülen yıpranmanın aşınma sayılabilmesi için aşağıdaki şartların mevcut olması gerekmektedir (Akkurt, 1992);

- a) Mekanik bir etken olması,
- b) Sürtünmenin (bağıl hareketin) olması,
- c) Yavaş ve devamlı olması,
- d) Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- e) İsteğimiz dışında meydana gelmesidir.

Aşınma, sürtünme halinde bulunan yüzeylerde mekanik etkenler ile istenilmediği halde kopan malzeme kaybıdır. Bu şekilde, yüzeylerin ilk şekilleri bozulur, parçalar arasındaki boşluklar büyür ve amaçlanan fonksiyon normal şekilde yerine getirilemez (Akkurt, 1992).

Sürtünerek çalışan bütün makine elemanlarında kaçınılmaz olan ve kompleks bir sistem özelliği gösteren aşınma, sanayide bir çok tribolojik sistemlerde görülen korozyonun ve yorulmanın yanı sıra üçüncü büyük problemdir. Bu nedenden günümüz teknik sistemlerindeki araştırmalar sürtünmeyi ve aşınmayı azaltma ve kontrol etme çalışmaları şeklinde yoğunlaşmıştır. Sürtünmenin ve aşınmanın azaltılmasıyla malzeme kaybı önlenerek boyut hassasiyeti saklanırken enerji israfı da önlenmiş olur (Hutchings, 1992).

Aşınma, ne bir malzeme ve nede bir malzemenin yüzey özelliğidir. Bilakis bir sistem özelliğidir. Bu nedenle çok değişkenli bir fonksiyon olan aşınmanın sürekli incelenmesi gerekir (Yılmaz, 2012).

Aşınmanın başlaması ve devam edebilmesi için sürtünme olmalıdır. Sürtünen iki cismin temas alanı, görünen temas alanından küçüktür. En hassas işleme yöntemleriyle bile işlenen katı malzemelerin yüzeyi hiçbir zaman düz değildir (Cöcen ve diğ., 1997).

Çünkü imalat tekniğinde tam olarak pürüzsüz düz bir yüzeyin elde edilmesi imkansızdır. Yüzeyi elde etmede kullanılan kesici ve yontucu araçlar ne kadar itinayla hazırlanırsa hazırlansın, işlem sonucu elde edilen yüzey üzerinde mutlaka belirli büyüklükte pürüzlülük, yani yüzeyde birkaç mikron yüksekliğinde mikroskobik pürüzler bulunur (Portakal, 1974).

Yüzeylerin temas etmesi halinde ise yüzeylerdeki karşılıklı pürüzler etkilenir. İlk temas birkaç pürüz tepeleri arasında oluşur. Pürüz tepeleri arasındaki girintiler temas etmezler. Gerçek temas alanı, temasta olan pürüzlerin toplam alanıdır. Yük arttıkça ilk temas eden pürüzler şekil değişimine uğrar (ezilir) ve bunun sonucu kısa boyutlu yeni pürüzler birbiri ile temas ederler. Yüklemenin temas etmesiyle de pürüz sayısı azalır ve gerçek temas alanı görülen temas alanına yaklaşır (İpek, 1987-Odabaş, 1991-İpek, 1992). Yüzey pürüzlüğünün artışı ile aşınma direnci azalır (Pigors, 1979). Temasta olan cisimlere bağlı hareket yaptırabilmek için sisteme bir enerji girer. Bu enerji yük ve hareket şeklindedir. Giriş ile çıkış arasındaki fark, mekanik titreşime, ısı, ses ve sürtünme enerjisine ve aşınmaya dönüşür (İpek, 1987-Odabaş, 1991-İpek, 1992).

Aşınmanın gerçek sistemlerde belirlenmesinin zorluğu, bir kısmı standartlaştırılan model cihazların geliştirilmesine yol açmıştır. Model cihazlarda tribo sistemi oluşturan unsurların, gerçek sisteme uygun şekilde oluşturulması, sonuçların tekrarlanabilir olması bu cihazlardan beklenen özelliklerdir (Yılmaz, 1997).

Aşınma; malzeme özellikleri (tane büyüklüğü, kırılma tokluğu vb), işlem koşulları (yük, hız), temas geometrisi, yüzey pürüzlülüğü ve çevresel koşulları (sıcaklık, nem) içeren sistemlerin kompleks fonksiyonudur. Bu yüzden temas halindeki ikili malzeme kombinasyonu için aşınma büyüklüğü bu koşullara göre değişebilir (Hsu-Shen, 2001).

Aşınma büyüklüğü; malzeme seçimi ve işlem koşullarına bağlı olarak mikro kırılma sebebiyle fiziksel, kimyasal veya temas ara yüzeyinde ergime ile $1,10^{15}$ ’ den $1,10^{14}$ mm^3/Nm ’ ye kadar bir aralıkta değişebilir. Baskın aşınma modu; malzeme özellikleri, sürtünmeden kaynaklı ısı sebebiyle dinamik yüzey etkileri, kimyasal film oluşumu ve aşınmaya bağlı olarak oluşur (Kato-Adachi, 2001).

Aşınma, sürtünme gibi bir malzeme özelliği değildir, bir sistem karşılığıdır. Çalışma koşulları ara yüzey aşınmasını etkiler. Aşınma mekanik ve/veya kimyasal anlamda meydana gelir ve genellikle sürtünme ısınmasıyla artar. Aşınma mekanizmaları, sürtünme süresince meydana gelen kompleks değişikliklere bağlı olarak tanımlanmaktadır. Genelde aşınma, tek bir aşınma mekanizması süresince yer almamaktadır. Sistemde bu şekilde, her bir tür aşınmadaki her bir aşınma mekanizmasının anlaşılması önemli hale gelmektedir. Aşınma, kimyasal bozulma veya iletişim ara yüzeyinde erime suretiyle mikro çatlama sebebiyle, fiziksel ayrılma olarak, malzemenin kaldırılması sonucuyla vuku bulmaktadır. Bu bağlamda aşınmanın birkaç tipi mevcuttur. Aşınma şiddeti, aşınma yüzey pürüzlülüğü ve aşınma parçacık şekli, bize aşınmanın sınıflandırılması konusunda, önemli bilgi vermektedir (Bayer, 1994).

Aşınma, oluşma hızı ve biçimi açısından zamanla gelişen ve aniden meydana gelen aşınma olmak üzere ikiye ayrılır (Vikipedi, 2007a).

Zamanla gelişen aşınmada makine elemanı üç aşamada aşınır ve normal çalışma ömrünü tamamlar. Zamanla gelişen aşınmanın kademeleri şu şekildedir:

Başlangıç (rodaj) aşınması: Zamanla gelişen aşınmanın ilk safhası makine elemanlarının alışma safhasıdır. Bu safhada hızlı ve şiddetli bir aşınma meydana gelir. Bu ilk aşınmaya rodaj aşınması denir. Makine elemanlarının ömürlerinin uzun olması için rodaj aşınması mümkün olan en kısa zamanda, en az yükte ve normal hızdan daha düşük hızlarda tamamlanmalıdır. Bunu sağlamak için makine elemanları rodaj için özel üretilmiş özel katkılı yağlayıcılarla yağlanırlar (Vikipedi, 2007a).

Asıl (kararlı) aşınma safhası: Rodajdan sonraki aşama, makine elemanının ömrünü belirleyen asıl aşınma safhasıdır. Bu safhada aşınma hızı çok azdır. Rodaj ne kadar uygun yapılmışsa bu aşama, dolayısıyla makine elemanı ömrü o kadar uzun olur (Vikipedi, 2007a).

Aşırı (şiddetli) aşınma safhası: Makine elemanı önceden belirlenen bir aşınma sınırına kadar aşındığı zaman normal çalışma ömrünü tamamlamış demektir. Bu aşınma safhasında aşınma hızı oldukça artmıştır ve makine elemanı değiştirilmelidir (Vikipedi, 2007a).

Aniden meydana gelen aşınma, parçalar üzerinde olaydan önce herhangi bir aşınma yokken; yanlış malzeme seçimi, yağlamanın uygun yapılamaması, sürtünme dolayısıyla meydana çıkan ısıl enerjinin dış ortama aktarılamaması gibi sebeplerden dolayı aşınmanın aniden ortaya çıkmasıdır. Birbiriyle eş çalışan makine elemanları bu durumda kilitlenebilirler ve çalışamaz duruma gelirler. Yatak sarması bu olaya örnek gösterilebilir (Vikipedi, 2007a).

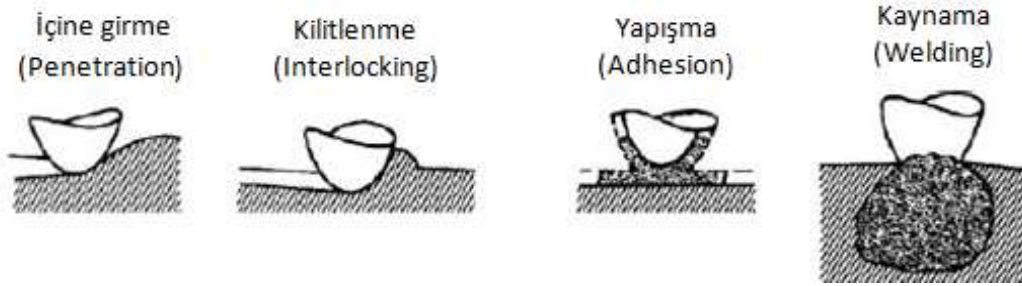
Aşınmayı azaltılmada tasarım anında dikkat edilecekler şöyledir (Ludema, 1996);

- a) Temas basıncının düşük tutulması
- b) Kayma hızının düşük tutulması
- c) Az pürüzlü yataklama yüzeylerinin seçilmesi
- d) Yüksek sıcaklıklardan kaçınılması
- e) Sert malzemelerin kullanılması
- f) Düşük sürtünme katsayılı malzemelerin kullanılması
- g) Yağlayıcı kullanılması

Aşınma, dış etkiler altında oluşan fiziksel ve kimyasal değişikliklerin sonucu olarak ortaya çıktığından, pratikte bir aşınma hali değil, birçok aşınma halleri veya başka bir deyişle aşınma mekanizmaları vardır. Bunlar adezyon, abrazif aşınma, erozyon, yorulma aşınması, mekanik korozyon olmak üzere sıralanabilirler (Akkurt, 2000). Bu mekanizmalar, aşınan yüzeylere uygulanan yük, aşındırıcı parçacığın boyutu ve türü, temas şekli ve temas geometrisi gibi etkenler dikkate alınarak sınıflandırılmıştır.

2.2.1. Aşınma çeşitleri

Aşınma üç aşama olarak formüle edilebilir: Yüzeylerin etkileşimi, yüzey tabakasındaki değişimler ve yüzeylerin zarar görmesi. Bütün aşamalar kontak noktalarında oluşur ve birbirleriyle ilişkilidir. Yüzeyler hem mekanik hem de moleküler yollarla etkileşir (Şekil 2.3). Mekanik etkileşim asperitlerin birbirlerine girmesini ve kilitlenmesini içerir.



Şekil 2.3. Yüzeylerin mekanik ve moleküler etkileşimi

Temas halindeki yüzeylerin nispi hareketinin başlangıcından sonra, içeri giren asperitler malzemeye elastik ve plastik baskılar uygular. Asperitlerin deformasyonundan dolayı kilitlenme olur ve yumuşak malzemenin asperitleri kesilene kadar devam eder. Moleküler etkileşim kontak yüzeylerin üzerinde filmlerin yapışması olarak belirtilir. Çok özel durumlarda adhesyon çok güçlü ise adhezyon bağı kopar ve malzemedden parça ayrılır.

Yüzey tabakasındaki değişimler mekanik gerilmeler, sıcaklık ve kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır. Plastik olarak deforme olmuş asperitlerin normal gerilimi yumuşak cismin batma sertliğine yakın olacaktır. Ancak, yüzeyler çok pürüzsüz, yumuşak veya hafif bir şekilde yüklenirse kontaklar elastik olabilir.

Bu yüzden, uygulama yükü asperiti kontağındaki plastik akışın uzantısını kontrol etmek için uygulanır. Eğer yük yeterince düşük veya yüzeyler uyumlu ise aşınma elastik deformasyonun bir sonucu olarak çok yavaş bir şekilde seyreder.

Maksimum kayma gerilmesinin pozisyonu ve şiddeti sürtünme katsayısına bağlıdır. $\mu < \sim 0,3$ olması durumunda, maksimum kayma gerilmesi ve plastik akış yüzey altına uzanacak ve plastik gerinim her bir kayma geçişiyle toplanır.

Bu şart tipik yağlanmış sistem için veya koruyucu tabakayla kaplı sistemler için geçerlidir. Ancak $\mu > \sim 0.3$ olması durumunda maksimum kayma gerilmesi yüzeye uzanır ve büyük kayma gerinimi toplayabilir. Birçok aşınma mekanizması önerilen miktardaki plastik akış tarafından kontrol edilir. Bu olay asperiti yapışmasını ve kesmesini, alt yüzey çatlağının oluşumunu ve büyümesini ve ayrıca yorulma çatlağının yayılmasını içerir. Nispeten düşük kayma hızı ve yüksek yüklerde bu plastisite kontrol edilmiş aşınma mekanizmasına üstün gelir ve şiddetli aşınmaya neden olur.

Belirli şartlar altında, kötü malzeme yapısından dolayı tekrarlı elastik deformasyon yuvarlanan yüzeylerin pulcuk şeklinde kopmasına neden olur. Plastik deformasyon yüzey tabakasının yapısını değiştirir. Bir metal içinde artan alt yüzey konsantrasyonu ve yakın yüzey dislokasyonları yüzey tabakasının sertleşmesine neden olur. Bu proses tekrar kristalleşme sıcaklığına ulaşana kadar sürer ve dislokasyon konsantrasyonu keskin bir şekilde düşer. Bu durum yüzey tabakasının tavlanması neden olur. Gerinim sertleşme tavlama prosesi çoğu zaman tekrarlanır ve belirli aşınma proseslerinde başlar. Ayrıca, yüksek sıcaklık ve plastik deformasyon aşınan yüzeyde difüzyon oranını hızlandırır ve yüzeyin çözünmesini teşvik eder.

Ara yüzeydeki lokal sıcaklık esasen ortam sıcaklığından daha yüksek olabilir ve geçici Flash spot tarafından asperiti kontakları artabilir. Flash sıcaklık 1000 Kelvin' e kadar artabilir. Aksine kararlı ara yüzey sıcaklığı sürtünmeden dolayı artar. Çoğu yüksek sıcaklık geçişleri lokal faz dönüşümlerine neden olabilir. Bu sıcaklıklar yüzey ile ortam arasında hızlı yüzey oksidasyonuna ve diğer reaksiyonların oluşumunu artırır.

Hemen hemen bütün metaller için, hava ortamında oluşan oksit filmler kaynağa (welding) karşı yüzeyleri korurlar. Yağ içindeki aktif maddelerle etkileşen metalik yüzeyler filmlerle çevrilir ve oksit filmlere benzer bir rol oynar.

Yukarıda bahsedilen mekanizmalar ve diğerleri aşınma prosesinin temelidir. Ancak, mekanizmaların çok büyük farklılıkları vardır ve birbirleriyle olan ilişkileri ciddi bir aşınma prosesi sınıflandırılması mümkün olabilir. Genel olarak aşınmayı meydana getiren tribolojik mekanizmalar aşağıdaki gibidir;

- a) Adhesif aşınma,
- b) Abrasif aşınma,
- c) Erosif aşınma,
- d) Fretting (yenme) aşınma,
- e) Korosif aşınma,
- f) Yorulma aşınması vb.

şeklinde sınıflandırılmaktadır. Aşınma kompleks bir durumdur. Bu aşınma mekanizmaları tek başlarına olabileceği gibi birden fazla şekilde de oluşabilir.

Yüzeyler arasındaki sürtünme direnciyle aşınma dayanımı arasında tüm aşınma mekanizmaları için geçerli olabilecek doğrudan bağlantı bulunmamaktadır. Sürtünme katsayıları aynı olan tribolojik çiftlerin aşınma oranları arasında çok önemli farklılıklar bulunmaktadır. Yine aynı şekilde sertlikle aşınma dayanımı arasında da doğrudan bir ilişki yoktur. Abrasif aşınma için sertlik önemli bir etken iken adhesif aşınma için ise etkili olmamaktadır. Kimyasal afinitenin önemli olduğu adhesif aşınma mekanizmasında sert malzemelerde aşınma miktarı daha fazla olabilmektedir.

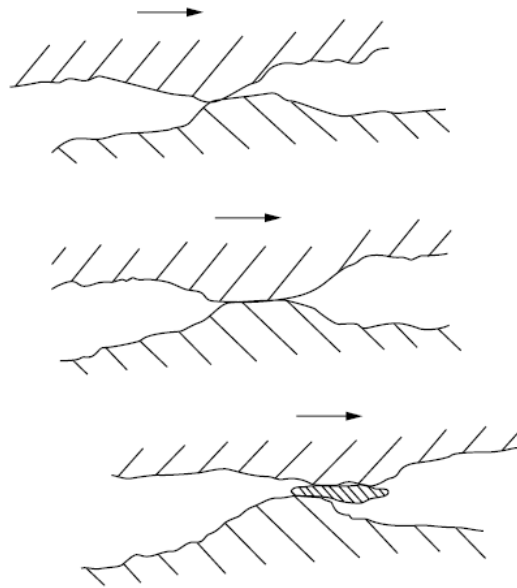
2.2.1.1. Adhesif aşınma

Adhesif aşınma birbiriyle temas halinde olan ve yağlanmış veya pratik manada kuru aşınma şartlarında sürtünme esnasında oluşan kavramalarının kesilmesi sonucu meydana gelen bir aşınma türüdür (Kajdas, 1990).

Bu aşınmanın temel mekanizması adhezyondur ve sürtünme bileşeni oldukça önemlidir. Bu aşınma prosesi adhezyon sürtünmesindeki gibi tamamen aynı davranışı sergiler. Bunlar oluşma, büyüme ve adhezyon kavramalarının kırılmasını içerir. Bu aşınma türünün en belirgin özelliği bir yüzeyden diğer bir yüzeye malzeme transferi meydana gelmesidir. Transfer prosesi kontak halindeki katı yüzeyler arasında oluşan lokal bağlanmalardan kaynaklanmaktadır (Takadoum , 2007).

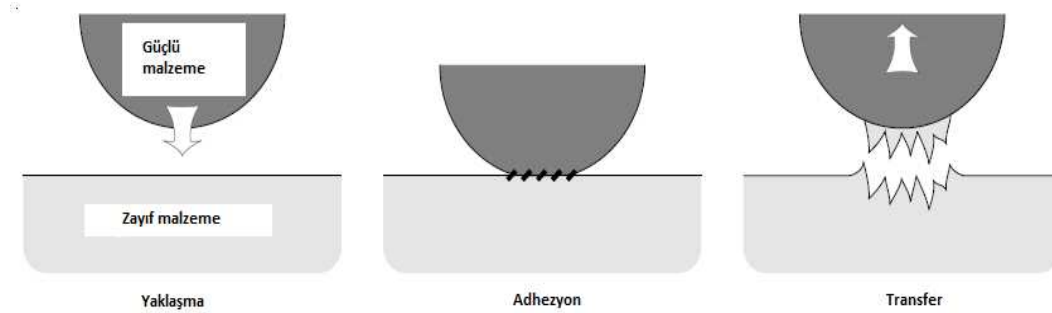
Asperiti kontakları kayma yoluyla kesilir ve küçük parçalar halinde her iki yüzeye veya bir yüzeye yapışır. Kayma işlemi devam ettiği için yeni asperitler kesilerek yüzeye yapışmaya devam eder. Bu transfer olan element tekrarlı bir şekilde bir yüzeyden diğer yüzeye geçer ve hızlı bir şekilde büyür. Bu transfer ürünü her iki yüzeyin malzemesini içerebilir. Ayrıca partiküle benzer flake şeklinde oluşabilir. Bu transfer partikülünün hızlı bir şekilde büyümesinin sonucunda aşınma partikülü meydana gelir.

Adhezif aşınma türü nadiren “galling”, “scuffing”, “scoring”, veya smearing, olarak adlandırılan biçimlerde oluşur (Bhushan, 2004). Scoring, malzeme transferi ve yüksek sürtünme kuvvetini de içine alan lokal katı faz kaynaktan dolayı meydana gelmektedir.



Şekil 2.4. Abrasif aşınmanın aşamaları (Bhushan, 2004)

Statik kontak durumundaki iki katı cismin ara yüzeyinde bile adhezyon meydana gelebildiğini deneyler göstermiştir. Cisimler birbirinden uzaklaştığı zaman zayıf malzemeden diğerine doğru yapışkan bir şekilde malzeme transferi olabilir. Bir katı cisim diğerinin yüzeyinde nispi olarak hareket ettirilirse daha güçlü malzemenin yüzeyinde transfer film oluşur (Şekil 2.4).



Şekil 2.5. Adhezyondan dolayı malzeme transferi (Stachowiak-Batchelor, 1993)

Transfer filminin miktarı adhezyon bağının mukavemetine bağlı olarak değişir. Ayrıca kristal yapısı ve oryantasyonu ile birlikte kontak çiftinin elektronik yapısı ve metalürjik uyumluluğu da transfer malzemenin miktarında etkilidir. Bir yüzeyden diğer bir yüzeye mikron seviyesinde partiküller transfer olursa aşınma oranındaki değişim belirsizdir (Czichos, 1978).

Deneysel sonuçlar ışığında birçok bilim adamı adhesif aşınma kanunu ile ilgili olarak denklemler türetmişlerdir. Hacimsel aşınma miktarı, kaymanın başlaması ile temas noktalarına yakın kristal atomlarının karşılıklı etkileşimleri sonucu, belirli bir L kayma mesafesinde orantılı olarak meydana Holm tarafından 1946 yılında teorik olarak ifade edilmiştir.

$$A = \frac{F_N}{P_a}; v = Z.A.L = \frac{Z.F_N.L}{P_a} \quad (2.1)$$

Burada Z, her bir etkileşimde yüzeyden ayrılan atom sayısını belirtmektedir.

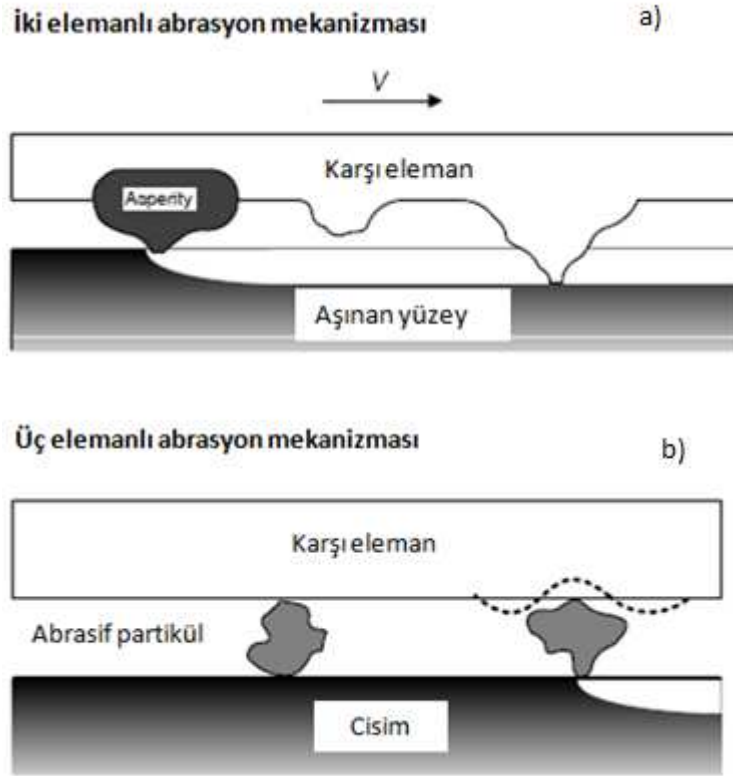
Adhesif aşınmadan korunmak için (Ludema, 1992);

- a) Benzer malzeme çiftlerinden mümkün merteye kaçınmak,
- b) Yüksek kontak basıncından dolayı yorulma problemi olmazsa yüksek sertlik arzu edilen bir özelliktir. Ancak, yağlanmış sistemlerde sert metale karşı sert metallerin kaydırılmasından kaçınmak,
- c) Yetersiz bile olsa yağlama aşınma azaltıcıdır. Ancak yağlı ortamlarda bile adhezyon meydana gelebilir.
- d) Yüzey temizliğinin kontrol edilmesi,
- e) Yüzey pürüzlülüğü.

2.2.1.2. Abrasif aşınma

Abrasif aşınma ASTM G 40–83 standardında “sert partikül veya sert protuberances kuvvetlerinin katı bir yüzeye bastırılıp, katı yüzey boyunca hareket ettirilmesiyle meydana gelen aşınma” olarak ifade edilmektedir. Abrasif aşınma en yaygın görülen aşınma mekanizmalarından biridir. Tarım ve maden endüstrisinde kullanılan cihazların hasarındaki başlıca sebeplerden biridir. Ama abrasyon günlük yaşantımızda da görülmektedir. Ayakkabılarını sürüyerek giyen birisinin ayakkabılarında abrasif aşınma görülür.

Abrasif aşınmanın başlıca etkisi, sert partiküller veya asperitiler tarafından yüzeyin kesilmesi veya yarılmasıdır. Bu kesme noktaları ya karşı yüzeyin içinde gömülü ya da kontak bölgesi içindeki boşluklarda olabilir. Yaygın olarak abrasyon iki elemanlı veya üç elemanlı abrasyon olarak isimlendirilir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. İki ve üç elemanlı abrasyon mekanizması

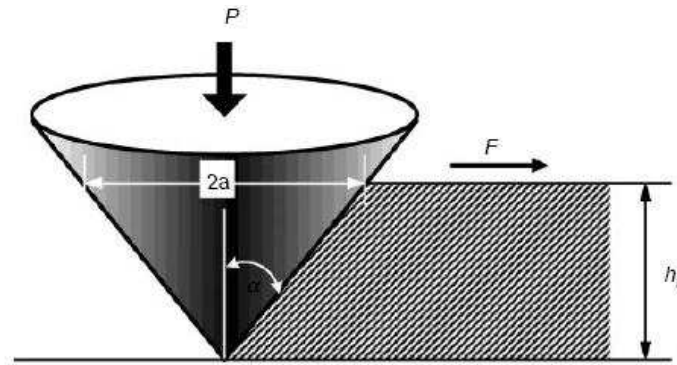
Bazen abrasyon, aşınan malzeme üzerine etki eden kuvvet açısından sınıflandırılabilir. Eğer kuvvet çok büyük ise abrasif partiküller parçalanır. Karşı yüzeyi keser, deforme eder ve yüksek gerilimli abrasyon meydana gelir. Bu abrasyon tipine örnek olarak yüksek yük taşımali yataklarda, eşleşen yüzeyler arasındaki sert partiküllerin neden olduğu abrasyon gösterilebilir. Yüksek gerilimli abrasyonun özel bir durumu oymalı (gouging) abrasyondur.

Abrasif partikül veya asperitileri kırmayacak şekilde nispeten düşük basınç uygulandığı zaman, abrasyon düşük gerilim abrasyonu olarak adlandırılır. Abrasif aşınma mekanizmasında etkili olan temel faktörler; sertlik, aşındırıcı partikül veya asperitinin boyut ve şekli, atak açısı, uygulama yükü, kayma hızı ve malzemenin kırılma tokluğu şeklinde sıralanabilir.

H_a ve H_s abrasif partikül ve yüzey sertliğini ifade etmektedir. Abrasif partikül ve aşınma yüzeyi birbirleriyle olan temasında oluşan plastik deformasyon analizi bu iki sertlik değeri arasında belirli bir oran olduğunu göstermektedir.

Bu oran $H_a/H_s \ll 1,2$ olursa yumuşak abrasyon, tam tersi $H_a/H_s \gg 1,2$ olduğu zaman ise sert abrasyon olarak meydana gelmektedir. Yumuşak abrasyon sert abrazyondan daha düşük aşınma oranı davranışı göstermekte ama H_a/H_s oranına hassasiyeti daha büyüktür. Ancak sert abrasyon olması durumunda net abrasif sertlik değeri çok az etkiye sahiptir.

Abrasif aşınmanın temel mekanizmaları direk bir şekilde plastik deformasyon ve gevrek kırılma ile ilgilidir (Hutchings, 1992). Sert abrasif partiküller tarafından iş parçası plastik deformasyona uğratılarak yivler şeklinde malzeme kaybına uğratılır. Piramit veya koni şeklindeki abrasif partikülleri yüzeye h_i derinliğinde batırarak modellenirse (Şekil 2.7); sürtünme yolu oldukça büyük olduğu zaman, aşınan malzemenin hacmi aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanır.



Şekil 2.7. Katı bir yüzey ile konik abrasif partikülün teması

$$Q = K \frac{P}{H} \quad (2.2)$$

$$P = F_N \cdot L \quad (2.3)$$

Olduğundan denklem 2.2 ile 2.3 tekrar düzenlenirse en son denklem 2.4 halini alır.

$$Q = K \cdot \frac{F_N \cdot L}{H} \quad (2.4)$$

Burada,

K : Boyutsuz abrasif aşınma katsayısını,

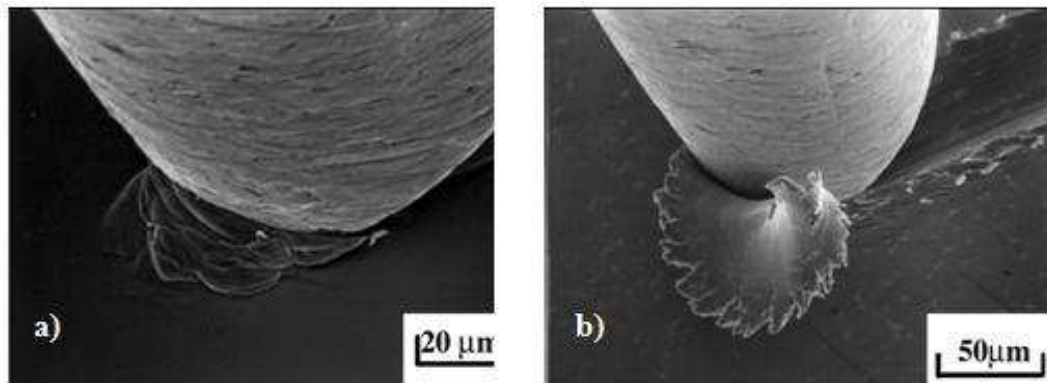
F_N : Toplam uygulama yükü,

L : Kayma mesafesi,

H : Sertlik

Boyutsuz abrasif aşınma katsayısı, malzeme kaybı ve abrasif partikül geometrisine bağlıdır. Aşınma katsayısı aşınmanın şiddetini belirler. Bu K katsayısı metaller için iki elemanlı abrasyonda $K: 5 \times 10^{-3}$ ile 50×10^{-3} , üç elemanlı abrasyonda ise $K: 0.5 \times 10^{-3}$ ile 5×10^{-3} arasında bir değer alır.

Plastik akış yoluyla abrasyon meydana geldiğinde yiv oluşumu da eşlik eder. Plastik özelliğe sahip bir malzemeyi abrasif partiküller aşındırırsa iki farklı modda deformasyon görünür. Birinci modda plastik yiv vardır ve genellikle ploughing olarak adlandırılır. Yüzeyde malzeme kaybı yoktur. İkinci modda ise kesme ismi verilir. Çünkü mikro işlemeye benzerdir ve bütün malzemedan partikül tarafından talaş şeklinde malzeme uzaklaştırılır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. İki farklı abrasif aşınma modu, a) ploughing modu b) kesme modu (Hokkirigawa, 1988)

İki elemanlı abrasyonda, bazı asperitiler ploughing üretirken geri kalanı ise kesme davranışı gösterir. Bu olay iki kontrol faktörüyle belirlenir: Partikülün atak açısı ve diğeri ise ara yüzey kayma mukavemeti ploughing ile kesmeye kadar geçişin olduğu yerde kritik bir atak açısı vardır. Kritik atak açısının değeri mükemmel bir şekilde plastik malzemenin ara yüzey kayma mukavemetine bağlıdır.

Gevrek bir malzeme için çalışma sertleşmesi oranı ve özellikle Young modülü (E) ile yüzey sertleşmesi (H) arasındaki oran gibi elastik özelliklere bağlıdır. E/H oranının yüksek olması daha büyük kritik atak açısı anlamına gelir. Çoğu metal için bu açı 30° ile 90° arasında değişmektedir. Gevrek malzemelerin abrasif aşınması örneğin seramiklerde mikro çatlaklarla sonuçlanır ve plastik akış ihmal edilecek seviyededir. Bu malzemeler için abrasif dalma ile ilgili çekme mukavemeti plastik bölgeden yanal çıkışa doğru çatlak yayılmasına neden olur. Yanal çatlak, bir yivden diğer bir yivle kesişirse veya yüzeye doğru yayılırsa bu malzemedeki malzeme kaybı kırılma mekanizması yoluyla gerçekleşir.

Sonuç olarak, abrasif aşınmanın her zaman kötü bir anlam taşıdığı manasına gelinmemesi lazım. Çünkü kontrollü abrasyon işlemi taşlama ve parlatma, örneğin; optik bileşenlerin parlatılması veya taş ocaklarından mikro çiplere kadar değişik malzeme gruplarının kesilmesi gibi proseslerde oldukça önemlidir.

2.2.1.3. Erosif aşınma

Bir cismin yüzeyine karşı katı veya sıvı partiküllerin çarpması sonucu meydana gelen aşınmaya erozif aşınma denir. Erozif aşınma gaz türbin kanatlarının zarar görmesi, uçakların uçması esnasında toz bulutu tarafından, pompa kompresör çarkının aşınması gibi çok geniş aralıkta meydana gelmektedir. Erozif partikülün özellikleri bu aşınma türünü kontrol etmede önemli bir parametredir.

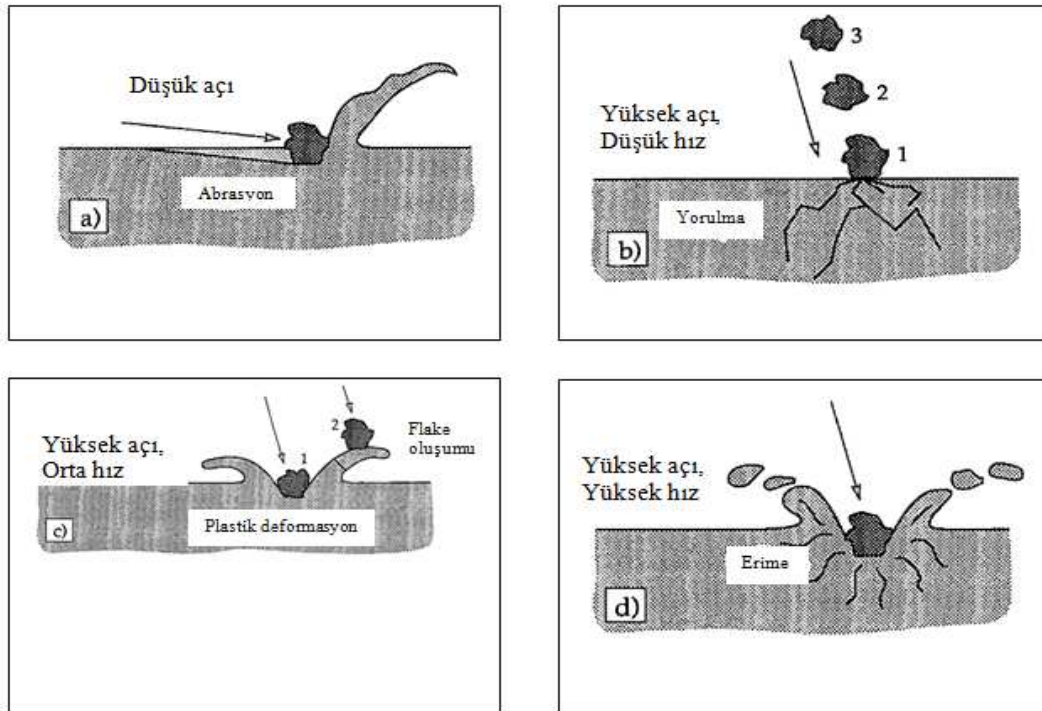
Erozif aşınmanın, üç elemanlı abrazyon aşınmadan temel farkı, aşınmanın sert partiküllerin yüzeyi kazımasından ziyade yüzeye çarpması sonucunda oluşmasıdır. Erozif aşınma aşındırıcı partiküllerin taşındığı veya olduğu ortama göre genel olarak (Soydan, 1996);

- a) Katı partiküllerin oluşturduğu erozyon,
- b) Akışkanların oluşturduğu erozyon,
- c) Kavitatif erozyon,
- d) Kıvılcım erozyon şeklinde sınıflandırılmaktadır.

Erozif aşınma bir çok mekanizmayı içermektedir ve büyük ölçüde bu mekanizmalar tarafından kontrol edilebilir. Bu mekanizmalar:

- Partikül malzemesi,
- Çarpma açısı,
- Çarpma hızı,
- Partikül boyutu.

Partikül sert ve katı durumda ise abrasif aşınmaya benzer bir proses meydana gelir. Sıvı partiküllerin aşındırıcı olduğu yerde abrasyon oluşmaz ve aşınma mekanizması tekrarlı gerilimin sonucunda meydana gelir. Şekil 2.9 erozif aşınma mekanizmasını temsili olarak göstermektedir.

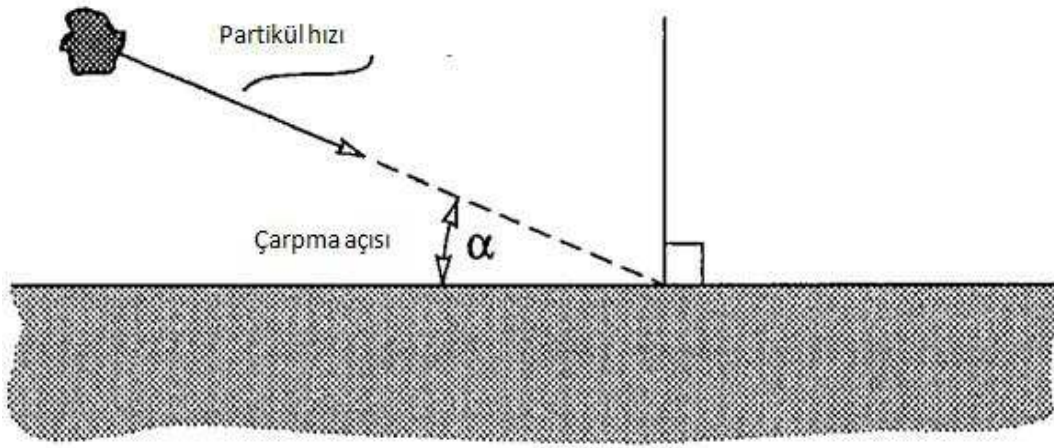


Şekil 2.9. Erozif aşınmada oluşabilecek muhtemel aşınma mekanizmaları (Stachowiak, 1993)

İlk olarak düşük açıyla gelen aşındırıcı partikül katı cisimde aşındırıcı bir etkiye neden olmuştur (Şekil 2.9a). Yüksek açı ve düşük hızla etki eden partiküller malzemede yorulma etkisi yapmıştır (Şekil 2.9b).

Yüksek açı ve orta hızla gelen partiküller malzemeyi plastik deformasyona uğratarken aynı anda malzemede flake oluşumuna da neden olmuştur (Şekil 2.9c). Hem yüksek açı hem de yüksek hızla gelen partiküller katı cismi erimeye maruz bırakmıştır (Şekil 2.9d).

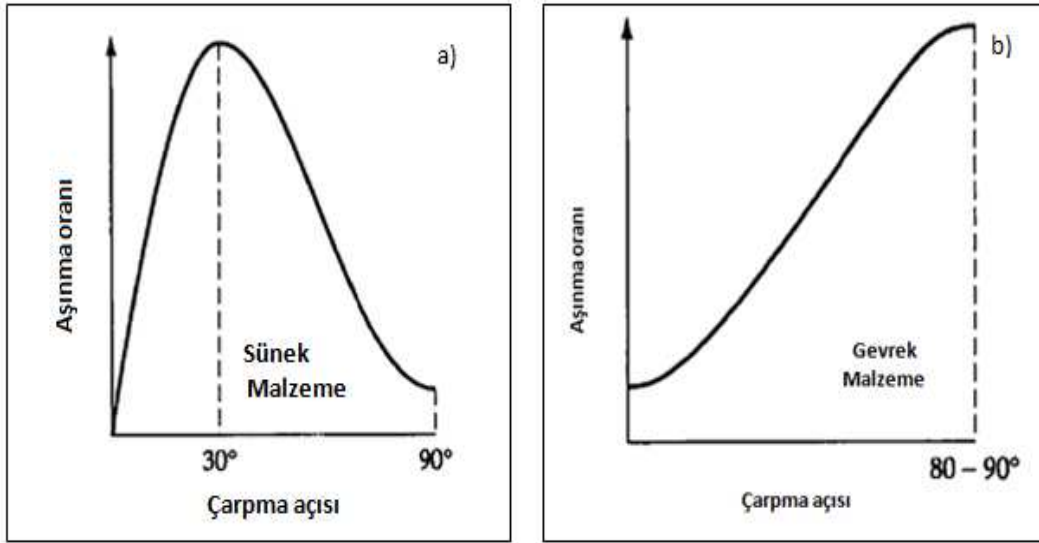
Şekil 2.10 erozif aşınmada yüzey ile partikül arasındaki partikül çarpma hızı ve partikülün takip ettiği yörüngeyi şematik olarak göstermektedir.



Şekil 2.10. Eroziv aşınmada partikül çarpma hızı ve açısının şematik gösterimi (Stachowiak, 1993)

Düşük bir çarpma hızıyla yüzeye etki eden partikülün meydana getirdiği aşınma prosesi abrasyona benzerdir. Çünkü partikül etkiden sonra aşınma yüzeyi boyunca iz yapma eğilimindedir. Yüksek çarpma açısının meydana getirdiği aşınma mekanizması tipik bir erozyondur.

Partikül çarpma açısı $0-90^\circ$ arasında sıralanabilir. Çarpma açısının sıfır derece olduğu zaman aşınma ihmal edilebilir. Çünkü eroziv partiküller yüzeye etki etmez. Yaklaşık olarak 20° kadar nispeten düşük çarpma açısına rağmen şiddetli aşınma olabilir. Eğer partikül sert ve yüzey yumuşak olursa bu şartlar altında oluşan aşınma abrasiv aşınmaya benzerdir. Yüzey kırılkan ise yüzeyin parçalanması ve etki açısının 90° ye yaklaşmasıyla şiddetli aşınma meydana gelir. Sünek ve kırılkan malzemeler için çarpma açısı ve aşınma oranı arasındaki ilişki Şekil 2.11' de gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Gevrek-sünek malzemenin erozif aşınmasına çarpma açısının etkisi (Stachowiak, 1993)

Düşük çarpma açısı ile maksimum erozyon aşınması meydana geldiği zaman sünek erozif aşınma modu, aksine yüksek açı ile maksimum erozif aşınma meydana gelirse gevrek erozif aşınma modu olduğu varsayılır.

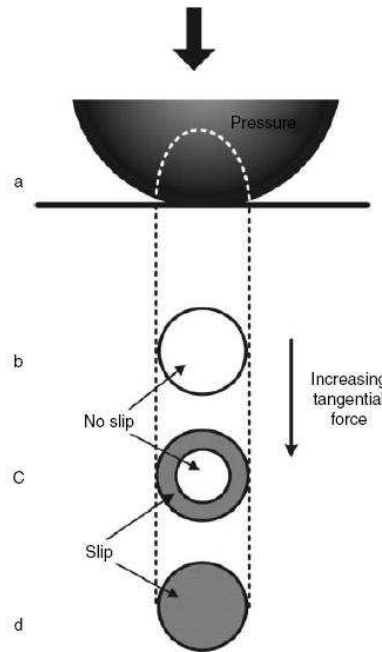
Partikül çarpma hızı aşınma prosesi üzerinde çok güçlü bir etkiye sahiptir. Hız çok düşük olursa partikülün yüzeyde meydana getirdiği gerilim yetersiz olacağından plastik deformasyon oluşur ve aşınma prosesi yüzey yorulmasıdır. Hız örneğin 20 m/s' ye artırıldığı zaman partikülün etki ettiği yüzeyde plastik deformasyon meydana gelir. Bu rejimde çoğu mühendislik bileşenlerinde aşınma genellikle tekrarlı plastik deformasyon yoluyla oluşur. Eğer ki erozif partikül keskin değil veya küresel şekilli ise aşınan malzemede aşırı derecede plastik deformasyona neden olur. Partiküller keskin şekilli ise aşınma yüzeyinde kesme veya gevrek parçalanmalar meydana gelir. Diğer bir yandan gevrek malzemelerde aşınma alt yüzey çatlakları tarafından oluşturulur. Çok yüksek partikül hızında ise aşınma yüzeyinde erimeler meydana gelir (Şekil 2.9d).

2.2.1.4. Fretting aşınma

Fretting terimi kontak halindeki iki katı yüzey arasındaki küçük salınım hareketi olarak ifade edilir. Bu salınımın miktarı 1 ile 100 μm arasındadır. Bu hareket sonucu meydana gelen aşınma türüne fretting aşınma denir.

Fretting aşınma makine bileşenleri arasında meydana gelir. Mekanik kilitler, elektrik konektörler gibi parçalar arasında bu tip aşınma meydana gelmemektedir. Bu aşınma genellikle sabit kontak halinde tekrarlı gerilime maruz kalan veya titreşen mekanizmanın çalışmasıyla birlikte oluşur. Fretting aşınmanın iki temel tipi vardır ve mekanik ve çevresel faktörlerin yapısına bağlıdır. Yüzey yorulma çatlaklarını başlatan tekrarlı yükleme tarafından fretting hasarı meydana geldiği zaman fretting yorulması ifadesi kullanılır.

Kimyasal etkileşimin baskın olduğu proseslerde ise fretting korozyon şeklinde ifade edilir. Çoğunlukla, fretting aşınmanın bu iki türü kendiliğinden oluşur. Metali kaplayan koruyucu film (örneğin; oksit film) mikro yer değiştirmeler sonucu kırılır. Bu kırılma işlemi sonucu ortaya çıkan metal yüzey kolay bir şekilde oksitlenir ve oksidasyon ürünleri abrasiv (aşındırıcı) olarak davranarak yüzeyin zarar görmesine neden olur.



Şekil 2.12. Düz zemine doğru bastırılmış kürenin altındaki elastik gerilim dağılımı (Hutchings, 1992)

Şekil 2.12 fretting yorulmayı tanımlamak için kullanılan 'flat-on-sphere' yi göstermektedir. Eğer ki temas elastik ve uygulama yükünü taşıyorsa kontak basıncı Hertzian kontak basıncına göre kontak dairesinin merkezinde maksimum dağılır ve sınırdaki sıfır bir değerdir. Teğetsel kuvvet kontak yüzey direncini artırır. Sonuç olarak, bir parça yer değiştirme kenarların yakınında olur.

Kontak bölgesi iki kısma ayrılır. Statik sürtünmenin direnci geçtiği kısım olan merkez alan (stickzone), bu kısımda kayma yoktur. İkinci kısım ise mikro kaymayı içeren dairesel alan (slip zone). Şekil 2.12' deki gölgelenmiş bölge slip alandır. Tutma bırakma sınır dairesi kritik kuvvet değeri sıfıra ulaşana kadar artan teğetsel kuvvetle daralır. Bu yüzden, kontak davranışına dört farklı rejimle dikkat çekilebilir: Tutmanın tamamlanması, kayma ve mikro kaymanın karışması, yoğun kayma ve son olarak gidip gelmeli kayma.

En şiddetli fretting yorulması slip alanında meydana gelir ve fretting hareket miktarını da içeren birçok faktör tarafından etkilenir. Fretting yorulma çatlaklarının oluşumuna ve sonradan büyümesine neden olur. Bu yüzden, malzemelerin mikro yapı ve özellikleri ciddi bir şekilde fretting aşınmayı etkiler. Diğer aşınma modlarıyla birlikte ortam ve sıcaklık hem ayrı olarak hem de birlikte fretting' i etkiler. Kimyasal saldırı önemli olduğu zaman fretting korozyonu da içerir. Havada fretting yüzeyinde oksit oluşur. Bu oksit tabaka yüzeylerde katı yağlayıcı gibi görev yapar ve ortam sıcaklığından daha yüksek sıcaklığın zarar veren etkisini geciktirir. Aslında hiç oksit tabaka olmasa daha iyidir. Çünkü oksitlerin etkisi malzeme türü, oksit kalınlığı, kontak şartları ve fretting çevresine bağlıdır.

Fretting aşınmayı azaltmak için, mikro yer değiştirme miktarını azaltma, kontak çiftinin abrasyon direncini artırma, ortam şartlarına karşı korozyon direncinin artırılması, titreşim önleyici özel cihazlar kullanma gibi yöntemlere başvurulabilir.

2.2.1.5. Koroziyon aşınma

Korozyon ortamla kimyasal veya elektrokimyasal etkileşimden dolayı meydana gelen katı hata olarak tanımlanır. Koroziyon aşınma, aşınma davranışına önemli bir etkisi olan sürtünme yüzeylerinde oluşan korozyon ürünlerinin bir sonucu olarak meydana gelir. Koroziyon aşınma bazı faktörlere bağlıdır.

Bunlar;

- a) Kontak yüzeylerinin mikro yapısı ve kimyasal kompozisyonu,
- b) Kontak yüzeylerinin porozite ve rijitliği,
- c) Tane sınırları,
- d) Kontak yüzeyinde meydana gelen çalışma sertleşmesinin derecesi,
- e) Yüzey içinde bulunan gerilimin durumu,
- f) Kontak yüzeyleri arasındaki elektrik potansiyeli ve akım yolları,
- g) Kontak bölgesindeki sıcaklık ve basınç.

Korozif aşınma ifadesinde kötü tribolojik ortamdaki şiddetli aşınmadan ayrılabilirdiği iddaa edilmektedir. Aksine bu terim, nispeten normal ortamda meydana gelen hafif aşınma için oksidatif aşınma olarak adlandırılmaktadır. Oksidatif aşınma, sürtünme yüzeyinde oksit oluştuğu zaman meydana gelir. Bu oksit film hava veya içerisinde sürtünme ve aşınmayı belirgin bir şekilde etkileyen yağlayıcı ile metalik yüzeyin reaksiyonuyla üretilebilir. Diğer yandan, yoğun metal deformasyonu ve yüksek kontak sıcaklığı, oksidasyon oranını belirgin bir şekilde etkileyen sürtünme yoluyla üretilir. Oksit film iki şekilde önemlidir. İlk olarak, bu film sürtünme yüzeyini şiddetli aşınma ve kilitlenmeden korur. Dolayısıyla aşınma prosesini azaltır. Temas edilmemiş yüzeylerin kaynamasını oksit film korur. Bu durum vakumlu ortamda meydana gelir. İkinci olarak, oksidatif aşınma ürünleri yüksek sertliğe sahiptir ve abrasif aşınmayı başlatabilir.

Oksidatif aşınma deformasyonu süresince, adsorpsiyon ve kimyasal reaksiyonlar kendiliğinden oluşur. Deformasyon en ince yüzey tabakalarını aktif hale getirir ve bu yüzey tabakalarını adsorpsiyon, difüzyon ve kimyasal reaksiyonlarla olan hassasiyetini artırır. Sonraki aşamada plastik gerinime çok büyük güç sarf eder. Tabaka yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahip alanları ve birçok mikro yapı kusurlarını içeren sınırlandırılmış plastik deformasyonun bir sonucu olarak oluşur. Sınırlı yağlama şartları altında, aktiflendirilmiş tabakanın kalınlığı yaklaşık olarak 100-1000 µm kadardır. Bu tabaka, yağlayıcı içinde sınırlı miktarda çözünmüş oksijenle etkileşir ve metal ile güçlü bir şekilde bağlanmış düzgün kalınlığa sahip oksit bir filme dönüşür.

Oksidatif aşınmanın başlıca özellikleri: Ana malzeme içinde herhangi bir kırılma yoktur, sürtünme boyunca üretilen ince yüzey tabakalarının içinde kırılma belirir. Mekanik ve kimyasal proseslerin dinamik dengesi sonucu oksit filmler oluşur ve sonra kırılır.

2.2.1.6. Yorulma aşınması

Yorulma kademeli kırılmayla sonuçlanan tekrarlı gerilmelerden dolayı malzemenin durumunda meydana gelen değişim olarak bilinir. Bu karakteristik özellik çatlakların üretimini ve gelişimini artırır. Hemen hemen bütün aşınma modlarına eşlik eden sürtünmeli kontakta benzer proses meydana gelir. Sürtünmeli kontak yuvarlanmalı ve gidip gelmeli kaymalı süresince tekrarlı gerilime maruz kalır. Ayrıca, sürtünme yüzeyinin her bir asperitisi karşı yüzey asperitileri tarafından bir dizi yüklemeye maruz bırakılır. Sonuç olarak yüzey ve alt yüzey bölgesinde iki değişik gerilim alanı üretilir. Bu alanlarda malzeme yorulduğu için bu bölgelerde aşınma partikülleri üretilir, çatlaklar oluşur ve yayılır. Bu procese sürtünme yorulması denir.

Hacimsel yorulmadan farklı olarak sürtünme yorulması sadece yüzey ve alt yüzey bölgelerinde sınırlanır. Sürtünme yorulmasından dolayı katı yüzeylerden malzeme kaybı yorulma aşınması olarak ifade edilir. Gerilme geriniminin meydana geldiği veya maksimum teğetsel gerilimin olduğu noktalarda yorulma çatlaklarının başladığı bilinmektedir. Teorik ve deneysel çalışmalar gösteriyor ki kontak yüklemesi altında maksimum teğetsel gerilimin konumu sürtünme katsayısına bağlıdır. Düşük sürtünme katsayısına sahip olması durumunda maksimum kayma geriliminin noktası yüzeyin altına yerleşir ($\mu < 0.3$). Sürtünme katsayısı arttığı zaman maksimum kayma mukavemetinin noktası yüzeyde ortaya çıkar ($\mu > 0.3$). Diğer bir yandan, bir cisim dik ve teğetsel yüklemeye maruz kalırsa gerilim gerinimi yüzey ve alt yüzey bölgelerinde görünür. Bu yüzden, çatlaklar yüzey ve/veya üstünde çekirdeklenir.

Yüzey üzerindeki çizik, çentik, iz ve çukur gibi kusurlar ile alt yüzey bölgesindeki kirlilikler, boşluklar, çukurlar gerilimi toplar ve yorulma çatlaklarını başlatır.

Yüzey ve alt yüzey çatlakları tekrarlı gerilimden dolayı kademeli olarak büyüyerek birbirlerine doğru yaklaşır ve yüzeye çıkarlar. Belirli bir yükleme sayısından sonra aşınma partikülleri yüzeyde görünür.

Yorulma aşınması birçok faktörden etkilenir. Bunlar; katı yüzeyin fiziksel, mekaniksel ve kimyasal özellikleri, yağlayıcı (sistemde var ise), ortam, yüzey kalitesi ve sıcaklık. Örneğin; yorulma çatlakları atmosfer içindeki neme karşı çok duyarlıdır ve bundan dolayı büyür.

2.3. Yağlama

Yağlama, birbirine göre bağıl hareket eden iki yüzeyi, yüzeye zarar vermeden kolayca yüzeyden kopabilen bir sıvı filmi yardımı ile ayırmaktır. Temasta ve birbirine göre izafi harekette olan iki elemanın temas yüzeyleri arasında sürtünme ve buna bağlı olarak aşınma, sıcaklık artışı ve enerji kaybı meydana gelmektedir. Bu olayların etkisini azaltmak için, alınması gereken tedbirlerin başında yağlama gelir.

Yağlamanın ana amacı sürtünmeleri azaltıp, parçaların ömrünü uzatarak motordan en fazla güç elde edilmesini sağlamaktır. Hareketi kolaylaştırmak daha fazla verim almak ve çalışan parçaların ömrünü uzatmak için, parçaların birbiriyle doğrudan doğruya sürtünmelerini önlemek gerekir. Dünya çapında yapılmış olan istatistiklere göre makine elemanlarının yaklaşık % 70' inin işe yaramaz hale gelmesinin nedeni aşınmadır. Yağlama ile sistemin verimi çok az artırılsa bile, tasarruf edilen paranın tutarı milyarları geçmektedir. Ayrıca meydana gelen malzeme kayıpları ve onarım için harcanan zaman göz önüne alınırsa yağlamanın önemi daha iyi anlaşılır (Course, 1967).

Yağların temel özellikleri koruyucu ve kaydırıcı olmalarıdır. Fakat belirli süre kullanılan yağların bu özellikleri bozularak motor parçaları üzerinde aşınmalar meydana gelmekte, motorun bakım ve revizyona girme periyodu kısalmaktadır (Anonim, 2003). Parça deformasyonuna bağlı olarak motor karakteristikleri de değişmektedir. Yağ ömrü tüm araçlar için genel bir süre ile belirtilmekte ve o süre sonunda değiştirilmesi tavsiye edilmektedir.

Halbuki yağ ömrüne etki eden parametreler taşıta göre değişim göstermektedir. Bunlar aracın markası, modeli, çalışma koşulları, iklim şartları vb. olarak sayılabilir. Dolayısıyla farklı çalışma koşullarına sahip olan araçların yağ değişim periyotları da değişmektedir.

Yağlardan optimum seviyede faydalanılması ve yağ tüketiminin azaltılması için yağın analiz edilerek değiştirilmesinde fayda görülmekte ve kullanılmış yağların analizinden motorun durumu hakkında genel bilgi edinilebilmektedir. Son yıllarda motorlarda kullanılan yağlar geliştirilerek değiştirilme süreleri uzatılmakta, yağ viskoziteleri ve sürtünme kuvveti azaltılarak egzoz emisyonları iyileştirilmekte ve yakıt ekonomisinde de iyileşme sağlanmaktadır.

Düşük viskoziteli sentetik ve yarı sentetik yağların daha az uçucu olmaları nedeniyle, kullanımları sırasında yağ tüketimleri azalmaktadır. Bu tür yağlarda, sürtünmeyi azaltıcı katkı maddeleri kullanılarak bilhassa sınır sürtünme şartlarında kaydırıcılık artırılarak metal yüzeyler korunmaktadır (Arvuz ve diğ., 1978).

Motorlarda kullanılan yağlama yağlarının başlıca görevleri; birbiri üzerinde hareket eden motor parçalarının, doğrudan doğruya temas etmesini önleyerek, parçaların aşınmasını ve güç kaybını azaltmak ve ısınan motor parçalarının soğutulmasına yardım etmektir. Bunun yanında yağlama yağının diğer görevleri, parçalar arasında oluşan pislikleri temizlemek, silindir cidarı ile piston-segman arasındaki boşlukları doldurarak sızdırmazlık sağlamak, yataklarda ve diğer hareketli motor parçalarındaki vuruntuyu yok ederek gürültü ve sesleri azaltmak ve motor parçalarının ömrünü arttırmaktır (Hamrock, 1994).

Parçalar yağsız çalışacak olursa, meydana gelecek sürtünmeler nedeniyle çok kısa zamanda görevini yapamaz duruma gelirler. Sürtünme nedeni ile meydana gelen ısı, motor parçalarının mekaniksel dayanımlarını tehlikeye düşürür. Yatak malzemelerinin eriyip akmasına, parçaların kırılmasına neden olur. Piston, segman ve silindirler çabuk aşınırlar. Amaca uygun şekilde çalışan yağ ve yağlama donanımı, bütün hareketli parçaların yeterince yağlanmasını sağlayıp, parçalar arasında sıvı sürtünmeyi sağlamalıdır (Cunningham, 1996).

2.3.1. Yağlama rejimleri

Piston segmanlarının yağlanması söz konusu olduğunda, segman ve silindir gömleği arasındaki rölatif kayma hızı strokun ortasında maksimum ve ölü noktalarda sıfırdır. Bu rölatif hız, hareketli parçalar arasında yağ filminin oluşmasını sağlar. Böylece orta strokta, kompresyon segmanları ve silindir gömleği arasında hidrodinamik yağlama koşulları ile çok tatminkâr bir yağ filmi kalınlığı oluşacaktır. Fakat ölü noktalarda ise, yağ ile temas sıfır hızında olmakta, bu da uygun yağ filmi kalınlığının olmamasına ve elastohidrodinamik (karışık) ve sınır yağlama rejimini oluşmasına yol açmaktadır. Böylece ölü noktalardaki sürtünme ve aşınma miktarı önemli derecede artış göstermektedir (Gautam, 1999).

İçten yanmalı motorlarda ÜÖN' da yanma boyunca minimum yağ kalınlığı ($\sim 1\mu\text{m}$) oluşmaktadır. Segman üzerindeki gaz basıncı artışı ile birlikte yağ filmi kalınlığını azaltmakta ve genişleme zamanında ise artan piston hızı ile birlikte yağ filmi kalınlığı artmaktadır. Motorun daha yüksek yüklerde çalışma koşullarında gaz basıncı artarak ve segmana gelen yükler artmaktadır. Ayrıca basınç artışı yağ sıcaklığını artırmakta ve yağın viskozitesini düşürmektedir. Bu sebeple emme, sıkıştırma ve eksoz zamanları boyunca yağ filmi kalınlığı azalmaktadır. Motorun bir çevrimi esnasındaki film kalınlığındaki değişim sınır yağlama rejiminden çok ince hidrodinamik yağlama rejimine kadar değişik sürtünme rejimlerinin oluşmasına yol açmaktadır. Yağ filmi 1 ppm altına indiği zaman yüzey pürüzleri teması başlayarak sürtünme katsayısı artmaktadır (Heywood, 1988).

2.3.1.1. Hidrodinamik yağlama

Hidrodinamik yağlama rejiminde oluşan yağ film kalınlığının yüzey pürüzlülüğüne oranı iki yüzeyi birbirinden ayıracak düzeydedir. Bu durumda, sürtünme viskoz akışkan içindeki kesme kuvvetlerinden kaynaklanır. Bu yağlama rejiminde yüzeylerin tamamı, yağ filmi tarafından birbirinden ayrılmış olup ve yükü taşımak için filmdeki basınçların oluşumu klasik hidrodinamik hareket ile sağlanmaktadır. Hidrodinamik yağlama rejiminde yağın dinamik viskozitesi, başlıca yağ karakteristiğidir (Priest, 2000).

Hidrodinamik yağlama rejimi, motor yatakları, piston eteği-silindir gömleği ve silindir-segman arasında yüksek kayma hızlarında oluşmaktadır (Heywood, 1988). Düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip silindir yüzeyleri kullanılarak, hidrodinamik yağlama rejiminde çalışma mümkün olmakta ve dolayısıyla sürtünme ve aşınma önemli ölçüde düşürülebilmektedir (Uras, 1984).

Hidrodinamik sürtünme, birbirine göre bağıl olarak hareket eden veya kayan iki yüzey arasında yeterli sıvı filminin ve basıncın oluştuğu sürtünme şeklidir. Harekete karşı direnç yağlayıcının viskozitesi ile oluşmaktadır. Hidrodinamik yağlamada, sürtünme katsayısı çok düşüktür ($f = 0,001$ ila $0,005$) ve aşınma teorik olarak sıfırdır. Hidrodinamik yağlama şartları altında düşük viskoziteli yağlar daha az direnç göstererek iç sürtünmelerin azalmasına sebep olmakta ve bu sayede yakıt ekonomisi sağlamaktadır. Ancak düşük viskoziteli yağların kullanılmasını yağ tüketimini artırırken yağ filmi kalınlığının azalmasına hatta yağ filminin yırtılmasına neden olabilmektedir (Priest, 2000).

Hidrodinamik yağlamada, sistemlerin tribolojik davranışı için mekanik enerjinin dağılımında aşağıdaki görüşler önemlidir (Priest, 2000).

- a) Operasyon değişkenleri hız, sıcaklık, basınç ve film kalınlığı yağ filmini oluşturur.
- b) a ile sistem geometrisi arasındaki ilişki, malzemeler ve yağlayıcı parametrelerine bağlıdır.
- c) Yayılan mekanik enerji ve sürtünme katsayısı değeri, a ve b' ye bağlıdır.
- d) Hidrodinamik yağlama, a, b ve c ile ilgilidir.

Hidrodinamik yağlama rejiminde sürtünme katsayısı, hız ve viskozitenin artması ya da yükün azalması ile artmaktadır (Uras, 1984).

2.3.1.2. Elastohidrodinamik yağlama

Burada yüzeyler yine hidrodinamik yağlamadaki (yüzeyler yağ filmi tarafından tamamı ile birbirinden ayrılmış) gibidir. Ancak yüzey teması hidrodinamik yağlamaya göre daha yoğundur. Bu yağlamada, filmler daha incedir. Aynı zamanda, yüzeylerdeki elastik değişimler ve dinamik viskozitedeki basınç daha etkilidir (Priest, 2000).

2.3.1.3. Karışık yağlama

Karışık yağlama rejiminde, viskozitede ya da kayma hızındaki düşüş veya yükteki artış sonucunda yağ filim kalınlığı düşer ve metal metale sürtünme hidrodinamik sürtünmeye eklenir (Priest, 2000). Karışık yağlama rejiminde yükün bir kısmı ince yağ filmi tarafından diğer kısmı ise temas halindeki yüzey pürüzleri tarafından taşınmaktadır. Yüzeyler arasındaki yağ sebebiyle pürüz uçları teması görülür. Bu yağlama rejiminde başlıca karakteristik yük, hız ve viskozite ile belirlenmekte ve (elasto) hidrodinamik ve sınır yağlama rejimi oluşmaktadır. Sürtünme, yüzey pürüzleri ve viskoz akışkanın kesme direncinden oluşmaktadır. Hidrodinamik yağlama rejiminin aksine karışık yağlamada sürtünme kuvveti hız ve viskozite artışı ya da yükün azalması ile azalmaktadır (Uras, 1984).

Hidrodinamik yağlama rejiminde, yağ filmi kalınlığı çok incelendiğinde hidrodinamik yağlama rejimi kopar ve yük artık yüzey pürüzleri tarafından taşınır. Sıvı sürtünmeye metal metale temas halinde yüzey pürüzleri sürtünmesi eklenir. Hem hidrodinamik hem de sınır yağlama şartı hakim olmaktadır. Yüzey yapısı, hidrodinamik rejimden karışık yağlama rejime geçişi belirler. Pürüzlü yüzeylerde daha düşük yüklerde geçiş sağlanır. Ani yük veya hız değişimi ya da titreşimli mekanizmalarda geçiş daha fazla olur. Silindir segman arasındaki temas ani hız, yük ve sıcaklık değişiminden dolayı ölü noktalarda (ÜÖN ve AÖN) karışık yağlama rejimine geçmektedir. Kayma anında yağ filmi koparak aralıklarla metal metale temas etmekte ve bunun sonucu olarak sınır sürtünmeye geçerek sürtünme katsayısı artmaktadır (Heywood, 1988).

2.3.1.4. Sınır yağlama

Sınır yağlama rejimine düşük hızlar, düşük viskoziteli yağlar ve yüksek yükler sebep olmaktadır. Sınır yağlama şartlarında, yük tamamen temas halindeki yüzey pürüzleri tarafından karşılanır. Burada fiziksel ve kimyasal performansı tanımlayan yüzeylere yapışmış, ince film hareketleri vardır. Yağlayıcının dinamik viskozitesi önemli değildir. Ancak katkı malzemesinin önemli bir rolü vardır (Priest, 2000). Sürtünme katsayısı hız, yağ viskozitesi ve yükten bağımsızdır. Sürtünme katsayısı sürtünme kuvvetinin normal yüke oranıdır.

İki yüzey arasındaki sürtünme ve aşınma davranışı yüzeylerin özelliklerine, çevre şartlarına ve aralarında oluşacak yağlayıcı özelliklerine ile belirlenmektedir (Uras, 1984).

Sınır yağlama rejimi, bağıl hareket eden yüzeyler arasında yağlayıcı ve yüzey özelliklerine bağlı olarak belirlenir. Sınır yağlama rejiminde önemli yüzey özellikleri; pürüzlülük, sertlik, esneklik, şekil değiştirilebilirlik, kayma gerilmesi, ısı iletkenlik ve yağlayıcının ıslatma kabiliyetidir. Yağlayıcının, yağlayıcı yüzeyleri ya da kimyasal yapısı başlıca önemli yağlayıcı özellikleridir. Katı yüzeyler arasında moleküler tutuculuk yağlama kabiliyetini belirler. Sınır yağlamada, yüzey pürüzlülüklerinden dolayı gerçek temas alanı yüzey alanından çok daha azdır.

Farklı malzemeler için, daha yumuşak malzeme özelliğine sahip olan malzeme sürtünme davranışlarında daha etkindir. Sınır yağlamada yüzeyler arasında oksit tabakası oluşmakta ve kayma gerilmesini azaltarak sürtünme katsayısını düşürmektedir. Sınır yağlama şartında sürtünme katsayısı hızdan bağımsızdır. Motor parçaları arasında (yataklar, piston ve segmanlar) ilk çalıştırma ve durma anlarında sınır yağlama rejimi oluşmaktadır. Ayrıca normal çalışma anlarında üst segman ve silindir gömleği arasında ÜÖN ve AÖN' da büyük yükler ve düşük hızlardan dolayı sınır yağlama rejimi oluşmaktadır (Heywood, 1988).

2.4. Katı Yağlayıcılar

Katı yağlayıcılar yalnız başlarına, sıvı yağların veya greslerin içine karıştırılarak kullanılır. Bu son durumda katı yağlayıcılar katık rolünü oynamaktadır. Pratikte en çok kullanılan katı yağlayıcılar grafit veya molibden disülfittir. Toz veya ince ve düzgün levhacıklar şeklinde kullanılan grafit; yüksek sıcaklıklarda (500 °C' nin üstünde) yalnız başına; diğer hallerde yağ veya gres yağı ile bir süspansiyon oluşturacak şekilde karıştırılarak kullanılmaktadır. Grafitin başlıca yağlama özelliği, madensel yüzeylerin üzerinde, kayma gerilmesi küçük ve kopma mukavemeti yüksek bir tabaka oluşturmasından ileri gelmektedir. Bu özellikler hava veya suyun bulunduğu ortamda ortaya çıkar. Hava ve suyun bulunmaması halinde, örneğin vakumda grafit, yağlama özelliği bir yana çok kuvvetli bir aşındırma elemanıdır. Molibden disülfid, madensel yüzeylerin üzerinde grafitte benzer olarak bir tabaka oluşturur. Bu tabakanın oluşması hava veya suya bağlı değildir. Bu nedenle vakumda veya oda sıcaklığında molibden disülfid çok iyi bir yağlama özelliğine sahiptir. Grafit ve molibden disülfidin ısı stabiliteleleri çok iyidir. Grafitin özgül ağırlığı daha küçük olduğundan sıvı ile grafitin karıştırılmasıyla elde edilen karışım, molibden disülfidinkinden daha stabildir. Yağlayıcı madde olarak kullanılan grafit ve bilhassa molibden disülfid çok temiz olmaları gerekir; aksi durumda yüzeyleri şiddetli bir şekilde aşındırırlar. Bazı durumlarda grafit ve molibden disülfid döküm sırasında metalik malzemeye karıştırılarak kullanılır (Merkezi yağlama sistemleri, 2014).

2.4.1. Molibden

Sert, kırılğan, gümüş beyazı metalik bir elementtir. İlk olarak İsveçli kimyager Carl Wilhelm Scheele tarafından 1778 senesinde molibdenit mineralinin sülfür minerallerinden ayrılması esnasında bulunmuştur. Sembölü Mo, atom numarası 42 ve atom ağırlığı 95,94' tür. Peryodik tabloda krom ve tungstenin de bulunduğu VI B grubundadır. Kimyasal özellikleri bu iki elemente benzer. Yüksek ergime noktası, yüksek hararete mukavemeti, ısıyı iyi iletmesi ve ısı ile az genleşmesi gibi üstün özelliklere sahiptir. Bu özellikleri sebebiyle 1100 °C üstündeki demir ve çelik sanayisinde kullanılır. Molibden 2617 °C' de erir. Bu özelliği ile metaller arasında altıncı sırayı alır. 4639 °C' de kaynar. Özgül ağırlığı 10,2 g/cm³ tür.

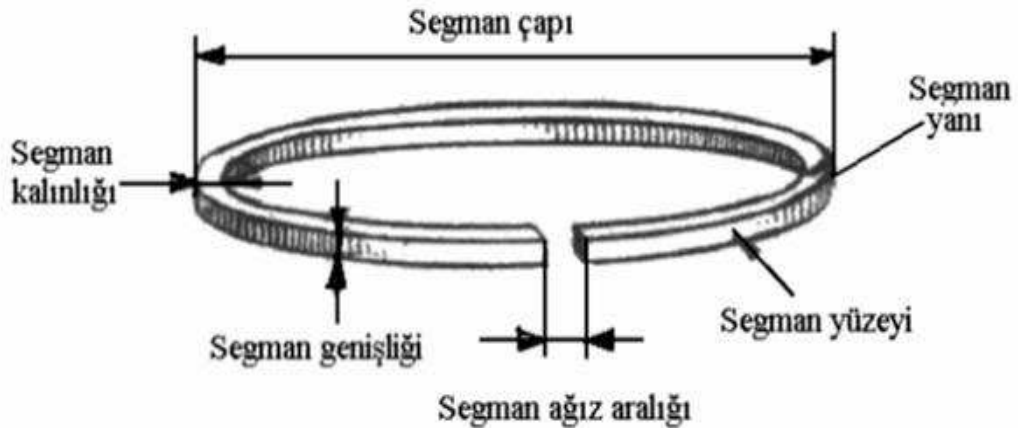
Canlı hücrelerinde eser miktarda bulunur. Molibden yer kabuğunda tungsten kadar bol, fakat dağınık olarak bulunur. Serbest halde bulunmaz. En çok bulunduğu mineral molibdenit (molibden disülfür, MoS_2)'tir. Molibden' in tabiatta bulunan yedi izotopu Mo-92, Mo-94, Mo-95, Mo-96, Mo-97, Mo-98 ve Mo-100'dür. Molibden bileşikleri ekseriya oksitler halindedir. En önemli bileşikleri molibden dioksit (MoO_2), molibden trioksit (MoO_3)'tir. Molibden kükürtle de sülfür bileşikleri meydana getirir. Mesela molibdenit olarak bilinen molibden disülfür (MoS_2) en önemli molibden cevheridir. Bundan başka halojenürler tellür ve selenür bileşikleri de vardır. Bileşiklerinde 2+, 3+, 4+, 5+ ve 6+ değerliklerini alabilir. En kararlı hali 6+ değerlikli halidir (Molibden, 2014).

Molibden sülfür (MoS_2) özellikle yüksek sıcaklıklarda iyi bir yağlayıcıdır. Saf metal halindeki molibden, tel, şerit, çubuk veya levha şekline getirilir. Molibden ayrıca, bisülfür halinde, 400-500 °C' lere kadar katı yağlayıcı madde olarak ya da greslerde, yağlarda katkı maddesi olarak kullanılır. Co-Cr-Mo alaşımlarındaki Mo dayanıklılık ve korozyon rezistansı sağlar (Wikipedia, 2014).

BÖLÜM 3. SEGMANLAR VE TRİBOLOJİSİ

Segmanlar, zamanların oluşmasına yardımcı olan piston üzerindeki sızdırmazlık elemanlarıdır. Zamanların oluşumunda meydana gelen yüksek sıcaklık nedeniyle pistonun genişerek sıkışıp kalmasını önlemek için piston başında fazla boşluk vardır. Bu nedenle piston başına takılan segmanlar, dört zamanın oluşumunda çok önemli görevler yapar.

Segmanlar yaylanarak silindir yüzeyine belli bir basınçla oturması için ve pistondaki yuvalarına kolayca sökülüp takılmalarını sağlamak için Şekil 1' deki gibi bir noktadan kesilmiştir. Bugün özellikle, seri yapımda kolaylık sağlaması nedeniyle segmanlar düz ağızlı olarak yapılmaktadır. Otomobil motorlarında kullanılan segmanların ağız aralıkları genellikle düz, ağır hizmet motorlarındaki ise, sızdırmazlığı daha iyi sağlamak için eğik, bindirmeli ya da geçmeli yapılmıştır.



Şekil 3.1. Segmanın kısımları

Piston başında bulunan segmanlar, silindir cidarlarına belli bir basınç yaparak zamanları oluşturur. Örnek: Emme zamanında piston Ü.Ö.N' den A.Ö.N' ye inerken karter tarafındaki havanın yanma odası tarafına geçmesini önler, silindirde iyi bir vakum oluşmasını ve emme zamanında karışımın silindire dolmasını sağlar.

Sıkıştırma zamanında ise piston, A.Ö.N' den, Ü.Ö.N' ye çıkarken silindirdeki karışımın kartere kaçmasını önleyerek yanma odasında sıkışmasını sağlar. İş zamanında ise yanmış gazları sızdırmadan, yalnız piston başına etki yapmasını sağlayarak motordan en yüksek verimin alınmasını sağlar. Ayrıca egzoz zamanında yanmış gazların kartere sızmasını önleyerek motor yağının özelliğinin bozulmasına engel olur.

Segmanlar silindir yüzeyindeki fazla yağı sıyrarak pistonla silindir arasında ince bir yağ filminin oluşumunu temin ederek hem silindirlerin yağlanmasını sağlar hem de motorun yağ yakmasını önler.

Ayrıca segmanlar piston başındaki yüksek ısıyı, silindir yüzeyine ve oradan da soğutma suyuna ileterek pistonların soğumasına yardım eder. (Megep, 2007)

3.1. Segman Malzemeleri

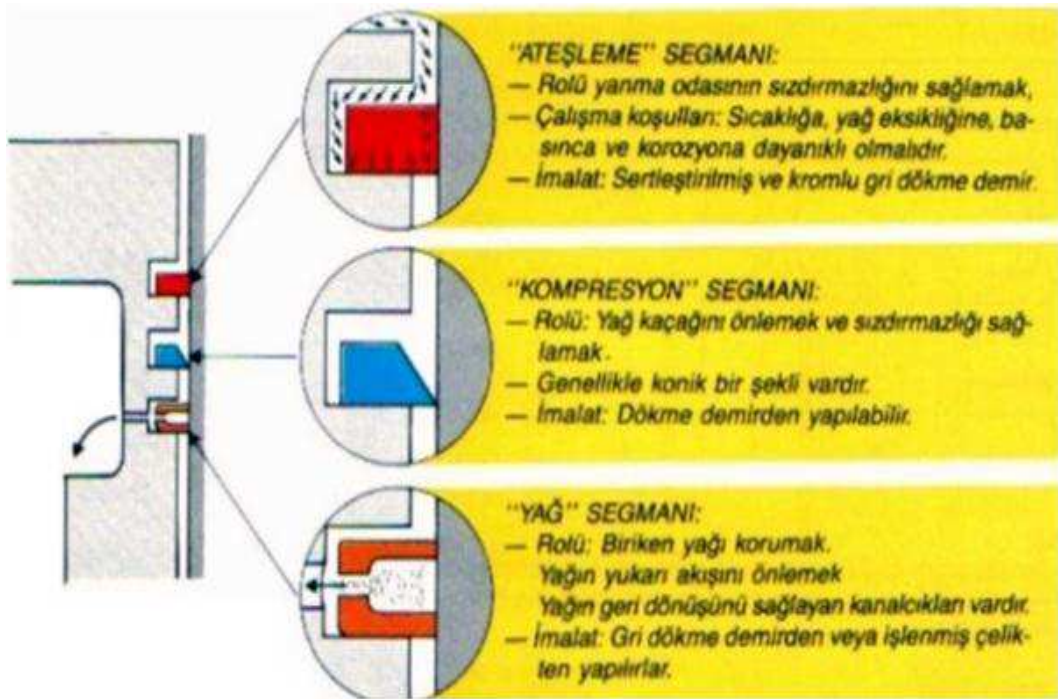
Segmanlar, genellikle dökme demir, çelik ve çelik alaşımlarından silindirik ya da eksantrik tipte, çevrelerindeki bir yerden kesilerek yapılırlar. Çelik alaşımlar iyi bir sürtünme yüzeyi oluşturduğu gibi motorda meydana gelen yüksek sıcaklık ve yüksek basınca karşı dayanarak uzun zaman esnekliklerini kaybetmeden görevlerini yapmaktadır.

Dökme demirler , % 2' den fazla oranda karbon içeren demir-karbon alaşımlarıdır. Başlıca çeşitleri Kır, Temper, Beyaz, Alaca ve Küresel grafitli dökme demirlerdir. Bütün dökme demirlerin yapısında genel olarak % 2-4 C, % 0,4-3 Si, % 0,4-0,8 Mn ve % 0,1-0,8 P bileşenleri bulunur.

Demir dökümlerin mekanik özelliklerini en fazla etkileyen bileşen karbondur. Yapıdaki karbon, ya bileşik halde (sementit) ya da serbest halde (grafit) olarak bulunur.

3.2. Segman Çeşitleri

Segmanlar, genel olarak sıkıştırma (kompresyon) ve yağ segmanları olmak üzere iki kısma ayrılırlar. Kompresyon segmanlarını da, sıkıştırma ve kazıyı segmanlar olarak ayırmak mümkündür.



Şekil 3.2. Kompresyon ve yağ segmanlarının pistondaki yerlerinin gösterilişi

Kompresyon segmanları pistonla silindir arasında sızdırmazlık görevini yaparlar. Kompresyon segmanlarının görevlerini istenilen şekilde yapabilmeleri için çeşitli biçimler verilmiştir. Dikdörtgen konik ve trapez kesitli segmanlar bu gruba girmekte olup, pistondaki yuvaya takılır.

Yağ segmanlarının görevleri silindir yüzeylerinde biriken yağı sıyrarak ince bir yağ katmanı (filmi) oluşturmak, yağın yanma odasına geçmesini önlemek ve sıyrıldığı yağı kanallarından, pistondaki deliklerden geçirerek dönüşünü sağlamaktır.

Yağ segmanları dökme demir ya da çelik alaşımlarından, hizmetin özelliğine göre değişik tip ve biçimlerde yapılırlar.

Kompresyon ve yağ segmanları silindir çevresine gerekli şekilde basınç yaparak yağların yanma odasına çıkmasını ve dolayısıyla motorun yağ yakmasını önler. Eğer bir motorda her iş zamanında, bir damla yağ yanma odasına çıkıp yanarsa motor her üç kilometrede bir litre yağ yakar. Hâlbuki segmanları iyi durumda olan motorlarda binlerce kilometre yol alındığı hâlde, hiç yağ eksilmesi olmaz.

3.3. Segman Tribolojisi

Triboloji, “bir izafi hareket içinde bulunarak birbirlerine etki eden yüzeylerin ve bunlarla ilgili olayların bilimi veya tekniği” olarak tanımlanmaktadır. Yunanca sürtünme anlamına gelen tribos kelimesinden türetilen triboloji; sürtünme, aşınma ve yağlamanın bilimsel incelenmesini ve tribolojik bilgilerin teknik uygulanmasını içermektedir (Zumgahr, 1987).

İçinde aşınma ve sürtünme olaylarının gerçekleştiği teknik sistemlere tribolojik sistem denilmektedir. Mühendislik malzemelerinin sürtünme ve aşınma davranışlarının araştırılmasında mekanik sistemleri bir tribolojik sistem olarak dikkate almak gerekir. Yani aşınma olayı bir sistem bütünlüğü içinde ele alınmalıdır (Karamış, 1985).

Triboloji alanındaki araştırmalar genellikle sürtünme katsayısının ve aşınma oranlarının belirlenmesi, sürtünme ve aşınmayı etkileyen doğal mekanizmaların bulunması (ortam koşulları, yük miktarı, hız, vb.), sürtünme ve aşınmayı azaltacak malzemelerin ve yağların bulunması konularını içerir (Yaman, 2009).

Makine elemanlarının ortalama % 70' inin hurdaya ayrılma sebebi aşınmadır. Bunun sonucu olarak meydana gelen malzeme kayıpları, aşınan parçaların yenileriyle değiştirilmesi zorunluluğu, makinelerin bakım-onarım faaliyetleri için harcanan zaman ve emek ve bu faaliyetler için istihdam edilen teknik personel, sürtünme sonucu oluşan enerji kayıpları göz önüne alındığında tribolojinin önemi anlaşılmaktadır (Vikipedi-Şafak, 2008).

Triboloji biliminin ana konusu, bağıl hareket halinde olan iki yüzeyin etkileşimi esnasında ortaya çıkan sürtünme, aşınma ve bunların etkilerinin azaltılmasına yardımcı olan yağlama ve mühendislik malzemeleridir (Şafak, 2008).

Triboloji biliminin ana konusu içinde yer alan üç temel tanımlamayı aşağıdaki şekilde yapabiliriz:

- a) Sürtünme kuvveti: Bir cisim diğer bir cisim yüzeyinde bağıl olarak hareket ederken yada hareket etmek üzere iken dışarıdan bir kuvvetin etkisi altında iki cismin temas ettiği ara kesit düzlemi boyunca teğetsel olarak etkiyen direnç kuvvetidir.
- b) Aşınma: Cisim yüzeyinde bağıl hareket neticesi gerçekleşen malzeme kaybı.
- c) Yağlama: Yağlayıcı kullanmak sureti ile yük taşıyan iki yüzey arasındaki sürtünme direnci, aşınma ve diğer yüzey bozulmalarının azaltılmasıdır.

Tribolojik özellikler oldukça karmaşık ve aynı anda pek çok parametrenin etkili olduğu bir olaydır. Sürtünme, aşınma ve yağlamanın farklı tip, mod ve prosesleri ile meydana gelmesi nedeniyle doğru saptamaların yapılabilmesi için bu farklılıkların dikkate alınması gereklidir.

Triboloji üç farklı alt başlıkta incelenmektedir (Yılmaz, 2002);

- a) Hareketin kinematiği veya tipi : (kayma, yuvarlanma, darbe vs.)
- b) Malzemenin tipi : (katı, sıvı, metal, polimer, vs)
- c) Tribolojik proses tipleri : (hidrodinamik, adhezyon, abrazyon vs.)

3.4. Segman Kaplamaları

Segmanların yüzeyleri, alıştırma zamanını kısaltmak, çabuk aşınmayı önlemek ve yüksek ısı ve basınç altında sarma gibi sakıncaları önlemek için demir oksit, grafit, kalay, krom ve molibden gibi metallerle kaplanır. Bu kaplama metallerinin kendine özgü değişik yarar ve sakıncaları vardır.

Molibden ve demir oksit ile yapılan kaplamalar, sürtünme ile sarmaya, krom ile kaplama ise, aşınmaya karşı dayanım kazandırır.

Krom elektroliz molibden ise püskürtme ile kaplanır. Krom kaplama, molibden kaplamaya göre, aşındırıcı tozların oluşturduğu aşınmaya karşı iki kat; molibden kaplama ise, krom kaplamaya kıyasla sarmaya karşı iki kat daha dayanıklılık gösterir. Krom kaplı basınç segmanı daha sert olduğundan, kaplanmamış dökme demir basınç segmanına kıyasla aşınmaya karşı beş kat daha dayanıklılık gösterir.

Krom kaplı segmanlar yapımları sırasında leplendiklerinden düzgün bir yüzeye sahiptirler. Bu nedenle, bu tür segmanların sürtünme yüzeylerindeki aşıntı daha az olur; segman uzun süre düzgün ve verimli çalışır; kenarları düzgün olduğundan sızdırmazlığı ve yağ kontrolünü daha iyi yapar.

Kaplamanın diğer bir yararı da, yukarıda belirtildiği gibi ilk alıştırma döneminde segmanı korur, fazla aşınmayı önler. Segman ve silindir yüzeyleri yeni olduğundan, bu yüzeyler bir süre karşılıklı uyum sağlayamazlar; uyum sağlanıncaya kadar karşılıklı aşınırlar. Bu ilk alıştırma döneminde kaplama kolay aşınarak segmanı korur. Ayrıca, kaplama katmanı yağlama yağını üzerinde daha iyi tuttuğundan segman ve silindirlerin yağlanması daha iyi sağlanır.

Sıcaklığa ve aşındırıcı maddelere karşı en iyi kaplama aracı molibden ve kromdur. Bu nedenle segmanların çoğu bu iki metalle kaplanmıştır (Işıkoğlu, 1984).

Kompresyon segmanlarının alışma zamanını kısaltmak, aynı zamanda çabuk aşınmayı önlemek ve segmanların iyi yağlanmasını sağlamak için segman yüzeyleri Kadmiyum, kalay, krom, demir oksit, molibden, nikel, fosfat veya siyah manyetik oksitle kaplanmıştır. Segmanlar ve silindir cidarları yeni olduğu zaman yüzeyleri düzgün değildir. Biri diğerine iyi uymaz ve alıştırma yetersiz kalır. Yukarıda sözü edilen kaplama malzemesi ilk alıştırmada kolay aşınarak motorun ilk alıştırma süresini azaltır. Buna ilaveten kaplama malzemeleri yağlama yağını daha iyi tutabildiğinden segman ve silindirlerin daha iyi yağlanmasını temin eder.

Ayrıca özellikle ateş segmanı denilen birinci kompresyon segmanı, krom veya molibdenle kaplanarak hem yüksek sıcaklığa daha fazla dayanabilir hem de silindirleri daha az aşındırır

Segmanlar üzerine uygulana genel yüzey işlemleri: Elektrokimyasal prosesler ile Cu/Sn kaplamalar ($2\mu\text{m}$) düşük sertlik ve yağlamaya yardımcı olmaktadır. Çinko ve mangan fosfat kaplamalar ($3-5\mu\text{m}$) ile yataklanmayı kolaylaştırmaktadır. Özellikle karbon çeliklerine uygulanan demir oksit tabakalar belirli bir seviyeye kadar korozyon korumasına yardım etmektedir. Segmanlara uygulanan nitrüleme işlemi mikro kaynaklanma riskini azaltmaktadır. Günümüzde segmanlara sert krom kaplamaların uygulanması esnasında çevreye verdiği zararlar nedeni ile alternatif proseslere ilgi yoğunlaşmıştır. Endüstri firması segmanlar üzerinde elmas benzeri çok sert kaplamalar (DLC) konusunda araştırmalar yapmaktadır. Bunun yanında PVD/CVD kaplama prosesi ile vakum altında TiN ve CrN sert kaplamalar üretilebilmesine karşın maliyet ve uygulama pratikliği açısından termal sprey prosesleri öne çıkmaktadır.

Genelde plazma sprey ve HVOF (yüksek hızda oksijen yakıt sprey) prosesi ile kaplama uygulamaları ile aşınmaya dirençli kaplamalar ekonomik olarak üretilebilmektedir. Silindir gömlekleri ve piston halkalarının yüzeylerine koruyucu termal sprey kaplama uygulamaları kapsamında çok çeşitli (metalik, seramik, sermet esaslı) koruyucu kaplama kompozisyonları geliştirmiştir. Geliştirilen kaplamalar arasında Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, ZrO_2 , Cr_2O_3 , MoO_x , WC-Co, WC-Ni, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, Mo, Mo-Ni-Cr esaslı kaplamalar yer almaktadır.

Bu kaplama kompozisyonları arasında $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ ve Cr_2O_3 esaslı kaplamalar yüksek sertlik (>2000 HV) değerleri ve 1000 °C' ye kadar yüksek aşınma ve erozyon direnci göstermeleri nedeniyle tercih edilmekte ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Molibden (Mo) esaslı ve metal matrisli kompozit (MMK) kaplamalar yaygın olarak kullanılmakta olup, yüksek performans sağlamaktadır (Federal Mogul, 1998).

Plazma spreyci prosesi (APS) ile $\text{Cr}_2\text{C}_3\text{-NiCr-Mo}$, $\text{TiO}_x(\text{Ti}_n\text{O}_{2n-1})$ kaplama kompozisyonları yüksek aşınma direnci ile piston halkaları ve silindir gömlekleri için performansı artırmaktadır.

Bunun yanında HVOF prosesi ile $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25-35\%NiCr}$, WC-17\%Co , WC-10\%Co4\%Cr , WC-85\%NiMoCrFeCo gibi sermet esaslı kaplamalarda gerçekleştirilebilmektedir.

BÖLÜM 4. MATERYAL VE METOD

Silindir-segman arasındaki sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemek amacıyla bir aşınma cihazı tasarım ve imalatı yapılmıştır. Segman-gömlek çifti arasında meydana gelen sürtünme ve aşınmanın farklı yağlayıcılara göre değişimleri araştırılmıştır. Deneyle farklı yük ve devir şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneyle esnasında silindir gömlek numunesi 75 °C’ de ısıtılmıştır. Sürtünme deneyle her bir yük ve devir şartlarında aşınma cihazının 30 sn çalıştırılması ile sürtünme kuvveti değerleri yük hücresi ile tespit edilerek normal yüke bölünmesi ile sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Aşınma deneylelerinde ise her bir deney için farklı numune kullanmak suretiyle aşınma miktarları tespit edilmiştir.

4.1. Materyal

Aşınma deneylelerinde GG-20 dökme demirden üretilen standart segman ve gömlekle kullanılmıştır. Segman ve gömleklere ait kimyasal bileşenler Tablo 4.1 ve 4.2’ de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. GG 20-30 dökme demir segmanın kimyasal bileşenleri

Element	C	Cu	S	Mn	Si	P	Ni	Fe
%	3,47	0,121	0,044	0,421	2,30	0,22	0,62	92,80

Tablo 4.2. GG 20-30 dökme demir silindir gömleğinin kimyasal bileşenleri

Element	C	Cu	S	Mn	Si	P	Fe
%	3,51	0,20	0,03	0,47	2,20	0,24	93,35

4.2. Kaplama Yöntemi

Kaplamalar Plazma Teknik Sert Metal ve Seramik Kaplama A.Ş' de DIAMOND JET marka HVOF ünitesi ile gerçekleştirilmiştir. Kaplama işleminin istenilen şartlarda gerçekleşmesi için segman tutucu aparattan faydalanılmıştır. Aparat sayesinde segman yüzeyine atılan kaplama kalınlığının bütün yüzeylerde eşit olması sağlanmıştır. Kaplama sonrası yüzeylere, yüzey pürüzlülüğünün istenen değerlerde olması için taşlama işlemi uygulanmıştır.

HVOF kaplama işlemi, kaplama tozlarını veya kaplama sistemlerini üreten firmaların tavsiye ettiği sprej parametreleri esas alınarak uygulanmıştır. Parametreler Tablo 4.3' de verilmiştir.

Tablo 4.3. HVOF kaplama parametreleri

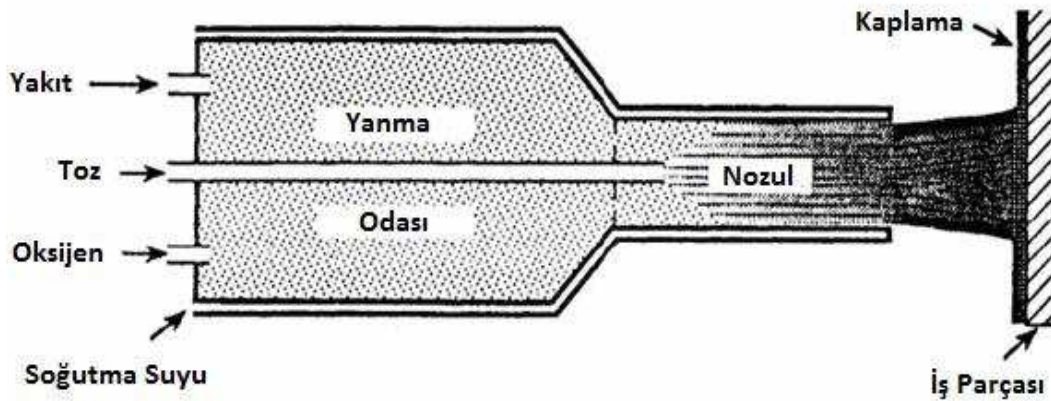
Parametreler	Değerler
Kaplama tozları	NiCrBSi
Oksijen Basıncı (bar)	10,8
Yakıt Basıncı (bar)	7,5
Yanma Basıncı (bar)	7,1
Toz disk devri (d/d)	200
Sprej mesafesi (mm)	300
Yakıt	Kerosen

4.2.1. HVOF kaplama sistemleri

Yüksek hızlı oksijen-yakıt yöntemi, termal püskürtme teknolojisinde son on yılın en önemli gelişmesidir. Yöntem 1980' li yılların başında D-Gun yöntemine alternatif olarak geliştirilmiştir. HVOF ile elde edilen kaplamalar yüksek sprej partikül hızlarının elde edilmesi sebebiyle çok az porozite içermekte ve yüksek yoğunluğa sahip olmaktadır. Ayrıca çok değişken bir sistemdir. Kullanılacak malzeme cinsine, istenilen kaplama kalitesine göre sprej parametreleri değiştirilebilir. Elde edilen kaplamalar endüstride kullanımda sınırsız imkanlar sunar (Prokap, 2014).

4.2.2. HVOF sisteminin uygulama prensibi

HVOF termal sprejde, yüksek basınçta oksijen gazı, yakıt gazı ile çok yüksek partikül hızı oluşturabilmek için yanma meydana getirirler. Bu yakıt karışımı propilen, propan veya hidrojen içerebilir. Son yıllarda HVOF kaplamalarda gaz yakıttan sıvı yakıta doğru gelişme vardır. Yakıt gazları HVOF silahının önünde bulunan siflon sisteminde karıştırılırlar. Karışım gazları nozuldan silaha enjekte edilirler ve tutuşturulurlar. Oluşan alev çembersel bir konfigürasyon gösterir ve toz halindeki kaplanacak malzemeyi sarar. Bu tozlar oluşan yüksek basınçla silahtan püskürtülürler. Yanma sıcaklığı kullanılan yakıta bağlı olarak 5000 F ve 6000 F arasında değişir. Çembersel alev şekli kaplanacak olan toz malzemenin ısınması, ergimesi ve hızlanmasını sağlar (Prokap, 2014).



Şekil 4.1. HVOF çalışma prensibi

4.3. Metalografik İncelemeler

Kaplanmış numunelerin kesme işlemleri kaplamadan altlığa doğru laboratuvar tipi kesme cihazında kesilmiştir. Kesme işlem yönünün kaplamadan ana malzemeye doğru olmasının nedeni, kaplamada çekme gerilmelerinin oluşumunu önlemektir. Kesilmiş numuneler soğuk kalıplama yöntemiyle kalıplanmış ve zımparalama işlemine geçilmiştir. Metalografik incelemeler için üretilen numuneler, standart numune hazırlama yöntemlerine uygun olarak sırasıyla 60, 180, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 meshlik SiC zımpara ile zımpara kademelerinden geçirilmiştir. Daha sonra 0,1µm' luk alümina pasta ile parlatılmıştır.

Hazırlanan numunelerin mikroyapı incelemeleri NİKON ECLIPSE L150 marka optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Kaplama tabakalarının kalınlık ölçümleri ve porozite değerleri de aynı cihazda ölçülmüştür.

4.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri

Çalışmada JEOL JSM-5600 marka taramalı elektron mikroskobundan (SEM) faydalanılmıştır. Yaklaşık olarak 1 cm³ boyutuna sahip numuneler SEM ve EDX analizlerinden önce % 37 HCl çözeltisi ile 5 dk. derin dağlama işlemine alınmıştır. Dağlama işleminden sonra numunelerin yüzeylerindeki asit kalıntıları saf su ve alkol ile uzaklaştırılmıştır.

4.5. Sertlik Ölçümleri

Yapılan kaplama işlemi sonucu oluşan kaplamaların sertlik değerleri Vickers (HV) cinsinden ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri fenollik bakalite alınan 1 cm³'lük parçalar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümü yapılacak yüzeyler sırası ile 60, 120, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gritlik zımpara ile zımparalanmış ve 1 µm' luk alümina süspansiyonu ile 15 dk. parlatılmıştır. Struers Buramin-500 EMCO marka sertlik ölçüm cihazı kullanılarak numunelerin yüzeylerinden 3' er adet Vickers sertlik (HV) değeri elde edilmiştir.

4.6. Yoğunluk Ölçümleri

Yoğunlukları Arşimed prensibine göre ölçülmüştür. Numunelerin ağırlıkları hem suda hem de havada ölçülmüş ve denklem 4.1 yardımıyla gerçek yoğunluk değeri hesaplanmıştır. Arşimet düzeneğinde saf su kullanılmış ve her numune en az üçer defa ölçülerek ortalaması alınmıştır.

$$\rho = m_{\text{Kuru}} / (m_{\text{Kuru}} - m_{\text{Yaş}}) \quad (4.1)$$

Burada ρ ; yoğunluk, g/cm³, m_{Kuru} ; kuru ağırlık, $m_{\text{Yaş}}$; yaş ağırlık

4.7. Taguchi Deneysel Optimizasyon Yöntemi

Deney planları Taguchi tarafından parametre tasarımı olarak tanımlanmakta olup, amacı ürün veya proses parametrelerinin, ürün özelliklerinin optimum seviyeye erişmesini sağlayan ve gürültü faktörlerine karşı en az etkileşimde bulunan değerlerin ortaya konulmasıdır.

Böylece etki ve gürültü faktörlerinin deney planı içinde ayrı ayrı bulunmaları gerekir. Etki faktörleri seviyeleri ayarlanabilen ve proses süresince değişmeyen faktörlerdir. Gürültü faktörleri ise seviyeleri ayarlanamayan ancak ürün karakteristik değerlerini etkileyen faktörlerdir.

Parametre tasarımı ile kontrol ve gürültü faktörleri arasındaki karşılıklı etkileşim incelenerek prosesin gürültü faktörlerine karşı direnci sağlanır. Bu işlem karakteristik değerler değişmez veya en az bir değişim gösterdiği parametrelerin araştırılması ve bulunmasıdır.

Taguchi deney tasarımına göre yapılacak işlem sırası Şekil 4.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Taguchi deney tasarımındaki işlem sırası

Bir optimizasyon çalışması 5 ana bölümden oluşur. Bunlar;

- a) Deneilerin planlanması
- b) Deneilerin yapılması
- c) Dene sonuçlarının değerlendirilmesi
- d) Dene sonuçlarının doğrulanması
- e) Standartlaştırmadır.

4.7.1. Sinyal/gürültü oranı

Performansın ölçütü sinyal/gürültü (S/N oranı) olup, ürün kalitesinin değerlendirilmesi anlamını taşır. Performansın seviyesi S/N oranı ile belirlendiği gibi aynı zamanda gürültü faktörlerinin performansa olan etkilerini de ortaya koymaktadır. S/N oranını veren eşitlikler ile kayıp fonksiyonu arasında doğrudan bir ilişki vardır. S/N oranı ürünün sahip olacağı karakteristik değer kararlılığının değerlendirmesidir.

Yüksek S/N oranı değerleri kayıp fonksiyonu ile saptanılacak zararın daha az olacağını gösterir. Kayıp fonksiyonu içeriğinde olduğu gibi, S/N oranı kalitenin ortalama değer ve varyansın göz önünde tutularak objektif bir değerlendirme ölçütüdür ve 3 tane S/N oranı bulunmaktadır.

- a) En büyük en iyi (Largerthebetter)
- b) En küçük en iyi (Smallerthebetter)
- c) Nominal en iyisi (Nominal thebest)

Performans karakteristiğinin en büyük-en iyi olduğu durumda;

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4.2)$$

En düşük-en iyi olduğu durumda;

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4.3)$$

Nominal- en iyi olduğu durumda;

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i^{-2}}{s^2} \right) \quad (4.4)$$

denklemleri ile hesaplanır.

4.7.2. Ortogonal diziler

Taguchi' nin deney tasarımımda çok sayıda faktörün az sayıda deneyle incelenmesinin nedeni ortogonal özellikten faydalanmış olunmasıdır. Ortogonal özellik bir faktörün seviyelerinin aynı sayıda diğer faktörlerin farklı seviyeleri ile eşleştirilmesidir.

Taguchi esas olarak 18 ortogonal deney planını tablolar halinde vermektedir. Bu deney planları standartlaştırılmış ortogonal diziler olarak tanımlanmaktadır.

$L_{27}(3^{13})$ olarak tanımlanan bir ortogonal deney planı 27 satır yani deney sayısı ile 13 adet 3 seviyeli sütunu içerir. Tablo 4.4' de L_{27} ortogonal dizileri gösterilmiştir. Bir uygun deney planının olması durumunda asgari toplam serbestlik derecesi gerekli deney sayısının 1 eksiğidir. Sütun sayısı azami faktör sayısını belirler.

Tablo 4.4. Ortogonal L_{27} dizininin gösterimi

Faktör	Faktör	Faktör	Faktör	Faktör	Faktör	Faktör	Faktör	Faktör	Faktör	Faktör	Faktör	Faktör
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

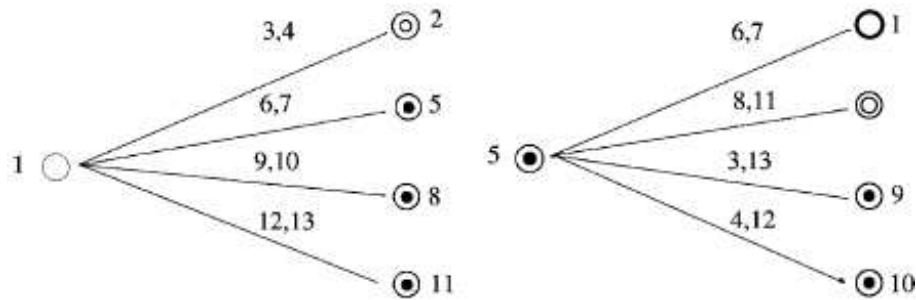
4.7.3. Faktörlerin etkileşimi

Taguchi metodunda etkileşim, bir deneysel tasarımda yer alan faktörlerin karşılıklı etkileşim durumlarını ifade etmektedir. $A \times B$ şeklinde ifade edilir ve A ve B faktörlerinin etkileşim durumunu ifade eder.

Her ikisinin de yer alması durumunda sistem üzerinde etkiye sahip olması durumu olarak ifade edilmektedir. Örneğin; sıcaklık insan rahatsızlığı açısından önemli bir etkiye sahip değilken, havanın hem sıcaklık hem de nemli olması insan rahatsızlığı açısından önemli bir etkiye sahiptir (Savaş, 2010).

Deneysel çalışmalarda etkileşim faktörlerinin önceden tespit edilmesi zordur. Taguchi deneysel tasarımında karşılıklı etkileşimin belirlenebilmesi için ortogonal seri üzerinde bir karşılıklı etkileşim sütunu tanımlanması ve hesaplara dahil edilmesi gereklidir (Ross, 1988).

Taguchi etkileşimlerin tespiti açısından iki metot önermektedir. Birincisi doğrusal grafik, ikinci ise tablolardır. Doğrusal grafikler, faktörlerin atanacağı sütunları ve hangi sütunların bu faktörlerin etkileşimini kullanılacağını göstermektedir. Bu çalışma da kullanılan L_{27} ortogonal dizinine ait etkileşim grafiği Şekil 4.3' de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. L_{27} ortogonal dizinine ait lineer etkileşim grafiği (Ross, 1988)

4.7.4. Varyans analizi (ANOVA)

Varyans analizi ile hangi işlem üzerinde hangi faktörlerin ne derecede etkili oldukları istatistiksel olarak ortaya konur. Varyans analizinde amaç, incelenen faktörlerin, kaliteyi ölçebilmek için seçilen çıktı değerlerini ne oranda etkilediklerini ve farklı seviyelerin nasıl bir değişkenliğe neden olduklarını ortaya koyabilmektir. Ayrıca elde edilen sonuçların istatistiksel olarak güvenilirliği de test edilir (Savaskan ve diğ., 2004-Kuram-Dal, 2009).

Varyans analizlerinde, kareler toplamı, serbestlik derecesi, karelerin ortalaması gibi matematiksel niceliklerden yararlanılmaktadır. Bu matematiksel nicelikler aşağıda tanımlanmıştır (İdiz, 1999).

4.7.4.1. Toplam kareler toplamı

A ve B faktörleri ve bu iki faktörün etkileşimleri (A x B) dikkate alınarak toplam kareler toplamı denklemi;

$$SDQ_T = SDQ_A + SDQ_B + SDQ_{AXB} + SDQ_C \quad (4.5)$$

$$SDQ_T = \left[\sum_{i=1}^N (S/N) i^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (4.6)$$

A faktörü için kareler toplamı denklemi

$$SDQ_A = \left[\sum_{i=1}^{K_A} \left(\frac{A_i^2}{nA_i} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad (4.7)$$

ANOVA geçen hatanın kareler toplamı denklemi ise;

$$SDQ_E = SDQ_T - SDQ_A - SDQ_B - SDQ_{AXB} \text{ olarak hesaplanır.} \quad (4.8)$$

4.7.4.2. Serbestlik derecesi

Toplam serbestlik derecesi toplam deney sayısının bir eksigidir ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır;

$$DOF_T = N - 1 \quad (4.9)$$

Bir faktör ya da sütunun serbestlik derecesi de seviye sayısının bir eksigidir.

$$DOF_A = k_A - 1 \quad (4.10)$$

Etkileşimlerin serbestlik dereceleri iki faktörün serbestlik derecelerinin çarpımına eşittir ve şu şekilde ifade edilmektedir;

$$DOF_{AXB} = (DOF_A)(DOF_B) \quad (4.11)$$

Hata serbestlik derecesi ise toplam serbestlik derecesinden tüm faktör ve etkileşimlerinin serbestlik derecelerinden çıkartılması ile bulunur.

$$DOF_e = DOF_T - DOF_A - DOF_B - DOF_{AXB} \quad (4.12)$$

4.7.4.3. Varyans

Varyans değerinun hesaplanması, varyans analizi tablolarıyla yapılmaktadır. Faktörlerin varyans değeri; faktörlerin kareler toplamının serbestlik derecesine bölümüdür.

$$V_A = \frac{SDQ_A}{DOF_A} \quad (4.13)$$

Hata varyansı da hata kareler toplamının serbestlik derecesine bölümüdür. Hatayı kontrol edilemeyen faktörler ve ölçüm yanlışlıkları oluşturmaktadır.

$$V_e = \frac{SDQ_e}{DOF_e} \quad (4.14)$$

4.7.4.4. F testi

Varyans analizi tablosu oluşturulduktan sonra, F testi hangi faktörlerin önemli olduğunu gösterir. F testi uygulanırken hesaplanan F_{Test} değerleriyle, istenen güven düzeyindeki F_{Tablo} değerleri karşılaştırılır. F_{Test} değeri 5' ten büyük olursa anlamlıdır. Ayrıca elde edilen F_{Test} değeri F_{Tablo} değerinden büyük ise güvenilir kabul edilir ve aşağıda verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$F_A = \frac{V_A}{V_e} \quad (4.15)$$

4.7.4.5. Sonucu yüzde katkı (P)

Varyans analizi tablosunun son sütununu ise P değeri oluşturur. P değeri herhangi bir faktörün veya etkileşimin sonuca ne kadar etki ettiğini ifade eder. Yüzde cinsinden ifade edilir. Faktörün kareler toplamının, toplam kareler toplamına bölünmesiyle elde edilir. Bu durum aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$P_A = \left(\frac{SDQ_A}{SDQ_T} \right) \times 100 \quad (4.16)$$

4.7.5. Doğrulama deneyleri

Taguchi metodunun son adımıdır ve istatistiksel çıktılarının doğrulanması şiddetle tavsiye edilir. Hesaplamalar sonucunda faktörler grafiksel olarak gösterilerek prosesi için optimum şartlar belirlenir. Belirlenen optimum şartlar dikkate alınarak tahmini ortalama kalite karakteristiği değerleri ve güven aralığı belirlenir.

Optimum şartlar dikkate alınarak yapılan doğrulama deneyleri sonrasında alınan kalite karakteristik değerinin hesaplanan güven aralığında olup olmadığına bakılır. Değerin hesaplanan güven aralığında olması yapılan deneyin doğru olduğunu, güven aralığının altında veya üstünde kalması durumunda ise deneysel tasarımda hata yapıldığını gösterir. Bu durumda deneyin tekrar baştan gözden geçirilmesi ve hatanın belirlenerek düzeltilmesi gerekir (İdiz, 1999-Savaş, 2010).

4.7.6. Regresyon analizi

Regresyon analizi, aralarında sebep-sonuç ilişkisi bulunan iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek ve bu ilişkiyi kullanarak o konu ile ilgili tahminler (estimation) ya da kestirimler (prediction) yapabilen istatistik analiz tekniğidir.

Bu analiz tekniğinde iki (basit regresyon) veya daha fazla değişken (çoklu regresyon) arasındaki ilişki açıklamak için matematiksel bir model kullanılır ve bu model regresyon modeli olarak adlandırılır.

Bir regresyon modeli oluşturulurken genelde en-küçük kareler ve en büyük olasılık teknikleri olarak bilinen iki yaklaşımdan birisi kullanılır. Eğer hata teriminin normal dağılım göstermesi şeklinde bir varsayım varsa en büyük olasılık, hata teriminin dağılışı ile ilgili herhangi bir varsayım söz konusu değilse en-küçük kareler tekniği kullanılarak parametreler tahmin edilir.

Bütün aşınma kaybı denklemlerinin geliştirilmesinde birinci dereceden denklemler oluşturulmuştur. Aşınma kaybı; uygulama yükü, sıcaklık ve devir lineer bir kombinasyonu olduğu düşünülürse, aşınma kaybını veren denklemler aşağıdaki gibi olacaktır.

$$W_{aşınma\ kaybı} = b_0 + b_1N + b_2T + b_3S + \varepsilon \quad (4.17)$$

Bu denklemlerde c_0 , b_1 , b_2 ve b_3 katsayılarıdır, ε ise hatadır ve Minitab 16.1 yazılımı yardımıyla bulunmuştur.

Denklemlerde aşınma kaybını, N uygulama yükü, T sıcaklık ve S devir sayısını ifade etmektedir. Çoklu regresyon analizinde, regresyon katsayısı R^2 (R-Sq)'nin 0,80' den büyük olması modelin tatmin edici anlamına gelmektedir.

4.8. Sürtünme Ve Aşınma Deneyleri

Deneylerde aşınma miktarı ağırlık kaybı esasına göre belirlenmiştir. Deneylere başlamadan önce segman ve gömlek numunesi etanol ile temizlenmiştir.

Temizleme işleminden sonra numunelerde etanolün kalmaması için kurutulma işlemi sağlandıktan sonra deney öncesi METTLER TOLEDO hassas terazide (10-4 g hassasiyetinde) ölçüm yapılmıştır.

Daha sonra aşınma cihazında farklı devir, yük ve yağlayıcılar ile 2000 m yol alınmıştır. Deney sonrası tekrar segman ve gömlek numunesi etanol ile temizlenmiştir.

Temizleme işleminden sonra etanolün segman ve gömlek numunesinden buharlaşmasını sağladıktan sonra ölçüm tekrar yapılmıştır. Ölçülen değerlerin farkları alınmak suretiyle segman ve gömlekteki aşınma miktarları belirlenmiştir.

Taguchi optimizasyon metoduna göre deneysel şartlar belirlenip aşağıda Tablo 4.5' de verilmiştir.

Tablo 4.5. Taguchi optimizasyon metoduna göre deneysel şartlar

Deney No	Yük (N)	Sıcaklık (°C)	Devir (Dev/Dak)
1	60	40	60
2	60	40	90
3	60	40	120
4	60	60	60
5	60	60	90
6	60	60	120
7	60	80	60
8	60	80	90
9	60	80	120
10	80	40	60
11	80	40	90
12	80	40	120
13	80	60	60
14	80	60	90
15	80	60	120
16	80	80	60
17	80	80	90
18	80	80	120
19	100	40	60
20	100	40	90
21	100	40	120
22	100	60	60
23	100	60	90
24	100	60	120
25	100	80	60
26	100	80	90
27	100	80	120

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Molibden kaplamalı segmanlar ile yapılan aşınma deneyleri Taguchi' nin L_{27} dizisine göre gerçekleştirilmiştir. Bu dizide 3 seviyeli 13 faktöre kadar deneysel optimizasyon işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca bu dizi segman ve gömlek aşınması üzerinde iki faktörün aynı anda etkisini de inceleyebileceği etkileşimlere de izin vermektedir. Bu çalışma da kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri Tablo 5.1' de gösterilmiştir. Yapılan aşınma deney sonuçları “en düşük en iyi” kalite karakteristiğine göre Sinyal(S)/Gürültü(G) oranına çevrilmiştir. Tablo 5.2 L_{27} deneysel dizisine göre gerçekleştirilen deneysel sıralama ve S/N oranlarını göstermektedir.

Tablo 5.1. Kontrol faktörleri ve seviyeleri

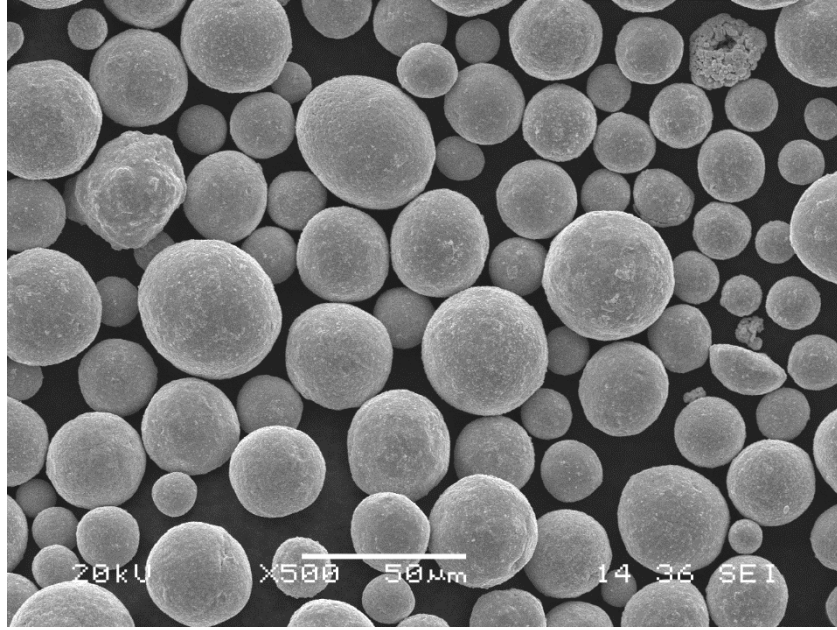
Kontrol faktörleri	Seviyeler			Birimler
	I	II	III	
A: Yük	60	80	100	N
B: Sıcaklık	40	60	80	°C
C: Devir	60	90	120	dev/dak

Tablo 5.2. L₂₇ Taguchi ortogonal dizisine göre deneysel ve S/N sonuçları

Yük (N)	Sıcaklık (°C)	Devir (dev/dak)	Aşınma Kaybı (segman)	Segman S/N oranı	Aşınma Kaybı (gömlek)	Gömlek S/N oranı
60	40	60	0,00187410	54,54	0,010700	39,41
60	40	90	0,00112444	58,98	0,005500	45,19
60	40	120	0,00092453	60,68	0,001300	57,72
60	60	60	0,00200146	53,97	0,000400	67,96
60	60	90	0,00143261	56,88	0,005700	44,88
60	60	120	0,00123651	58,16	0,000900	60,92
60	80	60	0,00039254	68,12	0,001800	54,89
60	80	90	0,00031255	70,10	0,003000	50,46
60	80	120	0,00020888	73,60	0,000800	61,94
80	40	60	0,00156983	56,08	0,027500	31,21
80	40	90	0,00153142	56,30	0,000700	63,10
80	40	120	0,00151542	56,39	0,005100	45,85
80	60	60	0,00157996	56,03	0,005400	45,35
80	60	90	0,00155789	56,15	0,002700	51,37
80	60	120	0,00154126	56,24	0,000600	64,44
80	80	60	0,00152147	56,35	0,001800	54,89
80	80	90	0,00150666	56,44	0,001300	57,72
80	80	120	0,00148221	56,58	0,000700	63,10
100	40	60	0,00331471	49,59	0,010700	39,41
100	40	90	0,00312563	50,10	0,002800	51,06
100	40	120	0,00300458	50,44	0,005400	45,35
100	60	60	0,00362145	48,82	0,002200	53,15
100	60	90	0,00334152	49,52	0,014700	36,65
100	60	120	0,00323651	49,80	0,008000	41,94
100	80	60	0,00286541	50,86	0,000500	66,02
100	80	90	0,00263554	51,58	0,039400	28,09
100	80	120	0,00245897	52,18	0,029200	30,69

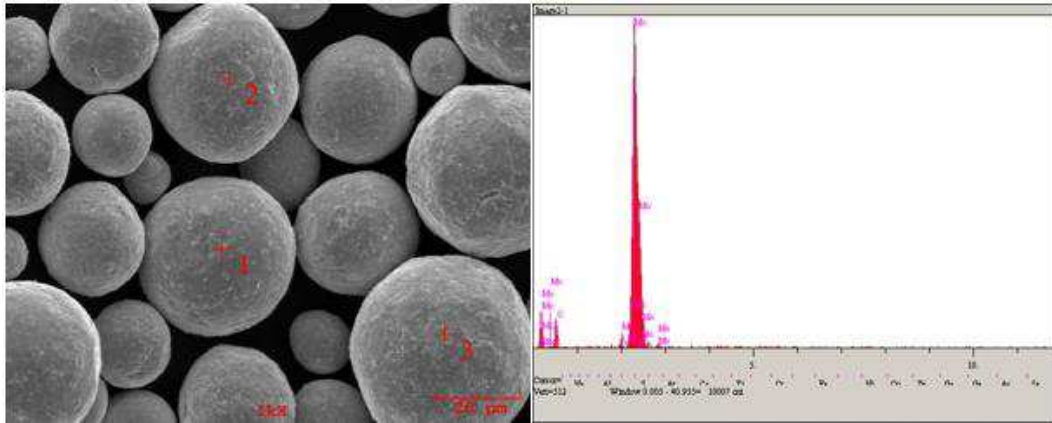
5.1. Molibden Tozunun Özelliklerinin İncelenmesi

Molibden tozunun toz şeklinin belirlenmesi amacıyla SEM-EDX analizleri yapılarak kaplama işleminden önce başlangıç toz özellikleri incelenmiştir. Şekil 5.1' de Molibden (Mo) tozuna ait SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.1. Molibden kaplama tozuna ait SEM görüntüsü (X500)

Şekil 5.1 incelendiğinde Mo tozunun genel olarak küresel formda olduğu gözlenmiştir. Toz içerisinde yapılan ölçümlerde tane boyutları 20–50 μm arasında değişmektedir. Şekil 5.2 ise Mo tozunun 1 nolu noktası üzerinden yapılan EDX analizi sonucunu göstermektedir.

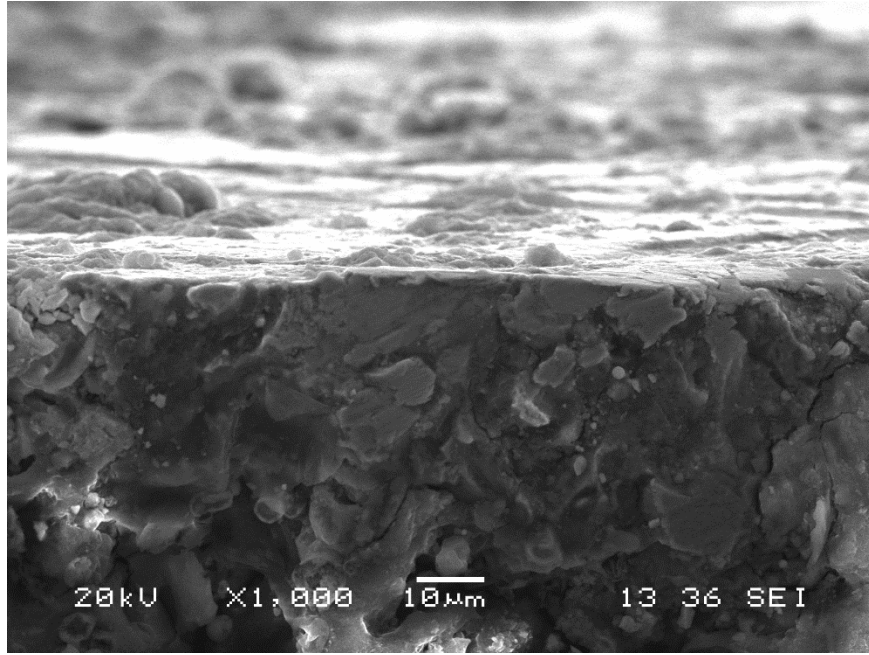


Şekil 5.2. Molibden tozunun SEM görünüşü ve EDX analizi (X1000)

Şekil 5.2' deki EDX analizi sonucunda toz içerisindeki elementlerin yüzdesel dağılımı % 80,969 Mo ve % 19,031 O elementi olarak tespit edilmiştir.

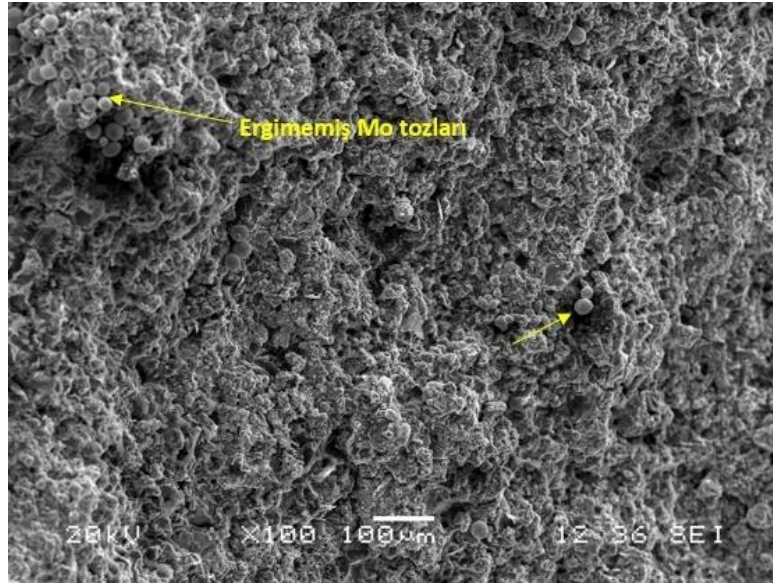
5.2. Metalografik Analizler

Şekil 5.3' te Molibden kaplama yapılan segmanın SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 5.3 incelendiğinde Molibden kaplamanın yaklaşık olarak 100 µm civarında olduğu tespit edilmiştir. Orta büyüklükteki içten yanmalı motorlarda kaplama kalınlığı 100-150 µm civarındadır (Kapsız, 2011).



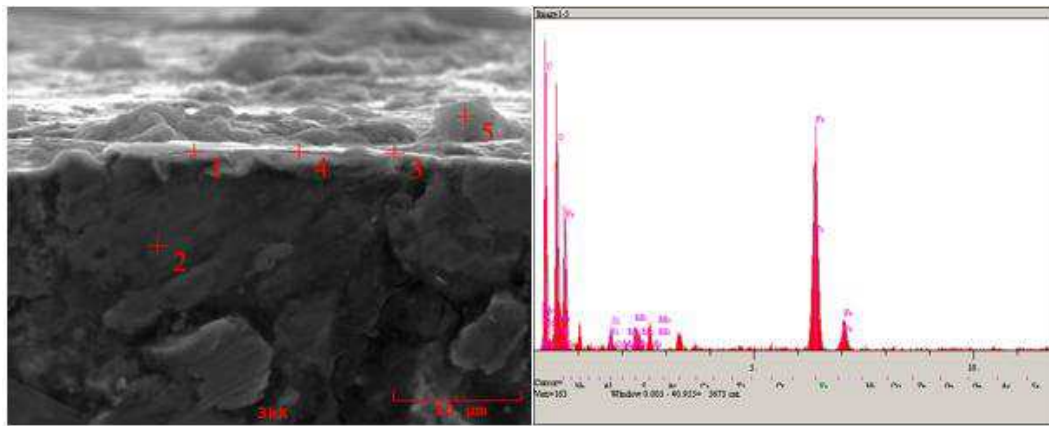
Şekil 5.3. Molibden kaplamanın SEM görüntüsü (X1000)

Şekil 5.4 kırık segman yüzeyine ait SEM görüntüsünü vermektedir. Şekil 5.4' e göre kaplama yüzeyinde ergimemiş Molibden tozlarına rastlanmıştır. Genellikle termal sprey kaplamalar tabakalı bir yapıya sahiptirler ve genellikle çeşitli oranlarda porozite, oksit ve ergimemiş partikül içerirler (Çelik ve diğ., 1997).



Şekil 5.4. Molibden kaplı kırık segman yüzeyi SEM görüntüsü (X100)

Şekil 5.5 Molibden kaplı segmanın SEM görüntüsü ve 5 nolu noktaya ait EDX analizini göstermektedir. Şekil 5.5' teki EDX analizi sonucunda toz içerisindeki elementlerin yüzdesel dağılımını % 26,364 C, % 37,585 O, % 1,245 Si, % 32,485 Fe ve % 2,321 Mo olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.5. Molibden kaplı segmanın SEM görüntüsü ve EDX analizi (X3000)

5.3. Sertlik Ve Yoğunluk Ölçümleri

Aşınma deneylerinde kullanılan molibden kaplı segmanların ve dökme demir gömleklerin yoğunluk ölçümleri yapılarak Arşimet prensibine göre hesaplanmıştır. Sertlik değerleri ise Brinell olarak ölçülmüştür. Elde edilen yoğunluk ve sertlik değerleri aşağıda belirtilmiştir.

Tablo 5.3. Segman ve gömleklerin yoğunluk ve sertlik değerleri

	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (HB)
Segman	7,14	363,55
Gömlek	7,18	205,00

5.4. Kontrol Faktörlerinin Etkisi

Segman ve gömlek aşınma kayıpları üzerinde her bir kontrol faktörünün etkisi Sinyal/Gürültü cevap tabloları yardımıyla Minitab 16.0 istatistik paket programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Test proseslerinin cevap tabloları Tablo 5.4 ve Tablo 5.5’ te gösterilmiştir.

Tablo 5.4. Segman ağırlık kaybı için S/N cevap tablosu

Seviye	Yük (N)	Sıcaklık (°C)	Devir (dev/dak)
1	61,67	54,79	54,93
2	56,29	53,95	56,23
3	50,32	59,54	57,12
Delta	11,35	5,58	2,19
Rank	1	2	3

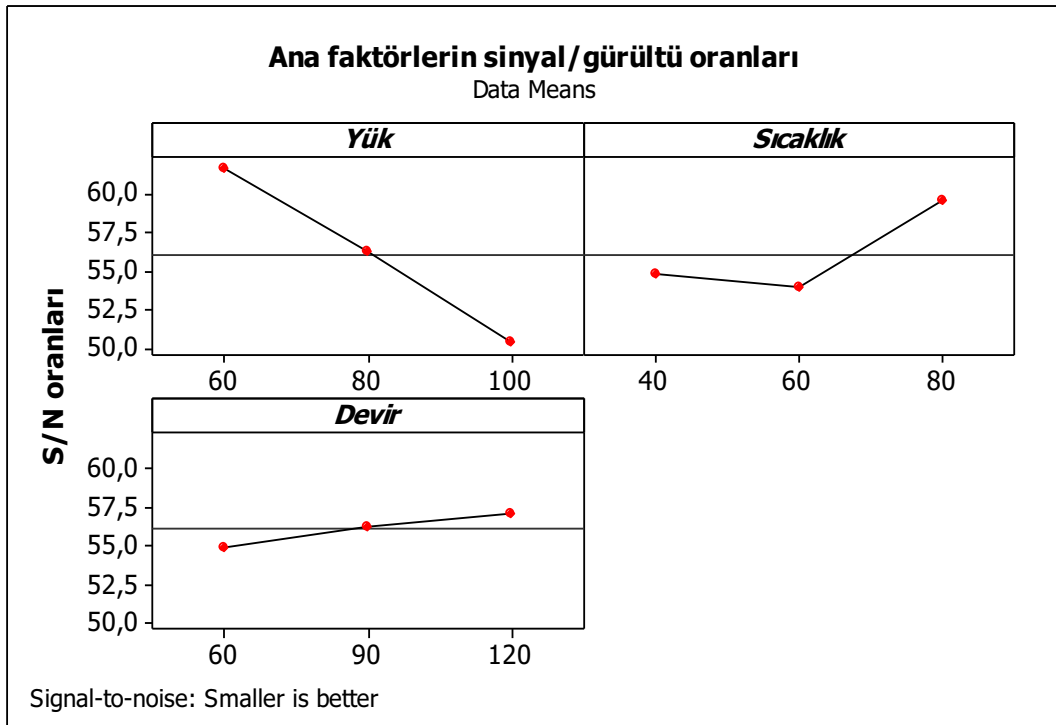
Tablo 5.5. Gömlek ağırlık kaybı için S/N cevap tablosu

Seviye	Yük (N)	Sıcaklık (°C)	Devir (dev/dak)
1	53,71	46,48	50,26
2	53	51,85	47,61
3	43,6	51,98	52,44
Delta	10,11	5,5	4,82
Rank	1	2	3

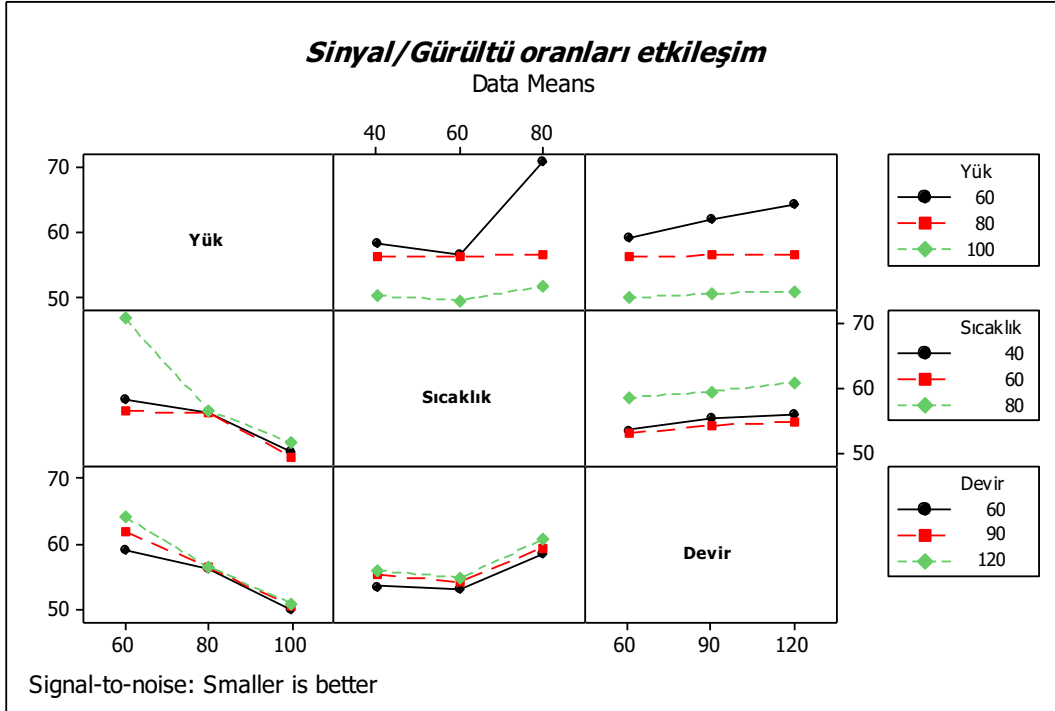
Tablo 5.4 ve 5.5 incelendiğinde her bir cevap tablosuna ait kontrol faktörlerinin S/N oranlarının Seviye 1’ den Seviye 3’ e doğru değiştiği gözlenmiştir. Aşınma kayıplarına ait en güçlü faktörü tespit etmek için delta değerlerindeki en yüksek değer gözlemlenir.

Tablo 5.4 ve 5.5' te aşınma kaybı üzerinde en etkili kontrol faktörünün yük olduğu tespit edilmiştir. Bu faktörden sonra sırasıyla sıcaklık ve devir kontrol faktörleri etkili olmuştur.

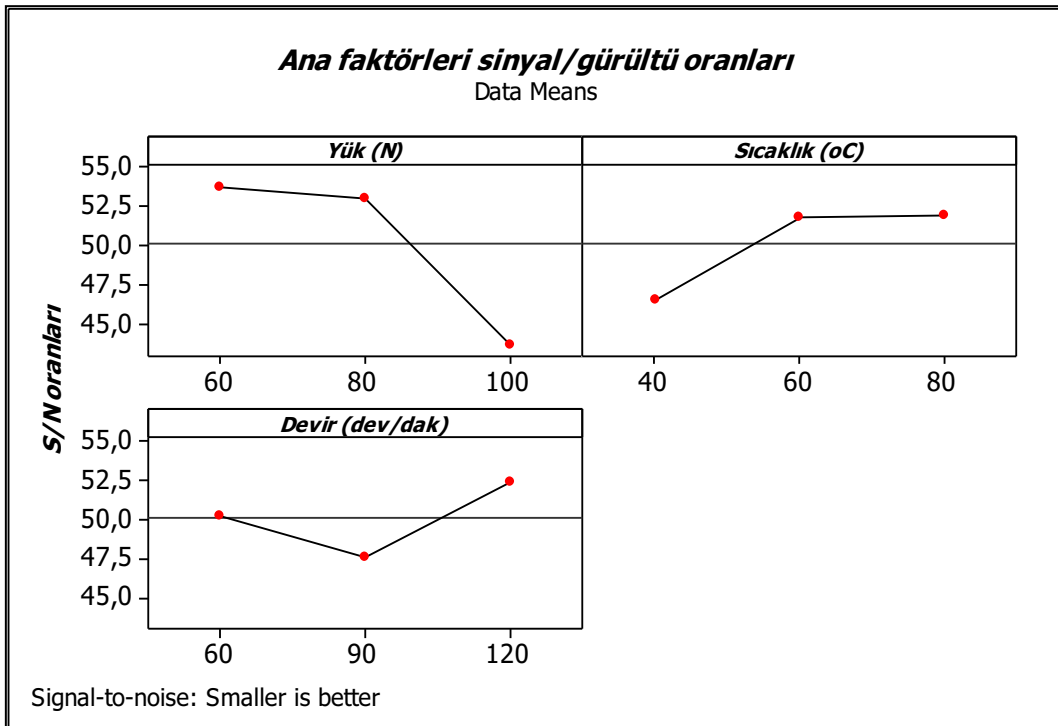
Aşınma kayıpları için optimum test parametrelerinin belirlenebilmesi için kontrol faktörleri ve bu faktörlerin etkileşimine ait S/N grafikleri kullanılır. Segman ve gömlek aşınma kayıpları için kontrol faktörlerinin ve etkileşimlerine ait S/N grafikleri ayrı ayrı elde edilmiştir. Şekil 5.6-9 segman ve gömleğin aşınma kayıplarına ait ana ve etkileşim S/N grafiklerini göstermektedir.



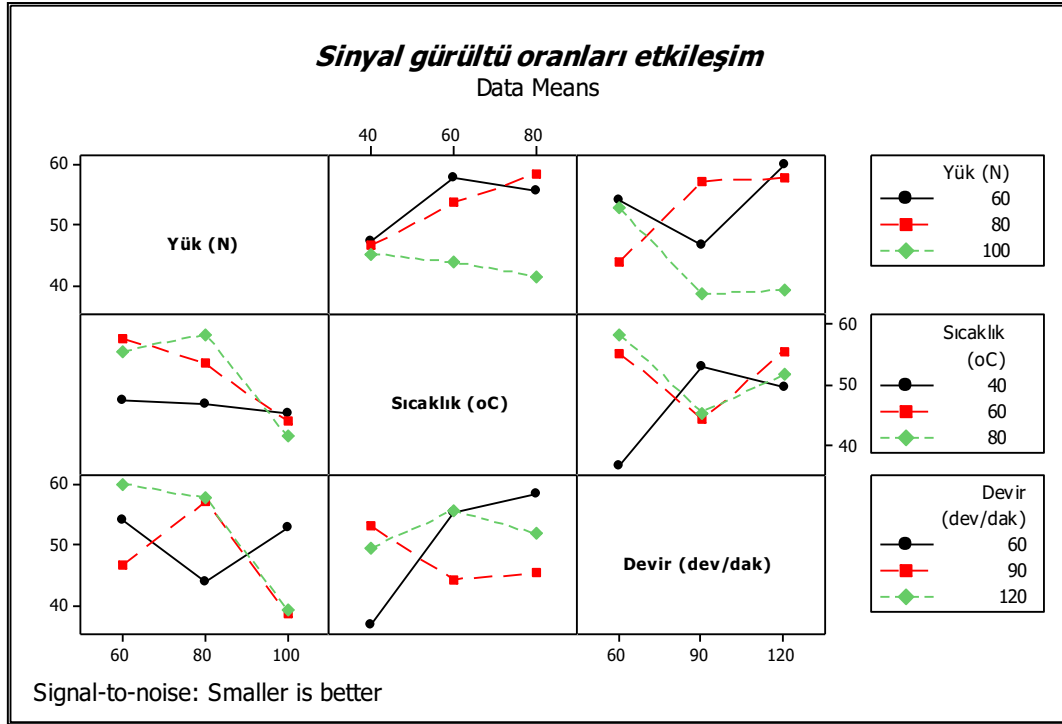
Şekil 5.6. Segman aşınma kaybı için S/N grafiği



Şekil 5.7. Segman aşınma kaybı için S/N etkileşim grafiği



Şekil 5.8. Gömlek aşınma kaybı için S/N grafiği



Şekil 5.9. Gömlek aşınma kaybı için S/N etkileşim grafiği

Şekil 5.6 ve Şekil 5.8 incelendiğinde optimum test parametrelerinin belirlenmesi $A_1B_3C_3$ olduğu belirlenmiştir. 60 N' luk yük, 80 °C sıcaklık ve 120 dev/dak proses şartları kullanılarak aşınma deneyleri gerçekleştirildiğinde hem segman hem de silindir gömleğinde en az aşınma meydana gelmiştir.

5.5. ANOVA

Varyans analizi tablosu (ANOVA), kontrol faktörlerinin segman ve silindir gömleğinin aşınma kaybı üzerindeki etkisi ve performanslarının anlaşılması için hazırlanmış istatistiksel verilerin bulunduğu tablodur. ANOVA tablosu genel doğrusal metot kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 5.6. Segman için ANOVA sonuçları

Kaynak	Serbestlik Derecesi (<i>DOF</i>)	Kareler Toplamı (<i>SDQ_T</i>)	Varyans (<i>V</i>)	<i>F</i> _{Test}	<i>F</i> _{Tablo5.}	Katkı Değeri (% <i>P</i>)
Yük	2	580,054	290,027	1358,70	8,65 ^a	58,12
Sıcaklık	2	163,230	81,615	382,34	8,65 ^a	16,35
Devir	2	21,823	10,912	51,12	8,65 ^a	2,19
Yük*Sıcaklık	4	208,245	52,061	243,89	7,00 ^b	20,86
Yük*Devir	4	22,018	5,505	25,79	7,00 ^b	2,21
Sıcaklık*Devir	4	0,982	0,246	1,15		0,10
Hata	8	1,708	0,214			
Toplam	26	998,059				

^a %99 güven aralığı

Tablo 5.7. Gömlek için ANOVA sonuçları

Kaynak	Serbestlik Derecesi (<i>DOF</i>)	Kareler Toplamı (<i>SDQ_T</i>)	Varyans (<i>V</i>)	<i>F</i> _{Test}	<i>F</i> _{Tablo5.}	Katkı Değeri (% <i>P</i>)
Yük	2	573,730	286,865	4,91	4,45 ^a	17,10
Sıcaklık	2	177,390	88,695	1,52	-	5,29
Devir	2	105,040	52,520	0,90	-	3,13
Yük*Sıcaklık	4	239,940	59,985	1,03	-	7,15
Yük*Devir	4	929,710	232,428	3,98	-	27,71
Sıcaklık*Devir	4	862,310	215,578	3,69	-	25,70
Hata	8	467,090	58,386			
Toplam	26	3355,210				

^a %99 güven aralığı

Tablo 5.6 incelendiğinde segman aşınma kaybı için en etkili faktörün yük olduğu gözlenmiştir. Daha sonra en etkili faktörün sıcaklık olduğu tespit edilmiştir. Devir faktörünün ise en az etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yük ve sıcaklık etkileşiminde oldukça etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Yükün sonuca etkisi % 58,12 sıcaklığın % 16,35 ve devirin ise % 2,19 olarak tespit edilmiştir. Yük-sıcaklık etkileşiminin ise % 20,86'lık oldukça büyük bir etkiye olmuştur. Ayrıca diğer iki etkileşim ve devir faktörünün ihmal edilecek seviyede olduğu söylenebilir.

Tablo 5.7' e göre en etkili kontrol faktörü yük olduğu gözlenmiştir. İkinci etkili faktör sıcaklık, daha sonra devir olarak belirlenmiştir. Ayrıca gömlek aşınma kaybı için her üç etkileşimde oldukça etkili olmuştur. Yük aşınma kaybı üzerinde % 17,10 sıcaklık % 5,29 ve en az etkiye sahip kontrol faktörü ise % 3,13' lük etkiye sahiptir.

Etkileşimlerin aşınma kaybı üzerindeki etkileri ise, yük-sıcaklık % 7,15, yük-devir % 27,71 ve sıcaklık-devir etkileşimi ise % 25,70' tir.

5.6. Regresyon Analizi

Segman ve silindir gömleği aşınma deneylerinde kullanılan kontrol faktörleri (yük, sıcaklık ve devir) ile aşınma kaybı arasında tahmini denklem oluşturma ve bunlar arasındaki ilişkiyi elde edebilmek için genel lineer regresyon analizi kullanılmıştır. Analizler Minitab 16.0 paket program kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışma için aşınma kaybı denklemleri segman ve gömlek için ayrı ayrı çıkarılmıştır. Denklemler aşağıda sırasıyla gösterilmiştir.

$$W_{Sekman} = 58.8045 - 0.252792.Yük(N) + 0.137499.Sıcaklık(^{\circ}C) + 0.036353.Devir(dev/dak) \quad (5.1)$$

$$R^2 = 0.8608$$

$$W_{Gömlek} = 68.3868 - 0.283714.Yük(N) + 0.118644.Sıcaklık(^{\circ}C) + 0.0364945.Devir(dev/dak) \quad (5.2)$$

$$R^2 = 0.8038$$

Regresyon analizinde R^2 değerlerinin 0,80' den büyük olması sonuçların tatmin edici olduğunu göstermektedir.

5.7. Doğrulama Deneyleri

Taguchi deneysel optimizasyon yöntemine göre optimum sonuçları verecek test parametrelerinin tahmininden sonra optimizasyon yönteminin son adımı doğrulama deneyleridir. Doğrulama deneyleri yapılarak optimizasyonun doğruluğu test edilir. Eğer ki, tahmin edilen kontrol faktörlerine ait seviyeler önceden gerçekleştirilen deneylerde mevcut ise doğrulama deneylerine gerek duyulmaz.

Aşınma kaybını hem segman hem de silindir gömleği için tahmin etmek için $A_1B_3C_3$ deney seti doğrulama deneylerinde kullanılacaktır. Aşınma kaybı için tahmini S/N oranları aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanabilir:

$$\hat{\eta}_{Segman} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_3 - \bar{T}) + (\bar{C}_3 - \bar{T}) \quad (5.3)$$

$$\hat{\eta}_{Gömlük} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_3 - \bar{T}) + (\bar{C}_3 - \bar{T}) \quad (5.4)$$

Burada; $\hat{\eta}$ tahmin edilen ortalama S/N oranı. \bar{T} tüm deneylerin ortalama S/N oranı.

$\bar{A}_1, \bar{B}_3, \bar{C}_3$ kontrol faktörlerinin cevap Tablo 5' den alınan S/N oranlarıdır.

Gerekli sadeleştirmeler yapılıncaya denklemlerin son hali aşağıdaki gibi olur.

$$\hat{\eta}_{segman} = \bar{A}_1 + \bar{B}_3 + \bar{C}_3 - 2\bar{T} \quad (5.5)$$

$$\hat{\eta}_{gömlük} = \bar{A}_1 + \bar{B}_3 + \bar{C}_3 - 2\bar{T} \quad (5.6)$$

Aşınma kayıpları için yapılan doğrulama deneylerinin tahmini ve gerçek test sonuçları Tablo 5.8' de gösterilmiştir.

Tablo 5.8. Aşınma kayıpları için doğrulama deneyleri sonuçları

	Optimum kontrol parametreleri	
	Tahmini	Deneysel
Level	A ₁ B ₃ C ₃	A ₁ B ₃ C ₃
Segman S/N oranı (dB)	65,85	73,60
Gömlük S/N oranı (dB)	57,93	61,94

Doğrulama deneylerinin güven aralığı ise aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır:

$$CI = \pm \left[\frac{F(1, n_2) \cdot V_e}{N_e} \right]^{0.5} \quad (5.7)$$

Burada F F Tablosundan alınan değer; n_2 hatanın serbestlik derecesi; V_e hata varyansı; N_e etkin tekraralama sayısı. Bu sayıda aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır:

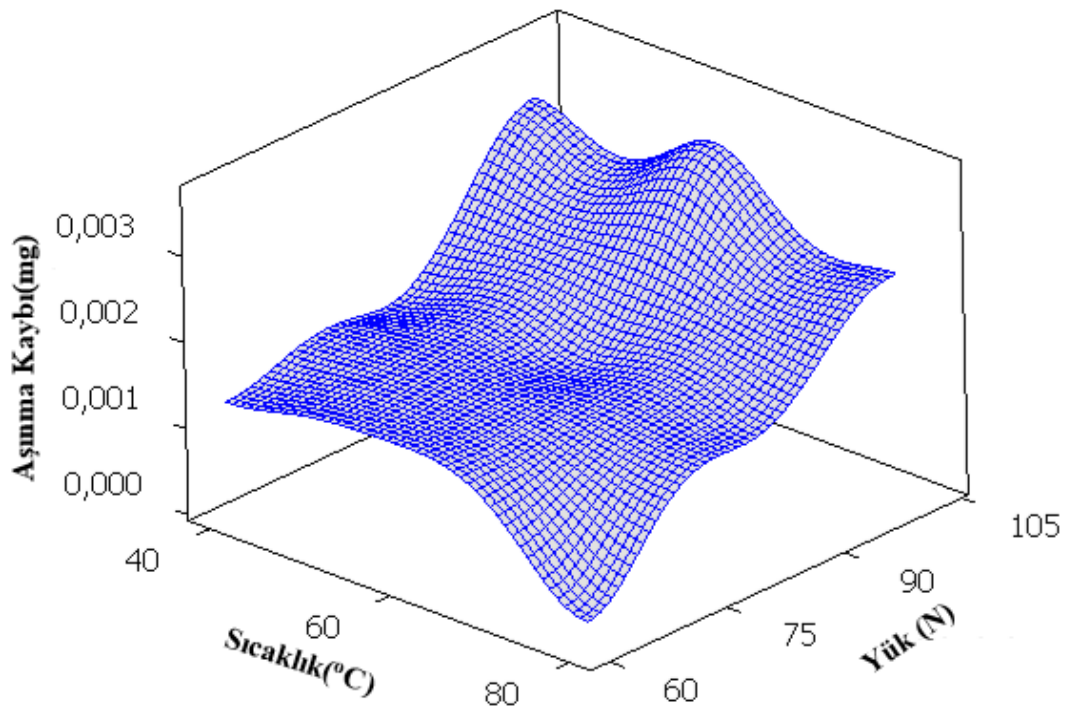
$$N_e = \frac{\text{Toplam deney sayısı}}{\text{Ortalama serbestlik derecesi}(=1) + \text{tüm faktörlerin serbestlik derecesi}} \quad (5.8)$$

% 99 güven aralığına göre $CI_{segman} = \pm 1.30$ dB. $CI_{gömlek} = \pm 1.74$ dB olarak hesaplanmıştır.

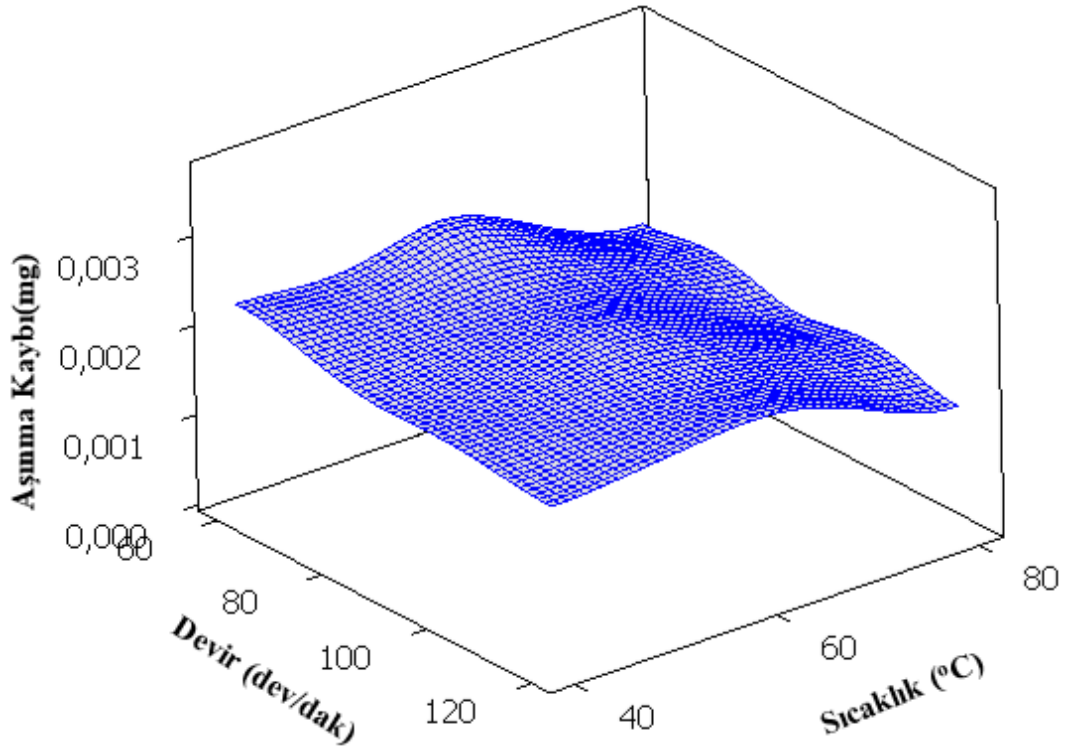
5.8. Aşınma Haritaları

Farklı test parametrelerine göre segman-gömlek aşınma kayıplarının değişimlerini daha rahat anlayıp, kıyaslamak amacıyla aşınma haritaları oluşturulmuştur.

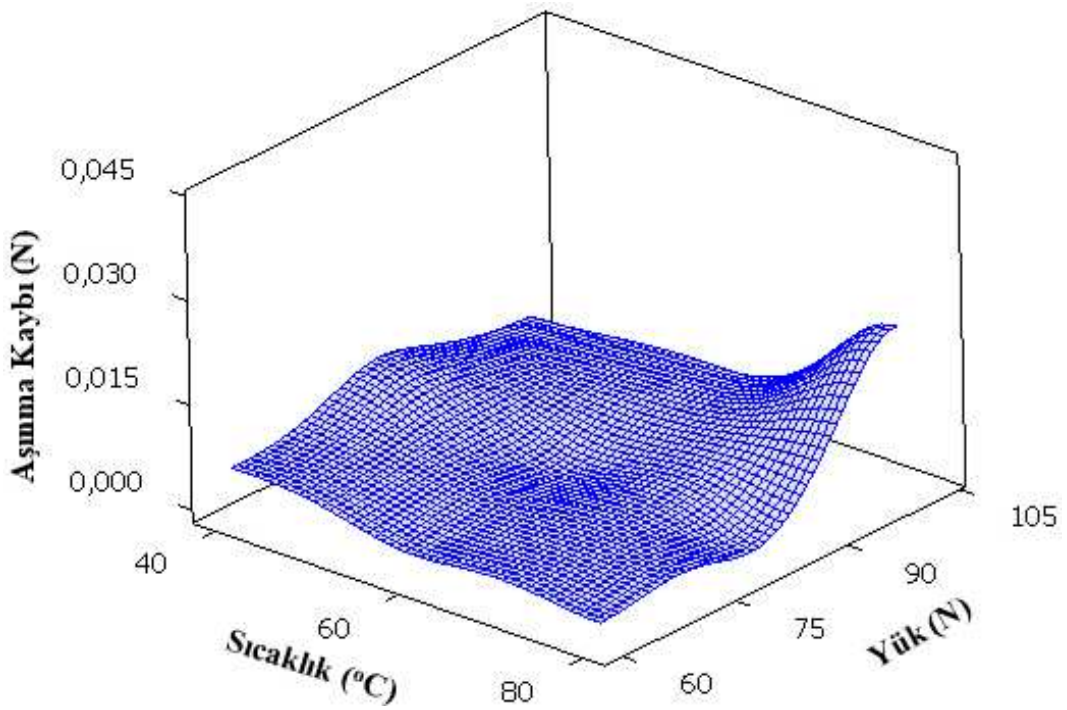
Şekil 5.10-13 segman ve silindir gömleğinin değişik test parametrelerine oluşturulan aşınma haritalarını göstermektedir.



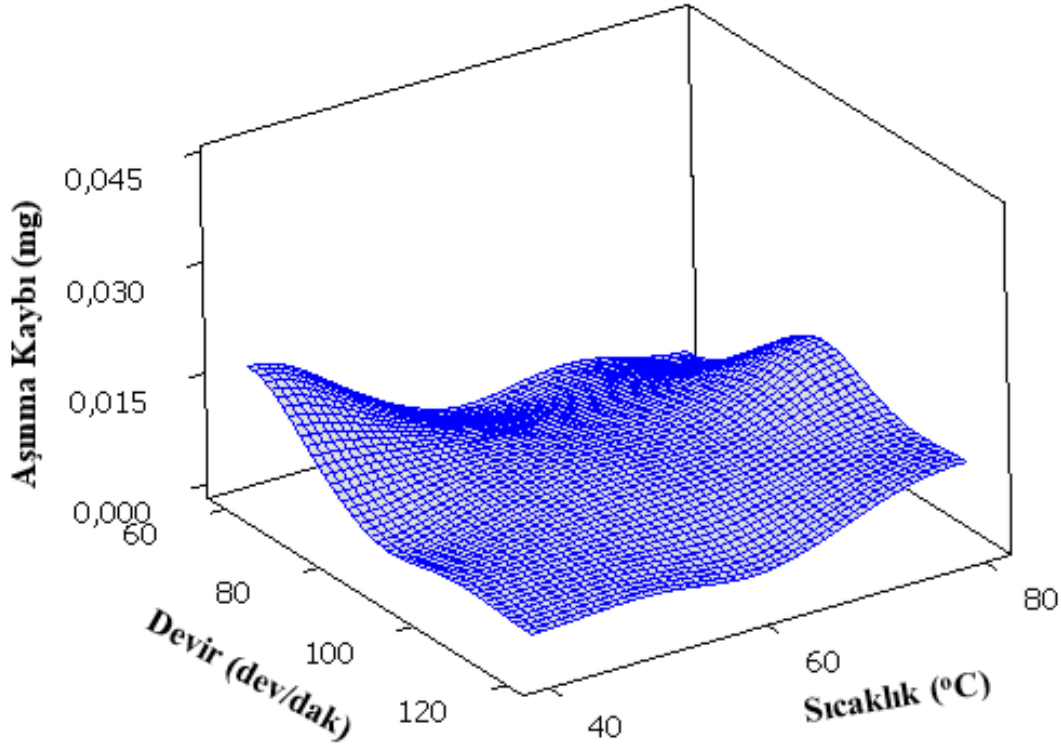
Şekil 5.10. Sıcaklık ve yük değişimine göre segman aşınma haritası



Şekil 5.11. Devir ve sıcaklık değişimine göre segman aşınma haritası



Şekil 5.12. Sıcaklık ve yük değişimine göre gömlek aşınma haritası



Şekil 5.13. Devir ve sıcaklık değişimine göre gömlek aşınma haritası

Şekiller incelendiğinde hem segman hem de gömlek için benzer davranışlar gözlenmektedir.

Şekil 5.10 ve 12 incelendiğinde sıcaklık artışıyla aşınma kaybında değişim meydana gelmiştir. Bu durum yağın içerisindeki aşınmayı azaltıcı katkıları, yüzey sıcaklığının artışı ile sürtünen yüzeyler arasında fiziksel ve kimyasal etkileşime daha çabuk girmektedirler (McQueen ve diğ., 2005- Xu ve diğ.- Gao ve diğ., 2004). Ayrıca yük artışına göre aşınma kaybı hem segman hem de gömlek için artış göstermiştir. Gömlek numunesinin üzerinde honlama çizgilerinin etkisi her geçen süre azalmaktadır. Özellikle honlama çizgilerinin yok olması yağın, aşınan yüzeyler arasında depolanmasını engellemektedir. Buda aşınma değerlerini artırmaktadır (Kapsız, 2011).

Şekil 5.11 ve 13'e göre devir artışıyla aşınma kaybında düşüş meydana gelmiştir. Bu düşüş izafi hareket eden parçalar arasında yağlama rejiminin hidrodinamik hal almasından kaynaklanmaktadır (Molinari ve diğ., 2001). Ayrıca hızın artması ile yağlama rejiminin hidrodinamik yağlamaya geçmesi ile açıklanabilir (Kapsız, 2011).

5.9. Aşınma Mekanizmaları

Dökme demir silindir gömleğine karşı molibden kaplamalı segmanın kaydırılması sonucu elde edilen aşınma yüzeyleri optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir.



Şekil 5.14. Dökme demir 100 N yük altında a) 60 b) 80 c) 120 dev/dak kayma hızı şartlarına ait aşınma mekanizmaları

100 N yük altında, 60, 80 ve 120 dev/dak kayma hızı şartlarına ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.14' de verilmiştir. Şekil 5.14 incelendiğinde tüm kayma hızı şartlarında abrasif aşınma izleri görülmektedir. Her üç abrasif aşınma izleri birbiri ile kıyaslandığında 60 dev/dak kayma hızında daha derin, 120 dev/dak kayma hızında ise derinliğin diğerlerine göre daha yüzeysel olduğu gözlenmiştir. Bu durum artan kayma hızı sonucu meydana gelen sürtünme ısısının yüzeylerde oksit tabaka oluşumunu artırarak aşınma izini azaltması şeklinde düşünülebilir. Ayrıca oluşan oksit tabaka bir katı yağlayıcı gibi davranarak aşınmayı azaltıcı etki yapabilir (Muratoğlu-Aksoy, 2000).

Muratoğlu ve Aksoy yapmış oldukları çalışmada, aşınma yüzeylerinde FeO ve Fe₂O₃ oksitlerini gözlemlemişler ve bu oksitlerin bir katı yağlayıcı özelliği göstererek sürtünme katsayısını düşürdüğü ifade edilmiştir (Muratoğlu-Aksoy, 2000).

Optik mikroskop görüntülerinde kısmi malzeme kayıpları da gözlenmiştir. Silindir gömleği-segman kontak sonucu ayrılan bu parçacıklar üçüncül eleman gibi davranarak üç elemanlı abrazyona neden olabilir. Bundan dolayı aşınma miktarında artış meydana gelebilir (Braunovic ve diğ., 2006).

BÖLÜM 6. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Molibden kaplı segmanın dökme demir silindir gömleği üzerinde kaydırılarak elde edilen deneysel ve istatistiki sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- a) Taguchi deneysel optimizasyon yöntemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
- b) Optimum deney şartları hem segman hem de gömlek için $A_1 B_3 C_3$ olarak tespit edilmiştir.
- c) Segman ve gömleğin ağırlık kaybı için en etkili faktör yük olarak belirlenmiştir. Ayrıca etkileşimlerin de belirli etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.
- d) Segmanın ağırlık kaybı üzerinde % 58,12 ile yük faktörü, % 16,35 ile sıcaklık faktörü ve % 2,19 ile devir faktörü etkili olmuştur. Yük*sıcaklık etkileşimi ise % 20,86 ile oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.
- e) Gömleğin ağırlık kaybı üzerinde % 17,10 ile yük faktörü, % 5,29 ile sıcaklık faktörü ve % 3,13 ile devir faktörü etkili olmuştur. Yük*sıcaklık etkileşimi % 7,15, yük*devir etkileşimi % 27,71 ve sıcaklık*devir etkileşimi ise % 25,70'lik bir etkiye sahip olmuştur.
- f) Segman ve gömlek aşınma kayıpları için oluşturulan matematiksel denklemler sırasıyla,

$$W_{Segman} = 58.8045 - 0.252792.Yük(N) + 0.137499.Sıcaklık(^{\circ}C) + 0.036353.Devir(dev / dak) \quad (6.1)$$

$$R^2 = 0.8608$$

$$W_{Gömlek} = 68.3868 - 0.283714.Yük(N) + 0.118644.Sıcaklık(^{\circ}C) + 0.0364945.Devir(dev / dak) \quad (6.2)$$

$$R^2 = 0.8038$$

olarak oluşturulmuştur.

- g) Segman ve gömleğin aşınma kaybı için % 99' luk güven aralığında yapılan doğrulama deneylerinin tahmini sonuçları ile gerçek deney sonuçları arasında sapma oldukça azdır.
- h) Segman ve gömleğin aşınma kayıpları için aşınma haritaları oluşturulmuştur.
- i) Dökme demir silindir gömleği üzerinde baskın aşınma mekanizması abrasyon olarak tespit edilmiştir.
- j) Dökme demir silindir gömleği üzerinde derin yivlerin oluştuğu da gözlenmiştir.
- k) Segman üzerine kaplama yapılan Molibden tozunu belirlemek amacıyla SEM görüntüsü elde edilmiştir. Ayrıca Molibden tozu üzerinden EDX analizi gerçekleştirilerek Molibden elementi tespit edilmiştir.
- l) Molibden kaplı segman kesitinin SEM görüntüsü çekilmiş ve EDX analizi yapılarak Mo elementi belirlenmiştir.
- m) Segman ve gömleğin sertlikleri Brinell cinsinden ölçülmüştür.
- n) Segman ve gömleğin yoğunlukları Arşimet kanununa göre ölçülmüştür.

KAYNAKLAR

- AKKURT, M., Makine Elemanları, Cilt 2, 76-79, İTÜ Matbaası, İstanbul, 1992.
- ANONİM, Petrol Ofisi A.Ş., “Madeni Yağlar ve Petrol Ofisi Ürünleri”, Ankara, 2003.
- ARVUZ, V., KARASU, T., ÖZDAMAR, İ. TAŞKAYA, Y., “Otomobil Motorlarında Yakıt, Yağlama ve Soğutma Sistemleri”, MEB Mesleki ve Teknik Öğretim Kitapları 78, Ankara, 1978.
- BHUSHAN, B., Introduction to Tribology, John Wiley, ISBN:0-471-15893-3, New York, 2002.
- BHUSHAN B., “Tribology: Friction, Wear, and Lubrication” The Engineering handbook, CRC Press, ISBN:978-1-4200-3987-0, 2004.
- BRAUNOVIC, M., MYSHKIN, N.K, KONCHITS, V.V., Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology, CRC Press, 2006.
- CANALE, L., XU, G., LIANG, H., LIU, J. et al., “Surface Engineered Coatings and Surface Additive Interactions for Boundary Film Formation to Reduce Frictional Losses in the Automotive Industry: A review,” SAE Technical Paper 2005-01-2180, doi:10.4271/2005-01-2180., 2005.
- CESUR. İ., Farklı Yakıt Karışımlarının Segman-Silindir Çifti Arasındaki Sürtünme ve Aşınma Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Temmuz 2008.
- CHO, S-W., CHOI, S-M., BAE, C-S, “ Frictional modes 1 of barrel shaped piston ring sunder fool dedlubrication”, Department of Mechanical Engineering, Advanced Institute of Science and Technology, KAIST 373-1, Korea, 1 June 2000.
- COURSE, W.H., Automotive Fuel, Lubrication and Cooling Sysytems, McGraw Hill Book Company, New York, 1967.
- CÖCEN Ü., BELEVİ M., ÖNEL K., “Tane Silisyum Karbür Katkılı Alüminyum Bazlı Kompozitlerin Aşınma Davranışı”, 7. Denizli Malzeme Sempozyumu, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 155-187, Denizli, 1997.
- CUNNINGHAM, G., An Investigation Into the Lubrication of Crankcase Scavenged Two-stroke cycle engines. Engineering Mechanical Science, pp 117, 1996.

CZICHOS H., “Tribology a systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear” Tribology Series1Handbook, Elsevier Scientific Publishing Company, ISBN: 0-444-41676., 1978.

ÇELİK, E., AVCI, E., YILMAZ, F., Evaluation of interface reactions in thermal barrier ceramic coatings, Surface and Coatings, Vol.97, pp.361-365, 1997.

DAL, M., “Bitkisel Esaslı Kesme Sıvılarının Frezelemedeki Performansının Araştırılması”, GYTE, Yüksek Lisans Tezi, 2009.

Federal-Mogul Kolbenringe Kurbelge hause (pistin rings/crankcases), Reprinted from ATZ/MTZ – Supplement Shell Lexicon Verbrennungs motor. This edition: Burcheid, Germany, Federal-Mogul Powertrain Systems, 32 p., 1998.

GAO, H., MCQUEEN, J.S., BLACK, E.D., GANGOPADHYAY A.K., JENSEN, R.K., Reduced Phosphorus Concentration Effects on Tribological Performance of Passenger Car Engine Oils, Tribology Transactions, 47: 200-207, 2004.

GAUTAM, M., CHITTOOR, K., DURBHA, M., SUMMERS, J.C., Effect of diesel soot contaminated oil on engine wear-investigation of novel oil formulations, Tribology International 32 (1999) 687699, 1999.

HAMROCK, B.J., Fundamentals of Fluid Film Lubrication, McGraw Hill Book Company, New York, 1994.

HEYWOOD, J.B., International Combustion Engine Fundamentals, McGraw Hill Book Company, New York, 1988.

HOKKIRIGAWA, K. and KATO, K., “An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear”, Tribology International, 21, 1, 51-57., 1988.

HUTCHINGS, I. M., “Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials”, Edward Arnold, London, 1992.

İŞİKOĞLU M.A., “Motor Yenileştirme”, M.E.B. , (Sayfa 529-534), İstanbul, 1984.

İPEK, R., “Tren Fren Papuçlarının Aşınmasının Deneysel İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 94-102, Kayseri, 1987.

İPEK, R., “AISI 1020 Çeliğinin, Yüzey Sertleştirme İşlemleri Uygulanarak AISI 5155 Çeliğinin Yerine Kullanabilirliğinin Deneysel Araştırılması”, Doktora Tezi (yayımlanmamış), Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 40 52, Kayseri, 1992.

İZGİZ S., “Piston segmanları ve malzeme özellikleri”, Teknik yazı, Metalurji müh., d156_1829.

KAJDAS C., HARVEY S.S.K., WILUSZ, E., “Encyclopedia of Tribology” Elsevier Science Publishers B.V., ISBN: 0-444-88401-7., 1990.

KAPSIZ, M., “Segman silindir çifti yüzeylerinde bor dop edilmiş kaplamanın motor sürtünme kayıplarına etkisinin incelenmesi” Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.

KARAMIŞ, M. B., “Toprak İşleme Aletlerinde İş Organının Aşınmasının Etüdü”, Doktora tezi (yayımlanmamış), Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 13-18, Kayseri, 1985.

KURAM, E., “Bitkisel Esaslı Kesme Sıvılarının Delmedeki Performansının Araştırılması”, GYTE, Yüksek Lisans Tezi, 2009.

LIN, S.S., PATTERSON, D.J., SAE Paper No.-930794-129, 1993.

LUDEMA K.C., “ Introduction to wear” ASTM Handbook 18, ASM International, ISBN: 0-87170-380-7, 1992.

MCQUEEN, J.S., GAO, H., BLACK, E.D., GANGOPADHYAY, A.K., JENSEN, R.K., Friction and wear of tribofilms formed by zinc dialkyl dithiophosphate anti wear additive in low viscosity engine oils, Tribology International, 38, 289–297, 2005.

Megep 2007.

Merkezi yağlama sistemleri, <http://www.merkeziyaglamasistemleri.com/kati-yaglayici-maddeler>, Erişim Tarihi: 2014.

Molibdena, <http://tr.wikipedia.org/wiki/Molibden>, Erişim Tarihi: 2014.

Molibdenb, <http://molibden.nedir.com>, Erişim Tarihi: 2014.

MOLINARI, J.F., ORTIZ, M., RADOVITZKY, R., REPETTO, E.A., Finite-element modeling of dry sliding wear in metals, Engineering Computations, Vol. 18 No. 3/4, pp. 592-609, 2001.

MOORE, D.F., Principles and Applications of Tribology, Oxford: Pergamon Press, 1975.

MS Motor Service International GmbH 2. Baskı 01.2010 Ürün No. 50 003 958-08 ISBN 978-3-86522-405-7 ks_50003958-08_web_leseprobe

MURATOGLU, M., AKSOY, M., The effects of temperature on wear behaviours of Al-Cu alloy and Al-Cu/SiC composite, Materials Science and Engineering A282, 91-99, 2000.

Nural segman, <http://www.nuralsegman.com.tr/bilgiler.htm>, Erişim Tarihi: 2014.

ODABAŞ, D., “Kuru Sürtünme Şartlarında Termomekanik Faktörlerin AISI 3315 Çeliğinin Aşınma Davranışına Olan Etkilerin Teorik ve Deneysel Araştırılması”, Doktora Tezi (yayımlanmamış), Fen Bilimleri Enstitüsü Erciyes Üniversitesi, 58-76, Kayseri, 1991.

PIGORS, O., “Abrasive Verschleißverhalten von Stählen bei Gleit – und Wölbewegungen”, Schmierungstechnik 10, 1979.

Piston Segmanı, http://tr.wikipedia.org/wiki/Piston_sekman%C4%B1, Erişim Tarihi: 2014.

PORTAKAL, A., “Kaymalı Düz Yataklarda Yüzey Pürüzlülüğü ve Aşınma Hızı”, Mühendis ve Makine ,Cilt 19, 400-408, 1974.

PRIEST, M., TAYLOR, C.M., Automobile engine tribology approaching the surface, Wear 241, 193-203, 2000.

Prokap, http://www.prokap.com.tr/hvofkaplama_1_20.htm Erişim Tarihi: 2014.

RYK, G., ETSION, I., “Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction” Wear 261 792–796., 2006.

ROSS P. ,Taguchi Techniques for Quality Engineering-Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design, McGraw-Hill, pp.10-50, New York, 1988.

SAVASKAN M., TAPTIK Y., ÜRGEN M., “Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu”, İtüdergisi/d mühendislik, 3(6):117-128., 2004.

SELÇUK, B., “Civatalı Bağlantılarda Sürtünmenin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 55-84, Kayseri, 1991.

SOYDAN Y., “Katı ortamda bor yayınımlı ile sertleştirilen çelik yüzeylerinin kuru kayma halinde sürtünme ve aşınma davranışları” Doktora tezi, İTÜ, 1996.

STACHOWIAK, G.W., BATCHELOR, A.W., “Engineering Tribology” Tribology series 24, Handbook, Elsevier Science Publishers B.V., ISBN: 0- 444-89235-4, Amsterdam, London, NewYork, Tokyo, 1993.

ŞAFAK, H.E., “Yüzeyi Pvd Yöntemiyle Kaplanmış Metallerde Tribolojik Özelliklerin Belirlenmesi” Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Bölümü”, 113 Sayfa, Nisan 2008.

ŞENEL, E., “Alüminyumun İçerdiği İz Elementlerinin Yüzey Segregasyonu Ve Tribolojik Özellikleri Üzerindeki Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2008.

TAKADOUM J., “Materials and Surface Engineering in Tribology” Handbook, John Wiley & Sons, Inc., ISBN: 978-1-84821-067-7., 2007

TEKMEN. Ç., ÖZDEMİR. İ., ÇELİK. E., Plazma püskürtme yöntemi ile dökme demir altlıklar üzerine molibden kaplamalar Deü Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi Cilt: 5 Sayı:1 Sayfa:173-179 Ocak 2003.

ULUKAN,L., “Makina Elemanları III”, Ders Notu, İstanbul, 1993.

URAS, H.M., “A Study Of Piston-Ring Assembly Friction”, Mechanical Engineering, Doctor of Philosophy, In The University Of Michigan, 1984.

Vikipedi, 2007a, <http://tr.wikipedia.org/wiki/a%c5%9f%c4%b>, Erişim Tarihi: Aralık 2007.

Vikipedi, 2007c, <http://tr.wikipedia.org/wiki/Korozyon>, Erişim Tarihi: Kasım 2007.

XU, G.H., LEE, J.H., LIANG, H., GEORING D., Tribological properties of solid-lubricating coatings on cylinder bore at low temperature, *Wear*, 257, 59-65, 2004.

YAMAN, B., “Seramik Matrisli Kompozit Malzemelerin Elektrik Akımı Destekli Sinterleme (SPS) Yöntemi ile Tribolojik Özelliklerinin Gelistirilmesi” Doktora Tezi, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, Eylül 2009.

Yenmak Katalog, 2012, http://www.yenmak.com.tr/turkce/online_katalog.asp, Erişim Tarihi: 2014.

YILMAZ, F., “Sürtünme ve Aşınma”, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 229-247, İstanbul, 1997.

YILMAZ, İ.Ö., “Otomotiv Saç şekillendirme Kalıplarında Kullanılan Malzemelerin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi” ,Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Ocak 2012.

YILMAZ, T., “Pek Ve Kompozitlerinde Kısa Fiber Takviyesi Ve Mikro Yapının Tribolojik Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniv., Haziran 2002.

Zorlu Segman, <http://www.zorlusegman.com>, Erişim Tarihi: 2014.

ZUMGAHR, K. H., “Microstructure and Wear of Materials”, Tribology Series Vol 10, Elsevier, 1987.

ÖZGEÇMİŞ

Sezer Kurgun, 11.02.1980' de İstanbul' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Adapazarı' nda tamamladı. 1996 yılında Sakarya Atatürk Lisesi' nden mezun oldu. 1997 yılında Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Öğretmenliği Bölümüne girdi ve 2001 yılında mezun oldu. Bu güne kadar özel sektörde çeşitli firmalarda farklı pozisyonlarda görev aldı. Ayrıca B sınıfı iş güvenliği uzmanı olarak iş güvenliği konusunda çalışmalar yapmaktadır.