

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SEGMAN SİLİNDİR ÇİFTİ YÜZEYLERİNDE BOR DOP  
EDİLMİŞ KAPLAMANIN MOTOR SÜRTÜNME  
KAYIPLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Murat KAPSIZ**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE EĞİTİMİ**  
**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Adnan PARLAK**  
**Ortak Danışman : Prof. Dr. Cuma BİNDAL**

**Ekim 2011**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SEGMAN SİLİNDİR ÇİFTİ YÜZEYLERİNDE BOR DOP  
EDİLMİŞ KAPLAMANIN MOTOR SÜRTÜNME  
KAYIPLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

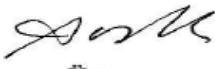
DOKTORA TEZİ


Murat KAPSIZ

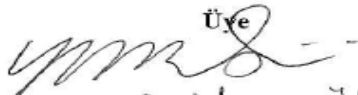
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE EĞİTİMİ

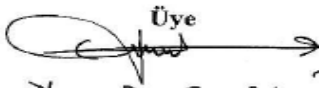
Bu tez 28 / 11 / 2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği/Oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

  
Jüri Başkanı  
Prof. Dr. İsmet GEVİK

  
Üye  
Prof. Dr. Adnan PARLAK

  
Üye  
Doç. Dr. Harif YAŞAR

  
Üye  
Doç. Dr. Yasim ÜST

  
Üye  
Doç. Dr. Ceylan DERİZ

## ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince çalışmalarımı teşvik eden, her türlü yardımlarını esirgemeyen danışmanlarım Prof. Dr. Adnan PARLAK ve Prof. Dr. Cuma BİNDAL'a minnet borçluyum. Tez izleme jürimde bulunan değerli katkıları ile çalışmalarına yön veren Prof. Dr. İsmet ÇEVİK ve Prof. Dr. Hatem AKBULUT'a ayrıca deneysel çalışmalarım esnasında her zaman destek olan Hasan GÜREL'e teşekkür ederim. Tez çalışmam, 2007-05-04-003 ve 2007-50-02-005 nolu BAPK projelerinin mali katkıları ile gerçekleştirilmiştir. Maddi katkılarından dolayı Sakarya Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür ederim. Tez çalışmamın her aşamasında desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xx
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Tribolojik Sistem Tasarımı.....	2
1.2. Motor Sürtünmesinin Önemi.....	3
1.3. Motor Aşınmasının Önemi.....	4
BÖLÜM 2.	
İÇTEN YANMALI MOTORLARDA TRİBOLOJİ.....	7
2.1. İçten Yanmalı Motorlarda Yağlama .....	7
2.2. Segman-Gömlek Çifti Yağlaması.....	11
2.3. İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünme.....	13
2.4. Segman-Gömlek Çifti Sürtünmesi.....	15
2.5. İçten Yanmalı Motorlarda Aşınma.....	17
2.6. Segman-Gömlek Çifti Aşınması.....	19
2.7. Segman-Gömlek Çifti Sürtünme Ölçüm Yöntemleri.....	22
2.7.1. Döner hareketli test sistemi .....	23
2.7.2. Piston hareketli test sistemi.....	24
2.7.3. Segman-gömlek sürtünmesi ölçüm sistemi.....	25
2.8. İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünme Kayıpları Ölçüm Yöntemleri.	26

2.8.1. Motor yöntemi.....	27
2.8.2. Morse yöntemi.....	28
2.8.3. Willians çizgi yöntemi.....	29
2.8.4. Hareketli gömlek yöntemi.....	29
2.8.5. Anlık indike basınç yöntemi.....	31
2.8.6. P- $\omega$ yöntemi.....	32
2.9. Motor Tasarımının Sürtünme ve Aşınmaya Etkileri.....	33
2.9.1. Motor özellikleri.....	33
2.9.2. Segman ve gömlek dizaynı.....	34
2.10 Segman Kaplamaları.....	35
2.10.1. Krom Kaplama.....	35
2.10.1.1. Elektro kimyasal kaplama yöntemi.....	36
2.10.1.2. Kromun elektro kimyasal kaplanması.....	38
2.10.1.3. Alternatif kaplamalar.....	40
2.10.2. HVOF (Yüksek Hızlı Oksi Yakıt) Kaplama.....	44
2.10.2.1. Gaz hareketi, yanma ve hız.....	45
2.10.2.2. Yoğunluk.....	46
2.10.2.3. Yüksek bağ mukavemeti.....	46
2.10.2.4. Sertlik.....	47
2.10.2.5. Kaplama kalınlığı.....	47
2.10.2.6. Aşınma mukavemeti.....	47
2.10.3. Kaplama Tozları.....	48
<b>BÖLÜM 3.</b>	
<b>SÜRTÜNME KAYIPLARININ TEORİK ANALİZİ</b>	<b>53</b>
3.1. Teorik Analiz	53
3.2. Analiz Sonuçları	58
<b>BÖLÜM 4.</b>	
<b>DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>63</b>
4.1. Kullanılan Tozlar.....	64
4.2. Altlık Malzemeler.....	66
4.2.1. Segman.....	66

4.2.2. G6mlek.....	67
4.3. Kaplama Tabakalarının Üretimi.....	68
4.3.1. Krom kaplama.....	68
4.3.1.1. Yüzey temizleme işlemleri.....	69
4.3.1.2. Kaplama işlemleri.....	69
4.3.2. HVOF kaplama.....	70
4.3.2.1. Altlık malzeme yüzeyinin hazırlanması.....	70
4.3.2.2. Kaplama işlemleri.....	70
4.4. Metalografik İncelemeler.....	71
4.5. X-Işınları Difraksiyon Analizi.....	71
4.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Elementel Analiz İncelemeleri (EDX).....	72
4.7. Mikro Sertlik Ölçümleri.....	72
4.8. Taguchi Metodu ve Deney Tasarımı.....	72
4.8.1. Ortogonal diziler.....	73
4.8.2. Sinyal / Gürültü (S/N) oranı.....	74
4.8.3. Etkileşimlerin incelenmesi.....	75
4.8.4. Varyans analizi.....	75
4.8.4.1. Kareler toplamı.....	76
4.8.4.2. Serbestlik derecesi.....	77
4.8.4.3. Varyans.....	78
4.8.4.4. F testi.....	78
4.8.4.5. Doğrulama deneyleri.....	79
4.9. Aşınma Deneyleri.....	79
4.9.1. Aşınma cihazı özellikleri.....	79
4.9.2. Hassas terazi.....	82
4.9.3. Veri aktarma sistemi.....	82
4.9.3.1. Üç eksenli kuvvet sensörü.....	83
4.9.3.2. Şarj amplifikatörü.....	84
4.9.3.3. Sinyal şartlandırıcı.....	85
4.9.3.4. BNC kablolar.....	86
4.9.3.5. DAQ kart.....	86
4.9.3.6. LabVIEW programı.....	88

4.9.4. Program yazımı.....	89
4.9.4.1. Ön panel.....	89
4.9.4.2. Blok diyagram.....	90
4.9.5. Kullanılan hesaplamalar.....	90
4.9.5.1. Sürtünme katsayısı.....	91
4.9.5.2. Aşınma oranı.....	91
4.10. Motor Deneyleri.....	91
4.10.1. Deney Motoru.....	92
4.10.1.1. Soğutma sistemi.....	92
4.10.1.2 Yağlama Sistemi.....	93
4.10.2. Dinamometre.....	94
4.10.3. Hesaplamalarda Kullanılan Formüller .....	94
4.11. Belirsizlik Analizi.....	95

## BÖLÜM 5.

DENEYSSEL SONUÇLAR VE İRDELEME.....	99
5.1. Kullanılan Tozların Özelliklerinin İncelenmesi.....	99
5.2. Metalografik İncelemeler.....	100
5.2.1. Kaplama tabakalarının kalınlıkları.....	101
5.2.2. Kaplama tabakalarının porozitesi.....	102
5.3. X-Işınları Difraksiyon Analizi.....	103
5.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Elementel Analiz İncelemeleri (EDX) .....	107
5.5. Sertlik Ölçümleri.....	108
5.6. Yüzey Pürüzlülük Değerleri.....	110
5.7. Taguchi Metodu Sonuçları.....	110
5.7.1. Segman aşınma analizi.....	111
5.7.2. Gömlek aşınma analizi.....	117
5.8. Sürtünme Katsayısı Sonuçları.....	120
5.9. Aşınma Deney Sonuçları.....	135
5.9.1. Segman aşınmaları.....	135
5.9.2. Gömlek aşınmaları.....	145
5.9.3. Aşınma oranları contour eğrileri.....	155

5.10. Motor Deneyleri Sonuçları.....	163
5.10.1. Sürtünme momentleri ve güç haritaları.....	163
5.10.2. Sürtünme momenti karşılaştırmaları.....	168
5.10.3. Sürtünme gücü karşılaştırmaları.....	172
BÖLÜM 6.	
GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....	177
6.1. Taguchi Metodu Sonuçları.....	177
6.2. Sürtünme Katsayısı Sonuçları.....	178
6.3. Aşınma Oranları Sonuçları.....	179
6.4. Motor Deneyleri Sonuçları.....	180
6.5. Genel Değerlendirme ve Karşılaştırmalar.....	182
KAYNAKLAR.....	184
ÖZGEÇMİŞ.....	199



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Al	: Alüminyum
B	: Bor
C	: Karbon
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
CH <sub>4</sub>	: Metan
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	: Etilen
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	: Propilen
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	: Propan
CrO <sub>3</sub>	: Kromik asit
d <sub>H</sub>	: Orifis çapı
F	: Fren terazi kuvveti
Fe	: Demir
F <sub>n</sub>	: Normal kuvvet
F <sub>s</sub>	: Sürtünme kuvveti
H <sub>2</sub>	: Hidrojen
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	: Sülfirik asit
Hz	: Hertz
H <sub>u</sub>	: Yakıtın alt ısı değeri
L(y)	: Hedef değerden sapma
l	: Yol,m
m	: Hedef değer
M <sub>d</sub>	: Döndürme momenti
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
$\dot{m}_y$	: Yakıtın kütleli debisi

N	: Gözlemlerin toplam sayısı
Ni	: Nikel
n	: Motor devri, devir/dakika
O <sub>2</sub>	: Oksijen
P	: Basınç, bar
ppm	: Milyonda bir partikül
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
P <sub>e</sub>	: Efektif güç, kW
r	: Krank mili yarıçapı, m
Si	: Silisyum
SO <sub>x</sub>	: Kükürt oksitler
T	: Tüm gözlemlerin toplamı
Ti	: Titanyum
V	: Hacim, cm <sup>3</sup>
V <sub>h</sub>	: Strok hacmi, m <sup>3</sup>
V <sub>A</sub>	: A faktörünün serbestlik derecesi
v <sub>B</sub>	: B faktörünün serbestlik derecesi
v <sub>T</sub>	: Toplam serbestlik derecesi
V <sub>p</sub>	: Piston hızı, m/s
$\overline{V_p}$	: Ortalama piston hızı (m/s)
W	: Tungsten
WC	: Tungsten karbür
W <sub>i</sub>	: Çevrim başına indike iş
W <sub>o</sub>	: Aşınma oranı
W <sub>p</sub>	: Pompalama kayıplarının işi
Z	: Çevrim başına devir sayısı
$\rho$	: Yoğunluk
$\mu$	: Sürtünme katsayısı
$\theta$	: Krank açısı, radyan
$\eta_v$	: Volümetrik verim
$\Delta V$	: Tüketilen yakıt hacmi
$\Delta t$	: Yakıt tüketme süresi

$\Delta h_H$	: Manometredeki akışkan yüksekliği (mmSS)
AÖN	: Alt ölü nokta
APS	: Atmosferik plazma sprey
ASTM	: Amerikan Malzeme Test Topluluğu
BMEP	: Fren ortalama basıncı
BNC	: Bayonet Neill Concelman
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
DAQ	: Data acquisition
DC	: Doğru akım
DIN	: Alman normu
EHD	: Elastohidrodinamik
FMEP	: Ortalama sürtünme basıncı
GIMEP	: Brüt ortalama indike basınç
HVOF	: Yüksek hızlı alev püskürtme
HFk	: Hava fazlalık katsayısı
H/Y	: Hava-yakıt oranı
KMA	: Krank mili açısı
MEP	: Ortalama efektif basınç
MoDTC	: Molibden dialkilditiokarbamat
Mo	: Molibden
PMEP	: Pompalama ortalama basınç
S	: Kükürt
SST	: Genel kareler toplamı
$SS_A$	: A faktörüne ait kareler toplamı
$SS_B$	: B faktörüne ait kareler toplamı
$SS_{AXB}$	: A ve B faktörlerinin etkileşim faktörüne ait kareler toplamı
$SS_e$	: Hata kareler toplamı
ÜÖN	: Üst ölü nokta
VI	: Sanal enstrüman
Zn	: Çinko

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Tribolojik sistemin yapısı.....	3
Şekil 1.2.	Tribolojik test sıralaması.....	3
Şekil 2.1.	Motor parçaları ile ilişkilendirilmiş Stribeck diyagramı .....	8
Şekil 2.2.	Krank mili açısına göre piston hızının değişimi.....	9
Şekil 2.3.	Kompresyon segmanı ve gömlek arasında ölçülen yağ film kalınlığının yük durumuna göre değişimi.....	10
Şekil 2.4.	(a)İçten yanmalı motorlarda enerji dağılımı (b) Mekanik kayıpların dağılımı.....	14
Şekil 2.5.	Abrazif aşınma .....	18
Şekil 2.6.	Adezif aşınma .....	18
Şekil 2.7.	Korozif aşınma .....	19
Şekil 2.8.	Yorulma aşınması .....	19
Şekil 2.9.	Adezif silindir aşınması.....	22
Şekil 2.10.	Döner hareketli test sistemi.....	24
Şekil 2.11.	Piston hareketli test sistemi .....	25
Şekil 2.12.	Segman ve gömlek sürtünmesi ölçüm cihazı .....	26
Şekil 2.13.	Hareketli gömlek yönteminin şematik görünüşü .....	30
Şekil 2.14.	Piston serbest cisim diyagramı .....	31
Şekil 2.15.	Çekirge bağlantı .....	32
Şekil 2.16.	Banyo düzeneği .....	37
Şekil 2.17.	Kaplama dağılımı .....	37
Şekil 2.18.	Metal ve alaşımların elektro kimyasal kaplanması .....	38
Şekil 2.19.	Sıvı yakıtlı HVOF işleminin şematik gösterimi .....	48
Şekil 2.20.	Alaşım elementlerinin NiCrBSi tabakasının sertliğine etkileri ..	50
Şekil 2.21.	Cr-B-Ni 1000°C’ deki faz diyagramı.....	51
Şekil 3.1.	Otto çevrimi Basınç-Hacim diyagramı .....	54

Şekil 3.2.	Farklı sürtünme katsayılarında, motor gücünün sıkıştırma oranına bağlı olarak değişimi.....	59
Şekil 3.3.	Farklı sürtünme katsayılarında, verimin sıkıştırma oranına bağlı olarak değişimi.....	59
Şekil 3.4.	Farklı sürtünme katsayılarında, motor gücünün verim ile değişimi.....	60
Şekil 3.5.	Farklı piston hızlarında, motor gücünün sıkıştırma oranına bağlı olarak değişimi .....	61
Şekil 3.6.	Farklı piston hızlarında, verimin sıkıştırma oranına bağlı olarak değişimi .....	61
Şekil 4.1.	Segman numunelerinin (A) lamel yapısı ve (B) dağlanmış yapıdaki lamel yapısı.....	67
Şekil 4.2.	Gömlek numunelerinin dağlanmış ve dağlanmamış haldeki yapısı.....	68
Şekil 4.3.	Karşılıklı aşınma cihazı şematik görünümü .....	79
Şekil 4.4.	Segman, gömlek numunesi ve hareket yönünün şematik görünümü .....	80
Şekil 4.5.	Aşınma cihazı ve şematik görünümü .....	80
Şekil 4.6.	DC motor ve invertör .....	81
Şekil 4.7.	Isı kontrol ünitesi ve fişek ısıtıcılar .....	81
Şekil 4.8.	Segman tutucu .....	81
Şekil 4.9.	Hassas terazi .....	82
Şekil 4.10.	Kullanılan veri toplama sisteminin elemanları .....	83
Şekil 4.11.	Üç eksenli kuvvet sensörü .....	84
Şekil 4.12.	Şarj amplifikatörü .....	84
Şekil 4.13.	Sinyal şartlandırıcı .....	85
Şekil 4.14.	BNC kablo ve koaksiyel soketleri .....	86
Şekil 4.15.	DAQ kart .....	87
Şekil 4.16.	Ön paneldeki manuel ayarlar .....	89
Şekil 4.17.	Ön panel grafik ekranı .....	90
Şekil.4.18.	Programın blok diyagramı .....	90
Şekil.4.19.	Motor deney düzeneği şematik görünümü .....	92

Şekil 4.20.	Deney motoru .....	92
Şekil 4.21.	Soğutma sistemi şematik görünümü .....	93
Şekil 4.22.	Yağlama sistemi şematik görünümü.....	93
Şekil 4.23.	Kontrol paneli ve dinamometre .....	94
Şekil 4.24.	Yük hücresi ve gösterge paneli .....	94
Şekil 5.1.	NiCrBSi tozunun SEM görünüşü ve EDX analizi.....	99
Şekil 5.2.	%88WC+%12 Co tozunun SEM görünüşü ve EDX analizi ....	100
Şekil 5.3.	%40NiCrBSi+%60 (%88WC-%12Co) karışımının SEM görünüşü ve EDX analizi.....	100
Şekil 5.4.	Kaplamaların optik mikroskop görüntüleri a)Krom kaplama b)HVOF NiCrBSi c)HVOF %60 WC-%40 NiCrBSi.....	101
Şekil 5.5.	Kaplamaların kaplama kalınlıklarını gösteren optik mikroskop görüntüleri a)Krom kaplama b)HVOF NiCrBSi c)HVOF %60 WC-%40 NiCrBSi.....	102
Şekil 5.6.	Kaplamaların porozitelerini gösteren optik mikroskop görüntüleri a) Krom kaplama b)HVOF NiCrBSi c)HVOF %60 WC-%40 NiCrBSi.....	103
Şekil 5.7.	NiCrBSi tozunun x-ışını difraksiyon paternleri .....	104
Şekil 5.8.	%88WC+%12Co tozunun x-ışını difraksiyon paternleri .....	104
Şekil 5.9.	%40NiCrBSi+%60(%88WC+%12Co) toz karışımının x-ışını difraksiyon paternleri .....	105
Şekil 5.10.	Elektrokimyasal krom kaplama tabakasının x-ışını difraksiyon paternleri.....	105
Şekil 5.11.	HVOF NiCrBSi kaplama tabakasının x-ışını difraksiyon paternleri .....	106
Şekil 5.12.	HVOF %40NiCrBSi+%60(%88WC+%12Co) kaplama tabakasının x-ışını difraksiyon paternleri.....	106
Şekil 5.13.	Elektrokimyasal krom kaplamanın SEM görünüşü ve EDX analizi .....	107
Şekil 5.14.	HVOF NiCrBSi kaplama tabakasının SEM görünüşü ve EDX analizi.....	107

Şekil 5.15.	HVOF %40 NiCrBSi-%60WC kaplama tabakasının SEM görünüşü ve EDX analizleri .....	108
Şekil 5.16.	Mikro sertlik izlerinin optik görüntüleri a)Krom kaplama b)HVOF NiCrBSi c)HVOF %60 WC-%40 NiCrBSi .....	109
Şekil 5.17.	Faktörlerin S/N oranları.....	115
Şekil 5.18.	Faktör etkileşimlerinin S/N oranları.....	116
Şekil 5.19.	Faktörlerin S/N oranları.....	118
Şekil 5.20.	Faktör etkileşimlerinin S/N oranları.....	119
Şekil 5.21.	U şekilli krank açısına göre sürtünme katsayısı .....	122
Şekil 5.22.	30°C, 60N ve 30 d/d' daki sürtünme katsayıları .....	123
Şekil 5.23.	30°C, 60N ve 60 d/d' daki sürtünme katsayıları .....	123
Şekil 5.24.	30°C, 60N ve 90 d/d' daki sürtünme katsayıları .....	124
Şekil 5.25.	30°C, 60N ve 120 d/d' daki sürtünme katsayıları .....	124
Şekil 5.26.	30°C, 60N ve 150d/d'daki sürtünme katsayıları.....	125
Şekil.5.27.	30°C, 80N ve 30 d/d' daki sürtünme katsayıları .....	125
Şekil 5.28.	30°C, 80N ve 60d/d'daki sürtünme katsayıları .....	126
Şekil 5.29.	30°C, 80N ve 90 d/d' daki sürtünme katsayıları .....	126
Şekil 5.30.	30°C, 80N ve 120 d/d' daki sürtünme katsayıları .....	127
Şekil 5.31.	30°C, 80N ve 150 d/d' daki sürtünme katsayıları.....	127
Şekil 5.32.	30°C, 100N ve 30 d/d' daki sürtünme katsayıları.....	128
Şekil.5.33.	30°C, 100N ve 60 d/d' daki sürtünme katsayıları.....	128
Şekil 5.34.	30°C, 100N ve 90 d/d' daki sürtünme katsayıları.....	129
Şekil 5.35.	30°C, 100N ve 120 d/d' daki sürtünme katsayıları.....	129
Şekil 5.36.	30°C, 100N ve 150 d/d' daki sürtünme katsayıları .....	130
Şekil 5.37.	50°C, 60N ve 30 d/d' daki sürtünme katsayıları.....	130
Şekil 5.38.	50°C, 60N ve 60 d/d' daki sürtünme katsayıları.....	131
Şekil 5.39.	50°C, 60N ve 90 d/d' daki sürtünme katsayıları.....	131
Şekil 5.40.	50°C, 60N ve 120 d/d' daki sürtünme katsayıları.....	132
Şekil 5.41.	50°C, 60N ve 150 d/d' daki sürtünme katsayıları.....	132
Şekil 5.42.	50°C, 80N ve 30 d/d' daki sürtünme katsayıları.....	133
Şekil 5.43.	50°C, 80N ve 60 d/d' daki sürtünme katsayıları .....	133
Şekil 5.44.	50°C, 80N ve 90 d/d' daki sürtünme katsayıları.....	134
Şekil 5.45.	50°C, 80N ve 120 d/d' daki sürtünme katsayıları.....	134

Şekil 5.46.	50°C, 80N ve 150 d/d'daki sürtünme katsayıları.....	135
Şekil 5.47.	30°C ve 60 N'da segman aşınma oranları .....	136
Şekil 5.48.	30°C ve 80 N'da segman aşınma oranları.....	137
Şekil 5.49.	30°C ve 100 N'da segman aşınma oranları.....	137
Şekil 5.50.	50°C ve 60 N'da segman aşınma oranları.....	138
Şekil 5.51.	50°C ve 80 N'da segman aşınma oranları.....	139
Şekil 5.52.	50°C ve 100 N'da segman aşınma oranları.....	140
Şekil 5.53.	70°C ve 60 N'da segman aşınma oranları.....	141
Şekil 5.54.	70°C ve 80 N'da segman aşınma oranları.....	141
Şekil 5.55.	70°C ve 100 N'da segman aşınma oranları.....	142
Şekil 5.56.	90°C ve 60 N'da segman aşınma oranları.....	143
Şekil 5.57.	90°C ve 80 N'da segman aşınma oranları.....	144
Şekil 5.58.	90°C ve 100 N'da segman aşınma oranları.....	144
Şekil 5.59.	30°C ve 60N'da gömlek aşınmaları.....	146
Şekil 5.60.	30°C ve 80N'da gömlek aşınmaları.....	147
Şekil 5.61.	30°C ve 100N'da gömlek aşınmaları.....	147
Şekil 5.62.	50°C ve 60N'da gömlek aşınmaları.....	148
Şekil 5.63.	50°C ve 80N'da gömlek aşınmaları.....	149
Şekil 5.64.	50°C ve 100N'da gömlek aşınmaları.....	150
Şekil 5.65.	70°C ve 60N'da gömlek aşınmaları.....	151
Şekil 5.66.	70°C ve 80N'da gömlek aşınmaları.....	151
Şekil 5.67.	70°C ve 100N'da gömlek aşınmaları.....	152
Şekil 5.68.	90°C ve 60N'da gömlek aşınmaları.....	153
Şekil 5.69.	90°C ve 80N'da gömlek aşınmaları.....	154
Şekil 5.70.	90°C ve 100N'da gömlek aşınmaları.....	154
Şekil 5.71.	30°C'de Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi segman aşınma oranları .....	156
Şekil 5.72.	50°C'de Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi segman aşınma oranları .....	157
Şekil 5.73.	70°C'de Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi segman aşınma oranları .....	158
Şekil 5.74.	90°C'de Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi segman aşınma oranları .....	159
Şekil 5.75.	30°C'de gömlek aşınma oranları .....	160
Şekil 5.76.	50°C'de gömlek aşınma oranları .....	161
Şekil 5.77.	70°C'de gömlek aşınma oranları.....	162
Şekil 5.78.	90°C'de gömlek aşınma oranları .....	163



Şekil 5.79.	Cr kaplı segmanın sıcaklık ve devre bağlı sürtünme momenti haritası.....	164
Şekil 5.80.	Cr kaplı segmanın sıcaklık ve devre bağlı sürtünme gücü haritası.....	165
Şekil 5.81.	NiCrBSi kaplı segmanın sıcaklık ve devre bağlı sürtünme momenti haritası.....	166
Şekil 5.82.	NiCrBSi kaplı segmanın sıcaklık ve devre bağlı sürtünme gücü haritası.....	166
Şekil 5.83.	WC-NiCrBSi kaplı segmanın sıcaklık ve devre bağlı sürtünme momenti haritası.....	167
Şekil 5.84.	WC-NiCrBSi kaplı segmanın sıcaklık ve devre bağlı sürtünme gücü haritası.....	168
Şekil 5.85.	30 °C’de motor sürtünme momenti değişimi.....	169
Şekil 5.86.	50 °C’de motor sürtünme momenti değişimi.....	170
Şekil 5.87.	70 °C’de motor sürtünme momenti değişimi.....	171
Şekil 5.88.	90 °C’de motor sürtünme momenti değişimi.....	172
Şekil 5.89.	30°C’de motor sürtünme gücü değişimleri.....	173
Şekil 5.90.	50°C’de motor sürtünme gücü değişimleri.....	174
Şekil 5.91.	70°C’de motor sürtünme gücü değişimleri.....	175
Şekil 5.92.	90°C’de motor sürtünme güçleri değişimi.....	176
Şekil 6.1.	NiCrBSi kaplı segman kullanımında aşınma cihazı ve motor üzerindeki sürtünme % değişimi.....	182
Şekil 6.2.	WC-NiCrBSi kaplı segman kullanımında aşınma cihazı ve motor üzerindeki sürtünme % değişimi.....	183

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Ni esaslı alaşımların kimyasal bileşimleri ve sertlik değerleri.....	50
Tablo 3.1.	Analizde kullanılan değerler.....	58
Tablo 4.1.	Kullanılan tozların kimyasal bileşimleri ve bazı fiziksel özellikleri.....	66
Tablo 4.2.	Altlık malzeme olarak kullanılan dökme demir segmanın kimyasal bileşimi.....	66
Tablo 4.3.	Segman Numunelerinin malzeme özellikleri .....	67
Tablo 4.4.	DeneYlerde segmanın çifti olarak kullanılan dökme demir gömleğın kimyasal bileşimi .....	67
Tablo 4.5.	Gömlek Numunelerinin malzeme özellikleri .....	68
Tablo 4.6.	Krom kaplama öncesi yüzey temizleme banyosu kimyasal özellikleri.....	69
Tablo 4.7.	Krom kaplama parametreleri .....	70
Tablo 4.8.	HVOF kaplama parametreleri.....	71
Tablo 4.9.	Ortogonal dizilerden L <sub>27</sub> (3 <sup>13</sup> ) .....	73
Tablo 4.10.	Taguchi metodunun Sinyal/Gürültü (S/N) oranları.....	75
Tablo 4.11.	DeneYlerde kullanılan yağ özellikleri.....	82
Tablo 4.12.	Kuvvet sensörü özellikleri.....	84
Tablo 4.13.	Şarj amplifikatörü özellikleri.....	85
Tablo 4.14.	Sinyal şartlandırıcı özellikleri.....	85
Tablo 4.15.	DAQ kart özellikleri.....	87
Tablo 4.16.	DeneY motoru özellikleri.....	92
Tablo 4.17.	DeneYsel bulguların atılması için Chauvenet kriteri.....	98
Tablo 4.18.	Belirsilik analizi sonuçları.....	98
Tablo 5.1.	Kaplamaların mikro sertlik değerleri.....	109
Tablo 5.2.	Yüzey pürüzlülük değerleri.....	110

Tablo 5.3.	Faktörler ve seviyeleri.....	111
Tablo 5.4.	Hazırlanan $L_{27}$ dizisi.....	112
Tablo 5.5.	Faktörlerin ve deney sonuçlarının programa girilişi.....	113
Tablo 5.6.	Segman aşınması S/N oranları .....	114
Tablo 5.7.	En küçük en iyiye göre S/N oran sonuçları.....	115
Tablo 5.8.	Segman aşınması için ANOVA tablosu.....	116
Tablo 5.9.	Gömlek aşınması S/N oranları.....	117
Tablo 5.10.	En küçük en iyiye göre S/N oran sonuçları.....	118
Tablo 5.11.	Gömlek aşınması için ANOVA tablosu.....	119

## ÖZET

Anahtar Kelimeler: Motor sürtünmesi, Aşınma deneyleri, Motor performansı, Segman kaplamaları, HVOF kaplama, Taguchi metodu

İçten yanmalı motorların performans kayıplarının en büyük nedeni sürtünme kayıplardır. Bu kayıpların en önemli kısmı da motor içerisindeki sürtünen parçalar tarafından oluşturulan sürtünme kayıplarındır. Motor içerisinde oluşan sürtünme kayıpları, motor performansı ve yakıt ekonomisini olumsuz yönde etkiler. Sürtünme kayıplarının yarısını oluşturan piston segmanı ve silindir gömleği sürtünmesi içten yanmalı motorlarda karşılaşılan en büyük sürtünme kaynağıdır.

Piston segmanı ve silindir gömleği sürtünmesinin azaltılması için birçok araştırma yapılmış ve çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Uygulanan yöntemler; düşük viskoziteli ve sentetik oranı yüksek yağ kullanımı, plazma kaplı silindirler, döner gömlekli motor uygulaması ve alternatif segman kaplamalarıdır.

Günümüzde malzeme kaplama yöntemleri sürekli gelişmektedir. Segman uygulamalarında, en yaygın şekilde kullanılan geleneksel elektrokimyasal krom kaplama yerini farklı kaplama yöntemlerine bırakmaktadır. Bu kaplamalar, CVD, PVD, atmosferik plazma ve HVOF (Yüksek hızlı alev püskürtme) kaplamalar şeklinde yaygınlaşmaktadır. Kaplama uygulamalarının en önemli özelliği katı yağlayıcı ve aşınma dayanımı çok yüksek olan malzemelerin dökme demir segmanlara uygulanabilmeleridir. Literatürde genellikle HVOF yöntemi ile sert karbürler uygulanmıştır.

Bu çalışmada, aşınma dayanımı yüksek olan NiCrBSi ve WC-NiCrBSi tozları HVOF yöntemi ile dökme demir segmanlar üzerine kaplanmıştır. Aynı şekilde dökme demir segman üzerine uygulanan elektrokimyasal krom kaplama ile aşınma ve sürtünme performansları açısından karşılaştırılmışlardır. Aşınma deneylerinden önce Taguchi analiz metodu uygulanarak optimum deney şartları ve etkin faktörler belirlenmiştir. Aşınma tezgâhın da tüm kaplamaların sürtünme katsayıları belirlenmiş daha sonra aşınma oranları ölçülerek standart değerle karşılaştırılmıştır. Aşınma ve sürtünme üzerinde etkin olan sıcaklık, yük ve hız parametreleri deneylerde farklı şartlarında uygulanmıştır. Bu deneylerin ışığında motor deneylerine geçilmiştir. Kaplanan segmanlar benzinli motor üzerine monte edilerek, motorun sürtünme kayıpları farklı sıcaklık ve devirler için ölçülmüştür.

# **INVESTIGATION OF EFFECT OF BORON DOPED COATING ON PISTON RING-CYLINDER LINER PAIR SURFACE TO ENGINE FRICTION LOSSES**

## **SUMMARY**

Key Words: Engine friction, Wear, Engine performance, Piston ring coating, HVOF, Taguchi Design Method.

Performance losses of internal combustion engine are mostly due to mechanical losses. The most important part of these losses is friction losses which are composed by friction component inside the engine. Friction losses composed inside the engine effect the engine performance and fuel economy negatively.

Nowadays, material coating methods are improving continuously. In piston ring applications, traditional electrochemical chrome coating method which is used widely replaces different coating methods. These coating methods are CVD, PVD, atmospheric plasma and HVOF. The most important features of the coating applications are their applicability to materials having high resistant of wear and solid lubricant.

In this study the die cast piston rings were coated with NiCrBSi and WC- NiCrBSi powders by HVOF method. These coatings were compared with electrochemical chrome coating in terms of wear and friction performance. All coatings were reproduced. First, friction coefficient of all coatings were determined in wear test bench and then wear rate were compared each other. All experiments were applied under different temperatures, loads and speeds conditions. After friction and wear tests the engine tests were done. The coated piston rings were assembled to a SI engine and the friction losses of the test engine were measured under different temperature and speeds. At last, optimum tests conditions and efficient factors were determined for all tests by applying Taguchi design method.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Günümüzde her geçen gün artan taşıt sayısı, enerji kullanımındaki artış ve hava kirliliğini önlemek amacıyla geliştirilen egzoz emisyonu standartları dünya otomotiv sektörünün araştırma geliştirme faaliyetlerine yön vermektedir. Özellikle motor üreticileri, üretmiş oldukları motorlarda yüksek performans, düşük egzoz emisyonları ve yakıt ekonomisi gibi önemli zorlukları aşma ile karşı karşıyadırlar. Ayrıca fosil yakıt kaynaklarının giderek azalması, ekonomik rekabet ve çevresel kaygılar, otomobil motorlarının verimliliğinin araştırılması için yeni yöntemlerin araştırılmasını zorunlu kılmaktadır (MacLean,2003-Haşımoğlu,2000).

Motor üreticileri, çeşitli teknikler geliştirerek bu amaçlar doğrultusunda sürekli çalışmaktadırlar. Bu tekniklerden bir tanesi, motor soğutma sisteminin küçültülmesi (mümkünse soğutmanın kaldırılması) ile yüksek sıcaklıkta motorun çalışmasına izin verilmesi ve böylece yakıt verimliliğinin önemli bir oranda iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Böyle bir gelişme için çeşitli malzeme özelliklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Malzemedен istenen bazı özellikler, ısıl (termal) bozulma dayanımı, yüksek mukavemet, çok iyi sürtünme ve aşınma performansı olarak sıralanabilir (Narendra,2005).

Yakıt ekonomisinin iyileştirilmesi için diğer metotlar ise araç ağırlığının azaltılması için daha hafif malzeme kullanılması, egzoz ve motor gövdesinden olan ısı iletimine bağlı olarak ısı kaybının ve sürtünme kayıplarının azaltılmasıdır. Motor ağırlığının azaltılması yakıt verimliliği için anahtar bir faktördür. Araç üreticilerinin performans geliştirilmesi amacıyla taşıt ağırlığının azaltılması çalışmaları çok daha yaygın hale gelmektedir. Bunun sonucunda araç üzerindeki belirli aksamların plastik gibi hafif malzemelere dönüşümü yapılmaktadır. Böylece düşük yağ ve yakıt tüketimi ayrıca emisyon azaltılması sağlanmış olacaktır (Maclean,2003).

İçten yanmalı motorlarda sürtünme, toplam güç kaybının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Silindir içerisindeki yakıt-hava karışımını yanması sonucu oluşan basınç, piston-biyel-krank mekanizmasıyla işe dönüştürülerek çıkış miline aktarılır. Bu aktarım esnasında, işin bir kısmı sürtünmeleri yenmek için harcanır. Bu işe sürtünme işi denir. Motor performans artışı ve yakıt ekonomisi için en önemli sorun motor içerisinde oluşan sürtünme kayıplarıdır. Gerekli iyileştirmelerin yapılabilmesi için motor sürtünme kayıplarının azaltılması gerekmektedir (Lin,1993).

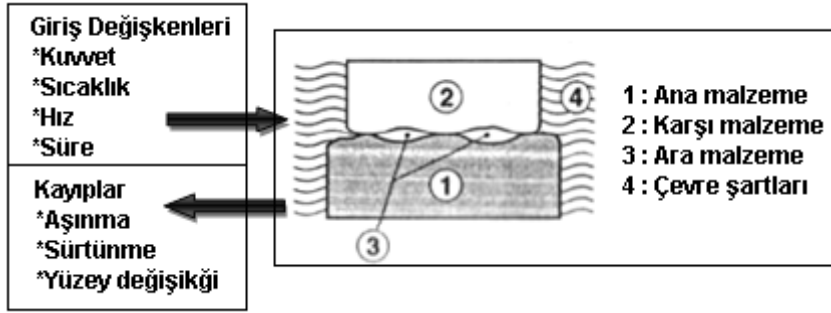
İçten yanmalı motorlarda motor içi sürtünmenin en önemli etkenlerden biri piston grubudur. Piston grubu sürtünmesi toplam motor sürtünmesinin yaklaşık % 40-55'ini oluşturmaktadır. Silindir gömleği-piston ve piston segmanı sürtünmesi, piston grubu sürtünme kaybının yaklaşık tamamıdır (Lin,1993).

Ayrıca yağ tüketiminin büyük bir bölümü, segman ve gömlek aşınmasıyla piston segmanının düşük seviyedeki sıyırma işlemi ve gömlek yüzeyinin bozulmasından meydana gelmektedir.

### **1.1. Tribolojik Sistem Tasarımı**

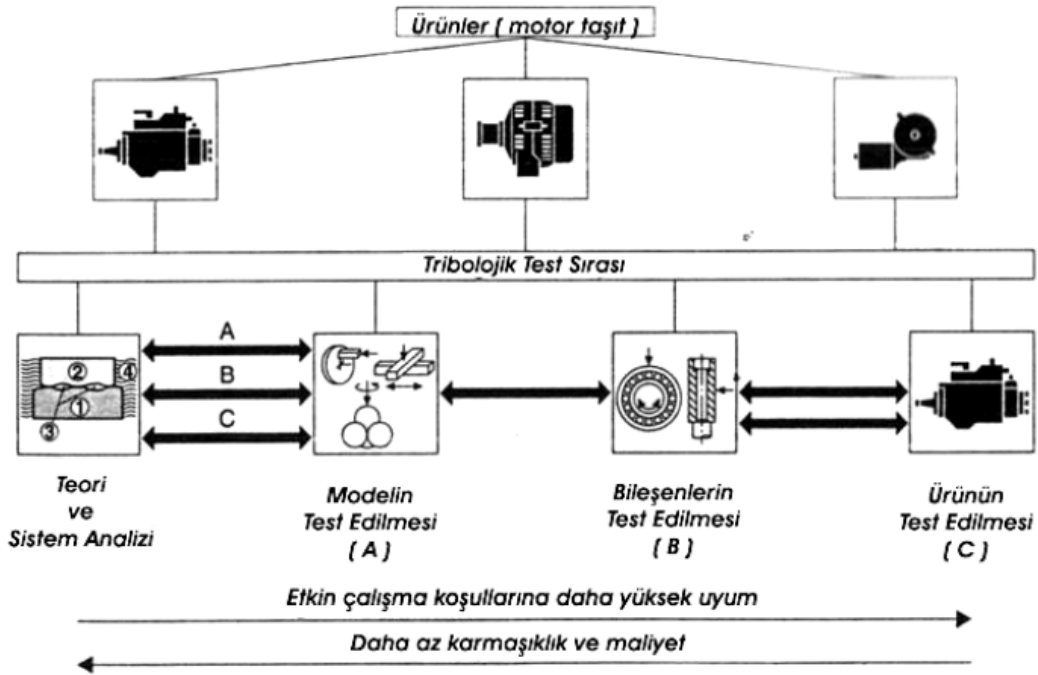
Tribolojik sistem tasarımında, aşınma ve sürtünme üzerine etki eden parametreler beraber incelenmelidir. Sistem bütünlüğü içerisinde her iki parametrenin birlikte incelendiği sisteme tribolojik sistem denir (Hutchings,1992).

Tribolojik sistemlerin tanımlanmasında üç parametre dikkate alınır. Malzeme özellikleri, çalışma koşulları ve çevre etkisi bu parametrelerdir. Malzeme özellikleri, sertlik, yüzey pürüzlülüğü gibi özelliklerdir. Çalışma koşulları, yük, yağlama ve devir gibi özelliklerdir. Çevre etkisi ise yüzey kimyası, nem ve sıcaklık gibi özellikleri kapsamaktadır (Hutchings,1992). Tribolojik sistemin yapısı Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Temas yüzeyleri için tribolojik sistem aşağıdakilerden oluşmaktadır. Malzeme özellikleri, A elemanlarının özellikleri ve salınım etkileri sistemi oluşturan yapılarıdır (Bosch,2001).



Şekil 1.1. Tribolojik sistem yapısı (Koç,2010)

Şekil 1.2’de tribolojik test sıralaması verilmiştir. Tribolojik sistemlerin test sıralamasında, sistem teorisi, sistem analizi, modelin, bileşenlerin ve ürünün test edilmesi uygulanacak basamakları göstermektedir. Teori ve analize doğru maliyet ve uygulama kolaylığı artmakta, ürünün test edilmesine doğru ise daha yüksek uyum sağlanmaktadır.



Şekil 1.2. Tribolojik test sıralaması(Bosch,2001)



## 1.2. Motor Sürtünmesinin Önemi

Heywood, motorlarda sürtünmeye neden olan faktörleri üç ana başlık altında incelemiştir. Bu kayıplar pompalama, sürtünen parçalar ve aksesuar kayıpları olarak adlandırılmıştır (Heywood,1988).

**Pompalama Kayıpları:** Taze dolgunun emme sistemi vasıtasıyla (hava filtresi, emme manifoldu, benzinli motorlarda gaz kelebeği ve supaplar) silindire alınması ve yanmış gazların silindirden ve egzoz sisteminden dışarı atılması esnasında harcanan işe pompalama işi denir. Şehir içi çalışma koşullarında, gaz kelebeği kısmi açık olduğundan benzinli motorlarda önemlidir.

**Sürtünen parçaların kayıpları:** Motorda birbirlerine göre bağıl hareket yapan parçalar arasındaki sürtünmelerin yenilmesi için harcanan iştir. Bu iş direk sürtünme işi olarak adlandırılır. Motorda bağıl hareket yaparak sürtünme kaybına neden olan parçalar: Silindir-piston segmanları, piston eteği-silindir gömleği, piston-piston pimi, krank ve kam mili yatakları; supap mekanizmaları, dişli, kasnak ve kayışlardır. Dizel motorlarında sürtünme kayıpları içerisinde en büyük kaybı direk sürtünme kayıpları oluşturur.

**Aksesuar Kayıpları:** Motor milinden hareket alan ve aksesuarlara harcanan kayıplardır. Parazitik kayıplar olarak da adlandırılır. Motordan hareket alan parçalar: Fan, devir daim pompası, yağ pompası, direksiyon hidrolik pompası ve klimadır.

## 1.3. Motor Aşınmasının Önemi

Aşınma, sürtünme yüzeyinden maddenin ayrılmasıdır. Aşınma yüzeylerinde oluşan malzeme kaybı, çalışma esnasında malzemelerin ömrünü ve çalışma performansını etkileyeceğinden ekonomik ve emniyet açısından çok önemlidir (Bhushan,2001).

Birçok üretici dökme demir motor blokları yerine daha hafif ve daha ucuz olan alüminyum-silisyum bloklar kullanmaktadır. Bununla beraber, yetersiz aşınma dayanımı ve düşük yük tutma gibi etkenler, bu malzemelerin direkt olarak silindir

gömlerinde kullanımını önlemektedir. Motorlarda silindir gömleri genellikle, alüminyum alaşım yerine yüksek aşınma mukavemeti ve işlenebilirliklerinden dolayı genellikle dökme demirden imal edilmektedir.

İçten yanmalı motorların en önemli parçalarını oluşturan segmanlar, silindirler ve pistonlar ağır çalışma ve çevre şartlarında çalışmaktadırlar. Motorlarda ana çalışma bölgeleri, segmanların alt ve üst yüzeyleri, piston oyuklarının alt ve üst yüzeyleri, piston etekleri, pistonun süpürdüğü alan, strok uzunluğu boyunca bulunan silindir gömleri ve piston pernosu muylu yatağıdır.

Silindir içerisindeki çalışma şartları, motor içi aşınma değerlerini etkilemektedir. Silindir içerisinde oluşan bu zor şartlar için, 10-15 m/s değerlerindeki yüksek ortalama piston hızları, 12000'den 1500 m/s<sup>2</sup>'ye kadar olan maksimum piston ivmesi (30000 m/s<sup>2</sup>'ye de çıkabilir), segman-gömlük bölgesinde yüksek ve çok çabuk oluşan yanma basınçları sayılabilir.

Ayrıca motor içerisinde sıcak yanma gazları ile yakın temas sonucu oluşan yüksek sıcaklıklar da aşınma mekanizmalarını arttırmaktadır. Motorun ilk çalıştırılmasında ya da soğuk havada segman ve silindir gömleği çeper sıcaklıkları oldukça düşüktür. Tablo 1.1'de motor bileşenlerinin kararlı çalışma hallerindeki sıcaklık değerleri verilmiştir.

Tablo 1.1. Motor bileşenlerinin sıcaklık değerleri (Müjdeci,2003)

Motor Bileşeni	Sıcaklık (°C)
Piston Alt Kısmı	250-400
İlk Piston Oyuğunun Altı	200-280
İlk Segmanın Kenarı	200-250
Silindir Gömleği İçi Üst Kısmı	160- 250
Silindir Gömleği İçi Alt Kısmı	130- 180
Piston Eteği	120-150

Diğer silindir içi etkiler ise, yağ tüketimi ve yanma esnasındaki karbonlaşmayı azaltmak için yağ tedarikinin bilerek sınırlandırılması, yağın yanmış gazlar ile teması sonucu buharlaşması ve motorun ilk hareketindeki olumsuz yağlama koşullarının

sonucunda yetersiz yağlama sayılabilir. Yanma ürünlerinin sonucu olarak korozyon ortamı ile temas, aşındırıcı ile temas, emme havası ile getirilenler, temel olarak silindir gömleğinin üst kısımları ve üst kompresyon segmanın aşınmasına etki ederler. Ayrıca yağ tarafından getirilen atık parçacıklar, silindir gömleğinin alt kısmına ve yağ segmanının aşınmasına etki ederler.

Bütün bunlar bize motor parçalarının değişik aşınma tiplerinden etkileneceği göstermektedir. Aşınma tiplerinin başlıcaları aşığdaki gibidir (Schilling,1972).

- Adhezif Aşınma
- Abrazif Aşınma
- Koroziif Aşınma
- Yorulma Aşınması

## **BÖLÜM 2. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA TRIBOLOJİ**

### **2.1. İçten Yanmalı Motorlarda Yağlama**

Otomobil motorlarının daha güçlü ve az yer kaplaması için devam eden eğilim parça tasarımcıların da yeni tasarımlar yapmaları konusunda zorlamaktadır. Gelişmiş özellik elde etmek için yapılan tasarımlarda daha fazla kombinasyonun bulunması istenmektedir. Örneğin daha hafif ve daha mukavim parça tasarımı gibi özellikler sayılabilir. Bu tasarım gelişimi motorun ana sürtünen parçaları olarak tanımlanabilecek yataklar, supap mekanizması ve piston grubu içinde geçerlidir. Daha fazla güç, yüksek devir veya yüksek sıcaklık gibi motordan istenilen zor koşullardaki çalışmalar için yapılan herhangi bir geliştirmenin, motorun dayanıklılığını olumsuz etkilememesi de önemlidir.

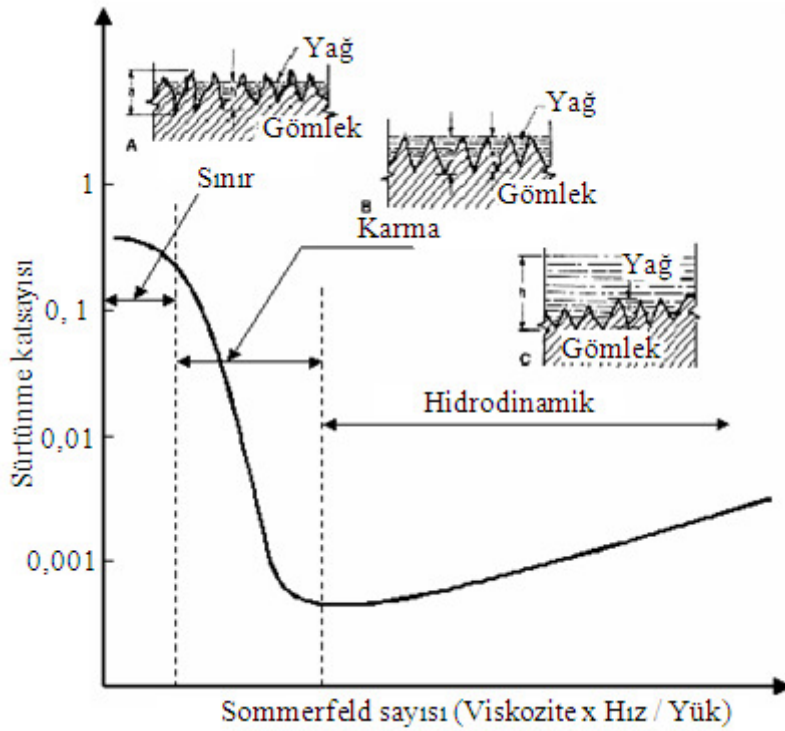
İçten yanmalı motorlarda tribolojik parçaların daha iyi tasarımının elde edilmesi için, silindir içinde ve dışında meydana gelen fiziksel ve kimyasal mekanizmaların daha iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu mekanizmalar motorun sürtünen parçalarının çalışma koşullarını belirler. Motorlarda özellikle sürtünen parçaların çalışma koşullarını belirleyen en önemli faktör yağlama koşullarıdır. Yağlama koşulları, yağlama rejimleri diye adlandırılır. Yağlama rejimleri Stribeck diyagramı yardımıyla açıklanırsa;

- Hidrodinamik yağlama
- Karma yağlama
- Sınır yağlama

Yağlayıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri ile yağ katkı malzemelerinin yağlama özelliklerine yaptıkları iyileştirmeler farklı yağlama rejimlerinde çok çeşitli sonuçlar doğurmaktadır. Günümüzde içten yanmalı motorlarda, yataklar, supap mekanizması

ve piston grubunu yağlamak için tek bir yağ kullanılmaktadır. Kullanılan yağ ile farklı çalışma koşullarına sahip motor parçalarının her birinin performansını en uygun hale getirmek istenmiştir. Motorlarda yapılan bu tercih seçilen yağlayıcının önemini ve işlevini vurgulamaktadır.

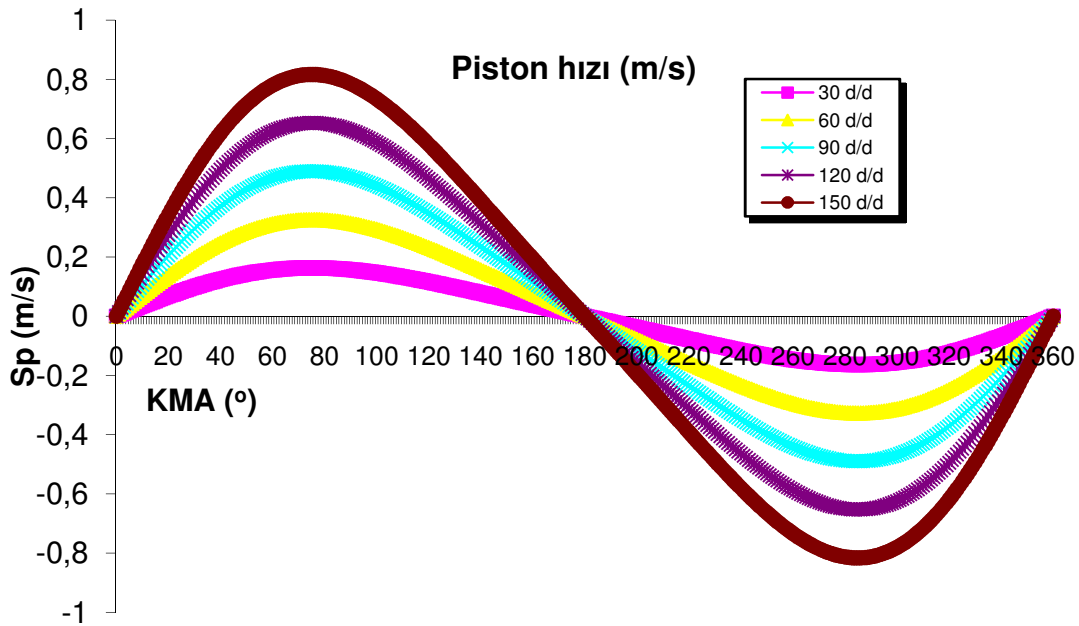
Birçok genel mühendislik uygulamasında tribolojik çiftlerin yüzeyleri toplam sürtünmeyi azaltacak ve aşınmayı düşürecek yağlayıcı ile ayrılmıştır. Modern yağlayıcılar bunu yağ filmi oluşturarak kolaylıkla üstesinden gelebilmektedir. Yağlama rejimleri farklılık göstermektedir. Örneğin sürtünen yüzeylerin tamamen birbirinden ayrılması yağlamanın bir şartı değildir. Farklı birçok değişik yağlama tipi vardır. Yağlama tipleri ve yüzey etkileşimleri Şekil 2.1'de, içten yanmalı motorların parçalarına adapte edilmiş şekilde görülebilir.



Şekil 2.1. Motor parçaları ile ilişkilendirilmiş Stribeck diyagramı (Taylor,1998-Uras,1984)

Stribeck diyagramı, sürtünme katsayısı ve Sommerfeld sayısı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Sommerfeld sayısı hız ve viskozitenin çarpımının temas yükü ya da temas basıncına oranı olarak ifade edilebilir. Bu diyagram sınır, karma ve hidrodinamik yağlama rejimlerinden oluşmaktadır.

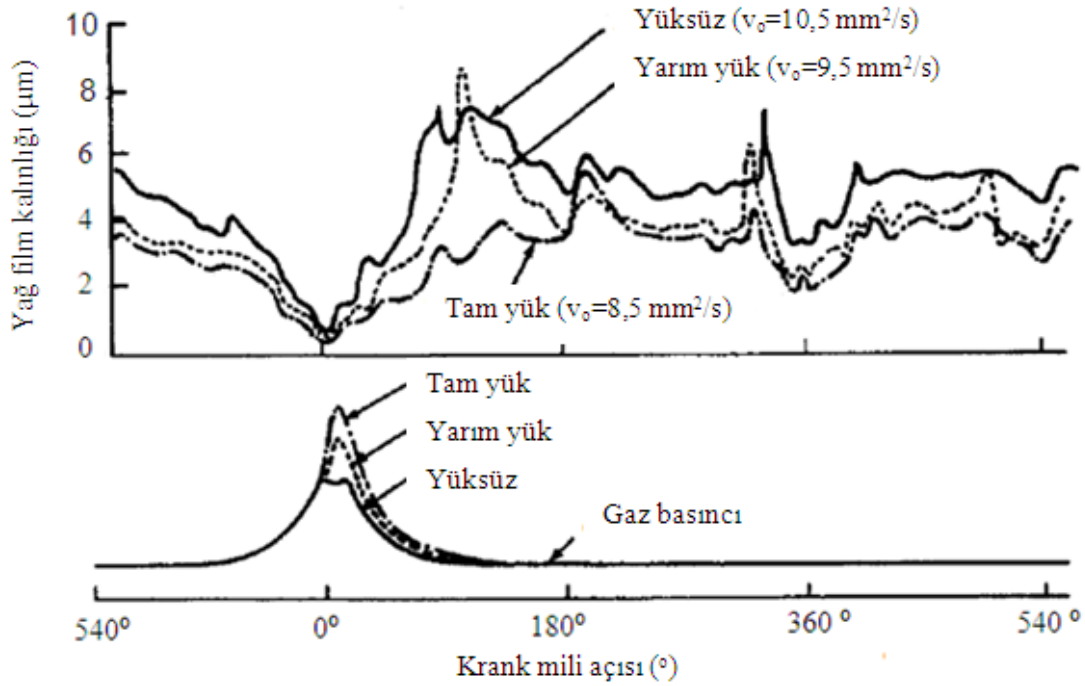
İçten yanmalı motorlarda özellikle ilk hareket esnasında ve yüksek basıncın olduğu üst ölü nokta civarlarında sınır sürtünme şartı hâkim olduğundan aşınma cihazı deneylerinde özellikle düşük devir aralıkları seçilmiştir. Şekil 2.2’ de farklı motor devirlerinde ortalama piston hızlarının değişimi gösterilmiştir. Bu hızlar aşınma cihazında uygulanan farklı devirleri kapsamaktadır. 150 d/d da çalıştırılan aşınma cihazında piston hızı yaklaşık 20 KMA’ dan sonra hızla artmakta ve yağlama rejimi sınır yağlamadan hidrodinamik yağlamaya geçmektedir. Aşınma deneylerinde seçilen devir aralıkları motorun normal çalışma devirlerinden düşüktür. Bu düşük devir seçimleri ile hem ilk hareket esnasındaki sürtünmeler hem de normal çalışma devirlerinin ilk 20 KMA’ a kadar olan düşük piston hızlarındaki sürtünmeler daha gerçekçi analiz edilebilecektir.



Şekil 2.2. Krank mili açısına göre piston hızının değişimi

Şekil 2.3’de içten yanmalı motorlarda tam yük, yarım yük ve yüksüz koşullarda segman ve gömlek yüzeylerindeki yağ film kalınlığının değişimi gösterilmiştir. Ayrıca şekilde krank mili açısına bağlı olarak silindir içerisinde oluşan gaz basıncının yük koşullarına göre değişimi de verilmiştir. Yağ film kalınlığı yükün artmasına bağlı olarak tüm krank mili pozisyonlarında incelmektedir. Ayrıca şekilde

verilen yağ viskoziteleri de yüksüz durumda  $10,5 \text{ mm}^2/\text{s}$ , yarım yük şartlarında  $9,5 \text{ mm}^2/\text{s}$  ve tam yük şartlarında ise  $8,5 \text{ mm}^2/\text{s}$ , değerini almaktadır. Yükün artması ile yağ viskozitesi azalmaktadır. Bunun nedeni yükün artması ile yüzeylere etkiyen basıncın artması ayrıca artan bu basıncın neden olduğu sıcaklık artışlarının yağ viskozitesinde azalmalara sebep olmasıdır.



Şekil 2.3. Kompresyon segmanı ve gömlek arasında ölçülen yağ film kalınlığının yük durumuna göre değişimi (Heywood,1988)

Hidrodinamik yağlama rejiminde yağ film kalınlığının yüzey pürüzlülüğüne oranı iki yüzeyi birbirinden ayıracak düzeydedir. Bu durumda, sürtünme viskoz akışkan içindeki kesme kuvvetlerinden kaynaklanır. Hidrodinamik yağlama rejiminde yüzeyler yağ filmi tarafından tamamı ile birbirinden ayrılmıştır ve yükü taşımak için yağ filmindeki basınçların oluşumu klasik hidrodinamik hareket ile kazanılmaktadır. Bu rejimde yağın dinamik viskozitesi, rejimin başlıca karakteristiğidir. Harekete karşı direnç yağlayıcının viskozitesi ile oluşmaktadır. Bu şartlarda sürtünme katsayısı çok düşük ve aşınma teorik olarak sıfırdır.

Karma yağlama rejiminde, viskozitede ya da kayma hızındaki düşüş ya da yükteki artış sonucunda yağ film kalınlığı düşerek, metalin metale sürtünmesi hidrodinamik sürtünmeye eklenir. Bu rejimde yüzeyler arasında yağ olmasına rağmen, pürüz uçları

teması da görülür. Davranış karakteristikleri ve yük kapasitesi, hidrodinamik ve sınır yağlama davranışları sergiler. Karma yağlama rejiminde, viskozitede ya da kayma hızındaki düşüş veya yükteki artış sonucunda yağ filim kalınlığı düşerek metalin metale sürtünmesi hidrodinamik sürtünmeye eklenir.

Sınır yağlama şartlarında ise yük tamamen temas halindeki yüzey pürüzleri tarafından karşılanır. Bu rejimde fiziksel ve belirli kimyasal performansı tanımlayan yüzeylere yapışmış ince film hareketleri vardır. Yağlayıcının dinamik viskozitesi önemli değildir, ancak yağlarda kullanılan katkı malzemelerinin etkin bir rolü vardır. Düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip silindir yüzeyleri kullanılarak, hidrodinamik yağlama rejiminde çalışma mümkün olmakta ve dolayısıyla sürtünme ve aşınma önemli ölçüde düşürülebilmektedir. Sınır yağlama şartları, motorların ilk hareketinde ve durması esnası ile silindirde motorların değişik işletim şartlarında oluşur. Özellikle piston-segman ve silindir yüzeyleri arasında, oldukça ağır yük altında çalışan ölü noktalarda ve yavaş hareket eden supap ve iticilerinde, krank mili yataklarında, yağ pompası dişlilerinde meydana gelir (Akalin, 1998).

## **2.2. Segman-Gömlek Çifti Yağlaması**

İçten yanmalı motorlarda, motor yağı segman ve silindir gömleği yüzeylerini birbirinden ayırarak sürtünmeye karşı hidrodinamik ve karma yağlamayı sağlar. Buna ek olarak yağ, ısı taşıyıcı olarak da görev yapar. Silindir içerisinde oluşan yüksek ısıyı, piston ve silindir gömleğini soğutarak absorbe eder. Ayrıca segmanın, segman oluşuna yapışmasını da önler.

Gömlek ve segman yağlaması karmaşık bir yapıya sahiptir. Bölgesel hız değişimleri, yük, yüzey pürüzlülüğü ve yağ miktarının değişimi sebebiyle piston grubu ve gömlek farklı yağlama rejimleri ile çalışırlar. Silindir içerisindeki basınç, piston hızı ve sıcaklık bir çevrim boyunca çok hızlı değişim gösterir. Hem teorik hem de deneysel çalışmalar göstermiştir ki strokun ortasında yani piston hızının maksimum olduğu bölgede segman ve gömlek arasındaki yağlama hidrodinamik yağlamadır. Piston hızının azaldığı bölgeler olan üst ölü nokta ve alt ölü noktalarda yağ filmi oldukça incelmekte ve metal yüzeyler birbirine temas etmektedir. Bu da karışık yağlamanın



oluştugu anlamına gelir. Metal yüzeylerin birbirine teması da daha fazla sürtünme kaybı ve aşınma demektir (Hersey,1966).

Yapılan başka bir çalışmada, değişken yükler, sıcaklık ve piston hareketine sahip segman numunesi kullanılmış ayrıca sürtünme katsayısı segman numunesi hareketine göre ölçülmüştür. Segmanın üst ölü nokta ve alt ölü noktadaki pozisyonlarında ölçülen sürtünme katsayısı değerleri en yüksek değerlerdir. Yüksek sürtünme kuvveti yüksek yük ile düşük sürtünme kuvveti ise yüksek hızlarda görülmüştür (Arcoumanis,1995).

Segman ve gömlek arasında istenilen yağlama şartları hidrodinamik yağlama şartlarıdır. Bununla birlikte segman-gömlek çiftinin yağlamasında hidrodinamik yağlamayı her zaman temin etmek günümüzün motor gücü talepleriyle imkânsıza yakındır. Piston grubunun sürtünme kaybını etkileyen ve farklı yağlama rejimleri oluşturan bazı faktörler vardır. Bu faktörlerden bazıları, piston segman bölgesi ve etek geometrisi, segman tansiyonu, yağlayıcı miktarı, gömlek yüzeyi, motor yükü ve hızı sayılabilir.

Yapılan başka bir çalışmada, krom kaplı segman ile honlanmış gömlek numunesi, yağ sıcaklığının 30°C olduğu ortamda denemiştir. Deneyleerde, 200 d/d'da ve 40 ile 80N yük aralığında, ortalama sürtünme katsayısını 0,07 bulunmuştur. Devrin 400d/d ya çıkması ile sürtünme katsayısı 0,06 olmuş, 600 d/d' da ise 0,03 olmuştur. Bu değerler karışık ve hidrodinamik yağlamanın göstergesidir. Deneyleer esnasında uygulanan normal yük değeri oldukça düşük tutulmuştur. Devrin değişimi sürtünme katsayısının azalmasında son derece etkili olmuştur. Devrin 200 d/d' dan 600d/d'ya çıkması sürtünme katsayısını yarı yarıya azaltmıştır (Dearlove,1995).

Silindir içerisinde oluşan yüksek yanma basıncı ve piston hızı yağlamanın şekillenmesin de rol oynarlar. Bu yüzden segman ve gömlek çiftinin yağlanması en çok karma ve sınır yağlama rejimleri ile gerçekleşir. Karma yağlama rejiminde segman bölgesinde ki yağ miktarı yeterli olmaz. Buna örnek olarak yüksek yanma basınçlarının yağ film tabakasını bozması gösterilebilir. Aşağıda farklı yağlama rejimlerinin piston grubunda nasıl oluştuğu açıklanmıştır.

Hidrodinamik yağlamada yağ tabakası bütün segman yüzey alanını kaplar. Segman ve gömlek arasında oluşan yük tamamen yağ tabakası tarafından taşınır. Bu şartlar genelde segman hareket hızı (piston hızı) yüksek iken ve segman üzerine ya da arka kısmına düşük basınç etki ettiği zaman oluşur. Piston hareketine bağlı olarak segmanların hareketi strokun ortasında ise yine hidrodinamik yağlama rejimi oluşur. Çünkü piston hızı strok ortasında maksimum değere ulaşır.

Karma yağlamada sadece segmanın bir kısmı yağlanır. Bu kısımda yükün bir kısmı yağ tabakası tarafından karşılanır. Yükün diğer kısmının taşınması yüzey teması ile olur. Karışık yağlama rejimi, özellikle piston hızının düşük olduğu ve segman üzerine ve arka kısmına etkiyen basıncın yüksek olduğu ölü noktalarda meydana gelir.

Sınır yağlamada silindir gömleğindeki yağ miktarı minimum seviyededir. Gömlekte bulunan yağ, yetersiz olması ve yüksek gaz basıncı nedeni ile segman yüzeyine temas etmeden bölgeyi terk eder. Piston hızının aşırı artması ise yağ film tabakasının bozulmadan kalabilmesini güçleştirir.

Diğer bir çalışmada, yağlayıcı olarak 5W30 motor yağı kullanılarak krom kaplı segman ile dökme demir silindir gömleği denenmiştir. Ölü noktalarda sürtünme katsayısı 0,12-0,15 iken strok ortasında 0,02-0,03 değerlerine düşmüştür. (Akalin,1998).

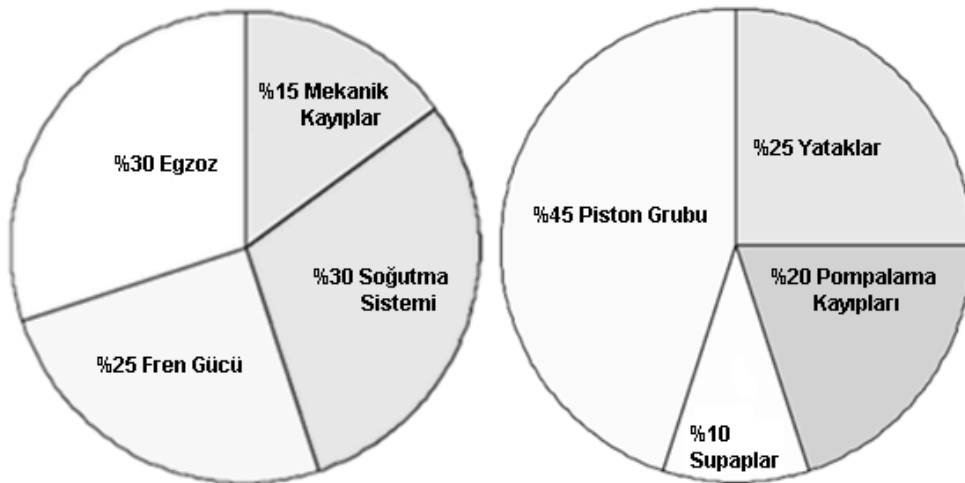
### **2.3. İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünme**

Günümüzdeki tüm iyileştirmelere rağmen içten yanmalı motorların silindir içerisinde elde edilen gücün tamamı çıkış milinden faydalı güç olarak alınamamaktadır. Motor içerisinde üretilen bu gücün büyük bir kısmı sürtünmelere ve diğer kayıplara harcanmaktadır. Motor tam yük konumunda çalışırken yaklaşık iç gücün % 25–30'luk kısmı sürtünmelere harcanırken, motorun rölantide çalışması veya motor üzerinde yük olmaması durumunda üretilen gücün tamamı sürtünmelere harcanır.

Motor rölanti konumunda iken sadece iç sürtünmeleri yenebilecek kadar güç üretebilir.

Sürtünme kayıpları, maksimum fren torkunu ve özgül yakıt tüketimini etkilemektedir. İyi bir motor dizaynı ile ortalama bir dizayn arasındaki fark, çoğu kez sürtünme kayıpları arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Sürtünme kayıplarının büyük bir kısmı soğutma suyuna ve motor yağına ısı enerjisi olarak geçer ve yağ soğutma sistemi ve radyatör aracılığıyla atılır. Bu yüzden sürtünme kayıpları motordaki soğutma sisteminin büyüklüğünü etkiler. Motorda üretilen güç ve fren beygir gücü sürtünmenin bulunmasında etkilidir. Sürtünme gücü, silindir içinde çalışan akışkandan elde edilen ve pistonla iletilen güç ile motorun krank milinden elde edilen faydalı gücün arasındaki fark olarak tanımlanır (Heywood, 1988).

Şekil 2.4' de içten yanmalı motorlarda oluşan kayıplar ve bu kayıplardan önemli bir kısım olan ve çeşitli araştırmalarla azaltılma yöntemleri geliştirilmeye çalışılan mekanik kayıpların dağılımı gösterilmiştir. Bu şekil toplam enerjinin 15'inin mekanik sürtünme kaybı olduğunu göstermektedir. Toplam mekanik kayıpların %45 ila 55'i piston grubundan meydana gelmektedir (Richardson,2000).



Şekil 2.4. (a)İçten yanmalı motorlarda enerji dağılımı (b) Mekanik kayıplar (Richardson,2000-Priest,2000)

Sürtünme kayıpları çalışan motor parçaları arasında oluşan sürtünmeler, emme ve egzoz kanallarındaki kayıplar ve su pompası, yağ pompası gibi yardımcı motor elemanlarından kaynaklanan sürtünmeler yoluyla oluşmaktadır. Piston mekanizması (piston, segman, biyel ve kompresyon yükleri) toplam sürtünme kaybının yaklaşık %50'sini oluşturmaktadır. Ayrıca supap sisteminde %25, krank mili yataklarında %10 ve yardımcı motor parçalarında ise %15'lik bir sürtünme kaybı oluşmaktadır (Stone, 1989).

İçten yanmalı motorlarda, mekanik kayıpların yaklaşık yarısını piston grubunun gömlek ile sürtünmesi oluşturur. Tipik bir motor için değerlendirilirse yakıt enerjisinin %5-8 gibi bir oranı bu sürtünme sırasında harcanmaktadır. Bu sürtünmenin içerisine segman-gömlek ve piston eteği gömlek sürtünmesi beraber girmektedir (Economou,1979-Dowson,1979).

Piston grubunun sürtünmesini azaltmak için segmanların ve piston etek geometrilerinin uygun şekilde dizayn edilmesi gereklidir. Çevresel zorunluluklar ve her geçen gün yükselen akaryakıt fiyatları tasarımcılara yakıt ekonomisini zorunlu kılmaktadır. Bunu sağlamanın yolu da piston grubu sürtünmesi gibi mekanik kayıpları azaltmaktır. Tipik bir benzin motorunda piston grubu sürtünmesi mekanik kayıpların yaklaşık %35-45'ine karşılık gelmektedir (Taylor, 1993).

#### **2.4. Segman-Gömlek Çifti Sürtünmesi**

Motorun çalışması esnasında segman ve silindir gömleği arasındaki hareketli yüzeyler farklı sürtünme mekanizmalarına ev sahipliği yaparlar. Yük, hız ve yüzey etkileşimleri, segman ve gömlek arasındaki yağlama şartlarındaki geçişler esnasında sürtünme ve aşınma davranışlarını değiştirirler.

Segman ve gömlek sürtünmesi, segmanın üzerine etkiyen yük, yüzey özellikleri ve yağlama şartları ile doğrudan ilişkilidir. Yağlama şartları, yağın viskozite özellikleri, yağlama esnasında bulunan yağ miktarı ve piston hızından etkilenir. Segman üzerine etkiyen yük, segmanın ön gerilmesi yani tansiyonu ve segmanın arkasında bulunan gazların etkisi ile oluşur. Piston üzerindeki segman sayısının iki veya üç olduğu

çalışma koşullarında sürtünmenin bu sayıdan etkilendiği gözlenmiş fakat sürtünme üzerindeki asıl belirleyici faktörün segmanların ön gerilmesi olduğu tespit edilmiştir (Takiguchi,1996).

Yapılan başka bir çalışmada, üst ölü nokta ve alt ölü nokta bölgelerinde sürtünme katsayısının 0,1-0,15 değerlerinde, strok ortasında ise 0,05-0,1 değerlerine ulaştığı bulunmuştur. Bu değerler, yerel yağlama şartlarına, yüzey kalitesine ve yüzeydeki malzeme cinsine bağlı olarak değişim göstermektedir. (Durga,1998).

Genellikle motorlarda yağlama ve sürtünme mekanizmalarının daha iyi anlaşılabilmesi için yaygın olarak kullanılan Stribeck diyagramı incelendiğinde, segman ve gömlek arasındaki yağlama rejimlerinin hızlı ve sert bir şekilde nasıl değiştiği görülebilir (Taylor,1998).

Yapılan başka bir çalışmada, alt ölü nokta ve üst ölü nokta bölgelerinde sürtünme katsayısı 0,1-0,15 değerlerinde, strok ortasında ise 0,02-0,01 değerlerinde ve ortalama olarak da 0,04-0,011 değerleri arasında değişmektedir (Andersson,2002).

Segman ve gömlek arasındaki sürtünme mekanizmaları özetlenirse, sürtünme mekanizmaları, piston hareketine ve yağlama rejiminin sınır ile hidrodinamik rejimler arası geçişinde karşılaşılan yağ film kalınlığına bağlı olarak ölü noktalarda aktif bir hal almaktadır. Strok ortasında ise piston hareketine bağlı olarak hidrodinamik bir yağlama rejimi söz konusudur (Wakuri,1995-Arcoumanis,1997-Durga,1998-Coy,1998). Maksimum sürtünme kuvveti, ÜÖN'da karışık yağlama şartları altında oluşur.

Temas eden yüzeyler arasındaki yağ miktarı, başka bir ifade ile sınır yağlama ya da hidrodinamik yağlama şartlarında, ölü bölgelerde elastohidrodinamik yağlamanın etkisi ile sürtünme mekanizması kesin olarak belirlenmektedir. Ayrıca yağ miktarı, temas eden yüzeylerin geometrisi, dinamik yağ viskozitesi, hız ve yüke bağlı olarak anlık sürtünme mekanizmalarını etkilemektedir. Yağsız şartlarda, dökme demir gömlek ve segman yapısındaki grafit fazın yağlayıcı gibi davranması ile belirli oranda sürtünme kuvvetini azaltabilmektedir (Glaeser, 1992).

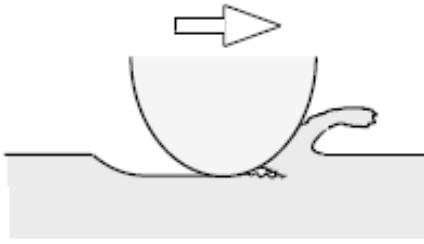
## 2.5. İçten Yanmalı Motorlarda Aşınma

Aşınma, sürtünme yüzeylerinden maddenin ayrılması, bir yüzeyden diğere yüzeye malzeme transferi yada malzemenin bir yüzey içerisine hareketi şeklinde tanımlanabilir (Almen,1950). Ayrıca aşınma, yüzeylerin birbiri üzerinde hareketlerinin bir sonucu olarak temas noktalarında aşamalı bir malzeme kaybı olarak da tanımlanabilir (Peterson,1980). Tribolojistler, yüzey veya yüzeyler arasındaki kontakların birbiri üzerinde göreceli hareketinin sonucunda katı malzemede yüzey hasarı ve genellikle aşamalı bir malzeme kaybı durumu olarak daha geniş bir tanımlama kullanırlar (Hutchings,2005).

Aşınma, bir malzeme özelliği değil bir sistem cevabıdır (Kato,1997-Bayer,1994). Aşınma oranları, malzeme seçimine ve çalışma şartlarına bağlı olarak  $10^{-15}$  ile  $10^{-1}$  arasında sert değişim göstermektedir (Winner,1980-Rabinowicz,1980-Kato,2001-Kato,2005). Çalışma şartları, kontak basıncı, hız, kontak şekli, ortam ve yağlayıcı değişimleridir. Aşınma mekanizmaları her kaynakta farklı olarak ele alınmaktadır. Başlıca aşınma mekanizmaları aşığıdaki gibidir (Kato,2001).

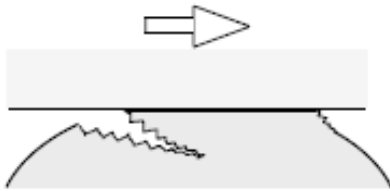
- Abrazif Aşınma
- Adhezif Aşınma
- Korozyif Aşınma
- Yorulma Aşınması

Abrazif aşınma, sert partiküllerin yüzey içerisinde kalması ve uzun çentikler ve kıymıklar şeklinde malzeme kaybı ile oluşur. Başka bir ifadeyle düzgün yüzey, üzerinde yapışık metalik partiküllerin bulunduğu ve düzenli uzun yarıkların oluştuğu pürüzlü bir yüzey halini alır. Bu tip aşınma, kuvvet derecesine bağlı olarak yüzeyde tırmalama, çizgisel sıyırma veya oluklar meydana gelmesi şeklinde tanımlanabilir. Sert oksitlerin varlığı abrazyon aşınmasını artırabilir. Şekil 2.5’de abrazif aşınma şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Abrazif aşınma (Kato,2001)

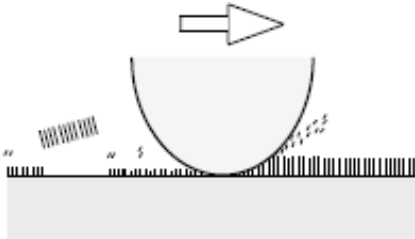
Adhezif aşınma, karşılıklı yüzeyler kayarken ve temas eden pürüz açıları arasında basıncın plastik deformasyona ve adezyona sebep olacağı değerlerde olduğu durumlarda meydana gelir. Adezyon, temiz yüzeyler, oksitlenmenin olmadığı koşullarda ve kayan yüzeyler arasındaki kimyasal ve yapısal benzerlikler tarafından desteklenir. Adezyon, hareket devam ederken boyutları artan pürüz açıları arasında gerçekleşir. Birleşme yerlerinin en zayıf noktasında, genellikle bir yüzeyden değerine metal transferi ile sonuçlanan, kırılmalar olacaktır. Şekil. 2.6'da adhezif aşınma şekli verilmiştir.



Şekil 2.6. Adhezif aşınma (Hutchings,2005)

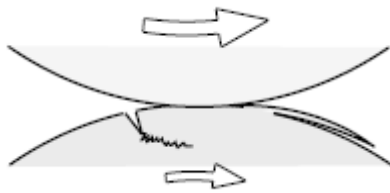
Korozif aşınmaya karşı, metalik malzemelerde içerdikleri alaşım elementlerinin miktarına bağlı olarak yüzeylerinde 0,1 mikron kadar doğal bir oksit tabakası bulunur. Bu tabaka sayesinde korozif ortamlara karşı direnç gösterirler. Aşındırıcı ortam tarafından metal yüzeyine uygulanan tekrarlı darbeler esnasında yüzeyden malzeme ile beraber oksit tabakası da kalkar (Eyre,1990). Tekrarlı darbelerin sıklığından veya koruyucu tabakayı oluşturan elementin alaşım içinde zamanla tükenmesinden dolayı oksit tabakası tekrar şekillenemez duruma gelir. Korozyonun beraber geliştiği ve korozyonun aşınma hasarına katkıda bulunduğu bu olaya düşük sıcaklık korozyon aşınması denir (Kato,2001).Korozyondan dolayı oluşan aşınma miktarındaki artış, yağlayıcıların kirlendiği, özellikle deniz suyu kirlendiği birçok

durumda meydana gelebilir. Beyaz metal yataklarda korozyon sonucu kalay oksit oluşumu, yatağın dayanımı önemli ölçüde düşürebilir. Şekil 2.7’de korozif aşınmanın şematik şekli verilmiştir.



Şekil 2.7. Korozif aşınma (Kato,2001)

Yorulma aşınması, yüksek gerilmelere tekrar tekrar maruz kalan yüzeylerde oluşur. Bu aşınma türü en çok bilyeli yataklarda, düz yataklarda ve dişlilerde meydana gelir. Hasar yüzeyde veya yüzeyin altında görülebilir. Fakat oyuklu bir yüzey oluşur. Malzemenin yüzeyindeki korozyon veya gövdesindeki kusurları erken bozulmaya neden olabilir ve bunlar oldukça iyi belgelenmiştir. Yorulmanın kanıtı oldukça belirgindir ve ışık yorulma çizgileri, formundadırlar ve çıktıkları nokta yorulma başlangıcını gösterir. Yorulma çizgileri, kırışma başladıktan sonra veya eğer korozyon ürünlerinden dolayı görülmeleri zorlaşıyorsa birbirine sürtünmeye devam eden yüzeylerde yorulma çizgileri çok açık olmayabilir. Şekil 2.8’de yorulma aşınmasının şematik şekli verilmiştir.



Şekil 2.8 Yorulma aşınması (Kato,2001)

## 2.6. Segman-Gömlek Çifti Aşınması

İçten yanmalı motorlarda ana aşınma bölgeleri, gömlek-segman, segman-segman yuvası, gömlek-piston eteği ve yataklar olarak sıralanabilir. Aşınma bu ana aşınma



bölgelerinin herhangi birisinde meydana gelebilir. Günümüzde motorlarda, yağ sarfiyatı ve kompresyon kayıpları arttığında (güç düşüklüğü olduğunda) motor yeniden yapılandırılır. Motorlarda oluşan aşınmalar incelendiğinde, yağ sarfiyatı genellikle birinci kompresyon segmanının aşırı radyal aşınması veya ÜÖN bölgesinde silindir gömleğinin özelliğini kaybetmesiyle ortaya çıkmaktadır.

İçten yanmalı motorlarda segmanlar, silindir yüzeylerinden yağ ve gaz sızıntısına neden olabilecek derecede yüzey bozukluğuna yol açtığında verimliliğini kaybederler. Bu verimlilik kaybı güçteki azalma ile yağ tüketimindeki artış ile fark edilir. Motorlarda aşınma belirtisi olan yağ sarfiyatı, birincil olarak yağ segmanının tansiyonu tarafından kontrol edilir. Yağ sarfiyatı, düşük tansiyonlarda yüksek olur. Segman tansiyonunun artmasıyla azalır ve belirli bir basıncın üzerinde sabit kalır. Normal olarak, motorlarda kullanılan yağ segmanları yağ sarfiyatının sabit olacağı tansiyonda tasarlanırlar. Yağ segmanlarında yay takviyesi olan motorlarda yağ segmanının basıncı ya yay zamanla aşındığında ya da segmanın özelliğini kaybettiğinde düşebilir. Bu yağ sarfiyatında artışa neden olur. Cr kaplama ve gaz nitritleme, yağ segmanının ömrünü arttırmak için tipik yüzey modifikasyon teknikleridir.

Uygun olarak dizayn edilen segman ve gömlek, segman ve gömlek arasında yeterli yağlama filmine olanak sağlarlar. Segman yüzeyine ve gömlek yüzeyine bazı uygulamalarda yüksek aşınma dayanımına sahip düşük sürtünmeli kaplamalar uygulanarak yağ filmini bozulduğu hallerde aşınma ve sürtünmeyi iyileştirmesi amaçlanır. Çünkü silindir içerisinde bazı ağır çalışma koşulları altında segman ve gömlek arasındaki yağlama değişimleri meydana gelmektedir.

Yapılan araştırmalar göstermiştir ki motorun ömrünü belirleyen birincil faktörler segman ve gömlek yüzeylerinde meydana gelen sürtünme ve bunun sonucunda oluşan aşınmadır. Bundan dolayı motor tribolojisi üzerine yapılan çalışmalar segman ve gömlek sürtünmesi ve aşınmasına odaklanmıştır.

Genellikle modern motorlarda korozyon ciddi bir problem değildir ve uzun çalışma ömrü sonucu sadece gömlelerde olur. Korozyon ne üst ölü noktada nede alt ölü noktada en çok orta kısmında görülür (Taylor,1998).

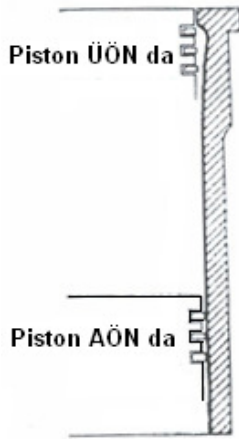
Silindir gömleği ve segmanın aşınmasını etkileyen faktörler birbiri ile aynıdır. Yani segman aşınmasını etkileyen faktör gömlek aşınmasını da etkilemektedir. Segman ve gömlek aşınmasını etkileyen önemli faktörler; motorların mekanik dizaynı, silindir içi çalışma koşulları, yakıt özelliği ve yağlayıcının özelliği olarak sıralanabilir.

Segman-gömlek bölgesi, sürekli ve etkili yağlamanın en zor oluşturulabileceği bölgedir. Çünkü bağımsız yağlama sistemlerine sahip büyük dizel motorları hariç yağlama biyel başlarındaki yağ akıtma yerlerinden sıçratılan yağdan etkilenir. Ayrıca yağ miktarı segmanlar, özelliklede yağ segmanı ile sınırlandırılmışlardır. Mükemmel hidrodinamik yağlama nadiren elde edilir. Bu yüzden adhezif aşınmanın temel olarak üst ve alt ölü noktada gerçekleştiği kabul etmek mantıklıdır. Zaten silindir gömleğinde aşınma kesitleri özellikle de bu noktada göze çarpmaktadır.

Aynı zamanda en üstteki segmanın aşınması her zaman diğer segmanlardan daha fazladır. Eğer segmanlar aynı biçimde tasarlanmış ise birinci kompresyon segmanının aşınması diğer segmanlara göre 5 ila 10 kat daha fazla olur. Bu asimetrik aşınma (profil) kesiti üst ölü nokta ile alt ölü nokta arasındaki sürtünme yüzeyi basınca ve sıcaklık farkları ile açıklanır. Üst ölü noktada, üst segman sıkıştırma basıncının büyük bir kısmına daha sonra da yanma basıncına maruz kalır. Bu sırada ikinci segman birinci segmana oranla yanma odası basıncının sadece küçük bir kısmına maruz kalır.

Bunun yanında, yanma basıncının hızlı yükselmesinin dinamik etkileri üst segmanda şok etkisi yapıp onun şeklini bozabilir ve spesifik yükleri daha da artırır. Aynı zamanda, silindirin üst ve alt taraflarındaki sıcaklık farkları 100°C' ye kadar ulaşmaktadır. Bu da şekil kesitini yağlama şartlarına, yüzeylerin mekanik dayanımına ve silindir gömleği ve segmana zarar veren heterojen genişlemelere neden olan ısıl bozulmalara etki ederek kötüleşir.

Motorlarda silindir içerisinde gömlek ve segman çiftlerinin aşınma mekanizmalarında korozyon ve abrazyon aşınması yoksa diğer bir aşınma mekanizması olan adezyon aşınması gerçekleşir. Silindir gömleği aşınma kesitlerinin görünüşleri Şekil 2.14' te verilmiştir. Adhezif aşınma üst kompresyon segmanının, üst ölü noktada olduğu durumlarda, yüksek basınç ve sıcaklığın olduğu durumlarda meydana gelir. Bu aşınmanın gömlek geometrisine etkisi Şekil 2.9'da çarpıcı şekilde gösterilmiştir (Brushan,1991).



2.9. Adhezif silindir aşınması (Schilling,1972)

## 2.7. Segman-Gömlek Çifti Sürtünme Ölçüm Yöntemleri

Motor üzerine monte edilen segmanlar genellikle elektro motor yöntemi ile ya da çalışır durumdaki motora uygun test düzenekleri ile test edilir. Segman, gömlek ve yağlayıcı sistemlerinin geliştirilmesi için kullanılan minyatürize edilmiş düzenekler ile yapılan testlerde tribolojik özelliklerin değerlendirilmesi normal motor testlerine oranla daha ucuzdur. Bu testlerde sisteme kolayca müdahale edilir ve sonuçlar izlenebilir. Birinci bölümde tribolojik sistem tasarımında kullanılan modelin test edilmesi aşamasında aşınma ve sürtünme yöntemleri kullanılmaktadır.

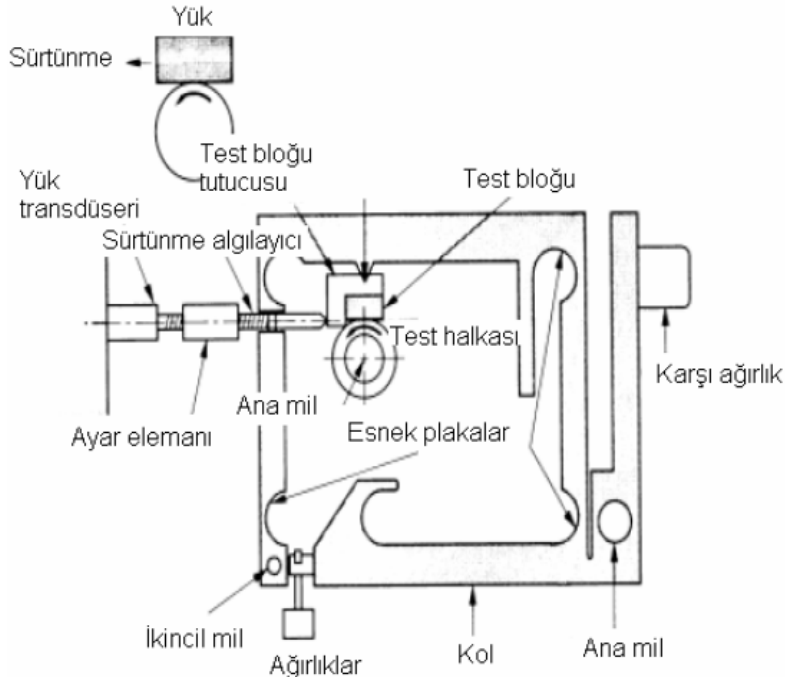
Segman ve silindir gömleğinin tribolojik özellikleri hakkında yapılan farklı deneysel çalışmalarda, segman numuneleri ile silindir gömleğinin tamamı veya bir kısmı çift olarak kullanılmakta ve çiftler birbiri üzerinde piston hareketi gibi hareket etmektedirler. Bu ölçümlerde en basit test düzeneği olarak salınımlı aşınma test

düzenegi ve pin-on-disk testi düzenegi kullanilmistir. Bu calismalar ile elde edilen gelismeler motorlarda denenmistir. Krank veya eksantrik mekanizmalar veya elektromanyetik duzenekler, segmanda veya silindir gomleginde yatay ve dikey olarak piston hareketini saglamak icin kullanilir. Surtunme kuvveti segman baglantısından veya silindir gomlegi baglantısından ölçülebilir. Bazı calismalarda surtunme grafikleri, baslangic ve durus anlarındaki karakteristik tepe noktalarını kapsar. Fakat yapılan bazı calismalarda ise bunlara yer verilmez. Bu farklılıkta surtunme kuvveti ölçümlerinin tribolojide ne kadar farklılık gösterdiginin kanıtıdır (Patterson,1993-Noorman,2000).

Segman silindir çifti arasındaki aşınma ve surtunme davranışlarının incelendiği yaygın olarak kullanılmakta olan surtunme ölçüm sistemleri aşağıda açıklanmıştır.

### **2.7.1. Döner hareketli test sistemi**

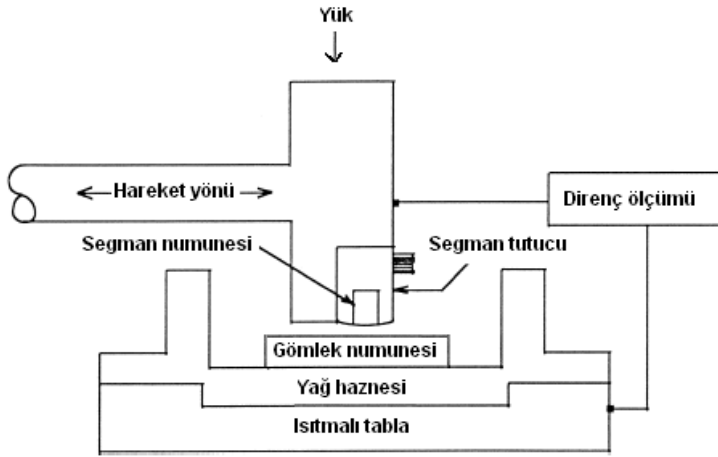
Segman numunesinin disk üzerine yerleştirildiği, segman numunesinin üzerine gomlek numunesinin temas ettiği ve segman numunesini tutan diskin döndüğü ölçüm sistemidir. Şekil 2.10'da sistemin şematik görünüşü verilmiştir. 25 yıldır kullanılmakta olan bu sistem Blok-on ring olarak veya Falex surtunme ve aşınma cihazı da denmektedir. Bu cihaz genellikle otomotiv laboratuvarlarında piston segmanları, gomlekler, motor blokları ve supap yuvaları motor parçalarının yüzey yapılarının geliştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır (Patterson,1991). Bu sistemde çok yönlü doğrusal hareketin yanı sıra dönme veya piston hareketi de gerçekleştirilebilir. Segman ve gomlek surtunmesi ölçümlerinde kullanılır. Cihazda yük, hız, yağlama ve sıcaklık parametreleri değiştirilebilir (Noorman,2000).



Şekil 2.10. Döner hareketli test sistemi (Noorman,2000)

### 2.7.2. Piston hareketli test sistemi

Pistonun gömlek içerisindeki AÖN ve ÜÖN arasındaki hareketinin numuneler üzerinde uygulanabildiği test sistemidir. Cameron- Plint yüksek frekanslı sürtünme ve aşınma cihazı olarak adlandırılmaktadır. Sistem farklı yağların, farklı segman ve gömlek malzemelerinin performansının belirlenmesine yardımcı olur. Şekil 2.11’de sistemin şematik görünüşü verilmiştir. Gömlek–segman sürtünmesinin ve yağlamasının modellenmesi amacıyla sisteme piston hareketi özelliği verilmiştir (Hartfield,1993). Segmanın yerleştirildiği kısım altındaki gömlek numunesine basarak ileri geri hareketi yapar. Böylece motordaki pistonun ölü noktalar arasındaki hareketi sağlanmış olur. Ayrıca cihazda segmanın yerleştiği kısma normal piston üzerindeki segmanın yuvasında hareket ettiği kadar hareket imkânı tanınmış ve cihaz geliştirilmiştir (Noorman,2000).



Şekil 2.11. Piston hareketli test sistemi (Wang,1999)

### 2.7.3. Segman-gömlek sürtünmesi ölçüm sistemi

Bu sistem gömlek, piston, segman ve yağlayıcı özelliklerinin motor çalışma koşullarına benzetilerek test edilmesini olanak tanır. Sistem Sadeghi tarafından geliştirilmiş ve kullanılmıştır (Sadeghi,2004-Bolander, 2004). Gömlek, devri kontrol edilebilen 1,5 beygir gücündeki krank mili mekanizmasıyla hareket ettirilir. Gömlek bir tabla üzerine sabitlenir ve DC motor tarafından tahrik edilir. Gömlek tablası lineer yataklar sayesinde yatay olarak hareket edebilmektedir. Bu da piston hareketinin sağlanmasını sağlar. Segman-gömlek temasındaki kuvvet ise kuvvet kolu yardımıyla normal kuvvet olarak sağlanır. Hava basıncı regülatör ile ayarlanır. Daha önceden her ağırlık için hesaplanan ağırlıklar sisteme yerleştirilir. Uygulanan normal kuvveti ve sürtünme kuvvetini ölçmek için piezo elektrik üç eksenli kuvvet sensörü kullanılmıştır. Yatay eksendeki atalet kuvvetleri krank mekanizmasının balansının alınması ve ağırlıklar yardımı ile dengelenmektedir.

Gömlek tablasında lineer yatak kullanılarak yağlanma gereksinimi ortadan kaldırılmıştır. Ölçüm sistemi aynı anda devri ve sıcaklığı kontrol edebilmekte ve sürtünme kuvvetini, yükleme kuvvetini ve krank açısını kaydetmektedir. Devir DC devir kontrol ünitesi kontrol edilmekte ve krank açısı ile segman konumu enkoder ile ölçülmektedir. Ölçülen çalışma devri, krank yarıçapı ve biyel uzunluğu ile segman kayma hızı hesaplanabilir. Gömlek tabla sıcaklığı, tablaya yerleştirilen bir termokupl ile ölçülür. Termokuplun bağlı olduğu sıcaklık kontrol sistemi ile tabla üzerine

yerleştirilen fişek ısıtıcılar yardımı ile tabla sıcaklığını istenilen değerde tutar. Bu sistem kullanılarak gerçek motor içerisindeki gömlek-segman sıcaklık şartları sağlanmış olur. Isıtma sistemi kullanılarak yüzey sıcaklığı 100°C' ye kadar çıkartılabilir. Yağlama miktarı damlatma tipi ayarlı bir sistem yardımıyla 5ml/h ile 250 ml/h arasında ayarlanabilmektedir. Şekil 2.12'de cihaz görülmektedir.



Şekil 2.12. Segman ve gömlek sürtünmesi ölçüm cihazı (Sadeghi,2004-Bolander, 2004)

Segman tutucunun kuvvet kolu ile olan bağlantısına üç eksenli kuvvet sensörü yerleştirilmiştir. Uygulanan normal kuvvet ve sürtünme kuvveti bu sensör tarafından ölçülmektedir. Bu kuvvet sensörünün sinyalleri bir amplifikatör ile yükseltilerek okunabilir. Verileri toplamak için DAQ kart kullanılmış ve veriler direkt olarak bilgisayara aktarılmıştır.

## 2.8. İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünme Kayıpları Ölçüm Yöntemleri

İçten yanmalı motorlarda sürtünme gücünün ölçülmesinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemlerin ölçüm için gerekli hassasiyetlere sahip olmalarında bile istenilen düzeyde ölçümlerde doğruluk elde edebilmek son derece zordur. Ölçüm yöntemleri kabaca üç ana başlık altında toplanabilir.

- Motor, sürtünmenin belirleneceği devirde bir elektrik motoru yardımıyla döndürülür. Moment koluna bağlanan bir yük hücresi yardımıyla döndürmeden kaynaklanan döndürme momenti ölçülür. Ölçülen döndürme

momenti sürtünme gücünü belirlemek amacıyla kullanılır. Bu yöntemde motor çalıştırılmamakta ve motorun yakıt almasına izin verilmemektedir.

- Motor sürtünmenin ölçüleceği devre çalıştırılarak getirilerek sıra ile birinci silindirden başlayarak silindirler çalışma dışı bırakılır. Her silindirin iptal edilmesiyle motordan ölçülen gücün değişim farkları o silindirin sürtünmeye harcadığı gücü verir.
- Sürtünmenin ölçüleceği devirde motorun indike basıncı ölçülerek, indike güç hesaplanır ve mil gücü ile farkı sürtünmeye harcanan gücü verir.

Motorlarda sürtünme gücünün ölçülmesinde dikkat edilmesi gereken ve ölçümün sağlıklı olması açısından aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır.

- Motorun çalışma sıcaklığın farklı bir sıcaklıkta çalıştırılması ile motorun içerisindeki sürtünen parçaların teması ve aralarındaki yağlama rejiminin farklı olması ölçülen sürtünme değerinin gerçek değerden farklı olur.
- Motor çalıştırılmadan yani dışarıdan elektrik motoru ile tahrik edilip, sürtünme bu yöntemle ölçüleceğinden piston, gömleğe ve segmanlara sürtünmeyi oluşturan basınç kuvveti yeteri kadar etkilemeyeceğinden çalışma şartlarındaki sürtünme kuvvetinden farklı bir değer ölçülecektir.
- Motorun çalışma koşullarında yağlama yağının viskozitesi değişim göstermektedir.

İçten yanmalı motorlarda sürtünme kayıplarının önemi arttığından dolayı sürtünme kaybının ölçülmesinde birçok yöntem geliştirilmiştir. Segman-Gömlek sürtünmesinin ölçümü için geliştirilen yöntemler, motor, morse, Willians çizgi, hareketli gömlek, ve anlık indike basınç yöntemleridir.

### **2.8.1. Motor yöntemi**

Motorun elektro motor yardımıyla döndürülerek sürtünmenin ölçümü, motorun çalışır durumundaki sürtünme değerine yakın olduğu için ve uygulanma kolaylığından dolayı içten yanmalı motorlarda mekanik kayıpların belirlenmesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Krzymien,2003-Soejima,1994). Motorun



sıcaklığı, soğutma suyunun ve yağlama yağının ısıtılması ile motorun normal çalışma koşullarındaki şartlara uygun hale getirilebilir. Motorda ateşleme olmamasından dolayı bu yöntemle sürtünme kayıpları ve pompalama kayıpları ölçülür. Böylece sadece mekanik kayıpların ölçümü için pompalama kayıplarının minimize edilmesi gerekir. Bunun içinde gaz kelebeği açıklığı tam olmalıdır. Böylece pompalama kayıpları en düşük seviyede tutulabilir. Genellikle pompalama kayıpları silindir içi basınç ölçülerek hesaplanmaktadır.

Bu yöntemde ayrıca motorun farklı elemanlarının sürtünmeye katkısının ölçülebilmesi için sırası ile motor üzerinden sökülmesi de ölçüm yönteminin avantajını arttırmıştır. Motorun çalışma koşullarındaki sürtünme bu yöntem ile kolayca modellenir (Daniels,2006).

Elektro motor yöntemi ile motorun çalışır durumdaki sürtünme değerleri aşağıdaki nedenlerden dolayı farklılık göstermektedir.

- Silindir basıncı piston, segman ve yataklar üzerine elektro motor yönteminde motorun çalışır durumundakinden daha düşük bir değerde etkir.
- Piston ve silindir gömleğinin sıcaklığı motorun normal çalışır durumundakinden daha düşük bir değere sahiptir. Bu da yağlayıcı viskozitesini etkiler.
- Elektro motor yöntemindeki piston ve silindir arasındaki boşluklar motorun normal çalışma koşullarından farklıdır.
- Pompalama şartları farklıdır, motor yönteminde egzoz yapılmamaktadır.

### **2.8.2. Morse yöntemi**

Morse testi çok silindirli motorlara uygulanabilir. Motor normal koşullarda ateşleme yapılarak çalıştırılır ve çıkış gücü kaydedilir. Daha sonra bir silindirin güç üretmesi kesilir ve motor devri bir önceki devre tekrar getirilerek güç tekrar ölçülür. İki güç değeri arasındaki fark gücü kesilen silindirin piston grubunun sebep olduğu sürtünme kaybıdır. Bu yöntem tüm silindirlere uygulanır ve toplam sürtünme değerleri toplanarak motorun toplam sürtünme kaybı belirlenir (Richardson,2000). Bu

yöntemin doğruluk derecesi elektro motor yöntemiyle benzerlik gösterir. Hata değerleri daha düşüktür çünkü motor ateşleme yapmakta ve normal şekilde çalışmaktadır. Devre dışı bırakılan silindirin sıcaklığı da motorun çalışmasından dolayı normal değerlerdedir. Bu yöntemin uygulama zorluğu sadece çok silindirli motorlara uygulanabilmesidir.

### **2.8.3. Willians çizgi yöntemi**

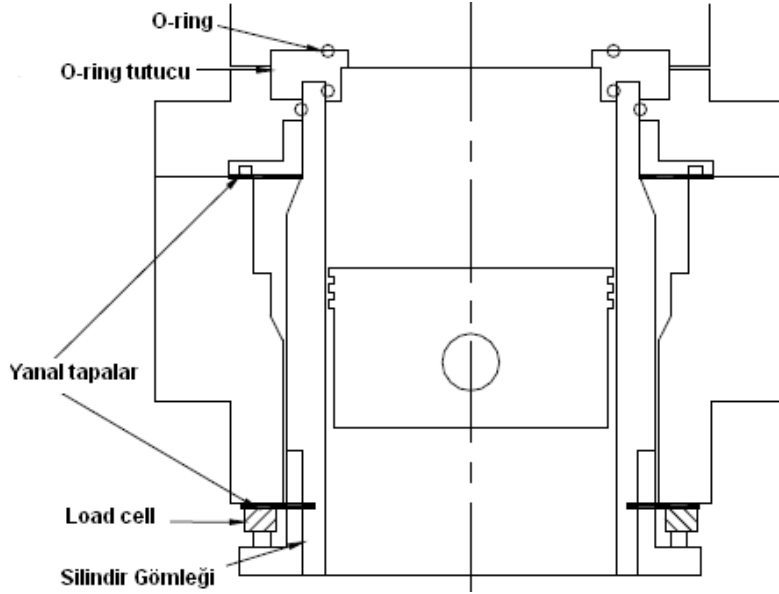
Bu yöntemde kullanılması gereken ekipmanların hassas olması gerekmekte aksi takdirde istenilen düzeyde ölçüm gerçekleştirilememektedir. Motor yükü ölçülür ve sabit devirde motorun yakıt oranının fonksiyonu olarak kaydedilir. Daha sonra motora giden yakıt kesilir ve motorda negatif yük oluşur. Bu negatif yük motorun kayıplarını göstermektedir. Bu yöntemle motorun mekanik ve pompalama kayıpları ölçülebilir. Genelde motor yükü çizilirken çok hassas olunamamakta ve negatife geçiş aşaması net olarak görülememektedir. Bu yüzden bu yöntemin uygulanması son derece zordur (Soejima,1994-Henein,1988).

### **2.8.4. Hareketli gömlek yöntemi**

Hareketli gömlek yöntemi Furuhamada tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem herhangi bir hesaplama ihtiyacı bırakmadan direkt olarak piston grubunun sürtünme kuvvetini ölçebilmekte olduğu için birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (Furuhamada,1981-Hoshi,1989). Motorun normal ateşlemeli çalışma koşullarında ölçüm yapabildiği için geniş kullanım alanına sahiptir. Bu yöntemin uygulanması çok basit bir metotla yapılır. Silindir gömleği üzerine monte edilen ve gömleğin hareketine izin veren bir yük hücresi ile sürtünme kuvvetinin ölçümü gerçekleştirilir. Şekil 2.13'de hareketli gömlek yönteminin tipik görüntüsü ve ölçme sistemi görülmektedir.

Silindir gömleği, motor bloğundan ayrılmış ve özel dizayn edilen gömlek destek parçalarının üzerine bağlanmıştır. Bu yüzden piston grubu küçük yer değiştirmelere yani gömleğin aksel gezintisine neden olur. Gömlek destek parçalarının altına

yerleştirilen yük hücresi gömleğin bu hareketini ölçer ve bu ölçülen değerle piston grubunun sürtünme gücü olur.

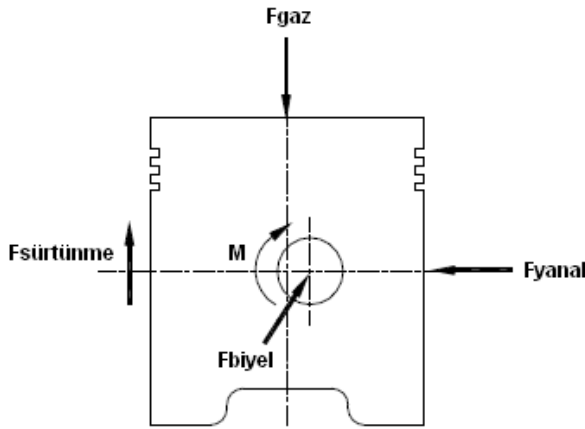


Şekil 2.13. Hareketli gömlek yönteminin şematik görünüşü

Bu yöntemin avantajı herhangi bir tahmin ve hesaplama ihtiyacı bırakmadan direkt olarak piston grubunun sürtünme gücünü ölçebilmesidir. Yük hücresi bağlantı yapılan yerde çok hassas olarak küçük yer değiştirmeleri bile ölçebilecek konumdadır. Bunun sonucu pistonun sürtünme kuvveti blok ve gömlek arasından ölçülür. Bu yöntemde en önemli sorun silindir basınç kuvveti ve pistonun itme kuvveti ile pistonun aksel yöndeki kuvvetinin birbirinden ayrıt edilmesidir. Çünkü silindir içerisindeki basınç kuvveti ve pistonun itme kuvveti, pistonun aksel yöndeki kuvvetinden çok daha fazladır. Diğer kuvvetlerden kaynaklanan küçük kuvvetler ölçülen piston sürtünme kuvvetini etkileyebilir. Birçok araştırmacı silindir basınç kuvvetinin ve piston itme kuvvetinin pistonun aksel yöndeki kuvvetini etkilememesi için donanımsal değişiklikler yapmışlardır (Koch,1996-Furuhama,1983). Bu yöntemin belirtilen sakıncadan dolayı kapsamlı bir motor modifikasyonuna ihtiyacı vardır. Silindir gömleği silindir bloğu içerisinde sadece aksel yönde hareket etmeli ve yanma odasının sızdırmazlığı sağlanmalıdır.

### 2.8.5. Anlık indike basınç yöntemi

Bu yöntem ilk defa gerçek motor parçaları ve motor üzerinde bir değişiklik yapmadan gerçekleştirilmiştir (Uras,1983-1984). Bu yöntem indike ortalama efektif basıncın ölçülmesi ve böylece anlık sürtünme gücünün belirlenmesi olarak açıklanabilir. Bu yöntemin dayandığı nokta, piston üzerine etkiyen çeşitli kuvvetlerin her krank mili açısından değişim göstermesiyle toplam dört kuvvet (gaz kuvveti, sürtünme kuvveti, yanal kuvvet, atalet kuvveti) aksenal yönde etkiler. Bu sayılan dört kuvvetin dengesi belirlenmelidir. Şekil 2.14' de piston üzerine etkiyen kuvvetler ve momentler gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Piston serbest cisim diyagramı

Bu yöntem, anlık biyel koluna gelen kuvveti, anlık silindir içi basıncı ve motor devrinin ölçülmesi ile atalet kuvvetinin hesaplanmasını gerektirir. Gaz kuvveti silindir içi basıncın piezo elektrik sensörle ölçülmesi ve piston alanına bölünmesi ile bulunabilir. Biyel koluna yerleştirilen bir strain gage ile de kola gelen kuvvet ölçülebilir. Biyel kolu üzerine gelen kuvvet, çekirge bağlantısı olarak adlandırılan bağlantı ile strain gage köprüsü tarafından ölçülür. Strain gagelerin yerleştirilmesinde sıcaklığın etkisi ile bağlantıların ve kendilerinin zarar görmemesi için dikkatli olunmalıdır.

Bu yöntemin avantajı motor bloğunda ve silindir kapağında herhangi bir modifikasyona ihtiyaç duymamasıdır. Bu yöntemde sadece motorun karter kısmına

çekirge bağlantının yerleştirilmesi gerekmektedir. Şekil 2.15’de çekirge bağlantı görülmektedir.



Şekil 2.15. Çekirge bağlantı (Walter,1997)

Bununla birlikte bu yöntem bazı zorlukları da barındırmaktadır. Bu yöntemin dezavantajlardan birisi bu yöntemde silindir içi basınç ve biyel kolundan ölçülen kuvvetin farklı ölçme yöntemleri ile ölçülmesi ve bu iki verinin beraber kullanıldığı hesaplamalarla sürtünme kuvvetinin belirlenmesidir. Ölçülen bu iki veriden silindir içi basınç değeri diğerine göre çok yüksektir ve bu iki verinin ölçümünün hassasiyeti sürtünme kuvvetinin belirlenmesinde çok önemlidir. Biyel koluna gelen kuvvetin ölçülmesinde strain gagelerin bağlantı yerleri, ara bağlantıların durumu gibi faktörler ölçüm hassasiyetini arttırmaktadır. Strain gagelerin sıcaklığa bağlı olarak kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir. Bu yöntemin diğer bir zorluğu ise strain gagelerin bağlantılarının sinyallerin iletiminde herhangi bir hataya meydan vermemesidir. Bu yüzden genelde bağlantı yöntemi olarak çekirge bağlantı yöntemi tercih edilmektedir.

### 2.8.6. P- $\omega$ yöntemi

Bu yöntem içten yanmalı motorlarda anlık sürtünmenin belirlenmesi amacıyla geliştirilmiştir. Yöntemde, anlık silindir basıncı, anlık sürtünme, atalet ve yük kuvvetinin neden olduğu volanın anlık açısal hız değişimine dayanır. Bundan dolayı bu yöntem, silindir basıncı ve volanın anlık açısal hızının ölçülmesi ile sürtünme

kayıplarının anlık olarak hangi parçalardan kaynaklandığının hesaplanmasına dayanır(Rezeka,1984).

## **2.9. Motor Tasarımının Sürtünme ve Aşınmaya Etkileri**

Motor bileşenlerinin dizaynının sitemin aşınması üzerine önemli etkisi bulunmaktadır. Düşük aşınmalı motorlar için ana dizayn prensipleri şu şekilde sıralanabilir.

- Sürtünen yüzeyler arasında doğrudan teması önleyen hidrodinamik yağlamanın sağlanması,
- Sürtünen yüzeyler arasında temas meydana geldiğinde az aşınma meydana gelmesi için yüzeylerde uygun malzemenin seçimi

Motor boyutlarını değiştiren motor parametreleri gömleğin aşınmasını etkiler. Gaz basıncı, segman-gömlek ara yüzünde temas kuvveti, segmanların dizaynı ve konumu ve piston pimi gibi parametrelerin etkisi önemlidir. Motorlarda aşınmayı etkileyen başlıca mekanik dizaynların üzerinde durulmuştur. Bunlar; çap ve strok, yük ve devir ile segman ve gömlek dizaynı olarak sayılabilir.

### **2.9.1. Motor özellikleri**

Motor çap boyutunun segman-gömlek aşınması üzerine çok az etkisi vardır. Çünkü segman üzerine etkiyen net basınç değişmemektedir. Strok ve biyel kolunun uzunluğu piston hızını etkilemektedir. Bu da segmanın altında gelişen hidrodinamik yağ filmlerinin oluşumlarını etkileyebilir. Arıca çapta meydana gelen aşırı bozulmalar sonucu segman-gömlek aşınması artar.

Motor yükü silindir içi basıncın etkisi ile oluşur ve miktarı basınç tarafından tayin edilir. Segmanlar üzerine daha yüksek veya daha uzun süre silindir basıncının etkimesi aşınmanın artması için büyük bir potansiyel oluşturur. Aşırı yüksek yükler ayrıca piston sıcaklığını arttırma eğilimindedir. Daha yüksek sıcaklıklar yağ

viskozitesini düşürür, yağ filmi kalınlığını azaltır ve aşınmayı arttırır. Bunlar ayrıca yüksek aşınmaya neden olabilecek etkiler de meydana getirir.

Motor devri, ÜÖN 'de segman ve gömleğin kaç kere temas ettiğini de belirtir. Daha yüksek hızlar ÜÖN' de segman ve gömleğin temas sayısının artmasından dolayı aşınmanın artmasına neden olabilir. Fakat yüksek devir sayıları piston hızını arttırdığından oluşan hidrodinamik yağlama rejimi ile aşınma oranları da azalma gösterebilir.

Segman ve gömlek sürtünmesinin daha iyi anlaşılabilmesi için farklı yaklaşımlarda olmuştur. Bu yaklaşımlarla yapılan çalışmalarda EGR'nin özellikle partikül filtresi kullanılmadığı durumlarda segman aşınmasını ve sürtünme katsayısını arttırdığı tespit edilmiştir. Bu aşınmanın karbon partiküllerinin segman ile gömlek ve segman ile yuvası arasına girmesi sonucu oluştuğu sonucuna varılmıştır (Urabe,1998-Hamatake,2001).

### **2.9.2. Segman ve gömlek dizaynı**

Gömlek dizaynı, aşırı aşınmaya neden olabilecek çap bozulmalarını en aza indirmek için önemlidir. Sınır yağlama koşullarında, gömlek yüzeyinin yüzey işlem kalitesi gömleğin aşınmasını etkilemektedir. Örnek olarak, süreksiz honlama izleri ve gömlek yüzeyinde yırtılmış veya şekil değiştirmiş metaller gömleğin fazla aşınmasına sebep olurlar.

Yüksek silindir basıncı boyunca, segman genişliği segmana etkiyen net radyal gaz kuvvetini etkiler. Segmanın gömleğe temas eden yüzeyinin genişliği azaltılarak bu kuvvet düşürebilir ve bu da potansiyel olarak aşınmayı azaltır. Segman yüzey profili net gaz basınç kuvvetini ve segman yüzünün hidrodinamik yağlanmasını etkiler. Bu yüzden az aşınma sağlamak için optimize edilmelidir.

Gömlek aşınması ayrıca pistonun üst segman bölgesinin de etkilediği aşınmadır. Eğer bu bölge de tolerans uygun olarak verilmezse karbon birikimi meydana gelebilir. Bu karbon birikintileri, gömlek ve piston arasında kaldığında birinci

segmanın piston tarafındaki yüzünde çapın azalmasına yani gömleğin aşınmasına neden olur. Çapın azalması önemli miktarda aşınmaya ve yağ kontrolünün kaybına neden olur.

Segman bölgesi toleransları ve segman yuvası genişlikleri, segmanların arasından geçen gaz akışını da etkiler. Bu da segmanlar üzerine etkiyen kuvveti ve son olarak aşınmayı etkiler. Segman bölgesindeki toleransların küçük olması durumunda aşırı aşınma, yapışma ve meydana gelebilir. Segman ve segman yuvası arasındaki büyük toleranslar segmanın kırılmasına yol açabilir.

## **2.10. Segman Kaplamaları**

### **2.10.1. Krom Kaplama**

Elektrolitik sert krom kaplama, yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı, düşük aşınma ve yüksek korozyon dayanımı istenen birçok uygulama alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Sert kromun uzay, otomotiv ve deniz endüstrisi için hidrolik parçalar gibi çeşitli uygulama alanlarında, segmanların kaplanmasında ve tekstil endüstrisinde de kullanımı vardır (Kubinski,1999).

Koruyucu, fonksiyonel ve dekoratif elektrolitik kaplamalar gibi geleneksel metal bitirme işlemleri için kullanılan proses ve teknolojiler, çevre kirliliğine yol açan sebeplerden biridir (Navinsek,1999). Krom kaplamalar kromik asit, sülfatlar, florürler ve diğer patentli kimyasallar içeren banyolardan oluşturulurlar. Temel banyolara ek olarak, temizleme, durulama ve sıyırılma sırasında atık sular oluşur. Temel banyolar ve bu atık sular altı değerli krom ve fosfatlar, yağlar vb. malzemeler içerirler. Bu atıklar kullanım ve elden çıkarmada çevresel probleme neden olurlar (Chen,1996). Temel konu sert krom kaplamanın üretiminde kanserojen madde olarak sınıflandırılan  $Cr^{+6}$ 'nın kullanılmasıdır. Atıkların yok edilmesi sırasında çok dikkat edilmesi gereklidir. Bu da sert krom üreticilerine ek üretim maliyeti ve sağlık riskleri nedeniyle ek işlemler getirmektedir (Rastegar,1997).



Elektrolitik sert krom üretiminde daha az çevre zararının sağlanması için iyon implantasyon tekniği üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu yöntem, elektrolitik yöntemle yapılan sert krom kaplama miktarını azaltmakta ve iyon implantasyonu ile aşınma, sertlik gibi özelliklerini geliştirmektedir (Walter,1996-1997). Bununla beraber tüm dünyada çevre yasaları ve programları, endüstriyel üretimde temiz teknolojilerin gelişmesinde temel oluşturmuştur. Son yıllarda özellikle çevresel hassasiyetlerin hem kanunlar hemde politikalar üzerinde gelişmesi ile krom, kadmiyum ve çinko kaplamaların yerlerini yüksek performanslı alternatif kaplamalar almışlardır.

### **2.10.1.1. Elektro kimyasal kaplama yöntemi**

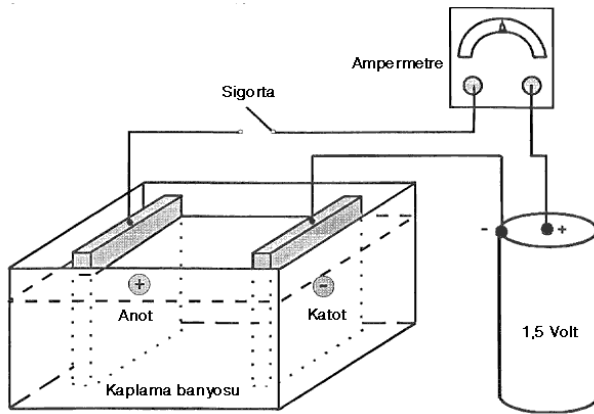
Metal içeren bir çözülden elektrik enerjisi geçirildiğinde, belirli miktarda metal kaplanacak veya çökecektir. Kaplanan metal miktarı, metalin kimyasal yapısına ve çözülmüş haldeki yapısına etki eden, kaplama işlemi esnasında kullanılan elektrik enerjisinin büyüklüğüne bağlıdır. Bazı metaller, farklı kimyasal enerjilere sahip olan birkaç değişik formda bulunabilirler. Çözülmüş metalin miktarına bağlı olarak, aynı miktardaki elektrik enerjisi kullanarak kaplanacak metal miktarı farklılık gösterir.

Elektro kimyasal kaplama, elektrik enerjisi kullanarak çözültideki metali bir yüzeye kaplama yöntemidir. Bir kaplama banyosu içinde elektriği ileten çözülmüş metal tuzu veya bileşiği bulunduran bir tank yardımıyla gerçekleştirilir. Kaplama banyosunun bu özellikleri taşıması gerekli olan temel niteliğidir. Fakat bu gerekliliklerin sağlanması iyi bir metal kaplama sonucu elde etmek için yeterli değildir.

Bir kaplama birimi başlıca bir katot, bir anot, bir elektrolit ve uygun bir kaplama banyosundan oluşur. Bunun yanında bazı ek araçlara da gereksinim duyulur bunlar elektrolitin karıştırılması ve saflaştırılması için gerekli olan ve herhangi bir otomatik kontrol için gerekli araçlardır. Elektriksel araçlar ise ana güç kaynağından gerekli düşük gerilim (doğru akım) sağlamak amacıyla bir azaltıcı dönüştürücü ve rektifiye edici araçlardır. Bazı hallerde motor jeneratörlerde kullanılmaktadır. Bu arada kaplama

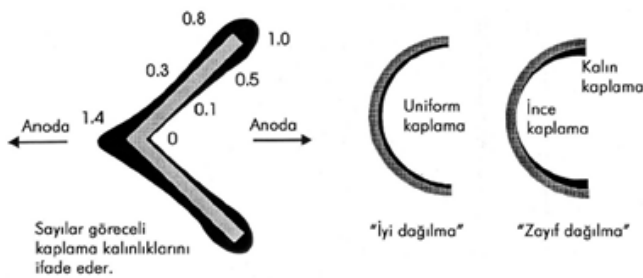
hücrelerine gerekli gücün istenen oranda verilmesini sağlayacak kontrol sistemlerine gereksinim vardır (Saraç, 1995).

Bütün kaplama banyolarının değişmeyen özelliği: metal katotta kaplanır, anottan ise metal çözünür. Katot veya doğru akım kaynağının eksi kutbuna bağlanan metal plaka dışında başka bir yerde metal kaplanmaz. Şekil 2.16'da krom kaplamada kullanılan banyo düzeneği görülmektedir.



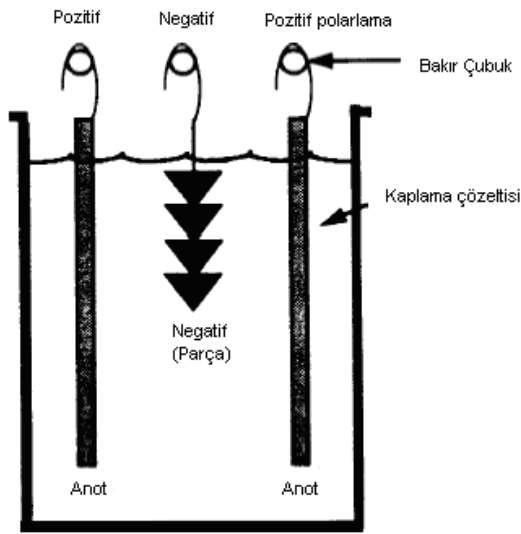
Şekil 2.16. Banyo düzeneği

Metal parça kaplama tankına yerleştirildiğinde metalin çıkık kısmı anoda daha yakındır. Bu nedenle elektrik akımı buraya doğru akarken daha kısa bir yol izler, yani daha düşük dirence maruz kalır. Bundan başka, akımda köşelere, kenarlara, sivri noktalara yönelme eğilimi vardır. Şekil 2.17'de kaplama dağılımı gösterilmektedir. Değişik noktalarındaki metal kaplama kalınlığı katottaki veya kaplanan malzemenin bir bölümündeki akım dağılım yönünün bir göstergesidir. Şekilde krom kaplama banyosunda kaplanan malzemenin dış ve iç kenarlarında gözlemlenen kaplama kalınlıkları görülmektedir.



Şekil 2.17. Kaplama dağılımı

Katottan anota bir akım geçişi ile banyo içerisinde metal iyonları kaplanacak malzeme yüzeyine hareketlenir. İyonlar kaplama malzemesinin nötr durumunun azalmasıyla malzeme yüzeyine metalin biriktirilmesini sağlar. Şekil 2.18’de anot ve katot bağlantıları ile parçanın bağlantı şekli görülmektedir. Banyo içerisindeki ilavelerle kaplama özellikleri değiştirilebilmektedir. Bu ilaveler kaplamaların kaplanma özelliklerini geliştirmektedir.



Şekil 2.18. Metal ve alaşımların elektro kimyasal kaplanması

### 2.10.1.2. Kromun elektro kimyasal kaplanması

Sert krom kaplamalar mühendislik alanlarında geniş kullanım alanlarına sahiptirler (uzay, otomotiv, askeri v.d) Özellikle kritik yerdeki parçaların yüzey özelliklerinin geliştirilmesi uygulamalarında tercih edilirler. Krom kaplama, zor koşullarda korozyon ve abrazyon durumlarında kullanılmaktadır (Bodger,1997).

Motorlarda farklı elemanlara da sert krom kaplama uygulanabilmektedir. Örneğin segmanlar, supaplar, pistonlar, piston kolları, hidrolik aksamlar uygulama yapılan parçalardan bazılarıdır. Sert krom kaplama özellikle içten yanmalı motorlarda kompresyon segmanlarının kaplanmasında kullanılmaktadır. Geleneksel sert krom kaplamalar  $Cr^{+6}$  ve negatif anyonları içeren kromik asit çözeltilerinden elde edilir. Bu kaplamalar, yüzey oksidasyonunun sonucunda oluşan pasif krom oksit ve çatlaklar

arasındaki ağırlara bağlı bir yapıya sahiptirler. Krom kaplamalarda sertlik ve mikro çatlak yoğunluğu gibi özellikler sıcaklık, banyo kompozisyonu ve akım yoğunluğu gibi değişkenlerden etkilenir (Rastegar,1997).

Sert krom kaplamalar son zamanlarda çevresel kirlilik, depolama sorunları ve kansorejenik olmasından dolayı Cr bileşiklerinin kullanım sınırlamaları gibi etmenlerden etkilenmektedir. Galvanik endüstrisi Avrupa yasalarında tehlikeli atık sınıfına giren krom atıklarına çözüm için krom kaplamanın alternatifi olabilecek çeşitli yöntemler üzerine çalışmaktadırlar (Picas,2006)

$Cr^{+3}$  ve diğer alternatif metaller (Mg, Ni ve Zn gibi) ile sert ve koruma amaçlı kaplamalar elektro kaplama işlemi ile üretilebilmektedir.  $Cr^{+3}$  ile üretilen krom kaplamalar aşınma dayanımı gerektiren sanayi uygulamalarında ve dekoratif uygulamalarda kullanılmaktadır.  $Cr^{+3}$  ile üretilen kaplamalar korozyon ve aşınma dayanımı gibi fiziksel özellikler açısından  $Cr^{+6}$ 'dan daha iyi sonuçlar vermektedir.

Çevresel problemler  $Cr^{+6}$  kullanımını önemli derecede azaltmaktadır. Krom kaplamadan sonra ortaya çıkan sıvı ve gaz atıklar önemli çevresel atıklardır. Ekipmanların maliyeti, kaplama işlemi esnasındaki gaz çıkışının az olması ile azaltılabilir. Kaplama sırasında ortaya çıkan gazların etkisizleştirilmesi için yapılacak olan yatırım kaplama maliyetini arttırmaktadır (Nabil 1993).

Çalışanların korunmaları için yüz maskesi, bot ve gözlük gerekmektedir. Zehirli kimyasallar ve bunların buharları (gazları) işçilerin bunlara maruz kalmaması için düzenli olarak temizlenmelidir. Ayrıca banyo tankı, zehirli gaz çıkışının azaltılması ve kimyasalların neden olabileceği yangınların önlenmesi için düzenli şekilde temizlenmelidir.

Bazı gaz atıkların çevreye yayılmadan etkisizleştirilmesi gereklidir. Kaplama banyolarında kaplama işlemlerinden sonra oluşan katı atıkların uygun şekilde temizlenmesi gerekir. Kalıntı metaller, elektrodializ, buharlaştırma, iyon değişimi ve azaltılan ozmos gibi proseslerle bertaraf edilmektedir.

### 2.10.1.3. Alternatif kaplamalar

İçten yanmalı motorlarda kullanılan motor blokları ve silindir gömlekleri gibi parçaların ağırlıkları, gereken çalışma koşullarına uygun olarak azaltılması motor ölçülerinde önemli bir azalmaya sebep olabilecektir. Bu azaltma tahmini olarak her motor için yaklaşık 1 kg'lık ağırlık azaltmasının kolaylıkla başarılması anlamına gelmektedir (Ebisawa,1991-Rao,1997). Yararlı yükün her azaltılan kilogramı yakıt ekonomisinin geliştirilmesinde önemlidir. 1100 kg'lık standart bir otomobilde 110 kg lık bir ağırlık azaltılması ile %7 civarında yakıt ekonomisi sağlanabilecektir. Otomobil ömrü düşünüldüğünde bu oran çok önemlidir. Yeni teknoloji ve malzeme uygulamaları bu amacın gerçekleştirilmesi için yapılan araştırmalardır.

Krom kaplamanın alternatifi olabilecek tam olarak uygun bir teknolojinin mutlaka sert krom kaplamanın ana özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Bu özelliklerden bazıları; yüksek sertlik ve korozyon dayanımı, düşük abrazyon aşınma hızı ve sürtünme katsayısıdır. Bazı dış bölgelerde uygulanan krom kaplama kalınlıkları 20 ile 200 µm hatta tekrarlı kaplamalarda 500 µm' a kadar çıkmakta, abrazyon ve korozyon dayanım gerektiren iç bölgelerde ise 5 ile 10 µm arasında uygulanabilmektedir (Heydarzadeh,2003).

Son yıllarda, termal sprey kaplamalar, örneğin tungsten ya da krom karbür kaplamalar özellikle istenilen aşınma dayanımı değerlerine çok iyi cevap verdiklerinden dolayı krom kaplamanın alternatifi gözükmektedirler (Ko,2002). Metalik kaplamaların, özellikle mekanik ve kimyasal dayanım gibi yüzey özelliklerinin geliştirmesi bir ihtiyaçtır. Bu kaplamalar teknolojik üretimlerle çevreyle dost olabilirler. Bu kaplamaların kullanımında diğer önemli gereksinimlerde krom kaplamaya göre HVOF ile uygulanan tungsten karbür kaplamaların sahip olduğu çok iyi aşınma ve yorulma değerleri vermeleridir.

Çevre kanunlarındaki sınırlamalar ve artan motor performansları üreticileri daha farklı kaplamalara yönlendirmiştir. Krom kaplama ile karşılaşılan asıl problem kaplama esnasında karşılaşılan problemlerdir. Bunlar işlem sırasında çok dikkatli olunması ve atıkların imhası esnasında karşılaşılan güçlüklerdir. Bunlara ilave olarak

üreticiler için maliyetin fazla olması ve kaplama esnasında insan sağlığı açısından karşılaşılan mahzurlar vardır. Avrupa Birliği, sert krom kaplamayı yasalar ile sınırlamakta, üreticiler ise alternatif uygulamalara yönelmektedir (Sahraoui,2004). Krom kaplamanın kullanılmaya devam etmesinin nedenleri ise öncelikle sağlam olması ve silindir gömleğinde daha az aşınmaya neden olmasıdır. Son 30 yılda krom kaplama motorlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Krom kaplamanın kullanıldığı motor parçaları; segmanlar, pistonlar, silindirlere, soğutma sistemi ve diğer bazı parçalarda krom kaplama yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Rastegar,1997).

Krom kaplamanın alternatifi olabilecek kaplamalardan bazıları, kimyasal buhar biriktirme, fiziksel buhar biriktirme, atmosferik plazma sprey ve yüksek hızlı alev püskürtme sayılabilir (NDCEE,1995).

Segman kaplaması olarak motorlarda kullanılan krom kaplamanın alternatifi olabilecek kaplama için bazı faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Günümüzde motor parçalarının yeniden dizaynı segman üzerinde yoğunlaşmaktadır. Üreticilerin alternatif krom kaplama yöntemleri geliştirme çalışmaları ve bunun yanında işlem değişikliği maliyetlerinin büyük yatırımlar gerektirmesi bu gelişleri kısıtlayıcı faktörlerdir.

Krom kaplamanın çevreye vermiş olduğu büyük zararlardan dolayı yapılması gereken yatırımlar krom kaplamanın maliyetini arttırmaktadır. Fakat hala krom kaplamanın yerini alabilecek bir alternatif geliştirilememiştir. Krom kaplamanın yerini alabilecek alternatif arayışında iki faktöre odaklanılmıştır. Bunlar Segman üretiminde ve kaplama işleminde daha düşük maliyeti elde etmek ve krom kaplamaya göre daha iyi veya eşit performans elde etmek

Günümüzde gelişmiş motorlarda metalik segmanların yanında bu segmanların eksiklerini tamamlayıcı olarak seramik segmanların da kullanılması araştırma konusudur. Seramik kaplamalardan bazılarında tribolojik testler yapılmıştır. Bu kaplamamalar; monolitik zirkonya, sinterlenmiş silisyum karbür ve silisyum nitrürdür. Tribolojik karşı yüzeyde titanyum nitrür olarak seçilmiştir. Yağsız terstler de

seramiklerin performansları düşük, yağlı testlerde ise silisyum nitür ve silisyum karbür iyi sonuçlar verirken zirkonya kötü sonuç vermiştir (Kustas,1996-Dufrane, 1989)

Sloan yapmış olduğu çalışmada, küresel grafitli dökme demirden imal edilen segmanı krom kaplı ve plazma sprej yöntemiyle  $Cr_2O_3$  ile kaplayarak aşınma oranlarını karşılaştırmıştır. Aşınma oranlarında ise tam tersi sonuç çıkararak segmanın aşınması plazma sprej kaplamada aşına altı kat azalmıştır (Sloan, 1991).

Dufrane yapmış olduğu çalışmada, krom kaplı, SiC ve  $Si_3N_4$  kaplı segmanların aşınma davranışlarını incelemiştir. Krom kaplı segmanın aşınma değeri  $Si_3N_4$  kaplı segmanla aynı olurken, SiC kaplı segmanın aşınma davranışı 1,5 kat daha fazladır (Dufrane,1987).

Naylor yapmış olduğu çalışmada, krom kaplı segmanların dökme demir gömlekle çalışmalarında sürtünme katsayısını 0,12 olarak bulmuştur. Deneyde kullanılan yağın kullanım süresine göre sürtünme katsayısı azalmıştır. Yeni yağ kullanımı aşınma ve sürtünme değerlerini azaltmıştır (Naylor,1992).

Çok tabakalı Ti-TiN kaplamalar dökme demir segmanlar üzerine uygulanmaktadır. Bu kaplamalar krom kaplama veya fosfat kaplamalar gibi tek tabakalı kaplamalara göre daha iyi sonuçlar vermiştir (Zhuo,2000).

Segman kaplamalarında ince ve sert kaplamalar PVD ve CVD uygulamaları ile gerçekleştirilmektedir. Bu kaplamalar, titanyum-nitrit (TiN) ve krom-nitrit (CrN) içermektedir. Bu uygulamalar daha çok küçük boyutlu motorlarda kullanılmaktadır (Broszeit,1999).

Ryk ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada günümüz motorlarında kullanılan segman yüzeylerinin laser teknolojisi kullanılarak mikro gözeneklerden arındırılması ile sürtünmenin %12-29 oranında azaldığını bulmuşlardır. Başka bir çalışmalarında ise bu oranı %30-40 olarak açıklamışlardır (Ryk,2002-2005).

Segman yüzeyleri, krom kaplamanın yanı sıra, termal sprej ile molibden, metal kompozitler, metal-seramik kompozitler veya seramik kompozitler ile de kaplanmaktadır. Segmanlarda kullanılan yüzey kaplamalarına; fosfor, nitrür, demir-oksit, bakır ve kalay örnek olarak verilebilir. (Mollenhauer,1997).

Deneysel çalışmalar sonucunda, molibden-nikel-krom maden alaşımı, kromoksit ( $Cr_2O_3$ ), alüminyum-titanyum ( $Al_2O_3-TiO_2$ ), metalik kobalt ( $MoSi_2$ , CrC-NiCr) bağlayıcı ile tungsten karbür (WC), maddeleri segmanlarda kaplama malzemeleri olarak kullanılmışlardır (Dufrane,1989-Radil,2001).

Termal sprej kaplamalar (Alev ve plazma sprej) krom kaplamanın yerini sadece sürünmenin olduğu uygulamalarda alabilirler. Günümüze kadar sürünmenin olmadığı uygulamalarda ise iyi krom kaplamanın yerini alamaz. Yani plazma kaplama sürülmenin olduğu yerde çok iyi performans göstermekte fakat aşınmanın olduğu yerde ise iyi sonuçlar vermemektedir (Rastegar,1993).

Truhan ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, ağır dizel taşıtların üst kompresyon segmanını plazma sprej yöntemiyle krom kaplamış ve farklı yağlar kullanarak aşınma oranlarını karşılaştırmışlardır. Sürtünme katsayısının sıcaklığın artması ile arttığı ve belli değerden sonra sıcaklıktan bağımsız olduğunu bulmuşlardır. Kullanılan yağın özelliğine bağlı olarak artan yük miktarının sürtünme katsayısını etkilediği görülmektedir. Ayrıca gömlek numunesi ile segman numunesinin aşınma değerleri karşılaştırıldığında gömlek numunesinin yaklaşık 12-15 kat daha fazla aşındığı söylenebilir (Truhan,2005).

HVOF kaplama yöntemi, metallerin çeşitli tozlarla kaplanarak aşınmaya, oksitlenmeye, korozyona ve ısıya dayanıklı hale getirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir termal sprej kaplama yöntemidir. Bu yöntemle gerçekleştirilen kaplama sayesinde belirtilen özellikler elde edildiği gibi, ana malzemenin üstün özelliklerinden tokluk ve kolay şekillendirilebilme özellikleri de korunmaktadır. Böylece HVOF kaplama, metal ve seramiklerin üstün özelliklerinin yeni bir malzemedeki toplanmasına imkan sağlamaktadır. HVOF işleminin birçok avantajları vardır. Bu avantajlar, kalın kaplama kapasitesi (belirli metaller için 2.5 mm den



fazla), parça büyüklüğü sınırlaması olmaması, kimyasal solüsyon kullanımına ihtiyaç duymaması ve daha düşük kurma ile uygulama maliyeti bunlardan bazılarıdır. Kaplama avantajlarından başka olarak kaplama kalınlığı ince (50- 100 µm) atılabilir buda kompresyon segmanlarında kullanım imkânı sağlar. Motor testleri göz önüne alındığında HVOF segman günümüz krom kaplı segmanlara kere 6 kat daha az aşınmıştır. Üretim işlemlerine başlarken tahmin edilen maliyet ve sonradan gelen maliyetlerin toplamı krom kaplama yönteminden az veya eşittir (Rastegar,1997).

### **2.10.2. HVOF (Yüksek Hızlı Alev Püskürtme) Kaplama**

HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) sistemi, işlenebilir yüksek kalitede metal, karbür ve farklı özel kaplamalar oluşturabilmek için geliştirilmiş yeni bir yüksek hızlı alev püskürtme sistemidir.

Bu prosesin özelliği olan yüksek kinetik enerji sayesinde çok yüksek yoğunluğa sahip kaplamalar elde edilir. HVOF işleminde, taşıyıcı gaz içerisinde toz bileşimi tabanca içerisindeki yanma odasına aksel olarak girer. Yanma odasında yakıt (propilen, hidrojen, kerozen,v.d) oksijen ile yüksek basınçta yakılır. Yanmanın etkisi ile supersonik hızda sprey elde edilir (Pawlowski,1995- Sobolev,2004) Kaplama esnasında 1350 m/sn gibi yüksek hızlara ulaşan toz partikülleri kaplanacak malzeme yüzeyine çarparak form değiştirir ve yayılarak malzemenin yüzeyinde mevcut olan tüm gözenekleri doldururlar (Kowalsky,1990). Kaplama işleminde partiküller ısıtılmış yüksek basınçlı oksijen ve yakıt karışımı jet alevi ile hızlandırılır, kinetik enerjisi artmış partiküllerin büyükçe bir kısmı yarı ergimiş şekilde hedef altlık üzerine hızla çarparak yapışırlar. Böylece yoğun ve bağlanma mukavemetleri yüksek kaplamalar elde edilir (Stokes,2003).

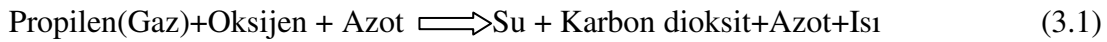
Yüksek bağ mukavemeti, düşük porozite ve yoğun kaplamalar üretilmesi için yanma, gaz hareketi ve alev hızı önemli karakteristiklerdir. HVOF sprey tekniğinin anlaşılabilmesi için bu üç temel ve diğer karakteristiklerin anlaşılması gerekir.

HVOF yöntemi krom kaplamada umut verici alternatif bir yöntem olarak düşünülmektedir. Genelde HVOF kaplama yöntemi diğer plazma kaplamalara göre

çalışan yzeyeleler arasında yzkksek adhezif ve kohezif (yapışma) dayanıma sahip aşırı derece yzkksek yoğunluklu kaplamadır. Ayrıca HVOF yzntemi ile elde edilen bitirme işlemi plazma işlemlerine gze 6 kat daha iyi, krom kaplama işlemine de eşittir (Rastegar 1997- Yoshida,1990).

### 2.10.2.1. Gaz hareketi, yanma ve hız

Oksijen ve gaz yakıt, yanma bzlgesine girmeden znce tabancanın izerisinde dzşk basınçta karıştırılır, daha sonra ateşleme ve kimyasal reaksiyon ile beraber ısı enerjisi ağıa çıkar. Oluşan alev sıcaklığı 2300-3000°C arasındadır (Metco,1989). Basıncın ve sıcaklığın artması yzkksek gaz hızının oluşmasını sağlar. Son araştırmalar ile oluşan kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir.



Denklemden gdrzldęz zere azot inert, propilen ve oksijen reaksiyonundan ise su (buhar) ve karbondioksit gazı oluşmaktadır. Yzkksek ııdan dolayı su buhar formundadır. Kimyasal reaksiyondan oluşan enerji ısı ve basınca dznuşmekte ve kullanılan toz partikzllerinin erimesini ve gazlar ile birlikte dzşarı hareketini sağlamaktadır. Sıcaklık, basınç, gaz izeriği, gaz yoğunluğu ve gazın geçtiği bzlgelelerdeki değişimler gaz hızını etkilemektedir. Diğer bir değişim, gaz hızından dolayı ses hızında meydana gelmektedir (Kowalsky,1990).

Bu prosesin uygulandığı kaplamalarda, flame sprej, elektrik ark sprej ya da plazma sprej gibi diğer yzntemlerden daha yoğun ve sıkı bağlara sahip katmanlar elde edilir. HVOF zellikle karbzr parçacıklarının metalik matrise gzmzllz olduğu (WC, Co, WC-CoCr, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr, WC, NiCrBSi-WC, v.b) sert metal katmanlar oluşturmak için uygundur. Ayrıca bu proses yzkksek yoğunlukta, gzlz bağ mukavemetine sahip ve oksit konsantrasyonu çok az olan kaplamalar için paslanmaz elik ve nikel bazlı alaşımlarda da kullanılabilir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> gibi oksitli seramiklerde HVOF sistemiyle uygulanması aşınma mukavemeti iyi kaplamalar zretir (Liu,2002).

HVOF sisteminde ince toz halinde metal, seramik ve karbür bileşikleri ısıtılarak yüksek sıcaklıktaki gaz akımıyla yarı ergimiş yüksek enerjili damlacıklar halinde altlığa çarpıp yapışarak güçlü bir kaplama oluştururlar. HVOF kaplama prosesinin diğer termal sprej kaplama sistemlerinden farklı birkaç önemli avantajı vardır.

Plazma sprej ile kıyaslandığında HVOF' la püskürtülen partiküllerin sahip olduğu enerji termalden çok kinetik enerjidir. Bu sebeple çok az partikül uçuş esnasında oksitlenir. Ayrıca tamamen erimemiş olan partiküller altlığa çarptığında plastik deformasyona uğrayarak yapışır buda kaplamada oluşan porozite miktarını azaltır. Sonuçta yüksek korozyon direncine sahip kaplamalar oluşturulabilir. Kaplamaların sertliği, malzemenin üzerindeki yüzeyinin durumuna, partiküllerin birbirine bağlanması, porozitenin seviyesi, bazı durumlarda çatlak oluşturulabilecek etkenlerin mevcudiyeti gibi etkenlere bağlıdır (Gerard,2006).

#### **2.10.2.2. Yoğunluk**

HVOF sistemi ile elde edilen kaplamalarda yüksek kinetik enerji sayesinde çok yüksek yoğunluk sağlanır. Kaplama partikülleri yüksek hız sayesinde ana malzeme üzerine vurarak, ergimiş partiküllerin formunun değişerek mümkün olan tüm gözeneklerin içine girip birleşmesi sağlanır. Bu kinetik enerji ve momentum transferi kaplama ile yüksek dereceli bir kapsam sağlar, bu da metal işlemlerinde olağanüstü kapasitede püskürtme kaplamalar yapılabilmesine olanak sağlar. Kaplamalarda % 4 den az porozite ve bazı kaplamalarda ise %0,5 den daha az porozite elde edilmektedir.

#### **2.10.2.3. Yüksek bağ mukavemeti**

Diğer termal sprej yöntemleri ile elde edilen kaplamalara göre daha yüksek bağ mukavemetine sahip kaplamalar elde edilir. Bunun sebebi partiküllerin, yüksek hız sebebiyle tozun yanan alevin merkezinde birleşmesinden kaynaklanmaktadır. Örneğin HVOF ile sprej standart karbür kaplama 82 MPa bağ mukavemeti göstermektedir. Diğer malzemelerde, HVOF kaplama ile farklı kaplama yöntemlerine göre daha yüksek bağ dayanımı kazanmaktadır. Kaplamada sıkıştırılan

kalıntı gerilmesi bazı durumlarda düşük çekme gerilmesi ile kaplama malzemelerinin yorulma ömrünü geliştirebilir. Bu da kalın kaplamaların kırılma hassasiyetini azaltır.

#### **2.10.2.4. Sertlik**

Kaplamaların sertliği; partiküllerin birbirlerine bağlanması, porozitenin seviyesi, bazı durumlarda çatlak oluşturabilecek etkenlerin mevcudiyeti gibi malzemenin yüzeyinin durumuna da bağlıdır. Elde edilen kaplamalar içerdikleri düşük porozite ve yüksek kaplama bütünlüğü sayesinde standart alternatif kaplamalara göre daha yüksek sertlik gösterirler. %12 WC ve Co içeren kaplamalarda mikro sertlik olarak 1100 ile 1350 (HV<sub>300</sub>) değerlerine ulaşmaktadır.

#### **2.10.2.5. Kaplama kalınlığı**

Kaplama kalınlığı limitleri standart alternatif proseslerle püskürtülmüş kaplamalara göre daha fazladır. Bu yüksek kaplama kalınlığı limitleri kaplamaların olağanüstü yapışma ve bağlanma mukavemetlerinden kaynaklanmaktadır. HVOF kaplamaların kaplama limitleri aynı kaplama malzemesi kullanılmasında plazma, yanma yada tel kaplamalara göre daha yüksektir.

#### **2.10.2.6. Aşınma mukavemeti**

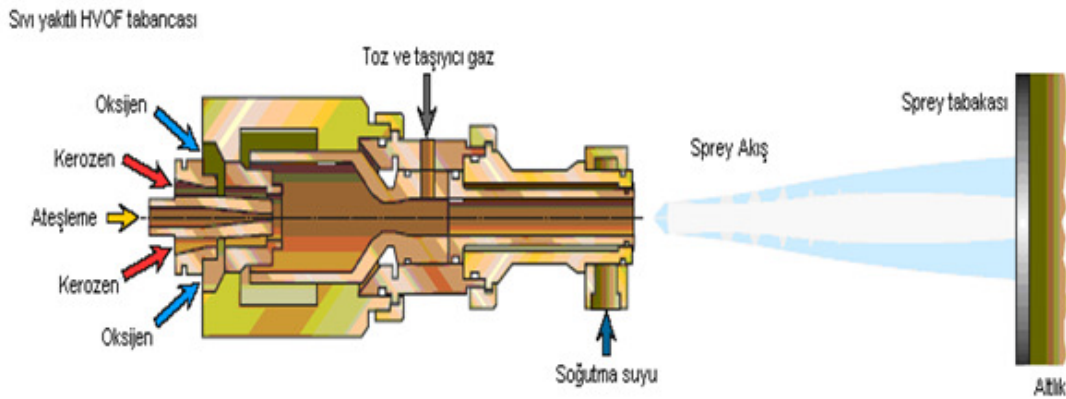
Genel olarak sert metaller aşınmaya karşı, yumuşak metallere göre daha fazla dayanıklılık gösterirler. Termal püskürtme kaplamalarında, iyi bir bütünlüğe sahip yoğun kaplamalar yüksek porozite seviyelerine ve zayıf bağlanma kuvvetine sahip kaplamalara göre aşınmaya karşı daha iyi dayanıklılık gösterir. HVOF kaplamaları bu nedenle düşük porozite seviyeleri ve olağanüstü partiküller arası bağlanma özellikleri ile aşınmaya karşı mükemmel bir mukavemet göstermektedirler. Gelişmiş tokluk, kimyasal ve diğer faktörlere bağlıdır. HVOF taki düşük sıcaklık ve kısa bekleme süresi ile darbe ve aşınma dayanımı yüksek kaplama üretilir.

HVOF kaplamada, kayma/adhezif aşınma, fretting, erozyon yada kavitezyon aşınma dayanımı uygun proses ve malzeme seçilerek en ileri seviyede elde edilebilir. HVOF

kaplamaların sağladığı yüksek yoğunluk ve fevkalade metalurjik özellikler korozyon dayanım etkisini geliştirmektedir. Korozyon etkisi; sıcak korozyonu, oksidasyonu, asidik asit ve alkalinin atmosferde gaz halinde veya sıvı halde bulunmasıyla oluşan korozif ortamı içermektedir.

HVOF prosesinin yüksek hızı; Kritik elementlerin kaybını minimize etmektedir. Karbürlerin püskürtülmesi noktasal olarak gerçekleşmektedir. Geleneksel püskürtme teknikleri karbür partiküllerinin dekarbürize olmasına neden olmaktadır. HVOF prosesinin yüksek hızı partiküllerin alevin içine oturma süresini düşürmektedir. Bu nedenle de dekarbürizasyon azalmaktadır. Sonuç olarak karbür partiküllerinin çözülmemiş görüntüleri gelişmiş bir aşınma direnci sağlamaktadır.

İyi yüzey işleme kabiliyetine sahip HVOF kaplama ile üretilen kaplamalar yumuşak yüzeylerinden dolayı kaplama yüzeyine birçok işlem uygulanmasına olanak tanımaktadır. Kaplamalara istenilen toleranslarda lepleme, honlama ve yüzey parlatma gibi işlemler uygulanabilir. Şekil 2.19'da sıvı yakıtlı HVOF işleminin şematik şekli verilmiştir.



Şekil 2.19. Sıvı yakıtlı HVOF işleminin şematik gösterimi (Metco,2010)

### 2.10.3. Kaplama Tozları

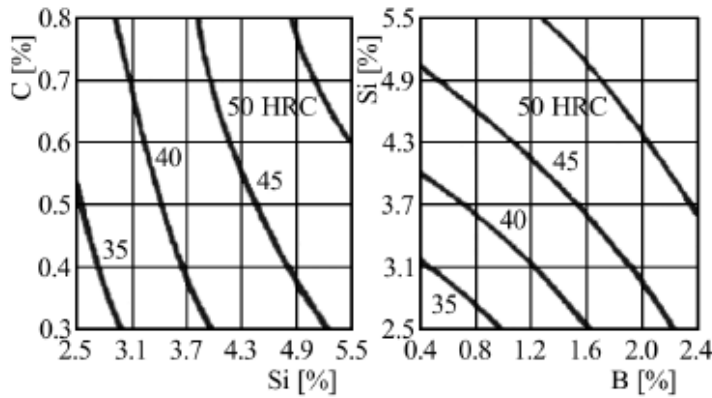
İçten yanmalı motorlarda kaplama amacına göre kullanılacak kaplama yöntemi ve kaplama tozları değişmektedir. Örneğin piston yüzeyine termal bariyer oluşturmak için atmosferik plazma sprej yöntemi ve toz olarak zirkonyum tercih edilmektedir.

Sürtünme ve aşınma performansının artırılması için ise farklı kaplama tozları tercih edilmektedir. Bunlardan bazıları, Nikel esaslı tozlar, Molibden takviyeli tozlar ve aşınma davranışını iyileştiren WC takviyeli tozlar olarak sayılabilir. Bu bölümde HVOF kaplama yönteminde kullanılan Ni bazlı tozlar hakkında bilgi verilecektir.

Nikel esaslı ısıl püskürtme tozları ticari olarak borür, karbür ve metaller arası bileşikler içerikli olmak üzere üç grupta bulunmaktadır. Ni-Cr-B-Si esaslı olan bu alaşımlar özellikle cam, seramik, çimento ve çelik üretiminde aşınma dirençli yüzey sertleştirme malzemesi olarak kullanılmaktadır (Brangt,1995).

Ni esaslı alaşımlar, aşınma direnci ile birlikte sıcak korozyon ya da oksidasyona direncin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Piston kolları ve toprak kaldırma ekipmanları gibi büyük boyutlardaki parçalarda kaplama tabakası oluşturmak için kullanılırlar. Krom elementi, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon ve korozyon direnci sağlamakla birlikte ayrıca sert fazın oluşumu ile de kaplamanın sertliğini artırır. Bor elementi ergime sıcaklığını düşürür ve sert fazın oluşumuna katkıda bulunur. Karbon ise sert fazı ürettiği gibi kaplamanın aşınma direncini de artırır (Miguel,2003).

Nikele, bor ve silisyum elementlerinin katılması nikelin ergime noktasını düşürmekte ve böylece kaplama sonrası oksitlenmiş torcu ile yeniden ergitme işlemi kolayca uygulanabilmektedir (Tobar,2006). Nikel ve bor, 1092 °C' de Ni-Ni<sub>3</sub>B ötektiği oluşturmakta ve silisyum ilavesi ötektik noktayı daha da düşürmektedir. Ancak nikel ve borun fazla miktarda katılması plastisiteyi azaltmaktadır çünkü nikelde borun çözünürlüğü çok az olup silisyum, nikel ile yeralan katı çözeltili oluşturmaktadır. Bu alaşımların abrazif aşınmaya karşı direnci nikel borür (Ni<sub>3</sub>B), krom borür (CrB, Cr<sub>5</sub>B ve Cr<sub>2</sub>B) ve diğer kompleks borür şeklindeki sert fazlara bağlıdır (Brangt,1995). Şekil 2.20'de alaşım elementlerinin NiCrBSi tabakasının sertliğine etkileri gösterilmiştir.



Şekil 2.20. Alaşım elementlerinin NiCrBSi tabakasının sertliğine etkileri (Mrdak,2009)

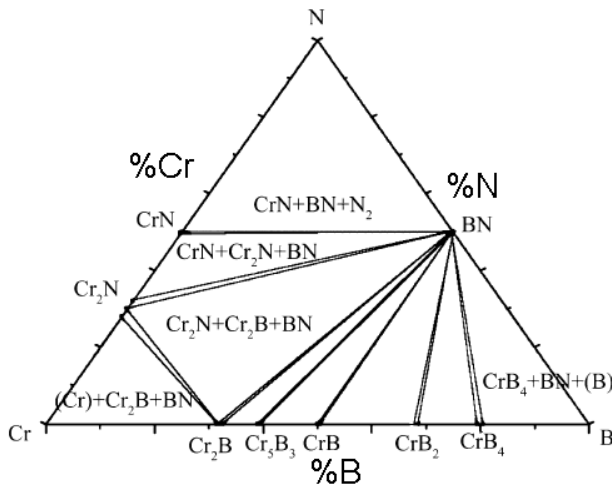
Nikel esaslı alaşımlar yüzey sertleştirme üreticilerin verdikleri ticari isimler altında çubuk, tel ve toz şeklinde püskürtme-ergitme tozlar olarak üretilmişlerdir. Tozdaki bor içeriği; % 0' dan %15' e kadar değişen krom içeriğine bağlı olarak % 1,5 dan % 3,5' a kadar değişir. Bu değişim ve sertlik değerleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Yüksek Cr içeren tozlar yüksek miktarda bor elementine ihtiyaç duyar ki bu da yaklaşık olarak 1800 kg/mm<sup>2</sup> sertliğindeki sert krom-borürler oluşturur (Sarı,2006).

Nikel 538 °C sıcaklıklarda sertliğini korur. 1010- 1065 °C olan düşük ergime noktasına sahiptir. Ni esaslı alaşımlar korozyona ve sıcak-soğuk abrazyona karşı mükemmel direnç gösterirler. Bağ mukavemeti olağanüstü olup seramik yada farklı metaller için mükemmel bir kaplama altı ara tabakasıdır. Ni-Al gibi bazı nikel alaşımlarının çok sert bir yüzeye bağlanması için çok az yüzey hazırlığı gerektirmektedir. Ni alaşımları, yenme şeklinde yüzey hasarına uğrayan malzemeleri tamir etmek için kullanılan ideal bir malzemedir (Howes,1994). Şekil 2.21' de Krom, bor ve nikelin 1000°C'deki üçlü faz diyagramları görülmektedir.

Tablo 2.1. Ni esaslı alaşımların kimyasal bileşimleri ve sertlik değerleri (Sarı,2006)

Kimyasal Bileşim (%Ağırlık)						
B	C	Cr	Fe	Si	Ni	Sertlik (HRC)
1,5	0,2	-	1	2,8	Kalan	19-24
1,6	0,3	3,7	1,2	3,1	Kalan	32-37
1,7	0,35	7,5	1,5	3,5	Kalan	35-42
2,4	0,45	11,0	3,0	4,0	Kalan	49-52
3,5	0,8	15,5	4	4,3	Kalan	59-92

WC fazı birçok uygulamada arzu edilir. Bununla birlikte spreyci esnasındaki yüksek sıcaklık ve HVOF işleminde karşılaşılan soğuma WC fazını başka fazlara dönüştürür. WC'ün dekarbürizasyonu sonucunda birçok uygulamada istenmeyen  $W_2C$ ,  $Co_xW_yC_z$  ve diğer karmaşık amorf yapılar oluşmaktadır.  $Co_6W_6C$ ,  $C_3W_3C$  ve  $Co_2W_4C$  önemli amorf yapılarıdır.



Şekil 2.21. Cr-B-Ni 1000°C' deki faz diyagramı (Rogl,1992)

Miguel ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada ise, %73.28 Ni, %14.80 Cr, %4.28 Si, %3.7 Fe, %3.21 B, % 0.73 C kimyasal bileşimindeki Ni-esaslı toz ile yüksek hızlı oksit püskürtme (HVOF), plazma püskürtme ve plazma püskürtme+ergitme şeklinde ısıl püskürtme yöntemleri kullanılarak orta karbonlu çelik altlık üzerinde kaplama tabakası oluşturulmuş daha sonra disk üzeri bilya (ASTM G99-90) aşınma deney düzeneğinde aşındırılmıştır. Araştırmacılar, aşınma deneyleri sonucunda; plazma püskürtme+ergitme ve HVOF yöntemleri ile kaplanmış numunelerin her ikisinde sadece plazma püskürtme işlemi uygulanmış numuneye göre çok iyi kayma aşınma direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, HVOF ve plazma püskürtme+ergitme işlemlili numunelerin her ikisinin de abrazif ve adhezif aşınma şeklinde benzer aşınma mekanizmaları göstermiştir. Plazma püskürtme işlemlili numunenin ise pürüzlü aşınma yüzeyi gösterdiğini, kaplamada önemli miktarda çatlak ağının olduğu, çatlakın aşınma sırasında ilerleyip yüzeye kadar çıktığını ve ana aşınma mekanizmasının yorulma olduğunu belirtmişlerdir (Miguel,2003).



Kim ve arkadaşları tarafından Ni-esaslı kaplamaların tribolojik özellikleri üzerine çalışma yapılmıştır. Ni- esaslı tozlar ile Ni-esaslı toza %15, 25, 35 ve 45 oranlarında takviye amacıyla WC-%12Co ilave edilmiş ve alev püskürtme yöntemi kullanılarak kaplama tabakası oluşturulmuş ve daha sonra numunelerin 2-cisimli ve 3-cisimli abrazif aşınma ile kuru kayma aşınma direnci incelenmiştir. Araştırmacılar deneyleri sonucunda, 2-cisimli abrazif aşınmada %35 WC ilaveli malzemenin, 3-cisimli abrazif aşınmada ise Ni-esaslı kaplamanın daha iyi sonuç verdiğini, kuru kayma aşınma direncinde ise %20 ve/veya %30 WC ilaveli kaplamanın çok daha iyi aşınma direnci gösterdiğini belirtmişlerdir (Kim,2003).

## BÖLÜM 3. SÜRTÜNME KAYIPLARININ TEORİK ANALİZİ

Gaz akışkanlı çevrimlerinin, içten yanmalı motorlar için geliştirilen teorik modelleri: içten yanmalı motorların performansını etkileyecek parametrelerin etkisinin incelenmesi açısından önemlidir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, çeşitli performans parametreleri tersinir ve tersinmez modeller üzerinde uygulanmış ve içten yanmalı motorların optimum çalışma şartları araştırılmıştır (Parlak,2004-Chen,2008- Ge,2008).

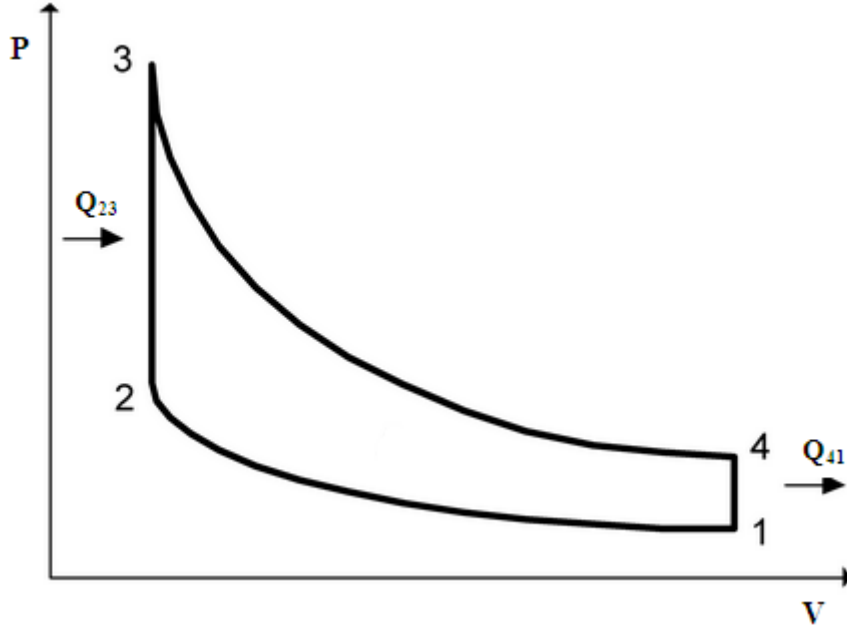
Yapılan bir çalışmada, tersinir otto çevrimi için güç ve ortalama efektif basıncın optimizasyonu yapılmıştır (Wu,1998). Diğer bir çalışmada, maksimum tersinmezlik işi ve Otto çevriminin verimi, adyabatik proseslerdeki tersinmezlik ile sıkıştırma ve genişleme proseslerindeki verim ile ilişkilendirilmiştir (Gonzales,2000).

İçten yanmalı motorlarda sürtünme kayıplarının iç tersinmezlik parametrelerinden biri olduğu yapılan çalışmalarda ortaya konulmuştur. Otto çevrimi üzerine yapılan çalışmalarda da sürtünme kayıplarının tersinmezlik ile ilişkisi ortaya konulmuştur. Yapılan bir çalışmada, Otto çevrimi sürtünme kayıpları ile sonlu zamanlı olarak modellenmiştir (Angulo-Brown,1994). Diğer bir çalışmada, Otto çevriminin güç ve verim ifadelerinin karakterizasyonları ısı transferi ve sürtünme kaybı ifadeleri kullanılarak çıkartılmıştır (Chen,2003). Başka bir çalışmada, Otto çevriminde kullanılan akışkanın özgül ısısının değişiminin, çevrim performansına etkisi ısı kaybı ve sürtünme kayıpları ile birlikte araştırılmıştır (Ge,2005).

### 3.1. Teorik analiz

Standart Otto çevriminin P-V diyagramı Şekil 3.1'de verilmiştir. Çevrimi oluşturan prosesler numaralandırılarak gösterilmiştir. Bu prosesler açıklanırsa, 1-2 adyabatik

sıkıştırma, 2-3 sabit hacimde ısı girişi, 3-4 adyabatik genişleme, 4-1 sabit hacimde sistemden ısı atılmasıdır.



Şekil 3.1. Otto çevrimi Basınç-Hacim diyagramı

Çevrim parametreleri sırasıyla açıklanırsa;

Özgül ısılar oranı;  $k = \frac{c_p}{c_v}$

Sıkıştırma oranı;  $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$

Genişleme oranı;  $r_e = \frac{V_4}{V_3}$

Basınç artma oranı;  $\beta = \frac{T_3}{T_2}$

Otto çevrimi için kritik noktalarındaki sıcaklık ifadeleri aşağıdaki şekilde çıkarılır.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1} \quad \Rightarrow \quad T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}$$

Basınç artma oranı ifadesinden aşağıdaki ifadeler çıkarılır.

$$T_3 = \beta T_2 \quad \Rightarrow \quad T_3 = \beta T_1 \varepsilon^{k-1}$$

Sıcaklık oranları ile hacim oranları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1}$$

$$T_4 = \frac{T_3}{r_e^{k-1}} = T_1 \beta$$

Sonlu zaman termodinamiği teorisi ile tersinir ve tersinmez çevrimlerin performans analizleri yapılabilmektedir. Otto çevriminde çevrim zamanı, 4-1 ve 2-3 prosesleri sabit hacimde gerçekleşmektedir. Çevrime zamana bağlı sabit hacimde ısı girişi ve çıkışı ifadeleri aşağıdaki şekilde çıkarılır.

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{2 \rightarrow 3} = \frac{1}{k_1} \quad \Rightarrow \quad t_{2 \rightarrow 3} = k_1(T_3 - T_2) \quad \Rightarrow \quad t_{2 \rightarrow 3} = k_1 T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)$$

$$t_{2 \rightarrow 3} = k_1 T_1 \varepsilon^{k-1} (\beta - 1) \quad (3.1)$$

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{4 \rightarrow 1} = -\frac{1}{k_2} \quad \Rightarrow \quad t_{4 \rightarrow 1} = k_2(T_4 - T_1) \quad \Rightarrow \quad t_{4 \rightarrow 1} = k_2 T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)$$

$$t_{4 \rightarrow 1} = k_2 T_1 (\beta - 1) \quad (3.2)$$

Çevrime sabit hacimde ısı verilmesi ve atılması için geçen toplam süre aşağıdaki gibi yazılır.

$$t_{top} = t_{23} + t_{41}$$

Burada t zaman,  $k_1$  ve  $k_2$  pozitif sabitler,  $t_{23}$  ve  $t_{41}$  ısı giriş ve çıkış zamanlarını ifade etmektedir.

Tersinir Otto çevrim iş ifadesi;

$$W = q_{23} - q_{41} = c_v(T_3 - T_2) - c_v(T_4 - T_1) \quad (3.3)$$

Zamana bağlı tersinir Otto çevrimi güç ifadesi;

$$P_T = \frac{c_v(T_3 - T_2) - c_v(T_4 - T_1)}{k_1(T_3 - T_2) + k_2(T_4 - T_1)} = \frac{W}{t_{top}} \quad (3.4)$$

Denklem 3.4 parametreler cinsinden düzenlenip aşağıdaki gibi yazılırsa;

$$P_T = \frac{c_v T_1 [(\beta \varepsilon^{k-1} - 1) - (\beta - 1)]}{(\beta - 1)(k_1 \varepsilon^{k-1} + k_2)} \quad (3.5)$$

olur. Otto çevriminde sürtünmeden kaynaklanan tersinmezliklerin belirlenebilmesi için silindir içerisindeki sürtünmeye bağlı kayıp güç ifadesinin çıkarılması gerekir. Silindir içerisindeki sürtünme kuvveti ifadesi aşağıdaki şekilde yazılabilir. (Angulo-Brown, 1994-1996).

$$f_s = -\mu v = -\mu \frac{dx}{dt} \quad (3.6)$$

Burada;

$\mu$  : Sürtünme katsayısı

$x$  : Piston yolu

Yukarıda görüldüğü gibi sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı ve pistonun hızı ile doğru orantılıdır. Sürtünme gücü ise sürtünme işi ve alınan yola bağlıdır. Sürtünme gücü ifadesi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$P_s = \frac{dW_s}{dt} = f_s \frac{dx}{dt} = -\mu v \frac{dx}{dt} = -\mu v^2 \quad (3.7)$$

Denklem 3.7’de görüldüğü gibi motorlarda iç sürtünmelerden kaynaklanan sürtünme gücü piston hızının karesi ve sürtünme katsayısı ile doğru orantılıdır. Burada  $v$  anlık piston hızıdır. Diğer çalışmalarda olduğu gibi analizde anlık piston hızı yerine ortalama piston hızı kullanılmıştır (Chen,2008-Ge,2005). Ortalama piston hızı ifadesi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$v_{ort} = \frac{x_1 - x_2}{\Delta t_{12}} = \frac{x_2(\varepsilon - 1)}{\Delta t_{12}}$$

Otto çevriminin zamana bağlı tersinmez güç ifadesi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$P_{net} = |P_t| - |P_s| = \frac{c_v T_1 [(\beta \varepsilon^{k-1} - 1) - (\beta - 1)]}{(\beta - 1)(k_1 \varepsilon^{k-1} + k_2)} - \mu \left( \frac{x_2(\varepsilon - 1)}{\Delta t_{12}} \right)^2 \quad (3.8)$$

Çevrimin zamana bağlı tersinmez termik verim ifadesi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\eta = \frac{P_{net}}{Q_g / t_{top}} = \frac{\frac{c_v T_1 [(\beta \varepsilon^{k-1} - 1) - (\beta - 1)]}{(\beta - 1)(k_1 \varepsilon^{k-1} + k_2)} - \mu \left( \frac{x_2(\varepsilon - 1)}{\Delta t_{12}} \right)^2}{\frac{c_v (T_3 - T_2)}{k_1 (T_3 - T_2) + k_2 (T_4 - T_1)}} \quad (3.9)$$

Denklem 3.8 ve 3.9 ifadeleri sadeleştirilirse;

$$P_{net} = \frac{c_v (1 - F)}{k_1 + k_2 F} - b (\varepsilon - 1)^2 \quad (3.10)$$

$$\eta = (1 - F) - \frac{b (\varepsilon - 1)^2 (k_1 + k_2 F)}{c_v} \quad (3.11)$$

olur.

Burada;

$$b = \frac{\mu (x_2)^2}{(t_{12})^2}$$

$$F = \frac{\alpha^k \varepsilon^{(1-k)k} - 1}{\alpha - \varepsilon^{k-1}}$$

Çevrimin güç ve verim ifadeleri Angulo-Brown'un vermiş olduğu deneysel sonuçlara göre çizilmiştir. Analizde kullanılan veriler Tablo 3.1'de görülmektedir.

Tablo 3.1. Analizde kullanılan değerler (Angulo-Brown,1994-1996)

Büyüklikler	Değerler
$c_v$	0,7073
$k$	1,4
$k_1$	$8,128 \cdot 10^{-6}$ s/K
$k_2$	$18,67 \cdot 10^{-6}$ s/K
$x_2$	$1 \cdot 10^{-2}$ m
$t_{12}$	$8,66 \cdot 10^{-3}$ - $16,66 \cdot 10^{-3}$ s
$\mu$	0-0,15 kN-s/m

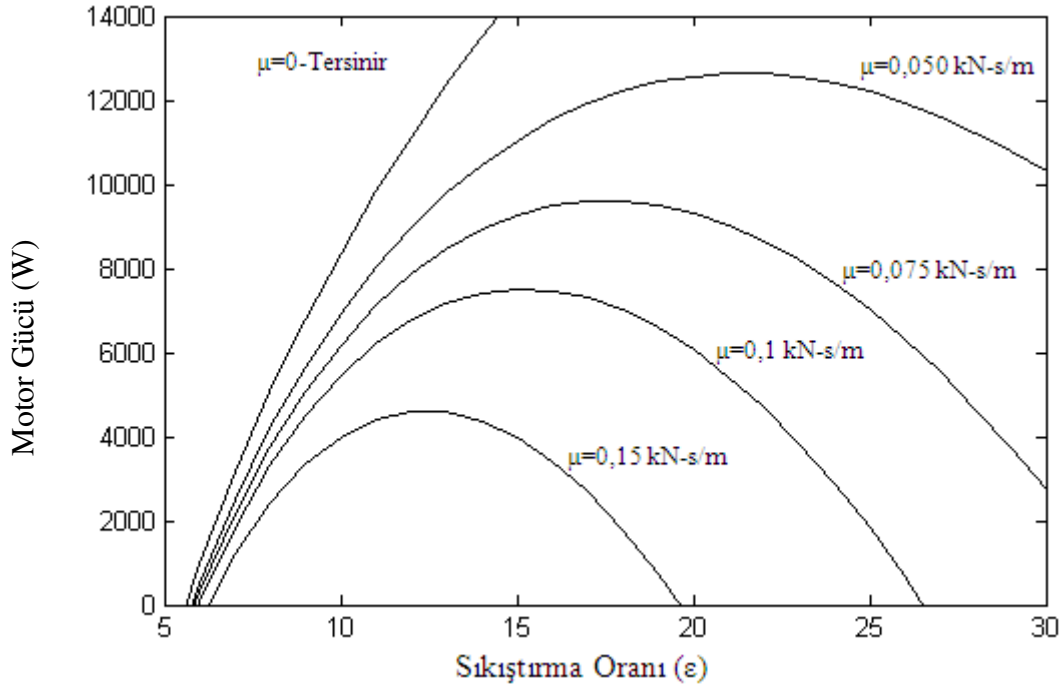
### 3.2. Analiz Sonuçları

Teorik analiz ile elde edilen ifadeler, literatürde kabulü yapılan değerler ve deney motoru verileri ile birlikte çözümlenmiştir. Çözümlemelerin sonuçları grafikler şeklinde verilmiştir. Sıkıştırma oranına bağlı olarak güç ve verim değişimleri, sürtünme katsayısının etkisi ile birlikte değerlendirilmiştir. Sürtünme katsayısının sıfır olduğu tersinir durum ile sürtünme katsayısının farklı değerler alması ile güç ve verim değişimleri grafiklerden görülmektedir.

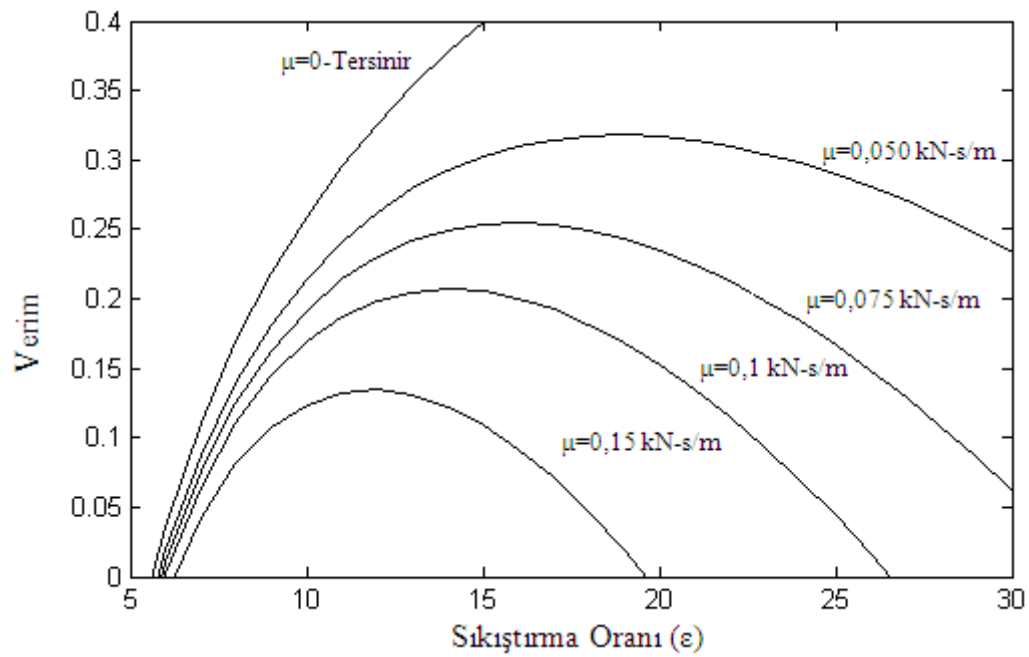
Şekil 3.2'de farklı sürtünme katsayılarında, motor gücünün sıkıştırma oranı ile değişimi verilmiştir. Tersinir yani sürtünme katsayısının sıfır olduğu durumdan maksimum olduğu duruma doğru artan sıkıştırma oranlarında motor gücü azalmaktadır. Sürtünme katsayısının artması ile motor içerisinde oluşan sürtünme gücü artmakta buna bağlı olarak da motor gücü düşmektedir. Sürtünme katsayısının artması ile çevrim tersinir halden tersinmez hale dönmektedir.

Şekil 3.3'de farklı sürtünme katsayılarında, verimin sıkıştırma oranı ile değişimi verilmiştir. Tersinir yani sürtünme katsayısının sıfır olduğu durumdan maksimum

olduğu duruma doğru verim azalmaktadır. Sürtünme katsayısının artması ile motor içerisinde oluşan sürtünmeye harcanan güç artmakta buna bağlı olarak da verim düşmektedir.



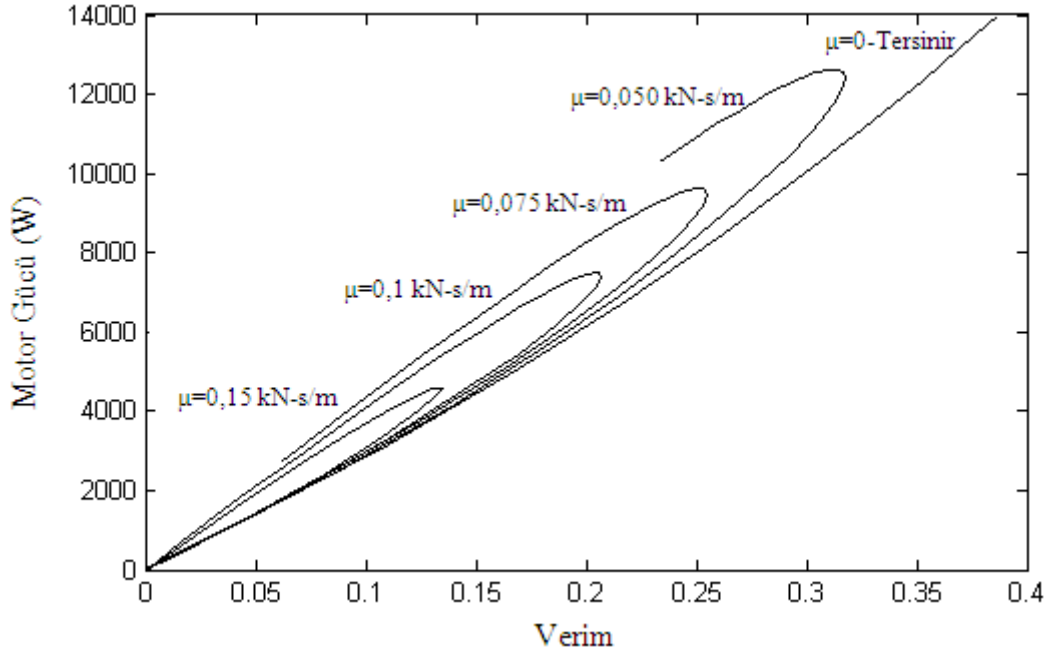
Şekil 3.2. Farklı sürtünme katsayılarında, motor gücünün sıkıştırma oranına bağlı olarak değişimi



Şekil 3.3. Farklı sürtünme katsayılarında, verimin sıkıştırma oranına bağlı olarak değişimi



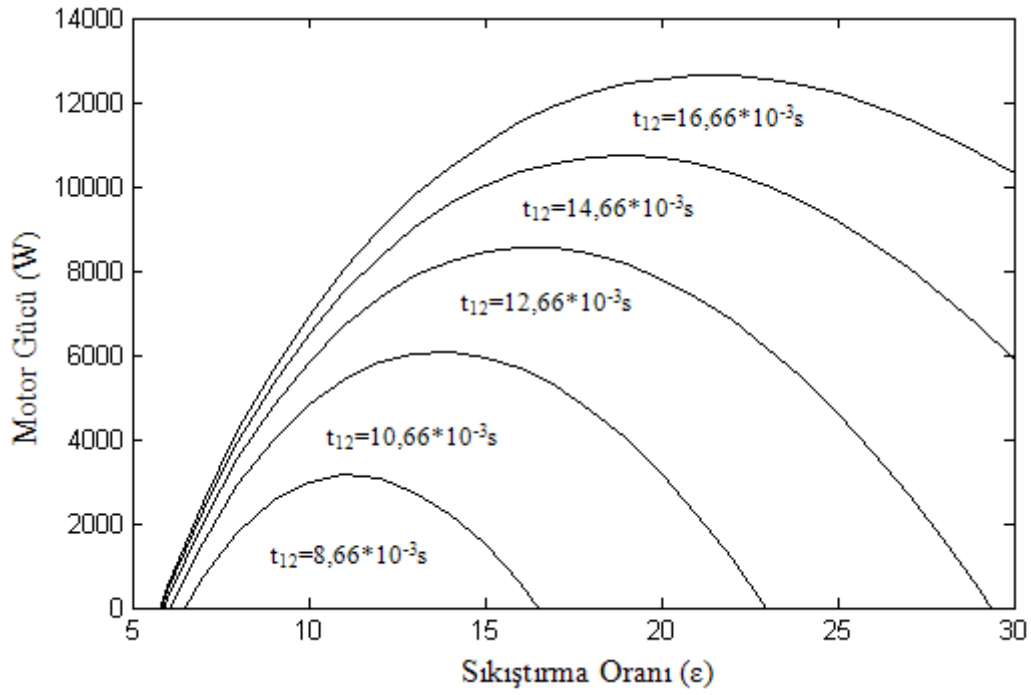
Şekil 3.4’de farklı sürtünme katsayılarında, motor gücünün verim ile değişimi verilmiştir. Sürtünme katsayısının artması ile motor gücü ve veriminde azalma olmaktadır. Motor gücü ve verimin maksimum olduğu değer sürtünme katsayısının sıfır olduğu tersinir şartlarda gerçekleşmektedir.



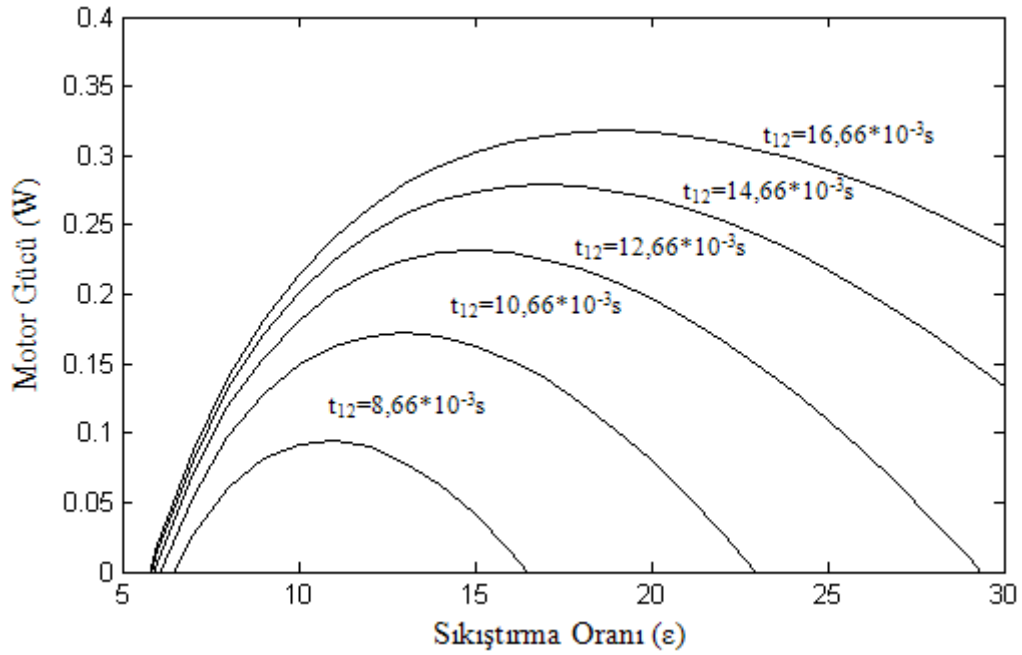
Şekil 3.4. Farklı sürtünme katsayılarında, motor gücünün verim ile değişimi

Çevrimde yapılan bir diğer analiz ise güç ve verimin zamana bağlı yani motor devrine bağlı olarak değişimlerini bulmaktır. Burada zaman parametresi  $d/d$  yerine  $s$  alınmıştır. Zamanın kısalması, gerçek motorda devrin artmasına karşılık gelmektedir. Şekil 3.5 ve 3.6’da zamana bağlı olarak tersinmez otto çevriminin güç ve termik verim değişimleri sıkıştırma oranına bağlı olarak verilmiştir.

Şekil 3.5 ve 3.6’da görüldüğü gibi, çevrim zamanı azaldıkça (devir arttıkça) güç ve verim azalmaktadır. Tersinmez güç ifadesinde sürtünmeden kaynaklanan kayıp güç değeri hızın karesi ile orantılıdır. Bu yüzden sürenin artması ile motor gücünde artış, azalması ile ise düşme olmaktadır. Hızın artması ile süre azalmakta ve güç ifadesindeki tersinmezlik parametresi olan sürtünme kayıpları hızın karesi ile orantılı şekilde artmaktadır.

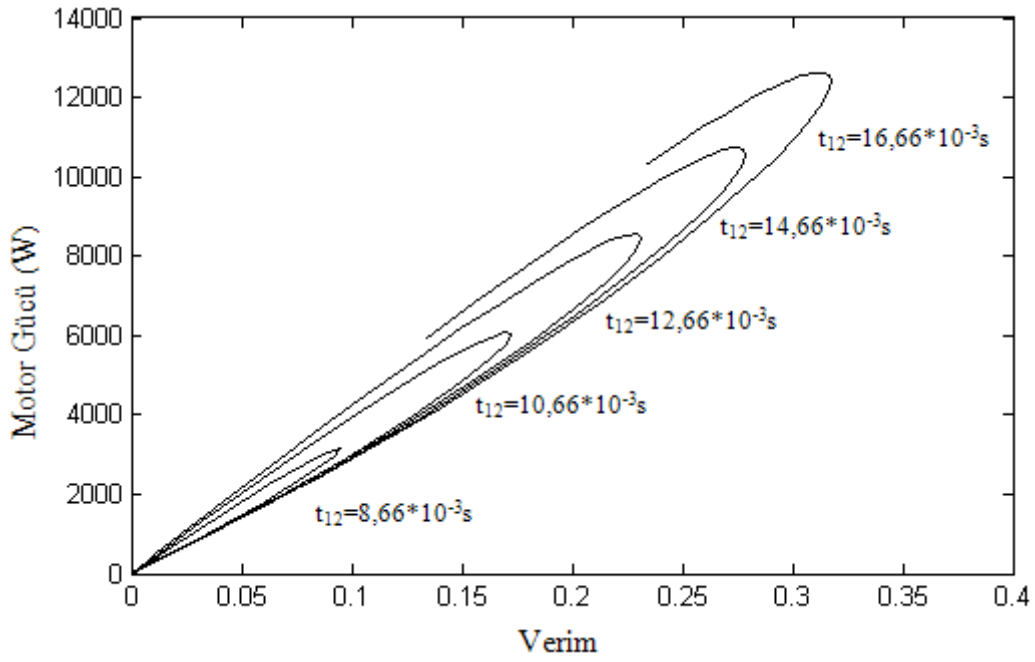


Şekil 3.5. Farklı piston hızlarında, motor gücünün sıkıştırma oranına bağlı olarak değişimi



Şekil 3.6. Farklı piston hızlarında, verimin sıkıştırma oranına bağlı olarak değişimi

Şekil 3.7’de güç ve verim ifadeleri görülmektedir. Grafikte farklı çevrim zamanları değişen sıkıştırma oranları için verilmiştir. Burada da görüldüğü gibi artan devirlerde (azalan çevrim zamanı) hem güç hemde verim azalmaktadır.



Şekil 3.7. Farklı piston hızlarında, motor gücünün verim ile değişimi

Çevrim analizi, gerçek motorlarda sürtünme katsayısı ve motor devri arttıkça motorun güç ve veriminin azalacağını göstermektedir.

## **BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

Bu çalışmanın amacı, içten yanmalı motorlarda %15'e varan mekanik kayıpların yaklaşık %50'sini oluşturan piston segmanları ile gömlek sürtünmesinin alternatif kaplama yöntemi ve kaplama malzemesi kullanılarak azaltılmasının araştırılmasıdır.

Motorlardaki sürtünme kaybının ve aşınmanın azaltılması için yapılan araştırmalar bu kayıpların en büyük kaynağı olan segmanlar üzerinde yoğunlaşmıştır. Geleneksel olarak segman yüzeylerine elektrokimyasal yöntemle krom kaplanması yaygın olarak uygulanmaktadır. Segman yüzeylerinin krom ile kaplanmasında uygulanan elektrokimyasal krom kaplama yöntemine alternatif olabilecek kaplama yöntemleri üzerinde çalışılmaktadır (Taylor, 1993).

HVOF yöntemi krom kaplamada umut verici alternatif bir yöntem olarak düşünülmektedir. Genelde HVOF kaplama yöntemi diğer plazma kaplamalara göre çalışan yüzeyler arasında yüksek adhezif ve kohezif (yapışma) dayanıma sahip yüksek yoğunluklu kaplama yöntemidir. Ayrıca HVOF yöntemi ile elde edilen yüzey kalitesi plazma kaplama yöntemlerine göre daha iyi, elektrokimyasal krom kaplama yöntemine ise eşit kalitededir (Rastegar, 1996).

HVOF kaplama yönteminde kaplama kalınlığının istenilen incelikte (50-100µm) atılabilmesi motorlarda kompresyon segmanlarına uygulanabilme özelliği de sağlamaktadır. Bu özellikte HVOF yönteminin diğer plazma kaplama yöntemlerine göre belirgin bir avantajıdır. Yapılan bir çalışmada, HVOF yöntemi ile kaplanan segmanlar elektrokimyasal yöntemle krom kaplanan segmanlara göre altı kat daha az aşınmışlardır. Aynı çalışmada maliyet analizleri yapıldığında, HVOF yönteminin üretim işlemlerine başlarken tahmin edilen maliyeti ve sonradan gelen maliyetlerin toplamı elektrokimyasal krom kaplama yönteminden az veya eşittir (Rastegar,1996).

Bu çalışmada segman kaplama yöntemi olarak, hem elektrokimyasal hem de HVOF kaplama yöntemleri kullanılmıştır. Elektrokimyasal kaplama yöntemi ile Cr kaplama ve HVOF kaplama yöntemi ile NiCrBSi ve WC+Co tozlarının kaplanması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra elde edilen numunelerin aşınma ve sürtünme performansları karşılaştırılmıştır.

Segman numune yüzeylerine aşınma testleri uygulanmadan önce çeşitli yöntemlerle karakterize edilmişlerdir. Kaplamaların mikroyapıları optik ve elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelenmiştir. Elde edilen farklı faz yapıları XRD ve noktasal EDX analizleri ile karakterize edilmiştir. Kaplama tabakalarının serlik değerleri mikro sertlik cihazında Vickers sertlik ucu kullanılarak ölçülmüştür. Ayrıca çalışma için geliştirilen aşınma cihazında sürtünme ve aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

#### **4.1. Kullanılan tozlar**

HVOF kaplamada kaplama tozları olarak, Wall Colmonoy firması tarafından üretilen Ni esaslı 62 H tozu ile bu toza %60 oranında karıştırılan %88WC-%12Co tozu karışımından oluşan kompozisyon kullanılmıştır.

Nikel esaslı ısıl püskürtme tozları ticari olarak borür, karbür ve metaller arası bileşikler içerikli olmak üzere üç grupta bulunmaktadır. Ni-Cr-B-Si esaslı olan bu alaşımlar özellikle cam, seramik, çimento ve çelik üretiminde aşınma dirençli yüzey sertleştirme malzemesi olarak kullanılmaktadır (Brangt,1995)

Nikel bazlı tozlar, aşınma dayanımı, yüksek sıcaklıklardaki korozyon dayanımından ve düşük fiyatlarından termal sprey kaplamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptirler (Mrdak,2009). NiCrBSi tozları, millerde, pompa elemanlarında ve diğer aşınma ve sürtünme performansının iyileştirilmesi gereken yerlerde iyi performans veren tozlardandır (González,2007).

Kaplamalarda kullanılan WC içerikli tozun içerisindeki %12 oranındaki Co kaplama tabakasının yapışmasını kolaylaştırmaktadır. WC-Co kaplamalarda sürtünme katsayısının azalması, kaplama içerisindeki tane boyutunun mikrondan nano boyuta

doğru azalması ve sıcaklığın 25 ile 500°C'ler arasında olması ile gerçekleşmektedir. Bu etki ile WC ayrışmaktadır. Bu ayrışma işlemi ile kaplama içerisindeki C serbest hale gelir. Böylece daha düşük sürtünme katsayısı elde edilir. WC-Co kaplamaların sürtünme davranışlarında Co matrisi başlıca rol oynar. Yüksek sıcaklıkta sürtünme katsayısının azalması Co elementinin düşük ergime sıcaklığından dolayı (1495°C) kolay okside olmasından kaynaklanmaktadır. Bu Co oksit (CoO,Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) kalıntıları ve eriyikler katı ve sıvı yağlayıcı gibi davranarak sürtünme katsayısının azalmasında rol oynarlar (Cho,2006–Cotton,1988). Yapılan deneysel çalışmalardaki sıcaklık aralıklarında WC yüzeyinin yağlayıcı bir fonksiyon içermediği ve bunun nedeninin kolayca okside olmaması ile erimemesinden kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Sürtünme çiftlerinin gerçek temas bölgesi, pürüzlülükten dolayı görülen temas bölgelerinin % 0,01'dir (Adamson,1982). Bundan dolayı temas noktaları test yükünün 10<sup>4</sup>-10<sup>5</sup> katı yüksek lokal basınç altındadır. Bunun sonucu olarak, temas noktalarındaki bu yüksek yerel basınç, nedeniyle temas yüzeyi arasında moleküler ya da atomik bağlardan dolayı yerel soğuk kaynamalar oluşur. Sürtünen WC-Co tabakalarda, aşınma mekanizması, oksidasyonlar ve başlangıçtaki adhezif aşınmada ortaya çıkan küçük Co matrislerinin abrazif aşınmaya neden olmasından dolayı değişim göstermektedir. Sürtünme katsayısının artması kaplama yüzeyinde sıcaklık artışı ile gerçekleşmektedir (Cho,2006-Adamson,1982).

Çalışmada kullanılan tozların kimyasal bileşimi, tane boyutu ve diğer zellikleri Tablo 4.1' de verilmiştir.

Tablo 4.1 Kullanılan tozların kimyasal bileşimleri ve bazı fiziksel özellikleri (Colmonoy,2011)

Kaplama tozu	Colmonoy 62 H		%88WC + %12 Co	
Kimyasal bileşim (% Ağırlık)	Ni	73,25	WC	88
	Cr	14,3	Co	12
	Fe	4		
	B	3		
	Si	4,25		
	C	0,7		
Sertlik (HRC)	45-50		55-60	
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	8,09		7,98	
Ergime Sıcaklığı (oC)	1025		1050	
Tane boyutu (µm)	53-20		15-45	

## 4.2. Altlık malzemeler

Bu bölümde kaplamaların uygulandığı segman ve aşınma çifti olarak kullanılan gömlek numunelerinin spektral analizleri ve diğer özellikleri verilmiştir.

### 4.2.1. Segman

Altlık malzeme olarak 98 mm çapında ve 3 mm genişliğinde üzerine kaplama uygulanmış dökme demir segman numuneleri kullanılmıştır. Kullanılan altlık malzemenin kimyasal analizi Tablo 4.2' de verilmiştir. Ayrıca segman numunelerinin grafit yapısı, grafit tipi ve sertlik gibi diğer malzeme özellikleri Tablo 4.3' de verilmiştir.

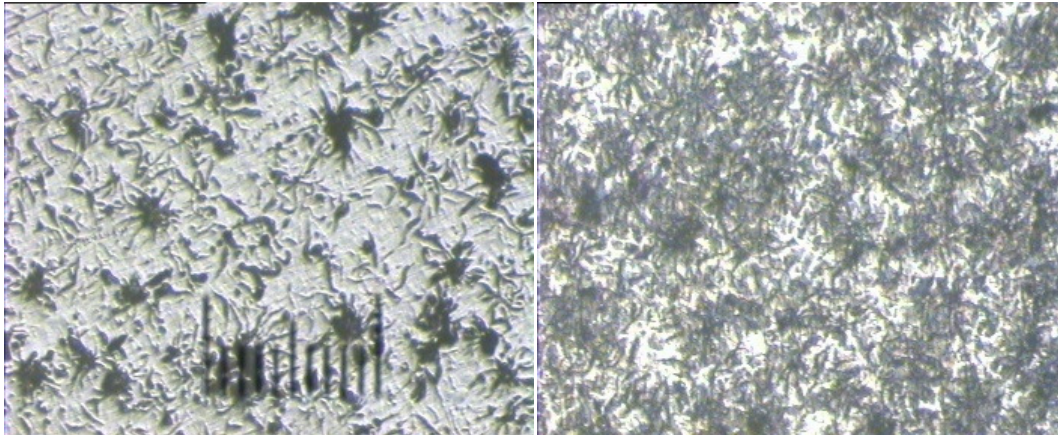
Tablo 4.2 Altlık malzeme olarak kullanılan dökme demir segmanın kimyasal bileşimi

Segman	Kimyasal Bileşim							
	C	Cu	S	Mn	Si	Ni	P	Fe
GG 20-30	3,62	0,117	0,043	0,416	2,4	< 1	< 0,3	Kalan

Tablo 4.3 Segman Numunelerinin malzeme özellikleri

Büyükükler	Değerler
Mikro yapı	Lamel grafit
Grafit tipi	AB
Ana doku	Perlitik
Tane boyutu	5
Sertlik	255-261 HB

Segman numunelerinin optik mikroskopta çekilen mikro yapıları Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekilde segman numunesinin dağlanmış ve dağlanmamış halde ki mikroyapıları görülmektedir.



Şekil 4.1. Segman numunelerinin (A) lamel yapısı ve (B) dağlanmış yapıdaki lamel yapısı (x50)

#### 4.2.2. Gömlek

Kullanılan gömlek numuneleri Yenmak A.Ş’nin üretmiş olduğu 98,45 mm çaplı yaş gömleklerden seçilmiştir. Aşınma deneylerinde segman çifti olarak kullanılan dökme demir gömlek numunelerinin kimyasal bileşimi Tablo 4.4’ de verilmiştir.

Tablo 4.4 Deneylerde segmanın çifti olarak kullanılan dökme demir gömleğin kimyasal bileşimi

Gömlek	Kimyasal Bileşim						
	C	Cu	S	Mn	Si	P	Fe
GG 20-30	3,45	0,1	0,05	0,4	2,10	0,4	Kalan

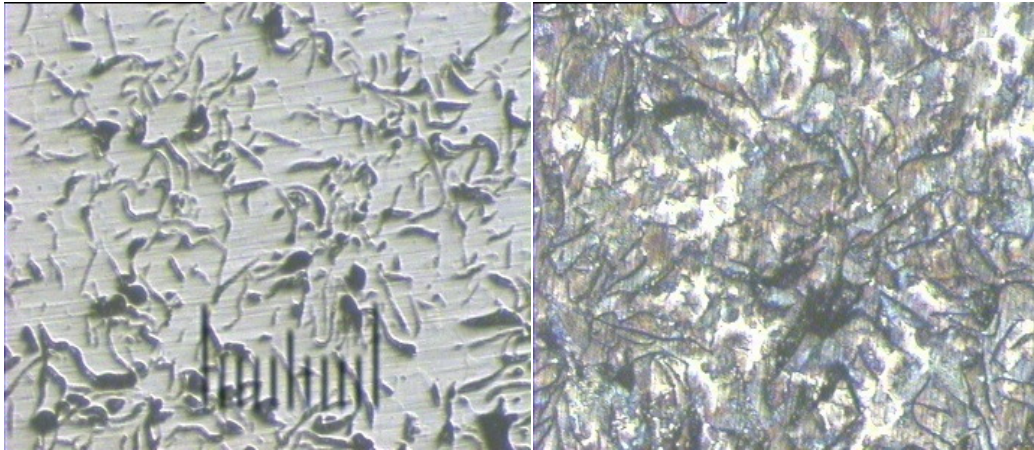


Gömlek numunelerin aşınma cihazında bağlamaya uygun hale getirilmesi için gömlek çapı azaltılmış ve bilgisayar programlı testere ile numune boyutuna küçültülmüşlerdir. Ayrıca gömlek numunelerinin malzeme özellikleri Tablo 4.5' de verilmiştir.

Tablo 4.5 Gömlek Numunelerinin malzeme özellikleri

Büyüklikler	Değerler
Mikro yapı	Lamel grafit
Grafit tipi	A
Ana doku	Perlitik
Tane boyutu	4
Sertlik	170-210 HB

Gömlek numunelerinin optik mikroskopta çekilen mikro yapıları Şekil 4.2'de verilmiştir. Şekilde gömlek numunesinin dağlanmış ve dağlanmamış haldeki mikroyapıları görülmektedir.



Şekil 4.2. Gömlek numunelerinin dağlanmış ve dağlanmamış haldeki yapısı (x50)

### 4.3. Kaplama Tabakalarının Üretimi

#### 4.3.1. Krom kaplama

Aşınma deneylerinde kullanılan krom kaplı segman numuneleri Federal Mogul Sapanca A.Ş firmasından temin edilmiştir. Kaplama işlem sırası aşağıdadır.

### 4.3.1.1. Yüzey temizleme işlemi

Elektrokimyasal krom kaplama yapılacak segmanlar kaplama öncesi temizleme ve kaplamaya hazır hale getirme işlemlerine tabi tutulmuşlardır. İlk olarak sıcak yağ alma çözeltisi için çalışma koşulları 80 °C ve 7 dakika olarak seçilmiştir. İkinci olarak elektrikli yağ alma işlemi ise iki basamaktan oluşmaktadır. Birinci basamakta katodik yağ alma 9A/dm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda ve 90 saniye sürede, ikinci basamakta anodik yağ alma 7 A/dm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda 20 saniye süre ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.6'da görülen özellikteki sıcak ve elektrikli yağ alma banyolarında temizlendikten sonra kurulanmıştır. Segmanlar daha sonra oda sıcaklığında tutulan %10 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (%10 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-saf su) çözeltisine 10 saniye süreyle daldırılmış ve saf suda yıkanarak kaplamaya hazır hale getirilmiştir.

Tablo. 4.6 Krom kaplama öncesi yüzey temizleme banyosu kimyasal özellikleri

	Banyo Bileşenleri	Birleşim Oranı (g/l)
Sıcak yağ alma banyosu	Sodyum karbonat (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	18
	Trisodyum fosfat (Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 12H <sub>2</sub> O)	10
	Sodyum hidroksit (NaOH)	50
	Sodyum Glukonat (C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> NaO <sub>7</sub> )	10
Elektrikli yağ alma banyosu	Sodyum karbonat (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	30
	Trisodyum fosfat (Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 12H <sub>2</sub> O)	22
	Sodyum hidroksit (NaOH)	40
	Sodyum Glukonat (C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> NaO <sub>7</sub> )	8

### 4.3.1.2. Kaplama işlemi

Kaplama işlemi kimyasal bileşimi 125 g/l kromik asit (CrO<sub>3</sub>) ve 1,25 g/l sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) maddelerinin saf suda çözündürülmesi ile hazırlanan kaplama banyolarında 4 saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Anot olarak % 7 oranında kalay içeren kurşun elektrot kullanılmıştır.

Tablo 4.7 Krom kaplama parametreleri

Özellikler	Değerler
Kaplama süresi(s)	4
Akım (A/dm <sup>2</sup> )	25
Kaplama hızı(ηm/s)	30
Kaplama sıcaklığı(°C)	25

### 4.3.2. HVOF kaplama

#### 4.3.2.1. Altlık malzeme yüzeyinin hazırlanması

HVOF kaplamalarda altlık malzeme ile kaplama tabakası arasındaki bağlanma çoğunlukla mekanik karakterli olduğu için, kaplama öncesi alt malzeme yüzeyinin hazırlanması, yani pürüzlendirilmesi oldukça önemlidir. Bu amaçla yağ, pas ve kirden arındırılmış alt malzeme yüzeyleri, 3,44 bar altında 30 gritlik ve keskin köşeli morfolojiye sahip Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcı malzeme ile pürüzlendirilmiştir.

#### 4.3.2.2. Kaplama işlemi

Kaplamalar Senkron Metal kaplama A.Ş' de METCO 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 sprey parametreleri esas alınarak uygulanmıştır. Parametreler Tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.8 HVOF kaplama parametreleri

Parametreler	Değerler	
	NiCrBSi	% 60 WC
Kaplama tozları	NiCrBSi	% 60 WC
Oksijen Basıncı (bar)	10,8	10,7
Yakıt Basıncı (bar)	7,5	7,3
Yanma Basıncı (bar)	7,1	7,0
Toz disk devri (d/d)	200	250
Sprey mesafesi (mm)	300	300
Yakıt	Kerosen	Kerosen

#### 4.4. 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'lik alümina pasta ile parlatılmıştır. Hazırlanan numunelerin mikroyapı incelemeleri NIKON ECLIPSE L150 marka optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Kaplama tabakalarının kalınlık ölçümleri ve porozite değerleri de aynı cihazda ölçülmüştür.

#### 4.5. X-Işınları Difraksiyon Analizi

Yapılan kaplama işlemlerinde elde edilen tabakalarda fazların tespiti için RİGAKU D MAX 2200 PC marka x-ışınları difraktometresi kullanılmıştır. Analiz sırasında  $CuK_{\alpha}$  ( $\lambda = 1,54059 \text{ \AA}$ ) ışın demetleri kullanılarak oluşan bileşiklerin tespitinde ASTM kartlarından yararlanılmıştır.

#### **4.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Elementel Analiz İncelemeleri (EDX)**

Elektrokimyasal ve HVOF kaplama tabakalarında oluşan farklı morfolojideki yapıların incelenmesinde JOEL JSM-6060LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Tabakalarda oluşan farklı fazlardan noktasal EDX analizleri yapılarak elementel değişimler tespit edilmiştir.

#### **4.7. Mikro Sertlik Ölçümleri**

Elektrokimyasal krom kaplama ve HVOF kaplama yöntemiyle üretilen kaplama tabakalarının sertlik ölçümleri, metalografik olarak hazırlandıktan sonra FUTURE TECH. FM 700 marka mikrosertlik cihazında Vickers sertlik ucu kullanılarak 100g yük altında, 10 s süre ile gerçekleştirilmiştir. Sertlik değerleri 5 ayrı ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

#### **4.8. Taguchi Metodu ve Deney Tasarımı**

Dr. Genichi Taguchi kaliteyi geliştirmek için temeli deney tasarımına dayanan, Taguchi yöntemi olarak bilinen deney tasarım metodunu geliştirmiştir. Bu yöntem, kısmi faktöriyel deney tasarımı yöntemine, sağlam tasarım ve ortogonal dizinler gibi kavramların dâhil edilmesiyle oluşturulmuştur.

Taguchi deneysel metodu ürün ve üretim performanslarını geliştirmek için kullanılır. Bu metod, sisteme etki eden parametrelerin saptanması, etkinlik derecelerinin belirlenmesi ve sisteme ait faktörlerin etkileşim durumlarını belirlemeye yönelik olarak sistem optimizasyonlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Taguchi yönteminin asıl amacı; hedef değer etrafındaki değişkenliği azaltmaktır. Bunu sağlamak için, bu değişkenliğe sebep olan kontrol edilebilir faktörler tanımlanmalı ve kontrol edilemeyen faktörlerin etkisinin en az olacağı ürün ve proses geliştirme süreci tasarlanmalıdır (Canıyılmaz,2001).

#### 4.8.1. Ortogonal diziler

Deneysel çalışmalarda çok sayıda faktörler ve seviyeler bulunduğundan deneylerin gerçekleştirilmesi çok fazla maliyet ve zaman kaybına neden olmaktadır. Taguchi yöntemi ise bir tür kesirli faktöriyel tasarımıdır. Taguchi deneysel tasarım metodunda, deneysel durumlar ortogonal diziler oluşturularak ifade edilir. Deneylerin tüm kombinasyonlarının yapılması yerine ortogonal diziler kullanılarak sadece belirlenen bir kısmının yapılmasıyla, en iyi performans karakteristiği değerini veren faktör seviyeleri belirlenir. Ortogonal diziler, faktöriyel tasarımından farklı olarak faktör seviyelerini tek tek değiştirmek yerine eş zamanlı olarak değiştirme imkânı sunarak deney sayısını belirgin oranda azaltır (Canıyılmaz,2001).

Örneğin 3 seviyeli 5 faktörlü oluşturulan bir deneyde kombinasyonlar kullanıldığında  $5^3 = 625$  tane deney yapılması gerekli iken geliştirilen ortogonal tablolarla bu sayı 36'ya düşmektedir. Buna ek olarak geliştirilen ortogonal serilerde karşılıklı etkileşimlerde ifade edilebilmektedir.

Taguchi deneysel metodu için geliştirilen bu ortogonal dizilerde genellikle faktörler, 2, 3 ve 4 seviyeli olmaktadır. Ancak bu faktör seviyeleri bir takım metotlar ile artırılabilir. Deneysel çalışmalarda en çok  $L_4$ ,  $L_8$ ,  $L_{16}$ ,  $L_9$ ,  $L_{18}$  ve  $L_{27}$  ortogonal dizileri kullanılmaktadır. Tablo 4.9'da  $L_{27}$  ortogonal dizisi görülmektedir (Ross,1988).

Tablo 4.9. Ortogonal dizi  $L_{27} (3^{13})$

A	B	C	D
1	1	1	1
1	1	1	1
1	1	1	1
1	2	2	2
1	2	2	2
1	2	2	2
1	3	3	3
1	3	3	3
1	3	3	3
2	1	2	3
2	1	2	3

Tablo 4.10.(Devamı) Ortogonal dizi  $L_{27}(3^{13})$ 

2	1	2	3
2	2	3	1
2	2	3	1
2	2	3	1
2	3	1	2
2	3	1	2
2	3	1	2
3	1	3	2
3	1	3	2
3	1	3	2
3	2	1	3
3	2	1	3
3	2	1	3
3	3	2	1
3	3	2	1
3	3	2	1

#### 4.8.2. Sinyal / Gürültü (S/N) oranı

Taguchi, kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktörlerin performans karakteristiği üzerindeki etkisini ölçmek için ortalama ve standart sapma ile birlikte kullandığı performans istatistiklerinden bir tanesi de S/N (Sinyal/Gürültü) olarak adlandırılan performans istatistiğidir. Taguchi deneysel metodunda kalite karakteristiğini ifade eden sinyal/gürültü oranı bir performans ölçütü olarak düşünülmektedir ve kayıp fonksiyonu ile ilgilidir. Örneğin deneysel durum için alınan 5 adet sürtünme kaybı tek bir S/N oranı ile ifade edilebilmektedir (İdiz,1999). S/N oranı çok sayıda tekrarı tek bir değerde toplamaktadır. Taguchi, uygulamadaki problemleri, hedefin türüne göre üçe ayırmış ve her biri için farklı bir sinyal/gürültü oranı tanımlamıştır (Ross,1988-Lochner,1990).

Performans karakteristiğinin, en küçük en iyi (Smaller the better), en yüksek en iyi (Larger the better) ve Nominal en iyisi (Nominal the best) durumlarının sinyal/gürültü oranları Tablo 4.10'da verilmiştir. Taguchi deneysel tasarımında daha güvenilir değerlerin alınabilmesi için güçlü bir kalite ölçütü olan S/N oranlarının kullanılması önerilmektedir (Ross,1988).

Tablo 4.10. Taguchi metodunun Sinyal/Gürültü (S/N) oranları

Durum	Formül
En düşük – en iyi olduğu durumda;	$\frac{S}{N} = -10 \log \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n yi^2 \right\}$
En yüksek - en iyi olduğu durumda;	$\frac{S}{N} = -10 \log \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{yi^2} \right\}$
Nominal – en iyi olduğu durumda;	$\frac{S}{N} = -10 \log \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y^{-2}}{s^2} \right\}$

### 4.8.3. Etkileşimlerin incelenmesi

DeneySEL tasarımlarda yer alan faktörlerin karşılıklı etkileşimleri, Taguchi metodunda etkileşim durumlarını ifade etmektedir. Bu faktörlerin etkileşimleri örneğin AxB şeklinde ifade edilir. Bu ifade, A ve B faktörlerinin etkileşim durumlarını ifade eder. Her iki faktörün de yer alması durumunda sistem üzerinde etkiye sahip olması durumu olarak ifade edilmektedir. Taguchi deneySEL tasarımında karşılıklı etkileşimin belirlenebilmesi için ortogonal seri üzerinde bir karşılıklı etkileşim sütunu tanımlanması ve hesaplara dâhil edilmesi gereklidir (Ross,1988).

### 4.8.4. Varyans analizi

Varyans analizi, test edilen parçaların ortalama performansları arasındaki farklılığı ortaya koymak için kullanılan istatistiksel bir metottur. DeneySEL çalışmalarda sisteme etki eden faktörlerin tespit edilmesi ve sistem üzerine olumsuz etkiye sahip faktörlerin, olumsuz etkilerinin azaltılmasına çalışılır.

Taguchi metodunda, faktörlerin etkinlik ve etkinlik dereceleri belirlenerek deneySEL verilerin yorumlanması varyans (ANOVA) analizi metodu ile yapılmaktadır. Varyans analizi, toplam değişkenliği bileşenlerine ayıran matematiksel bir tekniktir. Varyans analizi, serbestlik derecesi, kareler toplamı ve varyans gibi değerlerin hesaplanmasıyla bulunur (Canıyılmaz,2001-İdiz,1999).



A ve B gibi iki faktör ve bunların aralarında etkileşimlerin söz konusu olduğu durumlarda varyans analizi yapılırken kullanılan hesaplamalar aşağıdaki gibidir.

#### 4.8.4.1. Kareler toplamı

A ve B faktörleri ve A x B etkileşimleri dikkate alınarak toplam varyasyon denklemi;

$$SST = SS_A + SS_B + SS_{AXB} + SS_e \quad (4.13)$$

$$SST = \left[ \sum_{i=1}^N y_i^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (4.14)$$

A faktörü için varyans denklemi;

$$SS_A = \left[ \sum_{i=1}^{k_A} \left( \frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad (4.15)$$

AxB etkileşimi için varyans denklemi;

$$SS_{AxB} = \left[ \sum_{i=1}^C \frac{(AxB)_i^2}{n_{AxB_i}} \right] - \frac{T^2}{N} - SS_A - SS_B \quad (4.16)$$

Varyans analizi (ANOVA) tablosunda yer alan hata varyasyonu denklemi;

$$SS_e = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AxB} \quad (4.17)$$

Burada;

SST : Genel kareler toplamı

SS<sub>A</sub> : A faktörüne ait kareler toplamı

SS<sub>B</sub> : B faktörüne ait kareler toplamı

SS<sub>AXB</sub> : A ve B faktörlerinin etkileşim faktörüne ait kareler toplamı

SS<sub>e</sub> : Hata kareler toplamı

N : Gözlemlerin toplam sayısı

y<sub>i</sub> : i. Gözlem degeri

T : Tüm gözlemlerin toplamı

- $k_A$  : A faktörünün seviye sayısı  
 $A_i$  :  $A_i$  seviyesindeki gözlemlerin toplamı  
 $n_{A_i}$  :  $A_i$  seviyesi altındaki gözlem sayısı  
 $c$  : Etkileşim faktörlerinin kombinasyon sayısı  
 $(A \times B)_i$  : A ve B faktörlerinin  $i$ . koşulu altındaki verilerin toplamı

#### 4.8.4.2. Serbestlik derecesi

Varyans analizi (ANOVA) hesaplarının yapılmasında gerekli olan bir diğer nicelik serbestlik derecesidir. Serbestlik derecesi, bir sonuca ulaşabilmek için yapılması gereken bağımsız karşılaştırmaların sayısıdır (Bayrak 1996). Toplam serbestlik derecesi seviye sayısının bir eksiğine eşittir;

$$v_T = N - 1 \quad (4.18)$$

$v_T$  = Toplam serbestlik derecesi

Faktör seviyelerinin bir eksiği olan A ve B faktörünün serbestlik dereceleri;

$$v_A = k_A - 1 \quad (4.19)$$

$$v_B = k_B - 1 \quad (4.20)$$

Burada;

$v_A$  : A faktörünün serbestlik derecesi

$v_B$  : B faktörünün serbestlik derecesi

$k_A$  : B faktörünün seviye sayısı

Etkileşimlerin serbestlik dereceleri iki faktörün serbestlik derecelerinin çarpımına eşittir;

$$v_{A \times B} = (v_A)(v_B) \quad (4.21)$$

Hata serbestlik derecesi, toplam serbestlik derecesinden faktörlerin serbestlik derecelerinin çıkarılması ile bulunur;

$$v_c = v_T - v_A - v_B - v_{AxB} \quad (4.22)$$

#### 4.8.4.3. Varyans

Varyans analizi (ANOVA) tablosundan hesaplanan diğer bir tanımlayıcı istatistik varyanstır. Faktör varyansları, faktör kareler toplamının faktörün serbestlik derecesine bölümü ile bulunur.

$$V_e = \frac{SS_e}{v_e} \quad (4.23)$$

Her bir faktörün ise varyans değeri, faktörün varyasyonunun serbestlik derecesine bölünmesi ile bulunur. A faktörüne ait varyans formülü;

$$V_A = \frac{SS_A}{v_A} \quad (4.24)$$

#### 4.8.4.4. F testi

Varyans analizi (ANOVA) tablolarında faktörlerin önemli bir etkiye sahip olduğunu görmek için F testi uygulanır. F testi, faktörün varyansının hata varyansına bölünmesi ile bulunur. Standart F testi uygulamalarında hataların eşit sapmalarla normal dağıldığı ve bağımsız olduğu varsayılmaktadır. A faktörüne ait F testi formülü;

$$F_A = \frac{V_A}{V_e} \quad (4.25)$$

Varyans analizi (ANOVA) tablosunda bulunan değerlerin yorumları yapılırken bazı karşılaştırmalar yapılmalıdır. Her bir faktör için hesaplanan F testi değerleri F tablo değerleri ile karşılaştırılmaktadır. Hesaplanan F-testi değeri F-tablo değerinden büyük ise faktör proses ve ürün üzerinde etkiye sahip, eğer F-testi değeri F-tablo

değerinden küçük ise faktörün proses ve ürün üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı anlaşılır. Tablolardaki F-tablo değerleri, faktörün serbestlik derecesi ile hatanın serbestlik derecesinin kesiştiği yerdeki değerlerdir (Ross,1988).

Varyans analizi (ANOVA) tablolarında etkinliği çok düşük olan faktörler hata olarak kabul edilir. Bu şekilde hata yapılan faktörün varyasyonu ve hata varyasyonu iptal edilerek değerlendirme tekrar yapılır (Ross,1988-İdiz,1999).

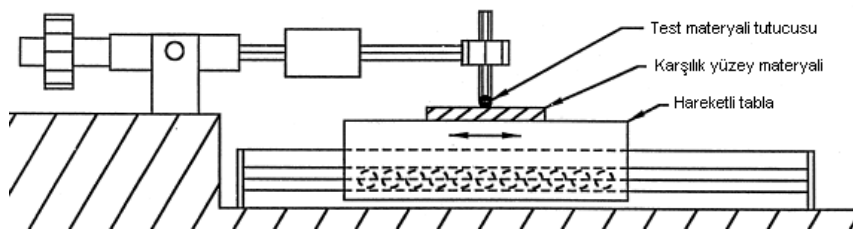
#### 4.8.4.5. Doğrulama deneyleri

Taguchi metodunda doğrulama deneyleri sistemi tamamlayan bir faktördür. Belirlenen optimum şartlar dikkate alınarak tahmini ortalama kalite karakteristiği değerleri ve güven aralığı belirlenir. Doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen değerler beklenen güven aralığının içinde ise bulunan faktör-seviye kombinasyonu en iyi performans karakteristiği değerini veren kombinasyon olur. Yani deneyin doğru olduğunu gösterir. Doğrulama deneyi sonuçlarının güven aralığının altında veya üstünde kalması durumunda, deneysel tasarımda hata yapıldığı ve deneyin tekrar gözden geçirilerek hatanın düzeltilmesi gerekir (İdiz,1999).

#### 4.9. Aşınma Deneyleri

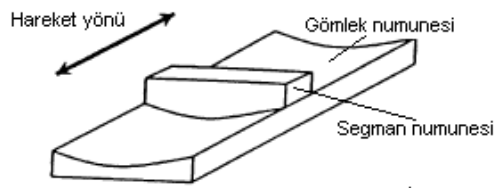
##### 4.9.1 Aşınma cihazı özellikleri

Aşınma deneyleri, gömlek ve segman numunesinin bağlanabildiği “karşılıklı tip aşınma” cihazında yapılmıştır. Kullanılan cihaz ASTM G-133 standardına uygundur. Standarda uygun cihazın şematik şekli Şekil 4.3’de görülmektedir.



Şekil 4.3. Karşılıklı aşınma cihazı şematik görünümü (Blau,1999)

Karşılıklı aşınma materyalleri olarak segman numunesi ile gömlek numunesi cihaz boyutunu küçültülerek kullanılmıştır. Segman numunesinin boyutu tam segman çapının yarısı olan 45 mm genişliği ise segmanın orijinal boyutu olan 3 mm' dir. Gömlek numuneleri ise cihaza ve aşınma deneylerinden sonra hassas terazi kapasitesine uygun olması için boyu 120 mm ve kalınlığı 5 mm' dir. Şekil 4.4'de segman, gömlek numunesi ve hareket yönü şematik olarak gösterilmiştir.



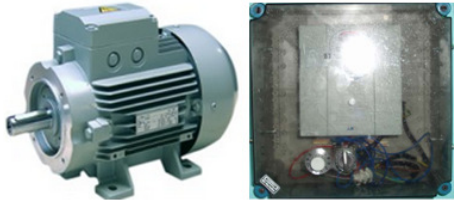
Şekil 4.4. Segman, gömlek numunesi ve hareket yönünün şematik görünümü (Wang,2001)

Aşınma cihazının üzerinde bulunan kuvvet sensörü, dengeleme ağırlığı, yük tutucu, yataklar, krank mekanizması ve segman tutucu Şekil 4.5'de şematik şekilde gösterilmiştir.



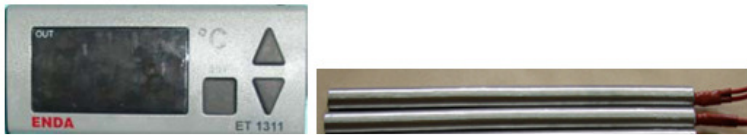
Şekil 4.5. Aşınma cihazı ve şematik görünümü

Aşınma cihazında 1,5 kW' lık üç fazlı DC motor kullanılmıştır. Maksimum devri 2200 dev/dak' dır. DC motorun hız ayarlamasında, 2 faz girişli, üç faz çıkışlı, 1 ile 60 Hz aralığında frekansı ayarlanabilen LG marka sürücü kullanılmıştır. Şekil 4.6'da DC motor ve invertör görülmektedir.



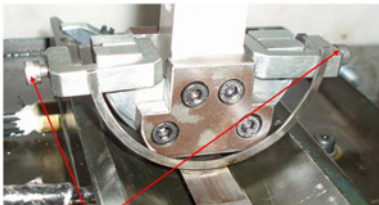
Şekil 4.6. DC motor ve invertör

Gömlek numunesinin bağlandığı yatağı ısıtmak için, 20 W gücünde 3 adet fişek ısıtıcı ve sıcaklığı istenilen değerde tutmak amacıyla da devre kesicili Enda marka sıcaklık kontrol ünitesi kullanılmıştır. Şekil 4.7’de ısı kontrol ünitesi ve fişek ısıtıcılar görülmektedir.



Şekil 4.7. Isı kontrol ünitesi ve fişek ısıtıcılar

Segman numunelerinin üzerlerine uygulanan normal kuvveti gerektiği gibi alttaki gömlek numunesine iletebilmeleri için uygun bir segman tutucuya ihtiyaç vardır. Segman numunelerinin, gömlek numuneleri üzerindeki temas genişliğini ayarlamak için tutucu üzerinde her iki taraftan segmanın çapını değiştiren iki ayar vidası kullanılmıştır. Bu ayar vidalarıyla, segman numunelerinin çapını kırmak veya açmak suretiyle istenilen temas genişliği sağlanmaktadır. Şekil 4.8’de segman tutucu ve ayar vidaları görülmektedir.



Segman ayar vidası

Şekil 4.8. Segman tutucu

Aşınma deneylerinde, gömlek numunelerinin üzerine 10W40 yağ damlatılmıştır. Yağ miktarının belirlenmesinde hacimsel ayarlı damlatma düzeneği kullanılmıştır.

Deneyleerde Petrol Ofisi firması tarafından üretilen 10W40 model yağ kullanılmıştır. Tablo 4.11’de deneyleerde kullanılan yağ özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.11. Deneyleerde kullanılan yağın özellikleri (PO,2011)

Özellikler		Değerler
SAE Viskozite sınıfı		10W-40
Yoğunluk, 15C kg/l	ASTM 4052	0,873
Parlama noktası, °C	ASTM D92	226
Kinematik Viskozite		
40 °C mm/s	ASTM D445	91,2
100 °C mm/s		13,8
Viskozite İndeksi	ASTM D 2270	154
Akma Noktası, °C	ASTM D97	-33

#### 4.9.2. Hassas terazi

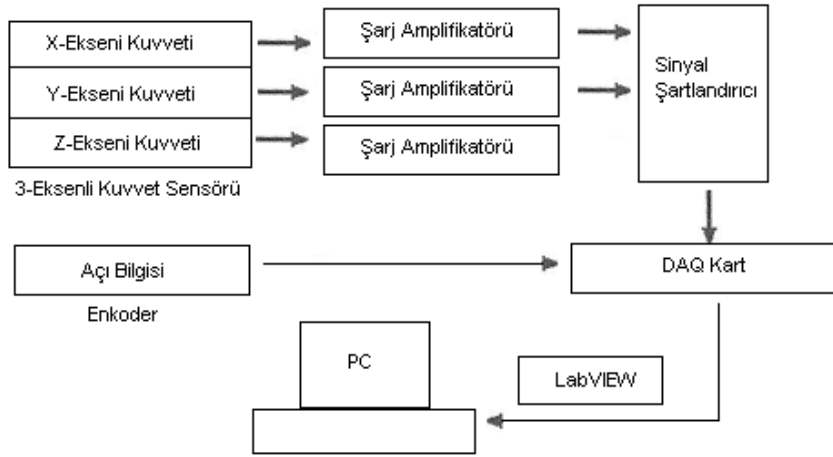
Deneyleerde aşınma miktarı ağırlık kaybı esasına göre belirlenmiştir. Deneyleere başlamadan önce segman ve gömlek numunesi etanol ile temizlenmiştir. Temizleme işleminden sonra numunelerde etanolün kalmaması için kurutulma işlemi sağlandıktan sonra deney öncesi hassas terazide,  $10^{-4}$  g hassasiyetinde ölçüm yapılmıştır. Ölçülen değerlerin farkları alınmak suretiyle segman ve gömlekteki aşınma miktarları belirlenmiştir. Deneyleerde kullanılan AND marka hassas terazi Şekil 4.8’de görülmektedir. Hassas terazi otomatik kalibrasyon özelliğine sahip ve her ölçümden önce kalibrasyon yapılmıştır.



Şekil 4.9. Hassas terazi

### 4.9.3. Veri Aktarma Sistemi

Bilgisayarların sunmuş oldukları avantajlardan faydalanılarak oluşturulan veri toplama ve işleme sistemi, farklı donanımlarından meydana gelir. Bu ayrı donanımları uygun bir çalışma sistemine göre işlevsel hale sokmak gerekir. Şekil 4.'de gösterildiği gibi, bir veri toplama ve işleme sisteminin temel elemanları, algılayıcılar ve transdüserler, alan kablolama, sinyal şartlandırma, veri toplama donanımı, bilgisayar ve veri toplama yazılımı olarak meydana gelmektedir (Park 2003). Deneylerde kullanılan veri aktarma sisteminin elemanları ve veri aktarma sisteminin akışı Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Kullanılan veri toplama sisteminin elemanları

#### 4.9.3.1. Üç eksenli kuvvet sensörü

Sürtünme kuvvetinin ölçümünde, PCB firması tarafından üretilen üç eksenli 260A11 modeli kuvvet sensörü kullanılmıştır. Bu tip sensörler, kuvars kuvvet sensörleri olarak adlandırılmaktadır. Bu sensör, kayma kuvveti, sürtünme kuvveti, basma, çekme gerilmeleri, darbe, tepki ve etki kuvvetlerini ölçebilmektedir. Bu tip sensörlerin bazı özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Çelikle kıyaslanabilecek kadar yüksek rijitlik.
- Yüksek voltaj-düşük empedanslı çıkış.
- Yüksek hızlı, frekans cevap özelliği.
- Küçük boyutlarda büyük kuvvet sinyallerini algılama özelliği.



- Büyük statik yükler üzerindeki küçük kuvvet dalgalanmalarını ölçme yeteneği.
- Sanki-statik cevap sayesinde statik kalibrasyon yapılabilir ve sabit ısıl şartlar altında sanki-statik ölçümler yapılabilir.
- Rijit konstrüksiyonu sayesinde dayanıklı ve uzun ömürlüdür.
- Çok iyi doğrusallık, sabitlik ve tekrarlanabilirlik (E3tam,2011).

Şekil 4.11’de kullanılan sensör görülmektedir. Sensörün özellikleri Tablo 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Üç eksenli kuvvet sensörü (PCB,2011)

Tablo 4.12. Kuvvet sensörü özellikleri (PCB,2011)

Özellikler	Değerler
Z eksenli hassasiyeti (pC/N)	3,37
X ve Y eksenleri hassasiyetleri (pC/N)	7,19
Z eksenli maksimum ölçüm değeri (kN)	4,45
X ve Y eksenleri maksimum ölçüm değeri (kN)	2,22
Z eksenli maksimum kuvvet(kN)	5,87
X ve Y eksenleri maksimum kuvvetleri(kN)	2,94
Z eksenli maksimum moment (Nm)	18,98
X ve Y eksenleri maksimum moment (Nm)	17,63
Üst frekans limiti (kHz)	90
Sıcaklık limitleri (°C)	-73 +177

#### 4.9.3.2. Şarj amplifikatörü

Kuvvet sensörü sinyali, bir DAQ kartın veya bir ölçme sisteminin istenen sinyali doğru bir biçimde elde edebilmesinden önce, şartlandırılmalıdır. Sensörün ürettiği elektrik yükleri şarj amplifikatörü tarafından mV mertebesine dönüştürülür. Kullanılan şarj amplifikatörü, PCB firması tarafından üretilmiş kablo hattına bağlanan 422E04 modelidir. Şarj amplifikatörü Şekil 4.12’de görülmektedir. Şarj amplifikatörleri X, Y ve Z eksenleri için birer tane kullanılmıştır. Şarj amplifikatörünün özellikleri Tablo 4.13’de verilmiştir.



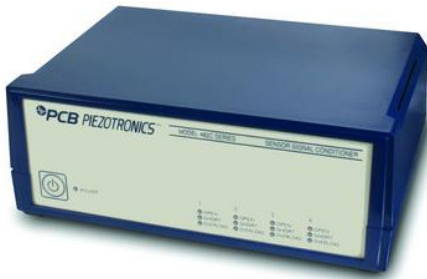
Şekil 4.12. Şarj amplifikatörü (PCB,2011)

Tablo 4.13. Şarj amplifikatörü özellikleri (PCB,2011)

Özellikler	Değerler
Hassasiyet ( $\pm\%2$ )	0,1 mV/ pC
Üstlimit	3 V
Düşük frekans tepkisi (%-5)	0,5 Hz
Yüksek frekans tepkisi (2,2 mA)	5 kHz
Yüksek frekans tepkisi (4 mA)	15 kHz
Yüksek frekans tepkisi (4 mA)	100 kHz
Sıcaklık limitleri ( °C)	-54 +121

#### 4.9.3.3. Sinyal şartlandırıcı

Sinyal yükseltme işlemi, sinyal şartlandırma cihazı tarafından gerçekleştirilir. Bu işlem yapılırken hem sinyal ölçümünün çözünürlüğü artırılır hem de sinyal/gürültü oranı yükseltilir. Sinyal çözünürlüğünün artırılması, mV mertebesindeki çok küçük bir gerilim değerinin V mertebesine yükseltilmesidir. Kullanılan sinyal şartlandırıcı, PCB firması tarafından üretilmiş 4 kanallı 482C05 modelidir. Sinyal şartlandırıcı Şekil 4.13’de görülmektedir. Sinyal şartlandırıcı da X, Y ve Z eksenleri için birer tane giriş ve çıkış noktası bulunmaktadır. Sinyal şartlandırıcının özellikleri Tablo 4.14’de verilmiştir.



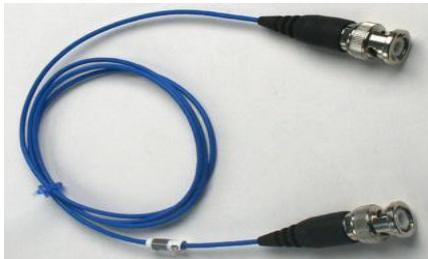
Şekil 4.13. Sinyal şartlandırıcı (PCB,2011)

Tablo 4.14. Sinyal şartlandırıcı özellikleri (PCB,2011)

Özellikler	Değerler
Kanal sayısı	4
Sensör giriş tipi	ICP
Düşük frekans tepkisi (%-5), Hz	<0,1 Hz
Yüksek frekans tepkisi (%-5),Hz	>100 kHz
Sıcaklık limitleri, °C	0 +50
Besleme (Adaptörlü)	AC
Besleme (Direkt)	DC

#### 4.9.3.4. BNC kablolar

BNC (Bayonet Neill Concelman) tip bağlantı elektronik ekipmanların bağlantılarında kullanılmaktadır. Yaygın olarak RF tip koaksiyel soketli bağlantı tercih edilmektedir. Kuvvet sensörü X,Y ve Z eksenlerinin çıkışlarından şarj amplifikatörüne olan bağlantı ve şarj amplifikatöründen X,Y ve Z eksenlerinin sinyal şartlandırıcıya olan bağlantıları düşük gürültü eşliğine sahip, dışı yalıtımlı PCB firması tarafından üretilen BNC tip kablolar ile yapılmıştır. Şekil 4.14’de BNC tip kablo ve koaksiyel soketler görülmektedir.



Şekil 4.14. BNC kablo ve koaksiyel soketleri (PCB,2011)

#### 4.9.3.5. DAQ kart

DAQ donanımları, bilgisayar ile deney sırasında oluşan fiziksel olayların birbiri ile bağlantısını sağlayan yardımcı ekipmanlardır. Gelen analog sinyalleri bilgisayarın anlayabileceği dijital sinyallere çevirirler ve dijital sinyalleri zamana bağlı olarak ölçüp aktarabilirler. Günümüzde gelişen bilgisayar ve DAQ sistemleri USB portundan haberleşebilmektedirler. Veri toplama işlemi, test ve ölçümün ilk aşamasıdır. Bu veriler, basınç, kuvvet, açı gibi gerçek şartlarda oluşan fiziksel

büyüküklerin ölçülmesi ve incelenmesi anlamı taşımaktadır. Ölçüm ortamında elde edilen analog işaretlerin sayısallaştırılması (analog to digital conversion - ADC) gerekir. Günümüzde bu işlemin kolay, etkin ve esnek şekli bilgisayar ortamında yapılmaktadır. Uygulamaya bağlı olarak, farklı PC tabanlı DAQ türleri vardır. Bunlar; Analog Giriş/Çıkış ve Dijital Giriş/Çıkış olarak sınıflandırılabilir.

Deneyler sırasında ölçülen tüm sinyaller aynı anda toplanmıştır. Bu veri toplama işlemine eş zamanlı veri toplama sistemi denmektedir. Daha sonra ise toplanan veriler bilgisayar ortamında işlenmiştir.

Deneylerde National Measurement firması tarafından üretilen Ni-USB-6251 modeli DAQ kart kullanılmıştır. Şekil 4.15’de kullanılan DAQ kart görülmektedir. Tablo 4.15’de kullanılan DAQ kartın özellikleri verilmiştir.



Şekil 4.15. DAQ kart (Ni,2010)

Tablo 4.15. DAQ kart özellikleri (Ni,2010)

Özellikler	Değerler
Kanal sayısı	16,8
Çözünürlük (bit)	16
Örnekleme oranı (MS/s)	1,25
Maksimum voltaj (V)	$\pm 10$
Tetikleme	Analog, Dijital

Son yıllarda hızlı bir gelişim içinde bulunan bilgisayarlar ile veri toplama ve işleme uygulamaları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Birçok uygulamada, özellikle veri toplama ve işleme için, bilgisayarların gücü ve esnekliği göz ardı edilemez. Bilgisayarların bu uygulamalarda tercih edilmesinin sebebi, özel bir veri toplama işleminin belirli şartlarının mevcut yazılım ve donanımla uyum sağlamasıdır.

Veri toplama, gerçek dünyadaki fiziksel büyüklüklerin ölçülerek, dijital bir forma dönüştürülmesi ve bilgisayara aktarılmasıdır. Bu aktarılan bilgiler bilgisayar tarafından işleme, analiz edilme için kullanılabilir veya saklanabilir. Uygulamaların büyük bir çoğunluğunda, veri toplama sistemi (DAQ), sadece veri elde etmek için değil ayrıca üzerinde çalışmak için tasarlanmaktadır.

#### **4.9.3.6. LabVIEW programı**

Geleneksel programlama dillerindeki komut veya değişkenlerin satırlarca yazılması yerine, yapılmak istenen işlem için kullanılabilir sanal enstrümanların (VI) blok diyagrama yerleştirilip, veriyi iletecek bağlantılar oldukça kolay bir şekilde yapılmaktadır. Veri işleme ve izlenmesinde kullanılan LabVIEW, içeriğinde bulunan otomasyon ve ölçme devre elemanları fonksiyonlarının ekranda birbirlerine bağlanması şeklinde kullanılır.

LabVIEW programı, kullanıcı ara yüzü olan ön panel ve blok diyagramdan oluşur. Ön panel, LabVIEW ile oluşturulacak uygulama için sisteme değerler girilmesine ve çıkışların görülmesine yardımcı olur. Blok diyagram ise ana işlemlerin yapıldığı kısımdır. Ön panelde bir taraftan kontrol sağlanırken, diğer taraftan blok diyagramda sanal enstrümanlar kullanılmaktadır. LabVIEW programının geliştiricisi National Instrument firmasının geliştirdiği donanımlar ile gerçek sistemler de çalıştırılabilmektedir. (Ni,2000-Tunçalp,2004)

Ölçme yapılan her yerde, veri izlenmesin de özellikle otomotiv sektöründen enerji sektörüne, uzay çalışmalarından su altı çalışmalarına, elektrik ve elektronik teknolojisine kadar birçok alanda LabVIEW programı kullanılmaktadır. Ayrıca farklı alanlarda birçok çözümler sunmasının yanında araştırma geliştirme çalışmalarında da kullanılmaktadır. LabVIEW, bilgisayar ve enstrümantasyon donanımına yapılan parasal yatırımı korumaktadır. Böylece üretkenliği arttırarak geliştirmeye harcanan zamanı azaltmakta ve kullanıcılarına kendi çözümlerini geliştirebilmeleri için fırsatlar sunmaktadır. Araştırma geliştirme çalışmalarında karmaşık araçlara gerek

kalmadan bütün işlemleri tamamlayabilme esnekliğine sahiptir. Programa ilave edilen güçlü araçlar ile karmaşık geliştirme işlemleri basitleştirir.

Yapılan bazı LabVIEW uygulamalarına örnek olarak eşzamanlı hızlanan görüntü elde etme, yer çekimi olmayan bir NASA araştırma aracında sıcaklık verileri okumak ve analog gerilim elde etmek için ortam şartlarına dayanıklı bir bilgisayar içinde bir DAQ kart ve LabVIEW kullanılmıştır. Bir başka uygulamada yol üstündeki motorun, sürücü ve test görevlisinin denemeleri sırasında durma süresi, fren sıcaklığı ve daha birçok veri hakkında bilgi verecek fren testleri için bir veri elde etme sistemi geliştirmek istenmiştir. Bu amaçla sağlam bir çalışma bilgisayarını, sinyal durum donanımı ve yolda DAQ sistem geliştirmek için bir giriş çıkış sürücüsü olan LabVIEW yazılımını ve NI donanımları kullanılmıştır (Ni,2000-2010).

#### 4.9.4. Program yazımı

Yazılan program, ön panel ve blok diyagram olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Bu iki kısım aşağıda açıklanmıştır.

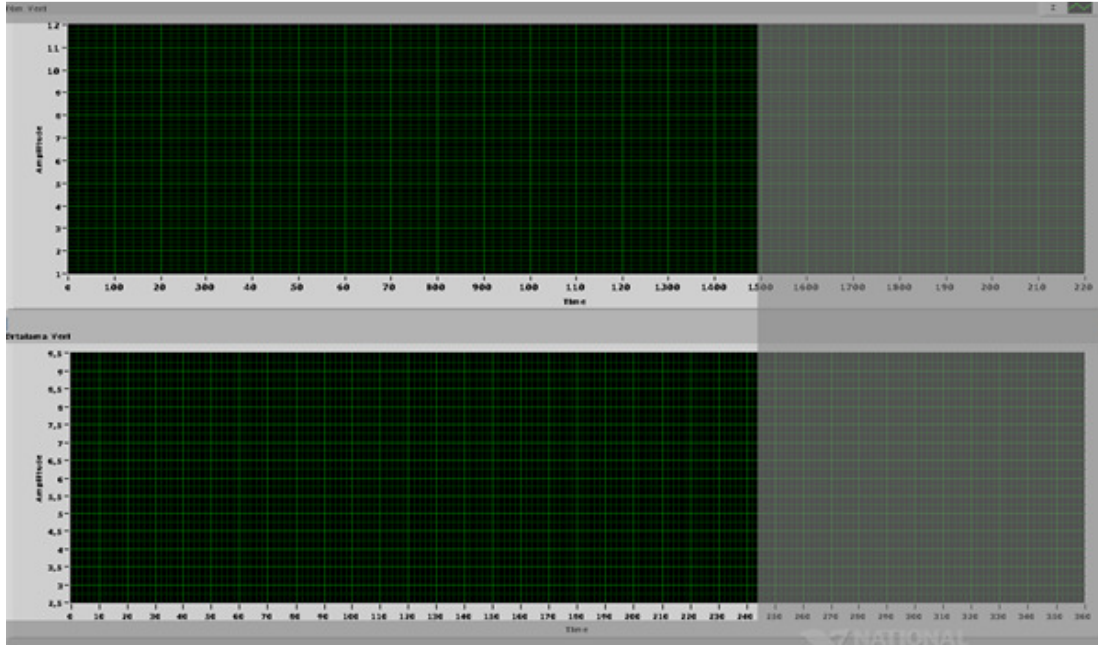
##### 4.9.4.1. Ön panel

Ön panel sanal enstrümanların kullanıcı ara yüzüdür. Ön panel sırası ile sanal enstrümanların etkileşimi giriş ve çıkış terminallerini kumanda cihazları ve göstergeler ile oluşturulabilir. Hazırlanan ön panelde üç eksenli kuvvet sensörü ve enkoderden gelen veriler görülmektedir. Ön panel iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda, verilerin kaç derecede bir alınacağı, deneyde kaç devir yapılacağı, baştan ve sondan değerlendirmeye alınmayacak devir sayıları manuel olarak girilmektedir. Şekil 4.16'da birinci kısım görülmektedir.

Encoder Pulse/Devir	1000	Kesilecek Tur Sayısı (Baştan)	2
Toplam Çevrim Sayısı	10	Kesilecek Tur Sayısı (Sondan)	2

Şekil 4.16. Ön paneldeki manuel ayarlar

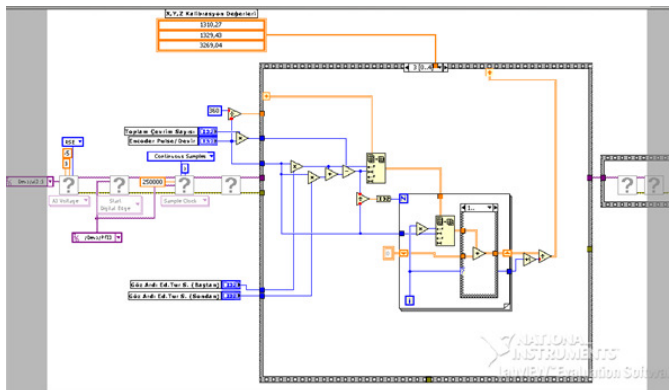
İkinci kısım ise kuvvet sensöründen gelen tüm verilerin görüldüğü tüm veri grafiği ve çevrim sayısına bağlı olarak ortalaması alınan değerlerin görüldüğü ortalama veri grafiğinden oluşmaktadır. Şekil 4.17’de grafikler görülmektedir.



Şekil 4.17. Ön panel grafik ekranı

#### 4.9.4.2. Blok diyagram

Ön paneli oluşturulduktan sonra ön panel objelerini kontrol etmek için fonksiyonların grafiksel ifadelerini kullanarak kodlar eklenilebilir. Blok diyagramları bu grafiksel kaynak kodlarını içerirler. Engelleme diyagramlarda ön panel objelerine terminal olarak tercih edilir. Şekil 4.18’de programın blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 4.18. Programın blok diyagramı

#### 4.9.5. Hesaplamalarda Kullanılan Formüller

Aşınma deneylerinde ölçülen sürtünme kuvveti, aşınma miktarı ve aşınma cihazının hız değişiminin hesaplanmasında kullanılan formüller aşağıda verilmiştir.

##### 4.9.5.1. Sürtünme katsayısı

Sürtünme, birbirine yüzeysel olarak temas eden ve birbiri üzerinde kaydırılmaya veya döndürülmeye çalışılan iki cisim arasında ortaya çıkan hareket etmeye karşı direnç kuvvetidir. Oluşan sürtünme kuvveti bir direnç kuvveti olduğundan hareket yönüne ters olarak ortaya çıkar. Deneylerde ölçülen sürtünme kuvveti kullanılarak, aşağıdaki formül yardımıyla sürtünme katsayısı ölçülmüştür.

$$\mu = F_s / F_n \quad (4.1)$$

Burada;

$\mu$  : Sürtünme katsayısı

$F_s$  : Sürtünme kuvveti (N)

$F_n$  : Normal kuvvet (N)

##### 4.9.5.2. Aşınma oranı

Ölçülen aşınma miktarları, aşınma oranlarına çevrilerek sonuçlar kısmında verilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan formül aşağıda verilmiştir.

$$W_o = \Delta g / \rho \cdot l \quad (4.2)$$

Burada;

$W_o$  : Aşınma oranı ( $\text{mm}^3/\text{m}$ )

$\Delta g$  : Aşınma miktarı (mg)

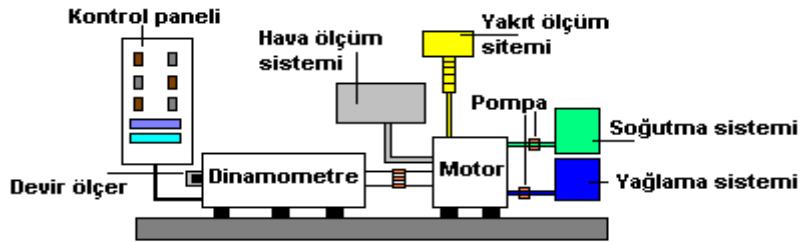
$\rho$  : Yoğunluk ( $\text{mg}/\text{mm}^3$ )

$l$  : Yol (m)



## 4.10. Motor Deneyleeri

Motor deneyleerinde içten yanmalı benzinli motor, soğutma, yağ, yakıt ölçüm, hava debisi ölçüm, elektrikli dinamometre ve devir ölçüm sistemleri kullanılmıştır. Şekil 4.19’da motor deney düzeneğinin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 4.19. Motor deney düzeneğinin şematik görünümü

### 4.10.1. Deney motoru

Motor deneyleerinde, su soğutmalı tek silindirli benzinli motor kullanılmıştır. Deney motorunun soğutma ve yağlama sistemleri yeniden tasarlanarak motorun farklı sıcaklıklardaki sürtünme değerleri belirlenmiştir. Deneyde kullanılan motorun özellikleri Tablo 4.16’da deney motorunun resmi ise Şekil 4.20’de verilmiştir.

Tablo 4.16. Deney motoru özellikleri

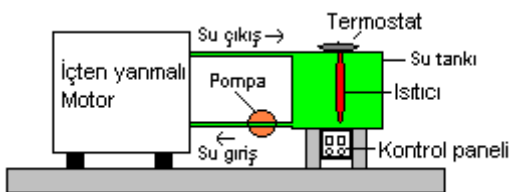
Marka ve model	Peter
Çalışma prensibi	4 zamanlı
Silindir sayısı	1
Silindir çapı (mm)	84,95
Silindir stroku (mm)	82,45
Toplam silindir hacmi (cm <sup>3</sup> )	467,07
Sıkıştırma oranı	8,78/1 (max.)



Şekil 4.20. Deney motoru

#### 4.10.1.1. Soğutma sistemi

Motorun farklı çalışma şartlarındaki sürtünme kayıplarının belirlenebilmesi için soğutma sistemi şartlandırılabilir hale getirilmiştir. Motorun soğutma sistemindeki soğutucu akışkan (su+antifriz) sıcaklığı istenilen değerde ayarlanabilmektedir. Bunun için deney motorunun soğutma sistemi, pompa, ısıtıcı ve sıcaklık kontrol ünitesi eklenerek yeniden tasarlanmıştır. Sistemin toplam su kapasitesi artırılarak, pompa ve ısıtma düzeneğindeki su seviyesinin, motor içerisindeki su seviyesini düşürmesi engellenmiştir. Şekil 4.21'de soğutma sistemi şematik olarak gösterilmiştir.

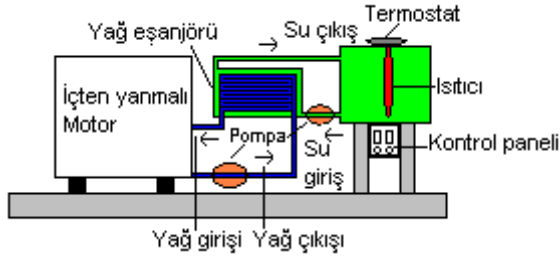


Şekil 4.21. Soğutma sisteminin şematik görünümü

#### 4.10.1.2. Yağlama Sistemi

Motorun farklı çalışma şartlarındaki sürtünme kayıplarının belirlenebilmesi için yağlama sistemi şartlandırılabilir hale getirilmiştir. Motorun yağlama sistemindeki yağ sıcaklığı istenilen sıcaklıkta ayarlanabilmektedir. Bunun için deney motorunun yağlama sistemi, pompa, eşanjör ve sıcaklık kontrol ünitesi eklenerek yeniden

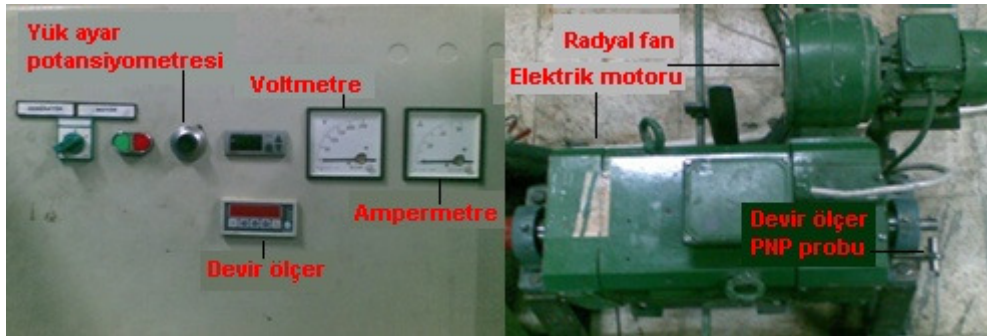
tasarlanmıştır. Sistemin toplam yağ kapasitesi artırılarak, pompa ve eşanjör içerisindeki yağ seviyesinin, motor içerisindeki yağ seviyesini düşürmesi engellenmiştir. Şekil 4.22’de yağlama sistemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Yağlama sistemi şematik görünümü

#### 4.10.2. Dinamometre

İçten yanmalı motorun sürtünme gücünün ölçüldüğü deneylerde Kemsan marka elektrikli dinamometre kullanılmıştır. Şekil 4.23’ de dinamometre ve kontrol paneli görülmektedir.



Şekil 4.23. Kontrol paneli ve dinamometre

Motor sürtünme momenti ve motor tarafından üretilen momentin tespiti için dinamometre koluna monte edilen 0,1 kg hassasiyetinde Zemic marka lama tip yük hücresi kullanılmıştır. Deneylere başlamadan önce yük hücresinin kalibrasyonu yapılmıştır. Şekil 4.24’de yük hücresi ve gösterge paneli görülmektedir.



Şekil 4.24 Yük hücresi ve gösterge paneli

### 4.10.3. Kullanılan hesaplamalar

Motor deneylerinde kullanılan motor yöntemi ile benzinli motorun sürtünme kayıpları ölçülmüştür. Yük hücresi tarafından ölçülen yük değeri gerekli hesaplamalar yapılarak önce motor döndürme momentine daha sonra da sürtünme gücüne çevrilmiştir (Parlak,2000).

Motor döndürme momenti ve güç hesaplamalarında aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır. Motor tarafından oluşturulan döndürme momenti;

$$M_d = F.L \quad (4.4)$$

Motor tarafından üretilen güç aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır (Kapsız,2004).

$$P_e = \frac{2\pi.F.L.n}{1000} \quad (\text{kW}) \quad (4.5)$$

Burada;

$M_d$  = Döndürme momenti (Nm),

$F$  = Fren terazi kuvveti (N),

$L$  = Moment kolu uzunluğu (m),

$P_e$  = Efektif güç(kW),

$n$  = Motor devri (devir/s).

#### 4.11 Belirsizlik Analizi

Deney sonuçlarına göre hesaplanan büyüklüklerin doğruluğu, kullanılan cihazların çalışma ve ölçüm hassasiyetleri ile çevresel faktörlerden etkilenebilir. Deneysel sonuçların hata analizi için, belirsizlik analizi adı verilen hassas bir yöntem kullanılmıştır. Belirsizlik analizinde hem cihaz belirsizlikleri hem de ölçüm belirsizlikleri hesaplanmıştır.

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde ölçüm sistemlerinin farklılıklarından dolayı her deney için ayrı ayrı ortalamalar alınmıştır. Sürtünme deneyleri sonuçları için her bir ölçüm noktası için 100 verinin ortalaması alınmıştır. Aşınma deneyleri için her 3 deney verisinin ortalaması alınmıştır. Ayrıca motor sürtünme deneyleri için ise her 100 verinin ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Bu ölçüm sonuçlarının sağlıklı değerlendirilebilmesi için ortalamaların standart sapmaları hesaplanmış ve limit dışında kalan verilerin elenmesi ya da düzenlenmesi için Chauvenet kriteri uygulanmıştır.

Chauvenet kriteri, ölçüm sonucunda elde edilen deneysel bulgulardan şüpheli olanların elenmesi amacı ile kullanılır. Bu kriter kullanılarak eleme yapılabilmesi amacıyla tüm sapma değerleri ile standart sapmanın bilinmesi gerekmektedir.

Sapma, i.nci veri ve ortalama arasındaki fark olarak adlandırılır,  $d_i$ ;

$$d_i = (x_i - \bar{x}) \quad (4.6)$$

Ölçülen bir büyüklüğün n tekrarlı ölçümünün ortalaması,  $x_m$  ;

$$x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.7)$$

Yapılan ölçümün standart sapması,  $\sigma$  ;

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.8)$$

Ölçüm yapılan büyüklüğün ortalamasındaki belirsizlik,  $S_{\bar{x}}$  ;

$$S_{\bar{x}} \approx \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.9)$$

Burada;

$n$  : Tekrarlı ölçümlerin sayısı

$\sigma$  : Ölçümün standart sapması

$S_{\bar{x}}$  İfadesine ortalamanın standart hatası ( $\sigma_m$ ) da denilmektedir. Sistematik bir belirsizliğin olmadığı durumda sonlu sayıdaki verinin ortalaması,  $x_i$ ;

$$x_i = \bar{x}_m \pm t_{v,99} S_{\bar{x}} = \bar{x}_m \pm P_{xi} \quad (4.10)$$

Burada;

$\pm t_{v,99} S_{\bar{x}}$  : Ölçümün ortalamasındaki rastgele belirsizlik ( $P_{xi}$ )

$P$  : % güvenirlilik aralığı

$t$  :  $v$ ' ye bağlı serbestlik derecesi ( $v = n-1$ )

Deney sonuçlarına göre hesaplanan parametreler pek çok bağımsız değişkenler içermektedir. Bundan dolayı hesaplama sırasında bu değişkenlerin her biri hesaplanan parametrenin ortalama belirsizliğini arttırmaktadır. Sözü edilen bu değişkenlerin ortalama üzerindeki etkileri, toplam belirsizlik olarak tanımlanır.

Ölçüm sırasında ortaya çıkan rastgele belirsizlik  $P_{xi}$  ve  $x_i$  bağımsız değişkenin sistematik belirsizliği  $T_{xi}$  olmak üzere toplam belirsizliği içeren doğru ortalama değer ifadesi aşağıdaki gibi olur.

$$R = \bar{R} \pm u_R \quad (4.11)$$

Burada;

$\bar{R}$  : Ölçümün ortalama değeri

Bu ifade sonuca etki eden belirsizlik veya toplam belirsizlik olarak adlandırılır. Sistematik ve rastgele belirsizliğin beraber değerlendirildiği ifade aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$u_R = f(T_{x1}, T_{x2}, \dots, T_{xn}, P_{x1}, P_{x2}, \dots, P_{xn})$$

Üretim esnasında ortaya çıkan sistematik belirsizliklerin toplamı  $T_x$  olarak ifade edilir.

$$T_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n [\theta_i T_{xi}]^2} \quad (4.12)$$

Burada;

$\theta_i$  :Duyarlılık indeksi

Toplam rastgele belirsizlikler  $P_x$  olarak ifade edilir.

$$P_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n [\theta_i P_{xi}]^2} \quad (4.13)$$

Rastgele ve sistematik belirsizliklerin toplam belirsizlik üzerine etkisi aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$u_R = \pm \sqrt{T_x^2 + (t_{v,99} B_x)^2} \quad (\% 99) \quad (4.14)$$

Chauvenet kriterin kullanılabilmesi için, öncelikle yapılan deneye ait standart sapma ( $\sigma$ ) ve bütün bulgulara ait sapmalar ( $d_i$ ) bilinmelidir. Daha sonra her bir deneysel bulgu, Tablo 4.17' deki kriter değeri ile karşılaştırılmıştır. Ölçülen deneysel bulgulara ait oranlardan bazıları bu kriter değerinden büyük ise, bu bulgular değerlendirme dışı bırakılmıştır.

Tablo 4.17. Deneysel bulguların atılması için Chauvenet kriteri

Tekrarlı Ölçüm	
Sayı	$ld_i / s$
3	1,38
4	1,54
5	1,65
7	1,8
10	1,96
15	2,13
50	2,57
100	2,81

Ölçülen değerlerdeki belirsizlikler birbirinden bağımsız olduğunda, bağımlı değişkenin toplam belirsizliği kısmi diferansiyel yöntemine göre hesaplanmıştır. Hesaplanan bu belirsizlikler Tablo 4.18' de verilmiştir.

Tablo 4.18. Belirsilik analizi sonuçları

Parametreler	Sistemantik belirsizlikler, $\pm$
Sürtünme kuvveti, N	$1 \cdot 10^{-13}$
Sıcaklık, °C	1,0
Devir, d/d	1,0
Ağırlık, g	0,0001
Yük, N	0,1
	Toplam Belirsizlik, %
Aşınma oranı, $\text{mm}^3/\text{m}$	0,4
Moment, Nm	4,8
Sürtünme katsayısı	2,72
Güç, kW	4,03

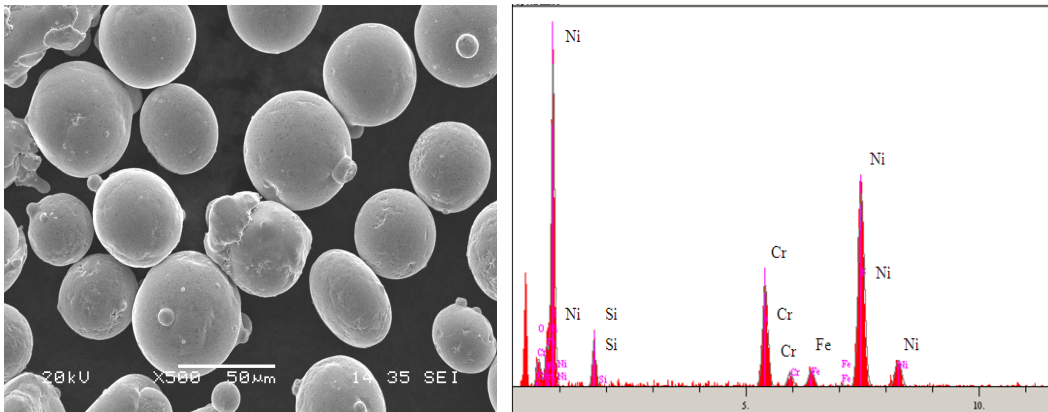


## BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

### 5.1. Kullanılan Tozların Özelliklerinin İncelenmesi

Kaplama tabakalarının üretiminde özellikleri Tablo 4.1’de verilen tozlar kullanılmıştır. Kaplama tozlarının toz şeklinin belirlenmesi amacıyla SEM-EDX analizleri yapılarak kaplama işleminden önce başlangıç toz özellikleri incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre gaz atomizasyon yöntemi ile üretilen NiCrBSi tozunun genel olarak küresel formda olduğu gözlenmiştir (Sidhu, 2006). Diğer kaplama tozu olan %88WC+%12Co tozunun küresel forma yakın daha köşeli bir yapıda olduğu görülmektedir.

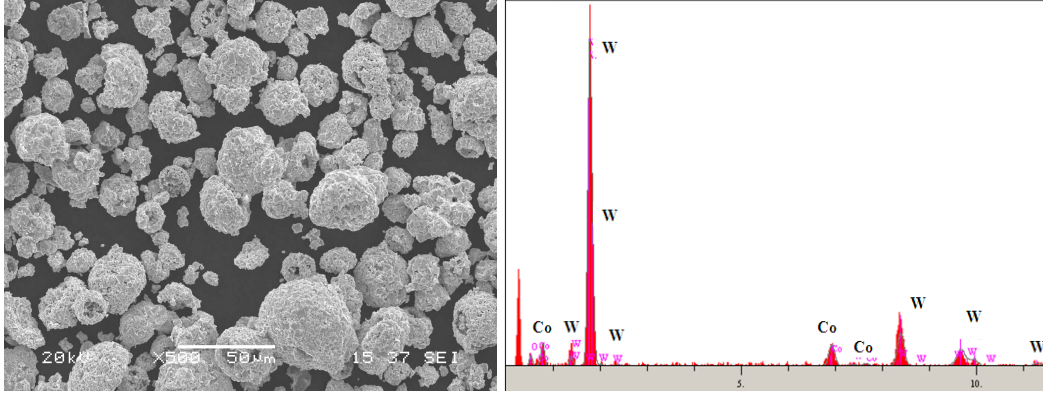
Şekil 5.1’de NiCrBSi tozunun görünüşü ve EDX analiz sonuçları görülmektedir. Bu toz Ni esaslı olarak gaz atomizasyon yöntemiyle üretilmiştir. Toz içerisinde yapılan ölçümlerde tane boyutları 20–50µm arasında değişmektedir (Sidhu, 2006). EDX analizi sonucunda toz içerisindeki elementlerin yüzdesel dağılımı %70 Ni, %15 Cr, %5 Si, %3,5 Fe ve %5 oksijendir.



Şekil 5.1. NiCrBSi tozunun SEM görünüşü ve EDX analizi

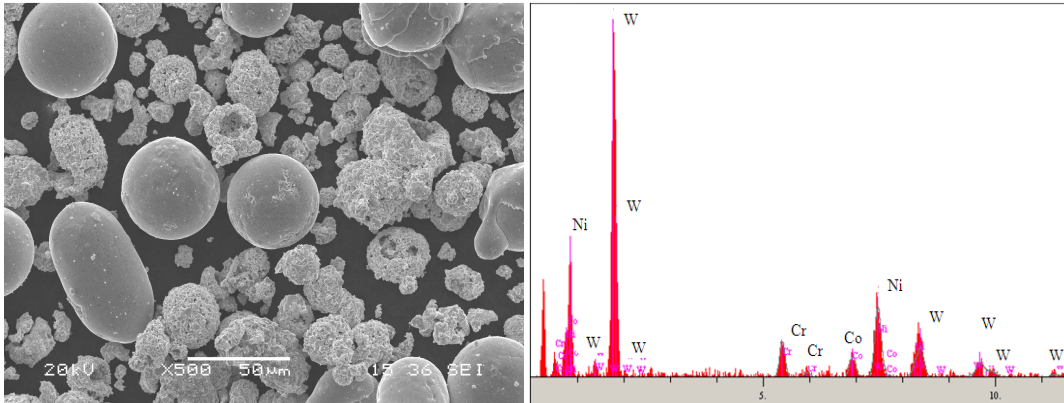
Şekil 5.2’de %88WC-%12Co tozunun karıştırılmadan önceki SEM görünüşü ve EDX analizi görülmektedir. Yapılan ölçümlerde tane boyutları 10–50µm arasında

değişmektedir. Bu tozun yapısındaki sert tungsten karbür tanecikleri kobalt matrisinin içerisine gömülü haldedir (Gruzdys, 2009). Yapılan EDX analizinde WC-Co tozunun içerisindeki elementlerin yüzdesel dağılımı %83W, %9,8 Co ve %7 oksijendir.



Şekil 5.2. %88WC+%12 Co tozunun SEM görünüşü ve EDX analizi

Şekil 5.3’de %40NiCrBSi+%60 (%88WC-%12Co) oranında karıştırılmış tozların SEM görünüşü ve EDX analizi görülmektedir. Toz içerisindeki elementlerin yüzdesel dağılımı %54 W, %28 Ni, %7 Cr ve %6 Co’ tır.

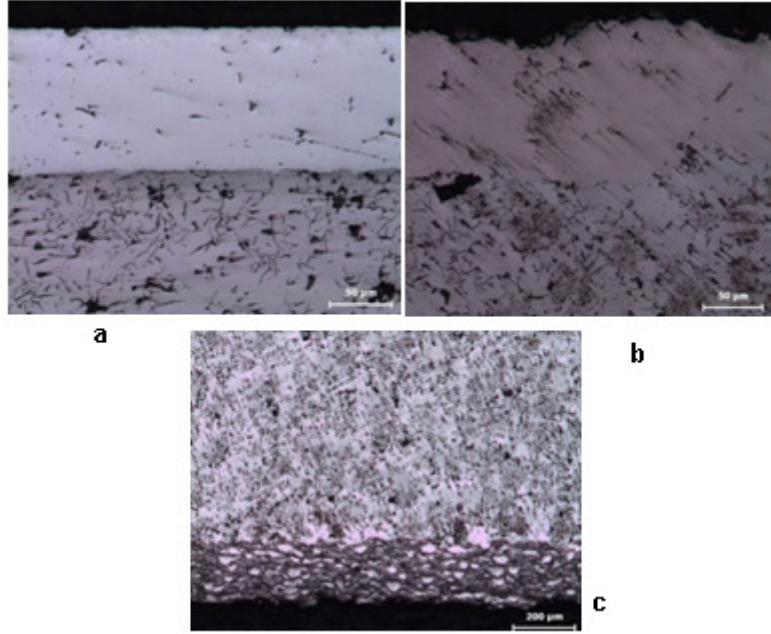


Şekil 5.3. %40NiCrBSi+%60 (%88WC-%12Co) karışımının SEM görünüşü ve EDX analizi

## 5.2. Metalgrafik İncelemeler

Termal spreycaplamalar lamelli yani tabakalı bir yapıya sahiptirler ve genellikle çeşitli oranlarda porozite, oksit, ergimemiş partikül ve inklüzyon içerirler (Çelik,1997). Kaplamaların mikroyapı incelemelerinde, genel kaplama yapısı ile

birlikte oluşan hatalı noktaların tespiti üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Şekil 5.4’de yapılan kaplamalara ait kaplama ve altlık malzemeyi gösteren mikroyapıları verilmiştir.



Şekil 5.4. Kaplamaların optik mikroskop görüntüleri

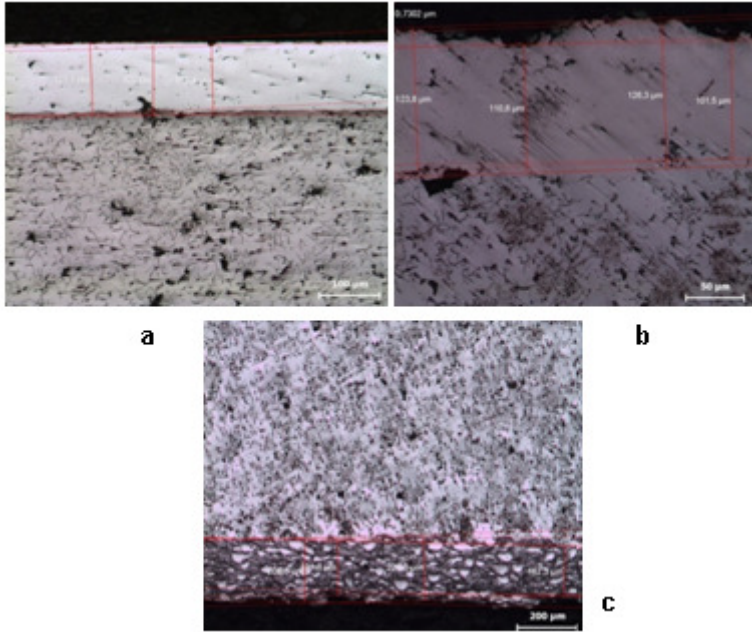
a)Krom kaplama b)HVOF NiCrBSi c)HVOF %60 WC-%40 NiCrBSi

### 5.2.1. Kaplama tabakalarının kalınlıkları

Kaplama tabakalarının üretiminde orta büyüklükteki içten yanmalı motorlarda kullanılan kaplama kalınlığı baz alınmıştır. Bu değer 100-150 $\mu$ m arasında değişmektedir (Narendra, 2005).

Yapılan kaplamaların kalınlık ölçümleri optik mikroskopta gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.5’de kaplama kalınlıklarının ölçümü görülmektedir. Kalınlık değerleri karşılaştırıldığında elde edilen değerlerin birbirine son derece yakın olduğu görülmektedir. Farklı termal sprey kaplamalarda kaplama kalınlıklarının birbirlerine yakın değerlerde olması son derece zor bir işlemdir. Kaplama kalınlıkları manuel kaplama sitemlerinde çeşitlilik arz etmektedir (Rao,1997).

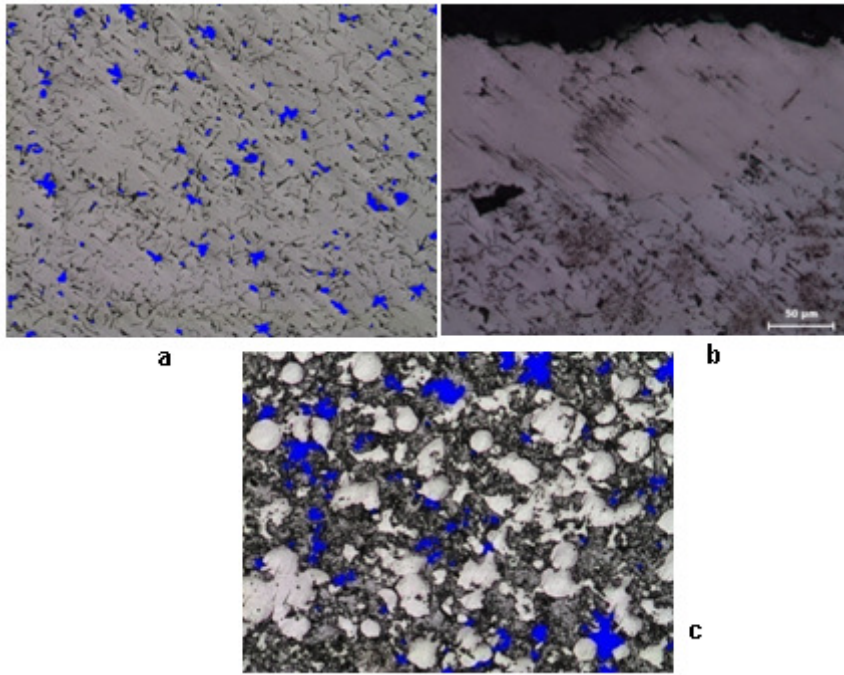
Elektrokimyasal krom kaplama ve HVOF kaplamaların kaplama kalınlıkları sırasıyla, krom (117-123 $\mu\text{m}$ ), HVOF NiCrBSi (110-126  $\mu\text{m}$ ), HVOF %60 WC-%40 NiCrBSi (140-160  $\mu\text{m}$ ) olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.5. Kaplamaların kaplama kalınlıklarını gösteren optik mikroskop görüntüleri  
a)Krom kaplama b)HVOF NiCrBSi c)HVOF %60 WC-%40 NiCrBSi

### 5.2.2. Kaplama tabakalarının porozitesi

Porozite termal sprej kaplamaların karakteristik bir özelliği olarak kabul edilmektedir. Kullanılan kaplama yöntemine ve kullanılan malzemelerin özelliklerine bağlı olarak termal sprej kaplamalarda %1-10 oranında porozite bulunmaktadır. Şekil 5.6' da kaplamalardaki poroziteyi (mavi renkli) gösteren mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.6. Kaplamaların porozitelerini gösteren optik mikroskop görüntüleri  
 a)Krom kaplama b)HVOF NiCrBSi c)HVOF %60 WC-%40 NiCrBSi

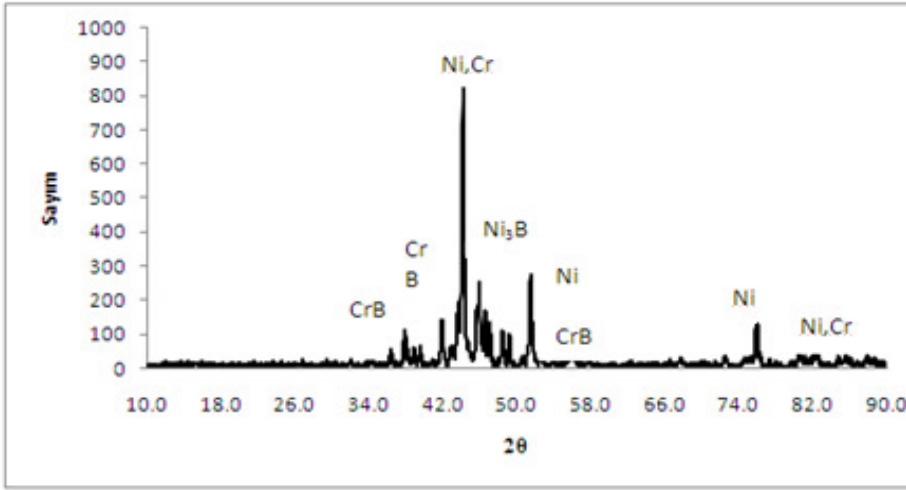
Standart termal spreyci kaplamalarda porozite oranı %15'lere kadar ulaşmaktadır. HVOF kaplama tekniğinde ise porozite en fazla % 7 civarında olmaktadır (Kawakita,2003-Sidhu,2005-2006). Kaplama tabakalarında ölçülen porozite değerleri sırasıyla, elektrokimyasal krom kaplamada %3-5, HVOF NiCrBSi kaplamada %3-4, HVOF %60 WC-%40 NiCrBSi kaplamada %5-7 olarak ölçülmüştür. Krom kaplama ve NiCrBSi kaplamanın WC içerikli kaplamaya göre daha düşük porozite içerdiği görülmektedir.

### 5.3. X-Işınları Difraksiyon Analizi

HVOF kaplamada kullanılan tozlarda ve üretilen elektrokimyasal krom, HVOF NiCrBSi ve HVOF %40NiCrBSi+%40 (%88WC-%12Co) kaplama tabakalarında oluşan fazları tespit etmek için X-Işınları Difraksiyon Analizi kullanılmıştır. XRD analizleri Şekil 5.7-12'de verilmiştir.

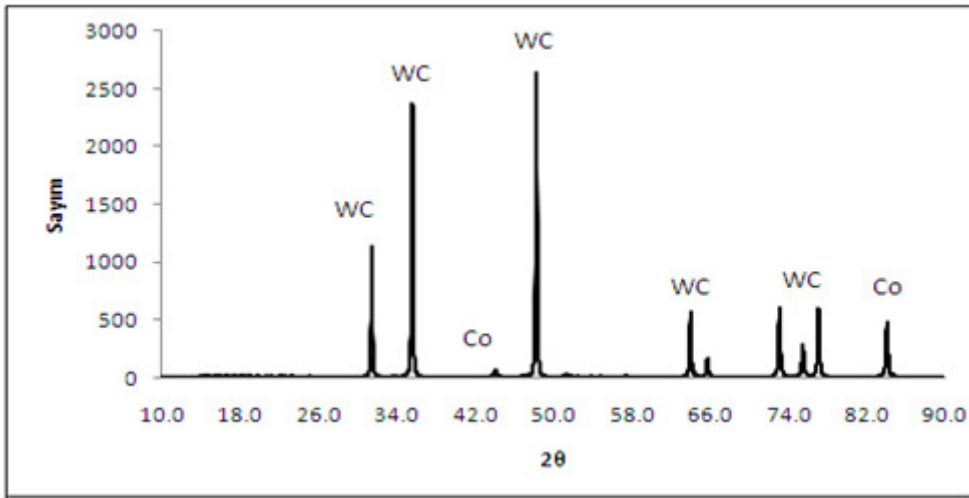
Şekil 5.7' de NiCrBSi tozunun XRD analizi görülmektedir. Navas ve arkadaşlarının (Navas,2005), Yuping ve arkadaşlarının (Yuping,2007), Sidhu ve arkadaşlarının (Sidhu,2006) yaptıkları çalışmalarda da CrB, Ni<sub>3</sub>B, Cr, Ni ve B fazları bulunmuştur.





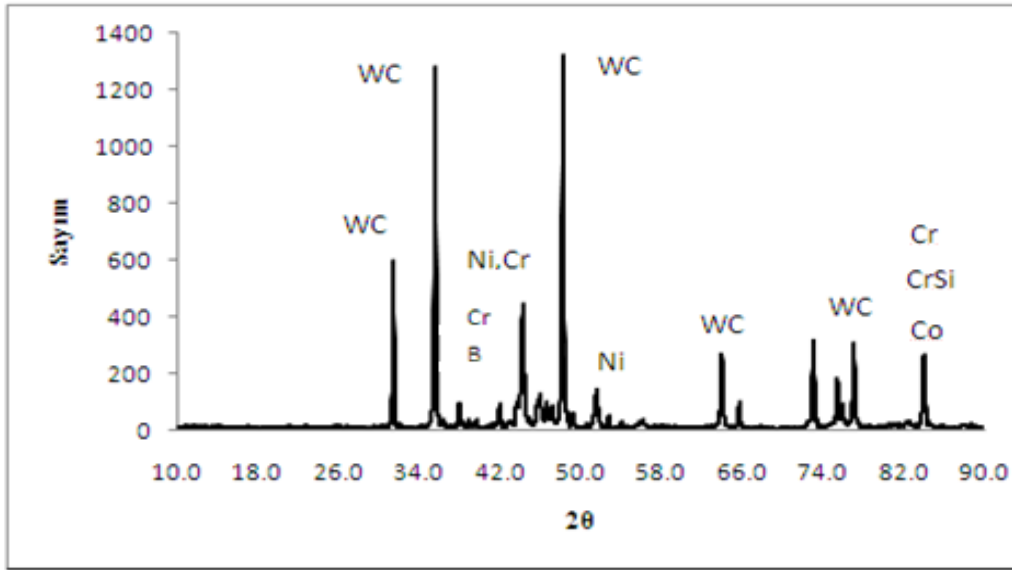
Şekil 5.7. NiCrBSi tozunun x-ışını difraksiyon paternleri

Şekil 5.8'de %88WC+%12Co tozunun XRD analizi görülmektedir. Cho ve arkadaşlarının (Cho, 2008), Çelik ve arkadaşlarının (Çelik, 2006) yaptıkları çalışmalarda da WC ve Co fazları bulunmuştur.



Şekil 5.8 %88WC+%12Co tozunun x-ışını difraksiyon paternleri

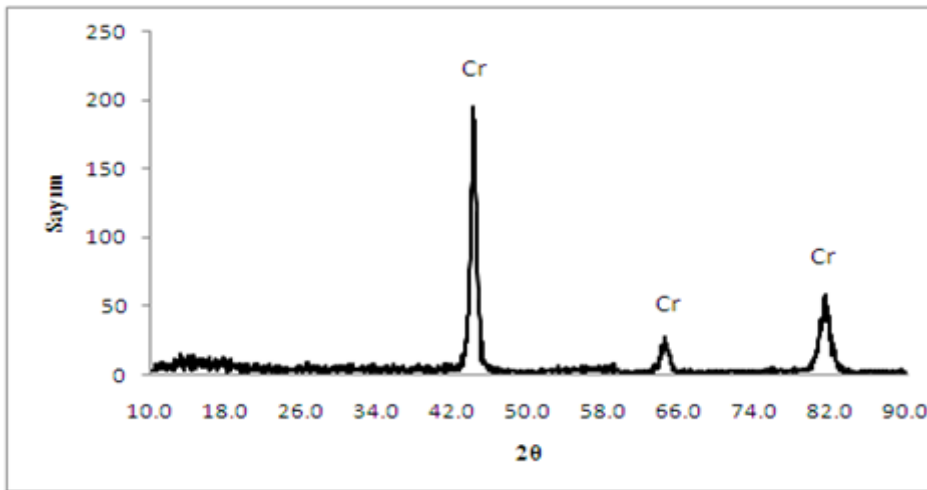
Şekil 5.9' da %40NiCrBSi + %60 (%88WC+%12Co) tozunun XRD analizi görülmektedir. Analizde WC, Cr, CrSi, B, Ni ve Co fazları bulunmuştur. Ramesh ve arkadaşlarının (Ramesh, 2010), Guilemany ve arkadaşlarının (Guilemany, 2006) yaptıkları çalışmalarda da aynı fazlar bulunmuştur.



Şekil 5.9. %40NiCrBSi+%60(%88WC+%12Co) toz karışımının x-ışını difraksiyon paternleri

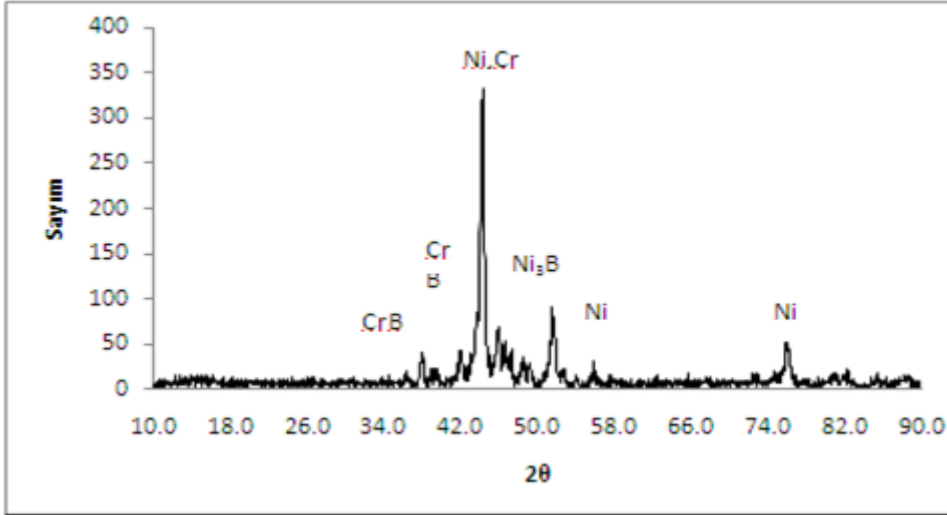
Şekil 5.10-12’de üretilen kaplamaların XRD analizi görülmektedir. Daha önce incelenen toz ve karışımlarının XRD analizleri ile üretilen kaplamaların XRD analizleri benzerlik göstermektedir.

Şekil 5.10’da elektrokimyasal krom kaplamanın XRD analizi verilmiştir. Kaplama tabakasında Cr fazları belirgin şekilde görülmektedir (Lunarska, 2001; Wang, 2007). Kaplama tabakalarının üretilmesinde elektrokimyasal yöntem kullanıldığından analizlerde sadece Cr fazı elde edilmiştir.



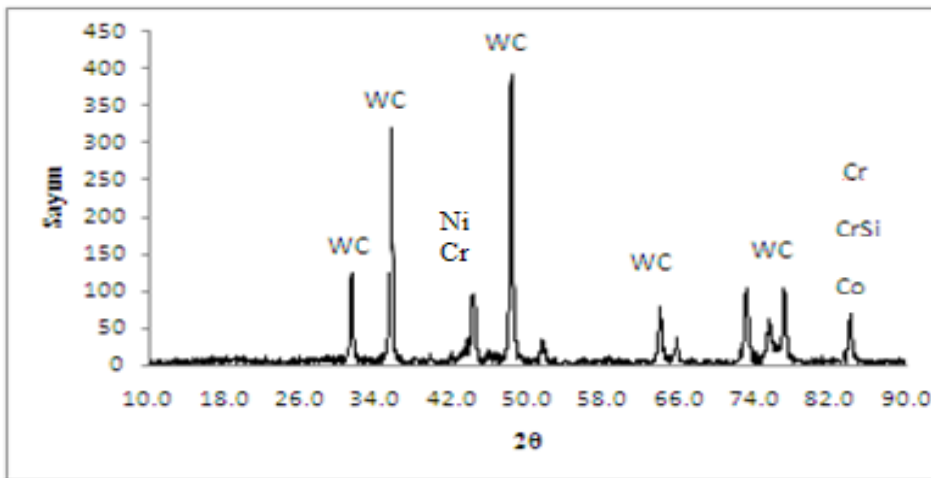
Şekil 5.10. Elektrokimyasal krom kaplama tabakasının x-ışını difraksiyon paternleri

Şekil 5.11’de HVOF NiCrBSi kaplamanın XRD analizi verilmiştir. Navas ve arkadaşlarının (Navas, 2005), Yuping ve arkadaşlarının (Yuping, 2007), Sidhu ve arkadaşlarının (Sidhu, 2006) yaptıkları çalışmalarda da CrB, Ni<sub>3</sub>B, Cr, Ni ve B fazları bulunmuştur.



Şekil 5.11. HVOF NiCrBSi kaplama tabakasının x-ışını difraksiyon paternleri

Şekil 5.12’ de HVOF %40NiCrBSi + %60 (%88WC+%12Co) kaplamanın XRD analizi görülmektedir. Ramesh ve arkadaşlarının (Ramesh, 2010), Guilemany ve arkadaşlarının (Guilemany, 2006) yaptıkları çalışmalarda da WC, Cr, CrSi, B, Ni ve Co fazları bulunmuştur.



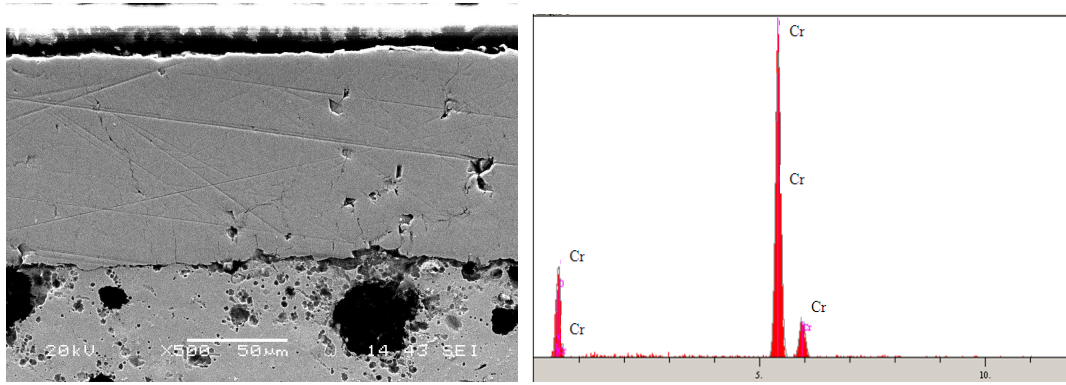
Şekil 5.12. HVOF %40NiCrBSi+%60(%88WC+%12Co) kaplama tabakasının x-ışını difraksiyon paternleri



#### 5.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Elementel Analiz İncelemeleri (EDX)

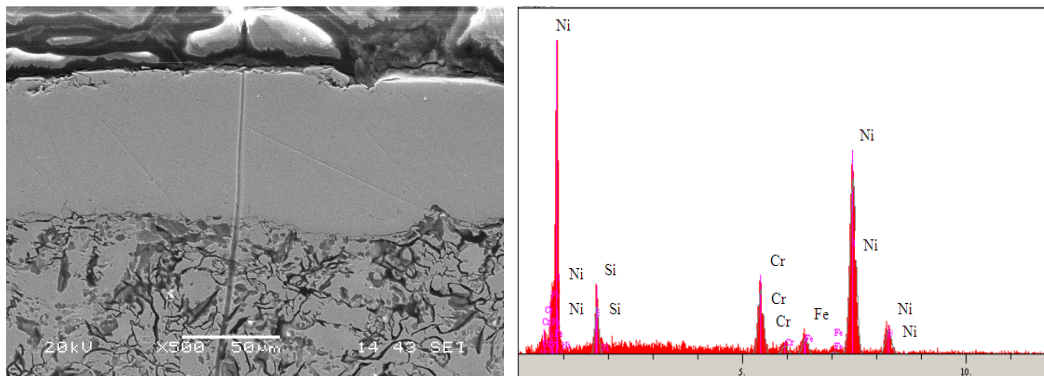
Üretilen kaplama tabakalarının mikroyapılarının daha ayrıntılı incelenebilmesi için SEM-EDX ile analiz edilmiştir. Elektrokimyasal krom ve HVOF kaplama tabakalarının SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 5.13-15’de verilmiştir.

Elektrokimyasal krom kaplama tabakasının SEM mikroyapı görüntüleri ve EDX analiz sonuçları Şekil 5.13’de verilmiştir. EDX analizlerinde kaplama tabakasında elementlerin yüzdesel dağılımı %83 Cr ve %17 oksijendir.



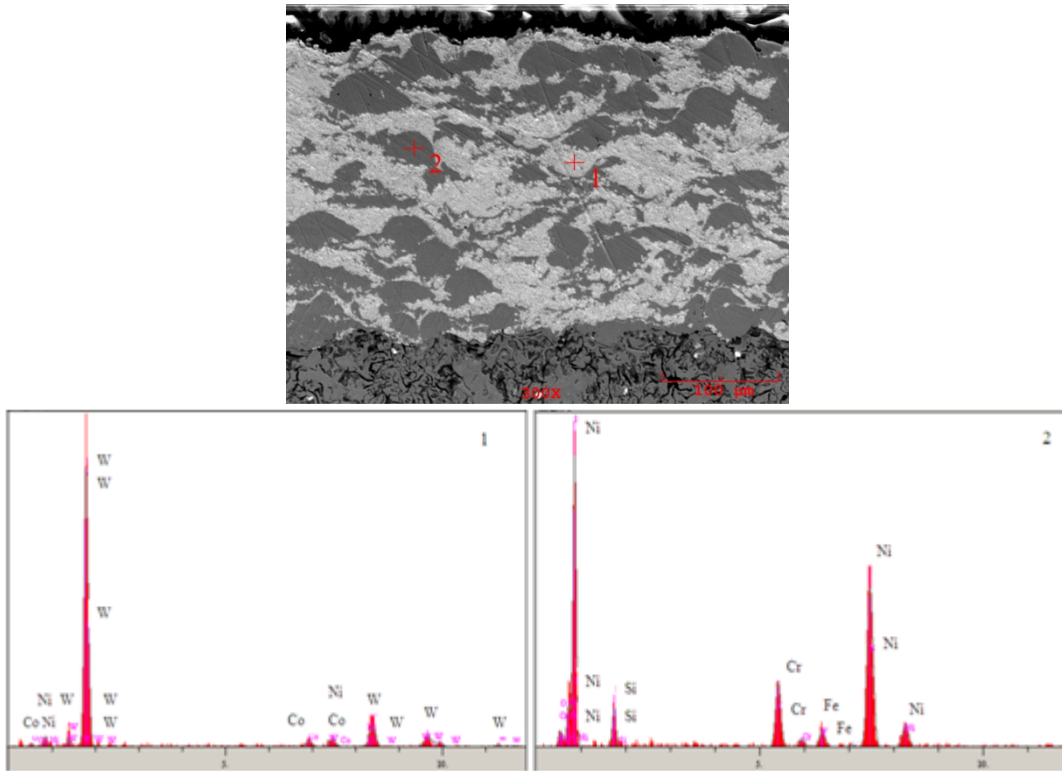
Şekil 5.13. Elektrokimyasal krom kaplamanın SEM görünüşü ve EDX analizi

HVOF NiCrBSi kaplama tabakasının SEM mikroyapı görüntüleri ve EDX analiz sonuçları Şekil 5.14’de verilmiştir. EDX analizlerinde kaplama tabakasında elementlerin yüzdesel dağılımı %73 Ni, %13 Cr, %3 Fe, %6 Si ve %3 oksijendir.



Şekil 5.14. HVOF NiCrBSi kaplama tabakasının SEM görünüşü ve EDX analizi

HVOF %40 NiCrBSi-%60WC kaplama tabakasının SEM mikroyapı görüntüleri ve EDX analiz sonuçları Şekil 5.15’de verilmiştir. 1 nolu grafikte görülen EDX analizinde kaplama tabakasında elementlerin yüzdesel dağılımı %84 W, %6 Ni, %5 Co ve %4 oksijendir. 2 nolu grafikte görülen EDX analizinde kaplama tabakasında elementlerin yüzdesel dağılımı %73 Ni, %12 Cr, %5 Si, %4 Fe ve %4 oksijendir.

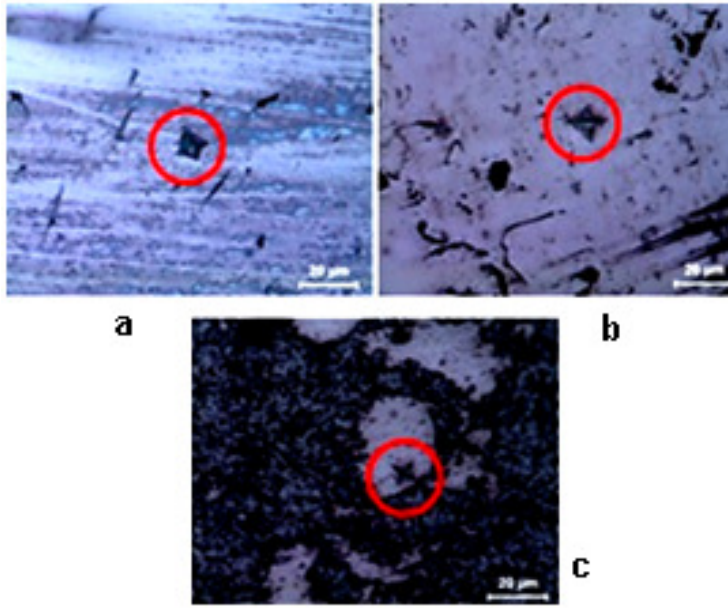


Şekil 5.15. HVOF %40 NiCrBSi-%60WC kaplama tabakasının SEM görünüşü ve EDX analizleri

### 5.5. Sertlik Ölçümleri

Altlık malzeme olarak seçilen sertliği düşük malzeme yüzeyine sert kaplama yapılarak istenilen aşınma dayanımı değerlerine ulaşılabilir. Aşınma ve korozyon direnci gibi diğer özelliklerin yanı sıra altlık malzemeye en az ısıl etkiyle yapışma ve çok çeşitli altlık malzeme seçimine olanak tanıyan HVOF kaplamalar, özellikleri gereği porozite, oksit ve ergimemiş partiküller gibi yapı hataları içerdiklerinde dolayı sertlik açısından homojen olmayan bir yapıya sahiptirler (Bansal,2007-Carrasquero,2008).

Mikro sertlik ölçümlerinde 5 adet farklı sertlik ölçümü uygulanmış ve bu ölçüm değerlerinin ortalamaları alınmıştır. Sertlik izlerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.16'da görülmektedir. Ölçülen sertlik değerlerinin ortalamaları Tablo 5.1'de görülmektedir. Bu değerler 5 ölçüm değerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Kaplamaların bir çizgi üzerinde sırasıyla ölçülen mikro sertlik değerleri, krom (880-950HV), HVOF NiCrBSi (860-920HV) ve HVOF %60WC- %40NiCrBSi (870-910HV) olarak ölçülmüştür (Sidhu,2007).



Şekil 5.16. Mikro sertlik izlerinin optik görüntüleri  
a)Krom kaplama b)HVOF NiCrBSi c)HVOF %60 WC-%40 NiCrBSi

Tablo 5.1. Kaplamaların mikro sertlik değerleri

Kaplamalar	HV <sub>0,1</sub>
Elektrokimyasal Cr	920(±20)
HVOF NiCrBSi	890(±23)
HVOF %60 WC - %40 NiCrBSi	896(±25)

Yapılan mikro sertlik ölçümlerinde krom kaplı segmanın sertlik değeri ile %60 WC takviyeli kaplamanın mikrosertlik değerleri en yüksek orana sahiptir. HVOF prosesinde partiküllerin çok yüksek kinetik enerjisi, elde edilen kaplamalarda kritik elementlerin kaybını minimize etmektedir. HVOF prosesinin yüksek hızı,

partiküllerin alevin içine bulunma süresini ve dolayısıyla kayıpları azaltmaktadır. Sonuç olarak, daha az porozite ile gelişmiş bir sertlik direnci sağlamaktadır.

### 5.6. Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Altlık malzemelerin, gömlek numunesinin ve kaplamaların yüzey pürüzlülük değerleri Mahr Perthometer S2 İstasyonel Yüzey Pürüzlülük ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Tablo 5.2' de ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Yapılan kaplama işlemlerinde sonra yüzeye parlatma uygulanmıştır.

Tablo 5.2. Yüzey pürüzlülük değerleri

	Dökme Demir segman	Krom kaplı segman	NiCrBSi	%60WC- %40 NiCrBSi	Dökme Demir gömlek
R <sub>a</sub> (µm)	1,052	0,121	0,21	0,66	0,81
R <sub>z</sub> (µm)	5,320	0,680	0,780	2,45	5,93
R <sub>max</sub> (µm)	6,94	1,300	1,860	5,34	8,08

### 5.7. Taguchi Metodu Sonuçları

Farklı deney koşullarında, üretilen kaplamaların ve gömlek çiftlerinin aşınma performanslarının optimizasyonu için Taguchi deneysel metodu kullanılmıştır. Taguchi deneysel metodunda ortogonal özellikten faydalanılarak, deney tasarımında çok sayıda faktörün az sayıda deneyle incelenmesi imkânı doğmaktadır. Ortogonal özellik bir faktörün seviyelerinin diğer faktörlerin aynı sayıdaki farklı seviyeleri ile eşleştirilmesi imkânı sağlamaktadır.

Aşınma deneylerinde parametreler, kaplama, yük, sıcaklık ve hız olmak üzere dört tanedir. Taguchi analiz metodunda Parametre sayısına bağlı olarak L27(3<sup>13</sup>) ortogonal dizini seçilmiştir. Seçilen L27 dizini segman ve gömlek aşınma analizlerinin her ikisinde de kullanılmıştır.

### 5.7.1. Segman aşınma analizi

Taguchi analiz metodu ile segman aşınma analizinde, deney parametreleri dört adet faktör olarak kabul edilmiştir. Faktörler yük(F), hız(V), sıcaklık(T) ve kaplama(K) olarak tanımlanmıştır. Tanımlanan faktörler Tablo 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5.3. Faktörler ve seviyeleri

Faktörler	Seviyeler		
	I	II	III
A: Yük(F)	60	80	100
B: Hız(V)	30	90	150
C: Sıcaklık(T)	50	70	90
D: Kaplama(K)	Cr	NiB	WCNiB

Yukarıda tanımlanan faktörlerin Minitab 15 programına seçilen diziye uygun şekilde girilmesi gerekmektedir. Bu dizi deney şartları ve parametrelerinin durumuna göre belirlenir. Minitab 15 programı, faktörleri ve seviyeleri göz önünde bulundurarak en uygun diziye seçme imkânı sunar. Seçilen diziye göre program uygun dizi yapısını oluşturur. Oluşturulan bu dizi Tablo 5.4’de gösterilmiştir.

Minitab 15 programına girilen faktörler den sonra Taguchi analizine geçilir. Taguchi analizinde, etkileşimler, sinyal/gürültü oranları ve analiz opsiyonları seçilir.

Taguchi deneysel metodunda kalite karakteristiğini ifade eden sinyal/gürültü oranı bir performans ölçütüdür. Örneğin deneysel durum için alınan 5 adet aşınma oranı tek bir S/N oranı ile ifade edilebilir (İdiz, 1999).

Aşınma deneyleri için uygun olan Taguchi analiz metodu en küçük en iyi (Smaller is better) durumudur. Çalışmada bu duruma göre analizler yapılmıştır. Yapılan Taguchi analizi metodunda seçilen performans karakteristiğinin, en küçük en iyi durumunun sinyal/gürültü oranı aşağıda verilmiştir.

Tablo 5.4. Hazırlanan L<sub>27</sub> dizisi

L <sub>27</sub> Deneyler	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1
4	1	2	2	2
5	1	2	2	2
6	1	2	2	2
7	1	3	3	3
8	1	3	3	3
9	1	3	3	3
10	2	1	2	3
11	2	1	2	3
12	2	1	2	3
13	2	2	3	1
14	2	2	3	1
15	2	2	3	1
16	2	3	1	2
17	2	3	1	2
18	2	3	1	2
19	3	1	3	2
20	3	1	3	2
21	3	1	3	2
22	3	2	1	3
23	3	2	1	3
24	3	2	1	3
25	3	3	2	1
26	3	3	2	1
27	3	3	2	1

Faktör tanımlamalarının ve deney sonuçlarının seçilen L<sub>27</sub> ortogonal diziye uygun olarak Minitab 15 programı Worksheet sayfasına girilişi Tablo 5.5’de verilmiştir.

Tablo 5.5. Faktörlerin ve deney sonuçlarının programa girilişi

A (F:Yük)	B(V:Hız)	C(T:Sıcaklık)	D(K:Kaplama)	E(WR: Aşınma Oranı)
60	30	50	Cr	12,17949
60	30	70	NiB	10,5068
60	30	90	WCNiB	6,892231
60	90	50	NiB	10,5068
60	90	70	WCNiB	6,265664
60	90	90	Cr	10,25641
60	150	50	WCNiB	6,265664
60	150	70	Cr	9,615385
60	150	90	NiB	8,034611
80	30	50	NiB	11,74289
80	30	70	WCNiB	9,398496
80	30	90	Cr	11,66667
80	90	50	WCNiB	8,145363
80	90	70	Cr	11,53846
80	90	90	NiB	9,888752
80	150	50	Cr	10,25641
80	150	70	NiB	9,270705
80	150	90	WCNiB	6,892231
100	30	50	WCNiB	11,2782
100	30	70	Cr	13,46154
100	30	90	NiB	11,31026
100	90	50	Cr	12,82051
100	90	70	NiB	11,74289
100	90	90	WCNiB	8,77193
100	150	50	NiB	11,12485
100	150	70	WCNiB	8,145363
100	150	90	Cr	10,38462

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

n : gözlem sayısı

$y_i$  : gözlem değeri

Faktör tanımlarına göre segman aşınma oranlarının S/N oranları Tablo 5.6'da verilmiştir. Tabloda değerler hazırlanan diziye uygun olarak karşılıklı yazılmıştır. Daha sonra faktörlerin en küçük en iyi sonuçları verilecektir.

Tablo 5.6. Segman aşınması S/N oranları

Yük(N) F	Hız(d/d) V	Sıcaklık(°C) T	Kaplama K	Aşınma Oranı WR	S/N Oranı SNRA1
60	30	50	Cr	12,17949	-21,7126
60	30	70	NiB	10,5068	-20,4294
60	30	90	WCNiB	6,892231	-16,7672
60	90	50	NiB	10,5068	-20,4294
60	90	70	WCNiB	6,265664	-15,9393
60	90	90	Cr	10,25641	-20,2199
60	150	50	WCNiB	6,265664	-15,9393
60	150	70	Cr	9,615385	-19,6593
60	150	90	NiB	8,034611	-18,0993
80	30	50	NiB	11,74289	-21,3955
80	30	70	WCNiB	9,398496	-19,4612
80	30	90	Cr	11,66667	-21,3389
80	90	50	WCNiB	8,145363	-18,2182
80	90	70	Cr	11,53846	-21,243
80	90	90	NiB	9,888752	-19,9028
80	150	50	Cr	10,25641	-20,2199
80	150	70	NiB	9,270705	-19,3423
80	150	90	WCNiB	6,892231	-16,7672
100	30	50	WCNiB	11,2782	-21,0448
100	30	70	Cr	13,46154	-22,5819
100	30	90	NiB	11,31026	-21,0695
100	90	50	Cr	12,82051	-22,1581
100	90	70	NiB	11,74289	-21,3955
100	90	90	WCNiB	8,77193	-18,8619
100	150	50	NiB	11,12485	-20,9259
100	150	70	WCNiB	8,145363	-18,2182
100	150	90	Cr	10,38462	-20,3278

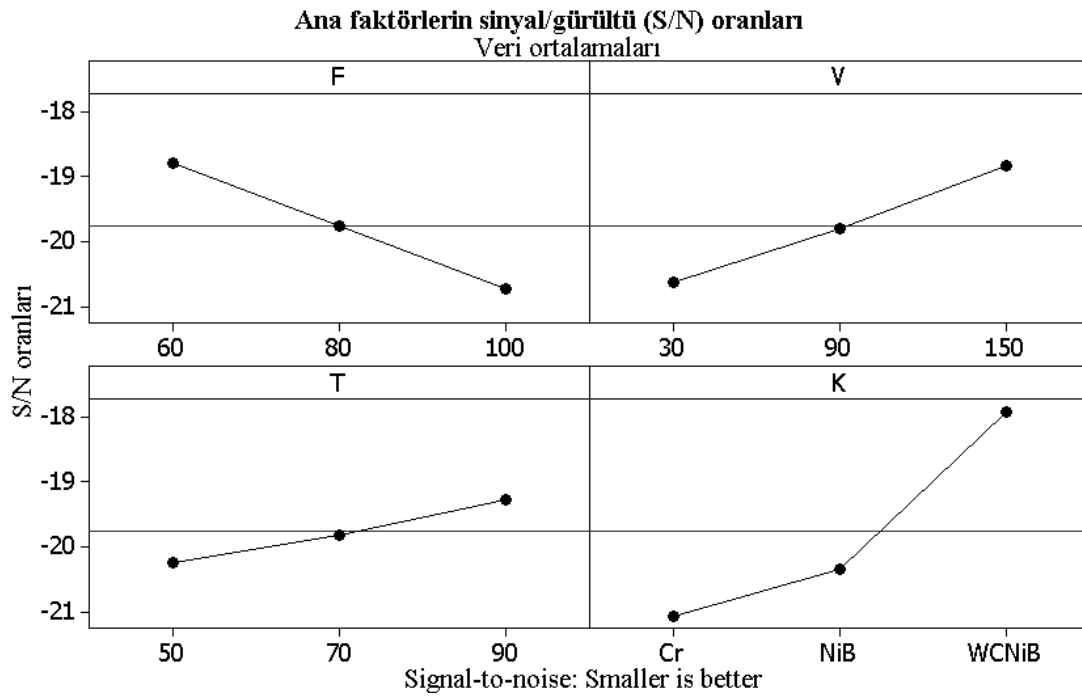
Taguchi analizinde faktörlerin seviyelerine göre S/N oranları Tablo 5.7’de özetlenmiştir. Burada görüldüğü gibi yükün (F) birinci, hızın (V) üçüncü, sıcaklığın (T) üçüncü ve kaplamaların üçüncü seviyesi en küçük en iyi sonuçtur. Düşük yükte, yüksek hızda, yüksek sıcaklıkta ve WCNiB kaplamada aşınma oranları en düşük seviyededir.



Tablo 5.7. En küçük en iyiye göre S/N oran sonuçları

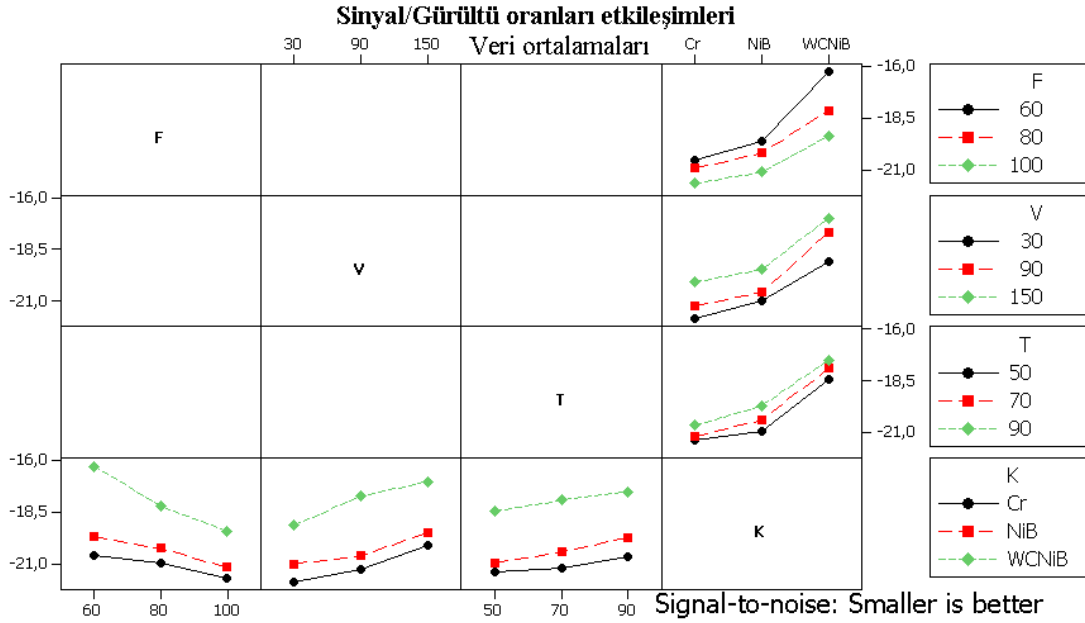
Level	Yük(N)	Hız(d/d)	Sıcaklık(°C)	Kaplama
	F	V	T	K
1	-18,8	-20,64	-20,23	-21,05
2	-19,77	-19,82	-19,81	-20,33
3	-20,73	-18,83	-19,26	-17,91
Delta	1,93	1,81	0,97	3,14
Rank	2	3	4	1

S/N oranlarının daha iyi anlaşılabilmesi için grafik şeklinde gösterimi Şekil 5.17'de yapılmıştır. Buradan da anlaşılacağı üzere yükün artması ile aşınma artmaktadır. Sıcaklık ve hızın artması ile aşınma oranı azalmaktadır. Kaplamalarda ise sertlik değeri en yüksek olan WCNiB kaplamada aşınma oranı en düşük seviyededir.



Şekil 5.17. Faktörlerin S/N oranları

Faktörlerin birbiri ile etkileşimlerinin S/N oranları Şekil 5.18'de verilmiştir.



Şekil 5.18. Faktör etkileşimlerinin S/N oranları

Varyans analizi tablosu (ANOVA), kaplamaların ve faktörlerin aşınma oranları üzerindeki etkisi ve performanslarının anlaşılması için hazırlanmış istatistiksel verilerin bulunduğu tablodur. Analizlerde genel doğrusal metot kullanılarak varyans analizi yapılmıştır.

Minitab 15 programı ile ANOVA tablosu düzenlenirken, test işlemini kolaylaştıracak bir P değeri üretilmektedir. Bu P değeri  $H_0$  hipotezini reddedilmesine yönelik en küçük anlamlılık düzeyini temsil etmektedir. Program çıktısında  $P=0,000$  olarak çok küçük bir değer olarak hesaplanmıştır. Hazırlanan analiz tablosu Tablo 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.8. Segman aşınması için ANOVA tablosu (<sup>a</sup> % 99,5 - <sup>b</sup> %95 Güven aralıkları)

Faktörler	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SST)	Varyans (V)	F değeri	F tablo değeri	P değeri
F(Yük)	2	16,796	8,398	216,31	14,54 <sup>a</sup>	0,000
V(Hız)	2	14,802	7,401	190,62	14,54 <sup>a</sup>	0,000
T(Sıcaklık)	2	4,2187	2,109	54,33	14,54 <sup>a</sup>	0,000
K(Kaplama)	2	48,653	24,326	626,57	14,54 <sup>a</sup>	0,000
F*K	4	3,8431	0,9607	24,75	12,03 <sup>a</sup>	0,001
V*K	4	0,8737	0,2184	5,63	4,53 <sup>b</sup>	0,031
T*K	4	0,2356	0,0589	1,52		0,308
Hata	6	0,233	0,0388			
Toplam	26	89,656				

### 5.7.2. Gömlek aşınma analizi

Gömlek aşınma analizinde, segman aşınmasında kullanılan L<sub>27</sub> dizisi, faktörler, seviyeler ve Taguchi analiz seçenekleri kullanılmıştır. Aşağıda sonuçlar sıra ile verilmiştir.

Faktör tanımlarına göre gömlek aşınma oranlarının S/N oranları Tablo 5.9'da verilmiştir. Tabloda değerler hazırlanan diziye uygun olarak karşılıklı yazılmıştır. Daha sonra faktörlerin en küçük en iyi sonuçları verilecektir.

Tablo 5.9. Gömlek aşınması S/N oranları

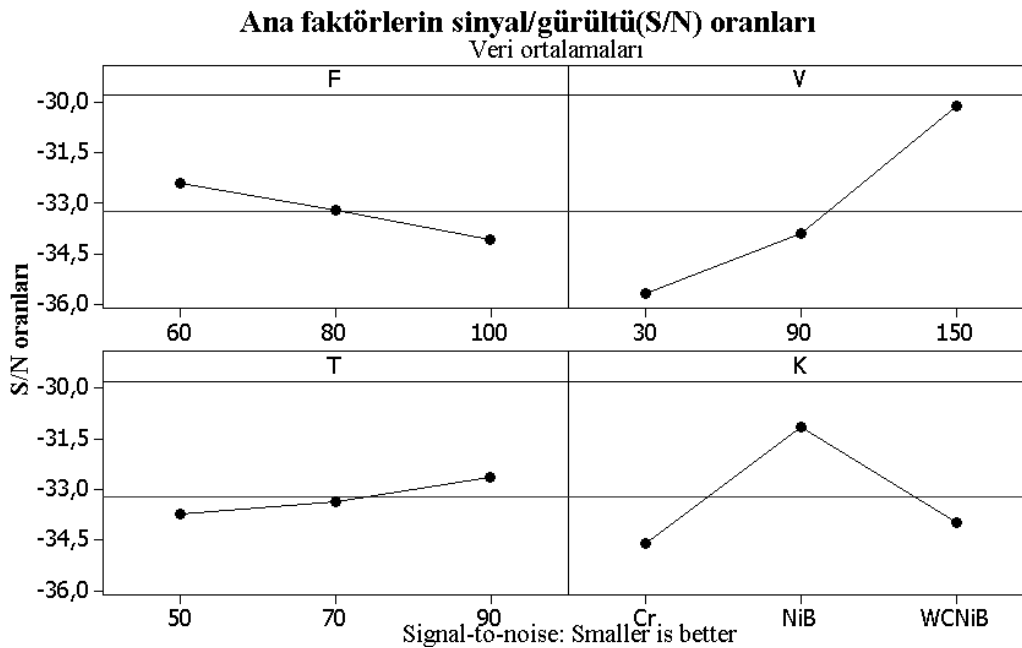
Yük(N)	Hız(d/d)	Sıcaklık(°C)	Kaplama	Aşınma Oranı	S/N Oranı
F	V	T	K	WR	SNRA1
60	30	50	Cr	71,794872	-37,1219
60	30	70	NiB	38,936959	-31,8072
60	30	90	WCNiB	38,936959	-31,8072
60	90	50	NiB	37,082818	-31,3835
60	90	70	WCNiB	52,130326	-34,3418
60	90	90	Cr	51,282051	-34,1993
60	150	50	WCNiB	33,834586	-30,5872
60	150	70	Cr	34,615385	-30,7854
60	150	90	NiB	20,395550	-26,1907
80	30	50	NiB	46,353523	-33,3217
80	30	70	WCNiB	67,669173	-36,6078
80	30	90	Cr	67,307692	-36,5613
80	90	50	WCNiB	56,390977	-35,0242
80	90	70	Cr	57,692308	-35,2224
80	90	90	NiB	37,082818	-31,3835
80	150	50	Cr	38,461538	-31,7005
80	150	70	NiB	27,812114	-28,8847
80	150	90	WCNiB	31,954887	-30,0907
100	30	50	WCNiB	78,947368	-37,9468
100	30	70	Cr	80,769231	-38,1449
100	30	90	NiB	51,915946	-34,3060
100	90	50	Cr	64,102564	-36,1375
100	90	70	NiB	43,263288	-32,7224
100	90	90	WCNiB	53,258145	-34,5277
100	150	50	NiB	32,138443	-30,1405
100	150	70	WCNiB	37,593985	-31,5024
100	150	90	Cr	36,538462	-31,2550

Taguchi analizinde faktörlerin seviyelerine göre S/N oranları Tablo 5.10'da özetlenmiştir. Burada görüldüğü gibi yükün (F) birinci, hızın (V) üçüncü, sıcaklığın (T) üçüncü ve kaplamaların ikinci seviyesi en küçük en iyi sonuçtur. Düşük yükte, yüksek hızda, yüksek sıcaklıkta ve NiB kaplamada aşınma oranları en düşük seviyededir.

Tablo 5.10. En küçük en iyiye göre S/N oran sonuçları

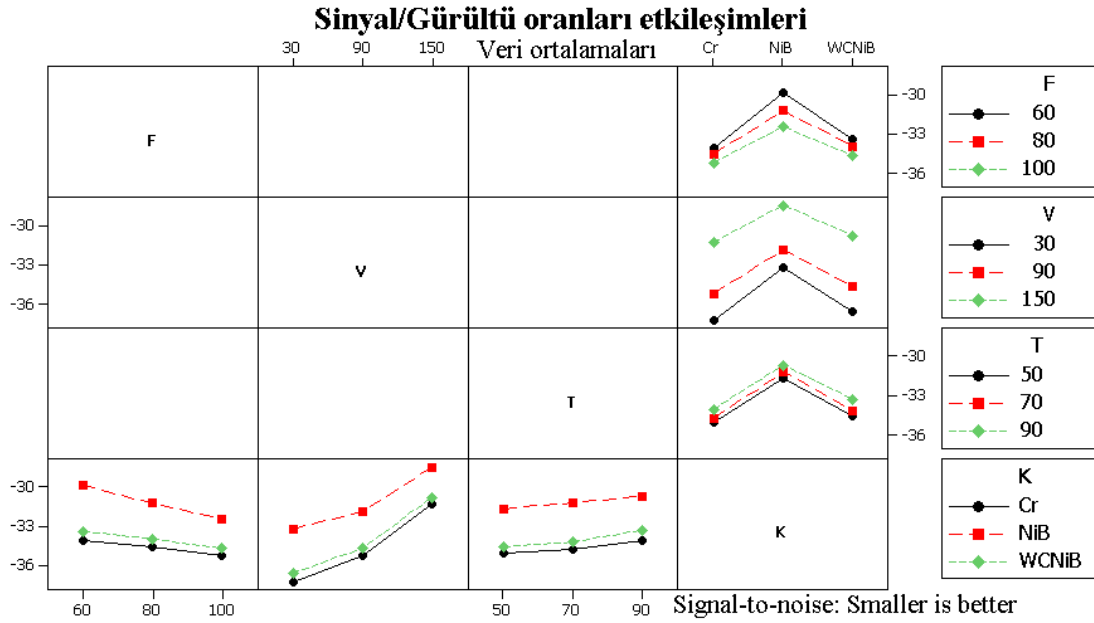
Level	Yük(N) F	Hız(d/d) V	Sıcaklık(°C) T	Kaplama K
1	-32,39	-35,66	-33,71	-34,57
2	-33,20	-33,88	-33,34	-31,13
3	-34,08	-30,13	-32,63	-33,97
Delta	1,68	5,53	1,08	3,44
Rank	3	1	4	2

S/N oranlarının daha iyi anlaşılabilmesi için grafik şeklinde gösterimi Şekil 5.19'da yapılmıştır. Buradan da anlaşılacağı üzere yükün artması ile aşınma artmaktadır. Sıcaklık ve hızın artması ile aşınma oranı azalmaktadır. Kaplamalarda ise sertlik değeri en yüksek olan Cr ve WCNiB kaplamaların gömlek yüzeyinde oluşturdukları aşınma oranı NiB kaplamaya göre daha yüksektir.



Şekil 5.19. Faktörlerin S/N oranları

Faktörlerin birbiri ile etkileşimlerinin S/N oranları Şekil 5.20’de verilmiştir.



Şekil 5.20. Faktör etkileşimlerinin S/N oranları

Analizlerde genel doğrusal metot kullanılarak varyans analizi yapılmıştır. Program çıktısında ana faktörlerin P değerleri 0-0,005 olarak çok küçük bir değer olarak hesaplanmıştır. Etkileşimlerin ise P değerleri 0,132-0,921 olarak hesaplanmıştır. Etkileşimlerin F değerleri 5’ten küçük olduğu için dikkate alınmazlar. Hazırlanan analiz tablosu Tablo 5.11’de verilmiştir.

Tablo 5.11. Gömlek aşınması için ANOVA tablosu

Faktörler	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SST)	Varyans (V)	F değeri	F tablo değeri	P değeri
F(Yük)	2	12,752	6,376	35,42	14,54 <sup>a</sup>	0,000
V(Hız)	2	143,657	71,828	399,07	14,54 <sup>a</sup>	0,000
T(Sıcaklık)	2	5,43	2,715	15,08	14,54 <sup>a</sup>	0,005
K(Kaplama)	2	60,926	30,463	169,25	14,54 <sup>a</sup>	0,000
F*K	4	1,955	0,488	2,71		0,132
V*K	4	1,464	0,366	2,03		0,209
T*K	4	0,154	0,038	0,21		0,921
Hata	6	1,080	0,180			
Toplam	26	227,417				

<sup>a</sup> % 99,5 Güven aralığı

### 5.8. Sürtünme Katsayısı Sonuçları

Sürtünme deneyleri, segman numunelerinin üzerine literatürde belirlenen yüklerin uygulanması ve segman numunelerinin gömlek numuneleri yüzeyine teması ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Bolander ve arkadaşlarının (Bolander,2004) segman ve gömlek numunelerinin sürtünme davranışlarını inceledikleri aşınma cihazının benzeri kullanılmıştır. Bu cihazda, segman numunesi sabit, gömlek numunesi ise hareketli ve ısıtmalı bir tabla üzerine bağlanmış durumdadır. Sürtünme kuvveti ölçümünde, segman taşıyıcıyı ve deneylerde uygulanan normal kuvveti gömlek numunesine ileten kol üzerine yerleştirilen üç eksenli kuvvet sensörü ve veri aktarma sistemi kullanılmıştır.

Labview programında yazılan program sayesinde açı ve ölçülen kuvve eşleştirilebilmektedir. Tezgâhın bir turunda veri aktarma sistemi 1000 veri işlemektedir. Sürtünme kuvvetlerinin ölçülmesinde tezgâh 100 tur döndürülmüş ve ölçülen 100000 verinin ortalaması alınarak değerler işlenmiştir. Yani tezgâhın her 0,3° 'lik turunda bir veri alınmış ve bu veri sayısı 100'e ulaştınca ortalaması alınarak her 0,3°'deki sürtünme kuvveti hesaplanmıştır. Labview programında yazılan program ile devir başına alınacak ölçüm sayısı, tezgâhın kaç devir yapacağı ve ne kadar miktarda verinin işleme alınmayacağı gibi seçenekler sunulmaktadır. Aşağıda sürtünme deneylerinde deney parametresi olarak seçilen, strok, sıcaklık, yük, devir ve yağ özelliklerinin seçilme kriterleri verilmiştir.

Sürtünme deneylerinde seçilen sıcaklık değerleri Truhan ve arkadaşlarının (Truhan, 2005), Selçuk ve arkadaşlarının (Selçuk, 2002), Cho ve arkadaşlarının (Cho, 2000) yapmış oldukları çalışmalarda içten yanmalı motorların gerçek çalışma şartlarında gömlek çevresindeki sıcaklığın, deney ortamında sağlanması için tercih ettikleri 30, 50, 70, 90°C sıcaklık değerleridir (Mc Queen, 2005-Tung, 2003).

Sürtünme deneylerinde seçilen yağın özellikleri Truhan ve arkadaşlarının (Truhan, 2005) yapmış olduğu çalışmada kullandıkları yağ ile benzer özelliktedir. Deneyler de günümüzde içten yanmalı motorlarda en yaygın olarak kullanılmakta olan 10W40 yarı sentetik yağ tercih edilmiştir. Deneylerde kullanılan yağ miktarı Bolander ve

arkadaşlarının (Bolender, 2004; 2005), Tung ve arkadaşlarının (Tung, 2003), çalışmalarında kullandıkları 0,5 ml/h miktarındadır.

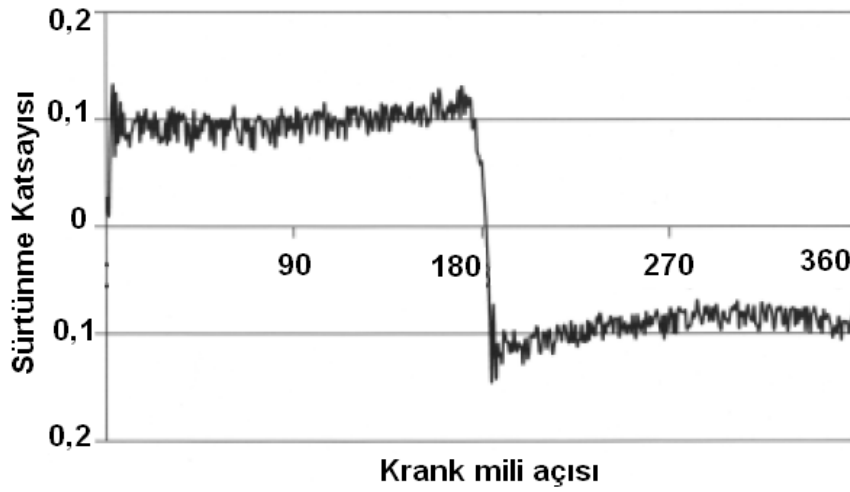
Sürtünme deneylerinde yük seçimi için, Ryk ve arkadaşlarının (Ryk, 2002; 2005), Bolender ve arkadaşlarının (Bolender, 2004; 2005), Ma ve arkadaşlarının (Ma, 2004), Tung ve arkadaşlarının (Tung, 2003; 2004), yapmış oldukları çalışmada kullandıkları 60, 80, 100 N' luk yükler tercih edilmiştir (Truhan, 2005).

Sürtünme deneylerinde devir seçimi için, Bolender ve arkadaşlarının (Bolender, 2004; 2005) yapmış oldukları çalışmada kullandıkları 30, 60, 90, 120, 150 d/d' lar tercih edilmiştir.

Sürtünme deneylerinde strok seçimi için, tercih edilen 100 mm strok Ryk ve arkadaşlarının (Ryk, 2002; 2005; 2006) da kullandığı strok değeri ile aynıdır. Ayrıca deneylerde tercih edilen gömlek numunelerinin boylarının efektif şekilde kullanılmasına da seçilen strok uygundur. Strok boyunun uzaması ile elde edilmek istenen piston hareketindeki sürtünme katsayısı karakteristiği daha iyi belirlenebilmektedir.

Literatüre uygun şekilde sürtünme katsayısının belirlenmesi için bir dakikalık periyotlarda ölçümler yapılmıştır. Ayrıca deneylerde yeni segman ve gömlek numuneleri kullanılmıştır. Her deney için kullanılan yağda yenilenmiştir (Truhan, 2005).

Deneyler yapılırken literatürde segman gömlek sürtünmesinin karakterize edildiği (Cho,2000;Bolender,2004-2005;Noorman,2000;Andersson,2002), Şekil 5.21'de görülen sürtünme katsayısı eğrisi yakalanmış ve farklı koşullardaki grafikler çizilmiştir. Segman ve silindir gömleğinin üst ölü nokta ve alt ölü nokta bölgelerinde sürtünme katsayılarının değişimi grafikte gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi ölü bölgelerdeki sürtünme katsayısı diğer bölgelerle karşılaştırıldığında oldukça yüksektir. Bu grafikler yaygın olarak U veya  $\cap$  şeklini alırlar. Bu tür grafikler birçok çalışmada çizilerek sürtünme katsayısı gösterilmiştir. (Akalin,1998-Glidewell,1998-Dearlove,1995-Durga,1998).



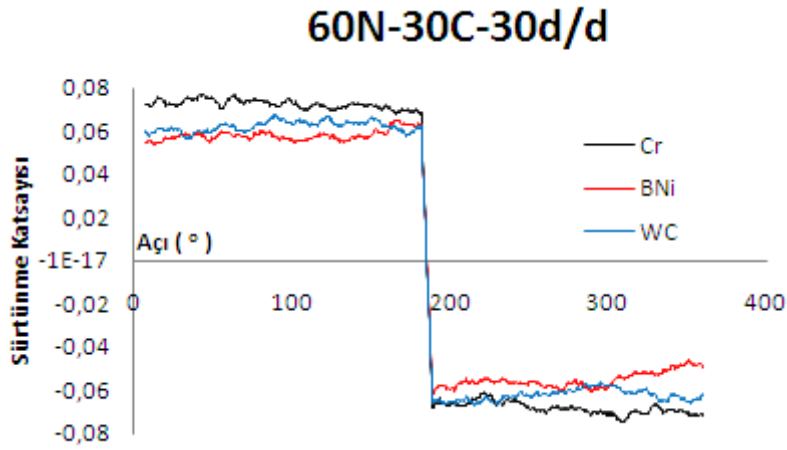
Şekil 5.21. U şekilli krank açısına göre sürtünme katsayısı (Andersson,2002)

Sürtünme katsayısı ölçümleri, aşınma cihazında farklı yük, sıcaklık ve devirlerde krom, NiCrBSi ve %60WC-%40NiCrBSi kaplı segmanların dökme demir gömlek üzerinde gerçekleştirilmiştir. Segman numunelerinin, dökme demir gömlek numuneleri üzerindeki sürtünme performansı aşağıdaki grafiklerde verilmiştir. Deney koşullarında sıcaklıklar 30, 50, 70 ve 90° C, uygulanan yükler 60,80 ve 100N, devir aralıkları ise 30, 60, 90, 120 ve 150 d/d' dir. Grafikler, sıcaklık ve yük değişimine göre sıra ile verilmiştir.

Şekil 5.22-26'da Krom, NiCrBSi ve %60WC-%40NiCrBSi kaplı segmanların 30°C ve 60 N yük altında tüm devirlerdeki sürtünme katsayısı değişimleri verilmiştir. Tüm devirlerde, NiB (NiCrBSi) ve WC (%60WC-%40NiCrBSi) kaplamaların sürtünme katsayıları Cr kaplamasının sürtünme katsayısından daha düşüktür.

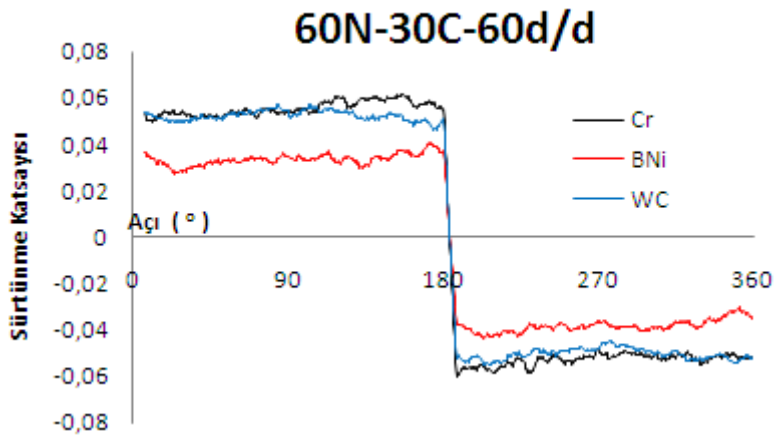
Şekil 5.22'de 30d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamasının sürtünme katsayısı 0,07 iken WC kaplamada %15 azalarak 0,06' ya, NiB kaplamada ise %30 azalarak 0,05'e düşmektedir.





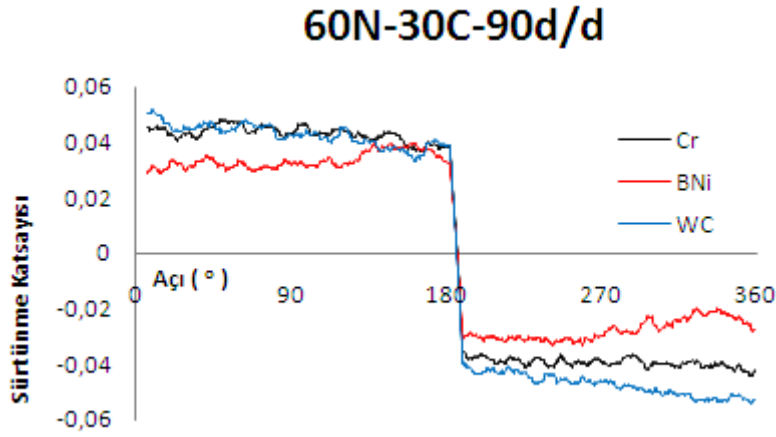
Şekil 5.22. 30°C, 60N ve 30 d/d' daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.23'da 60d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,05 iken WC takviyeli kaplamada %5 azalarak 0,0475'e, NiB kaplamada ise bu değerden %30 azalarak 0,03'e düşmektedir.



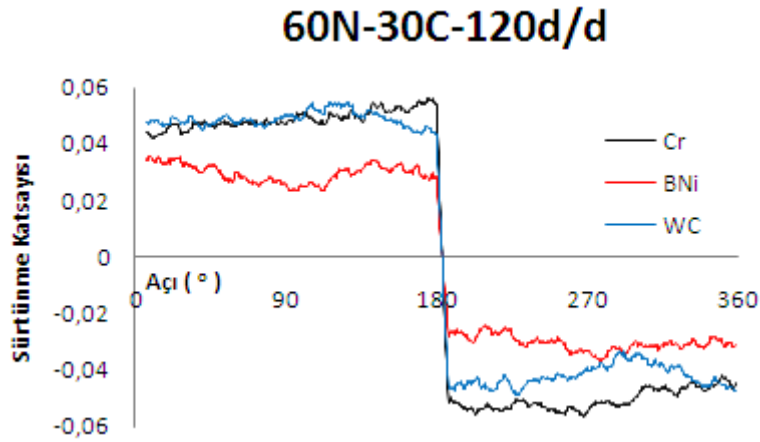
Şekil 5.23. 30°C, 60N ve 60 d/d' daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.24'de 90d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,045 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri de bu değere çok yakındır. NiB kaplamada ise bu değerden %33 azalarak 0,03'e düşmektedir.



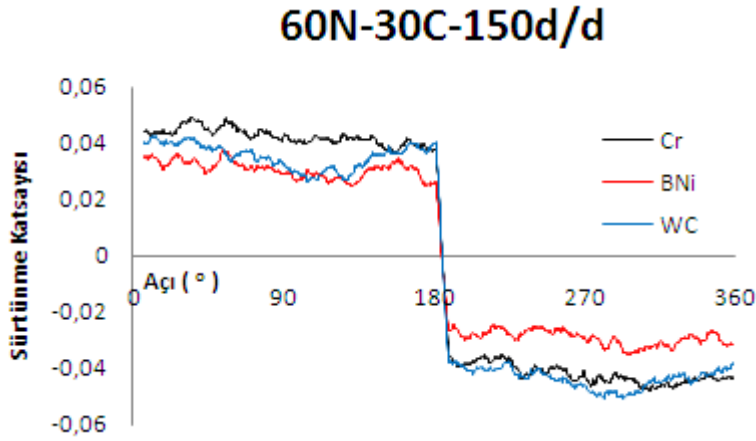
Şekil 5.24. 30°C, 60N ve 90 d/d' daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.25'de 120d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,05 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden %10 daha düşük olarak 0,045'tir. NiB kaplamada ise bu değerden %40 azalarak 0,03'e düşmektedir.



Şekil 5.25. 30°C, 60N ve 120 d/d' daki sürtünme katsayıları

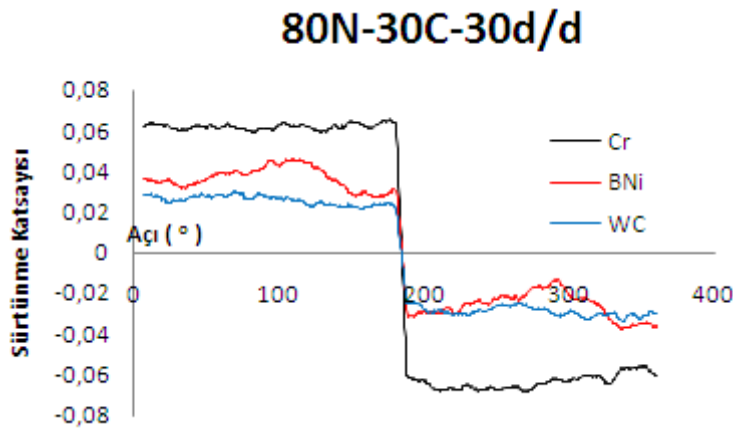
Şekil 5.26'da 150d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,045 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden %10 daha düşük olarak 0,04'tür. NiB kaplamada ise bu değerden %20 azalarak 0,035'e düşmektedir.



Şekil 5.26. 30°C, 60N ve 150d/d'daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.27-31'de Krom, NiCrBSi ve %60WC-%40NiCrBSi kaplı segmanların 30°C ve 80 N yük altında tüm devirlerdeki sürtünme katsayısı değişimleri verilmiştir. Tüm devirlerde, NiB (NiCrBSi) ve WC (%60WC-%40NiCrBSi) kaplamaların sürtünme katsayıları Cr kaplamasının sürtünme katsayısından daha düşüktür.

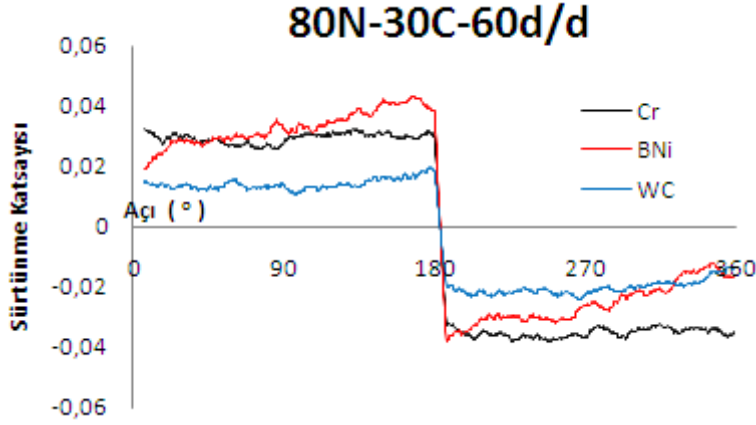
Şekil 5.27'de 30 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamasının sürtünme katsayısı 0,06 iken WC takviyeli kaplamasının sürtünme katsayısı değeri bu değerden %50 daha düşük olarak 0,03'tür. NiB kaplamada ise bu değerden %30 azalarak 0,04'e düşmektedir.



Şekil 5.27. 30°C, 80N ve 30d/d'daki sürtünme katsayıları

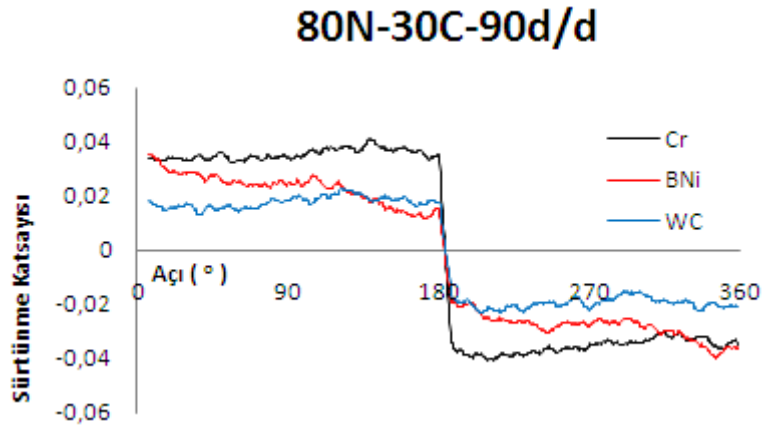
Şekil 5.28'de 60 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamasının sürtünme katsayısı 0,04 iken WC takviyeli kaplamasının sürtünme katsayısı değeri bu değerden

%25 daha düşük olarak 0,03'dir. NiB kaplamada ise bu değerden %25 azalarak 0,03'e düşmektedir.



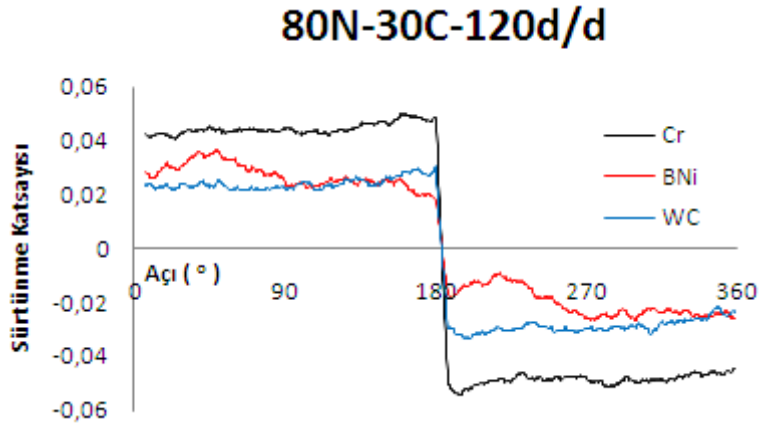
Şekil 5.28. 30°C, 80N ve 60d/d'daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.29'da 90 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,04 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden %50 daha düşük olarak 0,02'dir. NiB kaplamada ise bu değerden %33 azalarak 0,03'e düşmektedir.



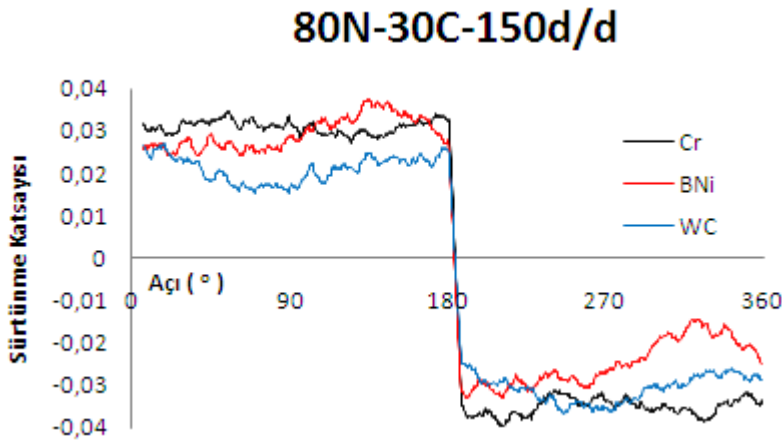
Şekil 5.29. 30°C, 80N ve 90 d/d'daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.30'da 120 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,04 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden %50 daha düşük olarak 0,02'dir. NiB kaplamada ise bu değerden %50 azalarak 0,02'e düşmektedir.



Şekil 5.30. 30°C, 80N ve 120 d/d'daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.31'de 150 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,03 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden %33 daha düşük olarak 0,02'dir. NiB kaplamada ise bu değerden %25 azalarak 0,025'e düşmektedir.

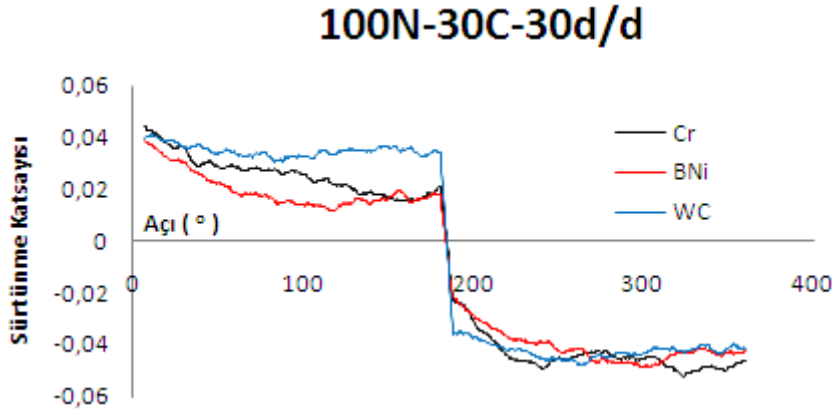


Şekil 5.31. 30°C, 80N ve 150 d/d'daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.32-36'da Krom, NiCrBSi ve %60WC-%40NiCrBSi kaplı segmanların 30°C ve 100 N yük altında tüm devirlerdeki sürtünme katsayısı değişimleri verilmiştir. Tüm devirlerde, NiB (NiCrBSi) ve WC (%60WC-%40NiCrBSi) kaplamaların sürtünme katsayıları Cr kaplamanın sürtünme katsayısından daha düşüktür.

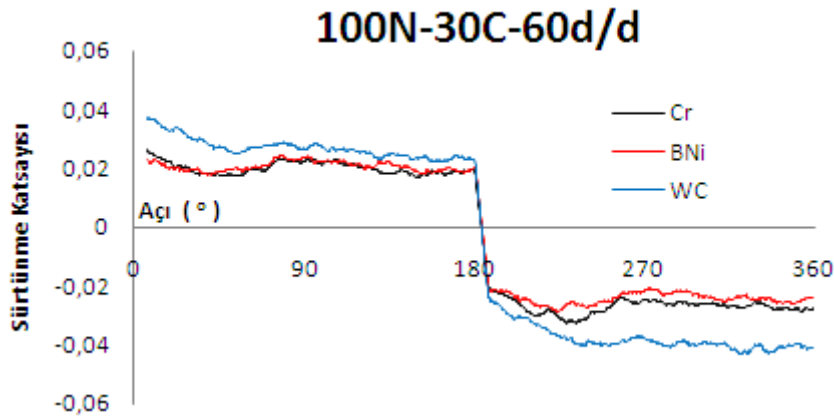
Şekil 5.32'de 100N ve 30 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,035 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu

değere yakın değerlerdedir. NiB kaplamada ise bu değerden %25 azalarak 0,025'e düşmektedir.



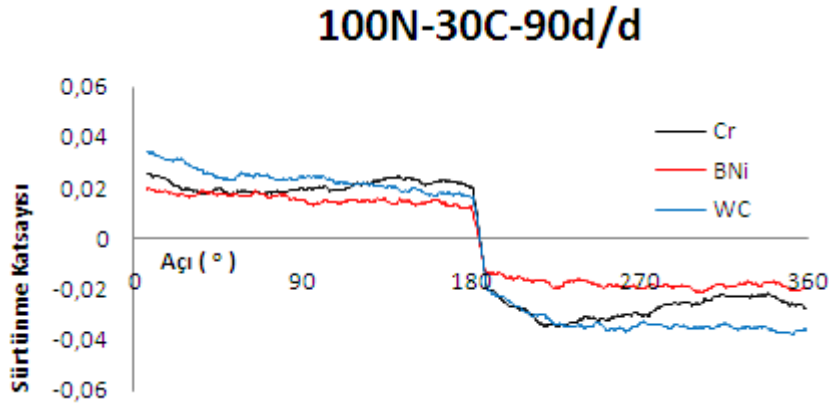
Şekil 5.32. 30°C, 100N ve 30 d/d'daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.33'de 60 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,02 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden %35 daha yüksek 0,025'dir. NiB kaplamada ise bu değerden %10 azalarak 0,018'e düşmektedir.



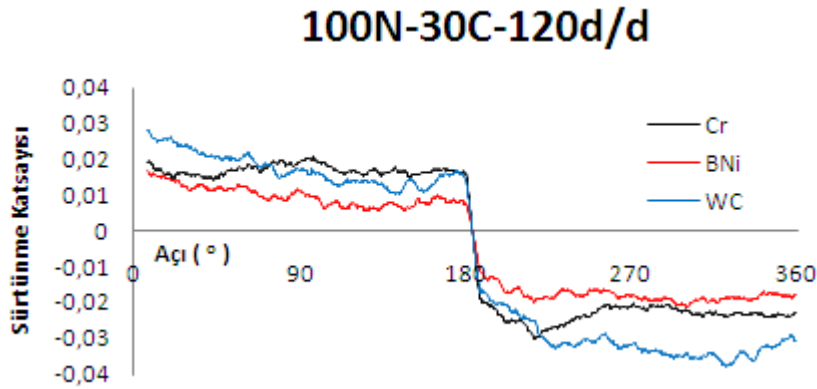
Şekil 5.33. 30°C, 100N ve 60 d/d'daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.34'de 90 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,025 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden %15 daha yüksek 0,028'dir. NiB kaplamada ise bu değerden %20 azalarak 0,02'e düşmektedir.



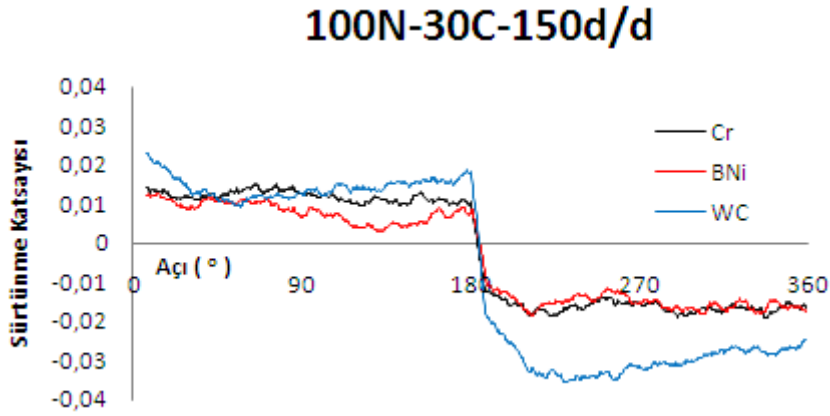
Şekil 5.34. 30°C, 100N ve 90 d/d'daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.35'de 120 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,02 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden %15 daha yüksek 0,025'dir. NiB kaplamada ise bu değerden %30 azalarak 0,015'e düşmektedir.



Şekil 5.35. 30°C, 100N ve 120 d/d'daki sürtünme katsayıları

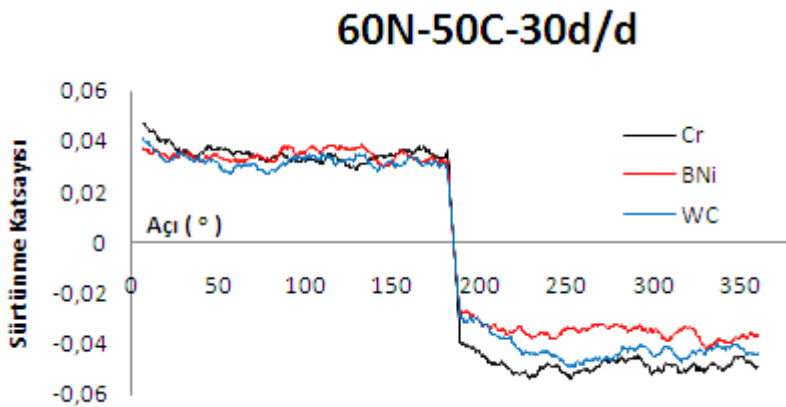
Şekil 5.36'da 150 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,015 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden %25 daha yüksek 0,02'dir. NiB kaplamada ise bu değerden %33 azalarak 0,01'e düşmektedir.



Şekil 5.36. 30°C, 100N ve 150 d/d'daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.37-41'de Krom, NiCrBSi ve %60WC-%40NiCrBSi kaplı segmanların 50°C ve 60 N yük altında tüm devirlerdeki sürtünme katsayısı değişimleri verilmiştir. Tüm devirlerde, NiB (NiCrBSi) ve WC (%60WC-%40NiCrBSi) kaplamaların sürtünme katsayıları Cr kaplamanın sürtünme katsayısından daha düşüktür.

Şekil 5.37'de 60N ve 50°C'de, 30 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,04 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden %7 daha yüksek 0,038'dir. NiB kaplamada ise bu değerden %10 azalarak 0,036'a düşmektedir.

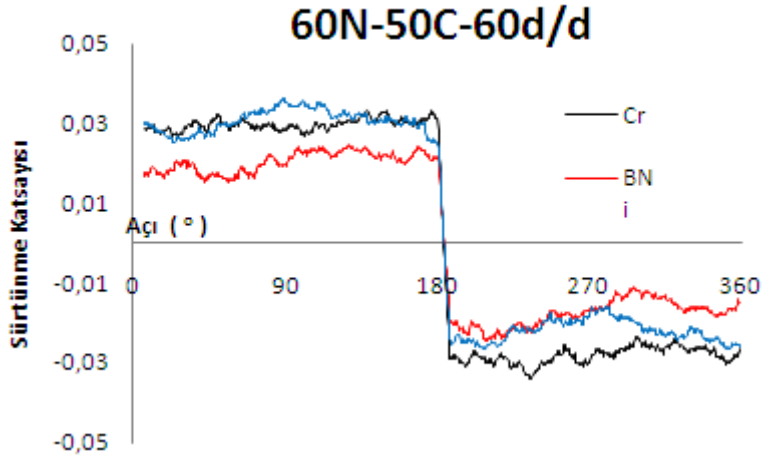


Şekil 5.37. 50°C, 60N ve 30 d/d'daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.38'de 60 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,03 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden

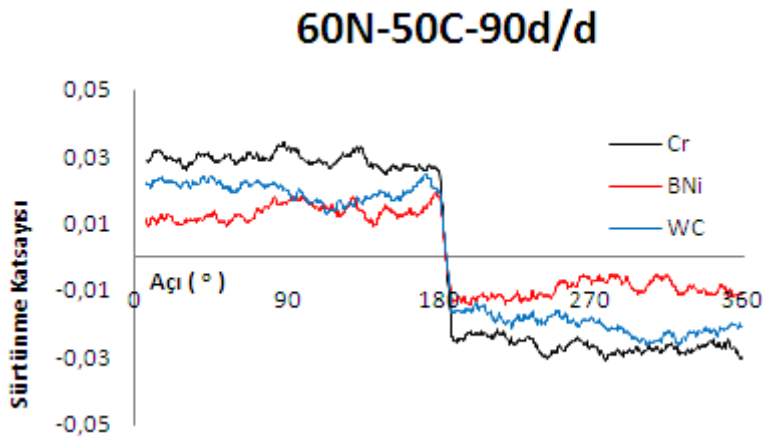


%8 daha yüksek 0,033'dür. NiB kaplamada ise bu değerden %33 azalarak 0,02'e düşmektedir.



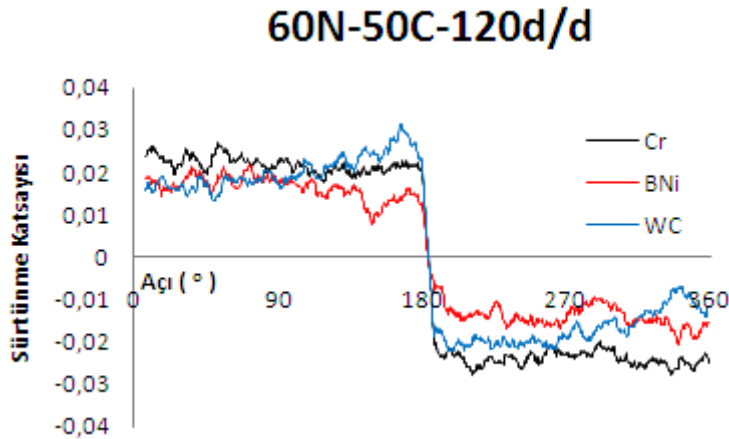
Şekil 5.38. 50°C, 60N ve 60 d/d'daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.39'da 90 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,03 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden %33 daha düşük 0,02'dir. NiB kaplamada ise bu değerden %66 azalarak 0,01'e düşmektedir.



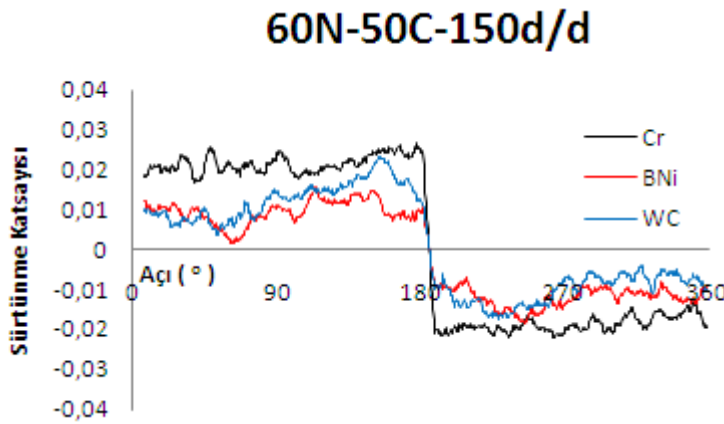
Şekil 5.39. 50°C, 60N ve 90 d/d'daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.40'da 120 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,025 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden %20 daha düşük 0,02'dir. NiB kaplamada ise bu değerden %40 azalarak 0,015'e düşmektedir.



Şekil 5.40. 50°C, 60N ve 120 d/d'daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.41'de 150 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,02 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden %25 daha düşük 0,015'dir. NiB kaplamada ise bu değerden %50 azalarak 0,01'e düşmektedir.

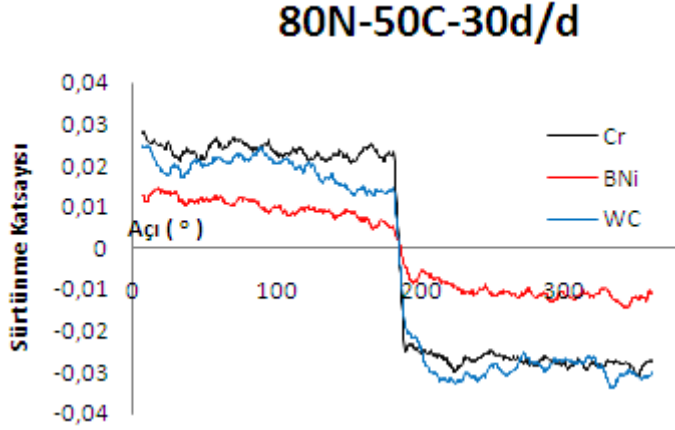


Şekil 5.41. 50°C, 60N ve 150 d/d'daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.42-46'da Krom, NiCrBSi ve %60WC-%40NiCrBSi kaplı segmanların 50°C ve 80 N yük altında tüm devirlerdeki sürtünme katsayısı değişimleri verilmiştir. Tüm devirlerde, NiB (NiCrBSi) ve WC (%60WC-%40NiCrBSi) kaplamaların sürtünme katsayıları Cr kaplamanın sürtünme katsayısından daha düşüktür.

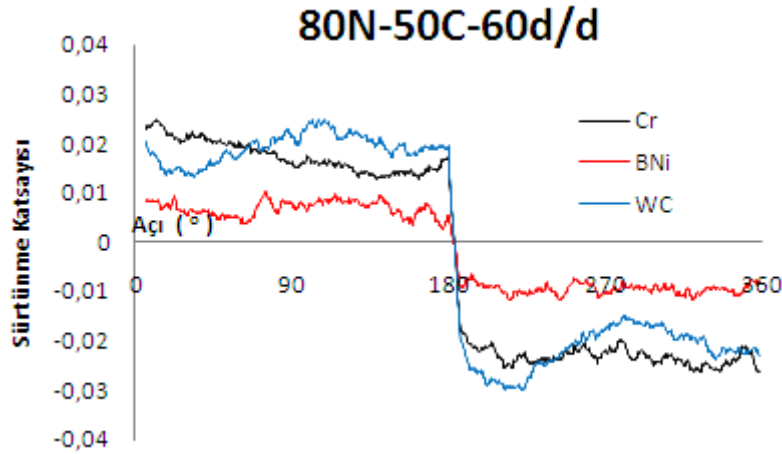
Şekil 5.42'de 30 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,025 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden

%20 daha düşük 0,02'dir. NiB kaplamada ise bu değerden %40 azalarak 0,015'e düşmektedir.



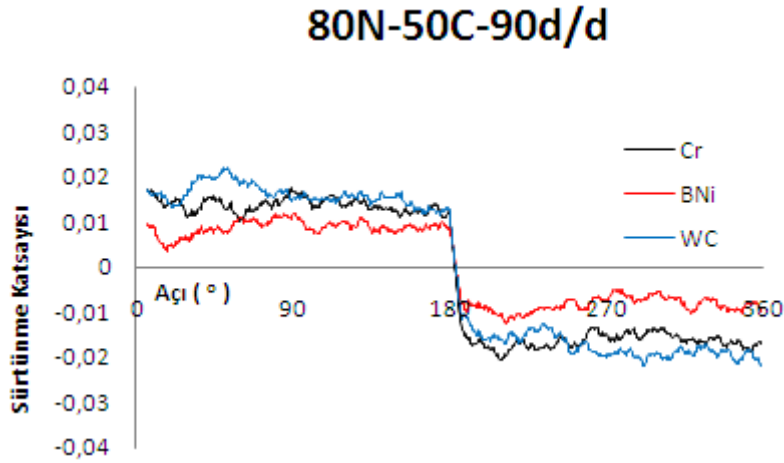
Şekil 5.42. 50°C, 80N ve 30 d/d'daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.43'de 60 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,023 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden %10 daha düşük 0,02'dir. NiB kaplamada ise bu değerden %54 azalarak 0,01'e düşmektedir.



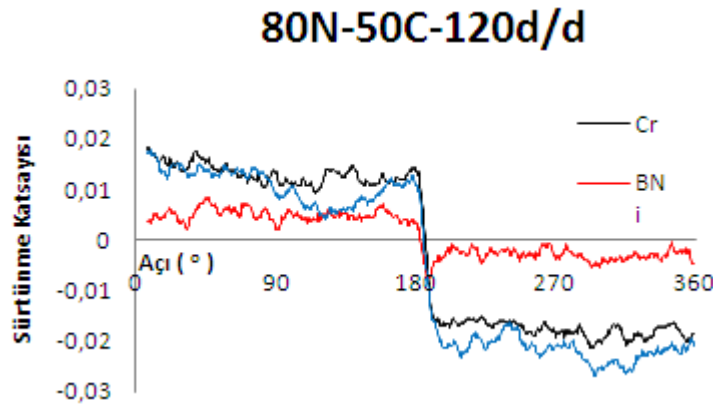
Şekil 5.43. 50°C, 80N ve 60 d/d'daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.44'de 90 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,015 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden %15 daha yüksek 0,018'dir. NiB kaplamada ise bu değerden %33 azalarak 0,01'e düşmektedir.



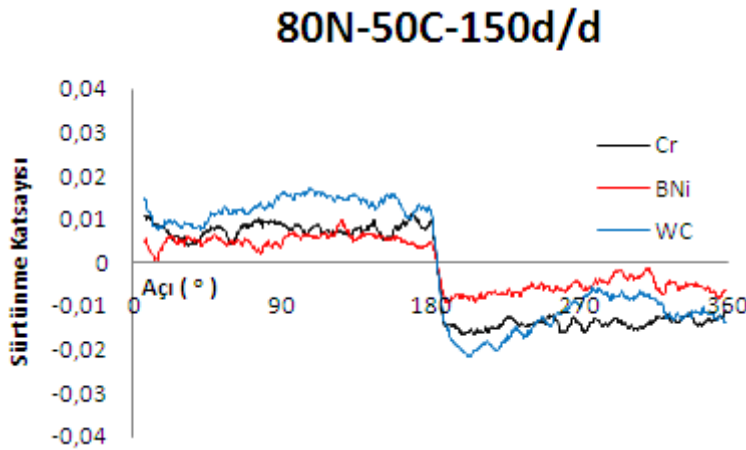
Şekil 5.44. 50°C, 80N ve 90 d/d'daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.45'de 120 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,015 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden %15 daha düşük 0,013'dir. NiB kaplamada ise bu değerden %33 azalarak 0,005'e düşmektedir.



Şekil 5.45. 50°C, 80N ve 120 d/d'daki sürtünme katsayıları

Şekil 5.46'da 150 d/d' daki sürtünme katsayıları verilmiştir. Cr kaplamanın sürtünme katsayısı 0,012 iken WC takviyeli kaplamanın sürtünme katsayısı değeri bu değerden %15 daha düşük 0,01'dir. NiB kaplamada ise bu değerden %40 azalarak 0,004'e düşmektedir.



Şekil 5.46. 50°C, 80N ve 150 d/d'daki sürtünme katsayıları

## 5.9. Aşınma Deney Sonuçları

Aşınma deneyleri, segman numunelerinin üzerine literatürde belirlenen yüklerin taşıyıcı kol yardımıyla uygulanması ve segman numunelerinin gömlek numuneleri yüzeyine teması ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Bolander (Bolander, 2004; 2005) ve arkadaşlarının segman ve gömlek numunelerinin aşınma davranışlarını inceledikleri aşınma cihazının benzeri kullanılmıştır. Aşınma deneylerinde toplam kat edilen mesafe 2000 m olarak belirlenmiştir. Deneylerde segman ve gömlek numunesi her deney için yenilenmiştir. Aşınma kaybı ağırlık kaybı ölçüm metoduna göre hassas terazide ölçülmüştür (Truhan, 2005). Hassas terazi ölçümlerinde deneylerden önce ve deneylerden sonra numuneler alkol ile yıkanmış ve hava yardımıyla temizlenmiştir. Daha sonra ölçüm işlemine geçilmiştir. Aşınma grafiklerinde farklı kaplamaların aşınmaları ayrı ayrı başlıklar halinde incelenmiştir. Farklı kaplamalı segman ve gömlek çiftlerinin aşınma oranı değerlerinde devir, sıcaklık ve yük etkisinin net şekilde görülebilmesi için birlikte verilerek karşılaştırma olanağı sunulmuştur.

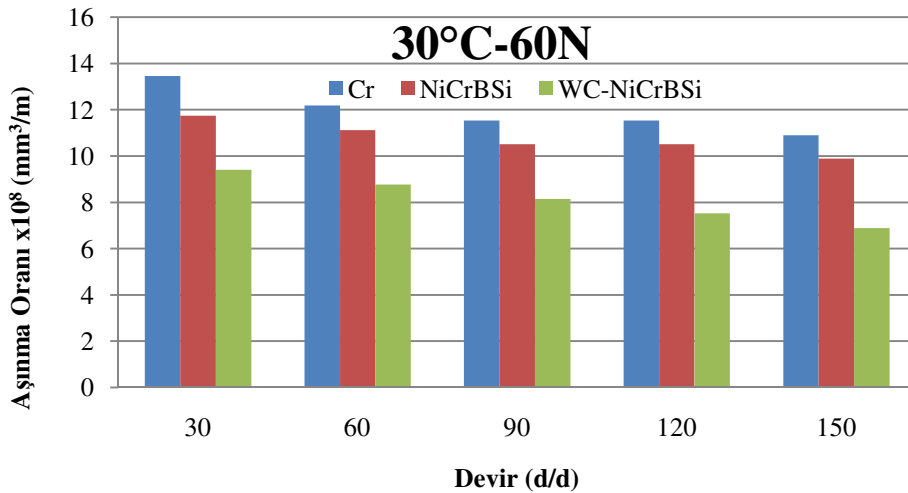
### 5.9.1. Segman aşınmaları

Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi kaplı segmanların aşınmaları farklı sıcaklıklar ve yüklerde devre bağlı olarak aşınma oranları şeklinde verilmiştir. Şekil 5.47-49'da 30°C sıcaklıkta farklı yüklerdeki aşınma oranları verilmiştir. Aşınma oranları

değerlendirilirken en fazla aşınmanın olduğu 30 d/d ve en az aşınmanın meydana geldiği 150 d/d' daki aşınma oranları karşılaştırılmıştır. Cr kaplı segmana göre NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranları %6-14 değerleri arasında, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranları %22-38 oranında azalmıştır.

Şekil 5.47'de 30°C ve 60 N'da segman aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d'da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 13,46 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 12 kadar düşerek 11,9 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 32 azalarak 9,27 olmaktadır.

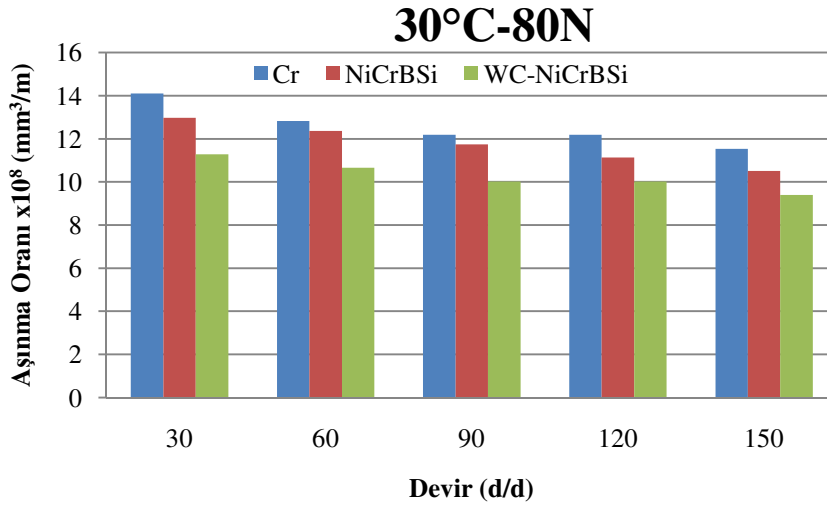
150 d/d'da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 10,9 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 8 kadar düşerek 10,02 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 38 azalarak 6,79 olmaktadır.



Şekil 5.47. 30°C ve 60 N'da segman aşınma oranları

Şekil 5.48'de 30°C ve 80 N'da segman aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d'da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 14,1 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 6 kadar düşerek 13,15 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 22 azalarak 11,1 olmaktadır.

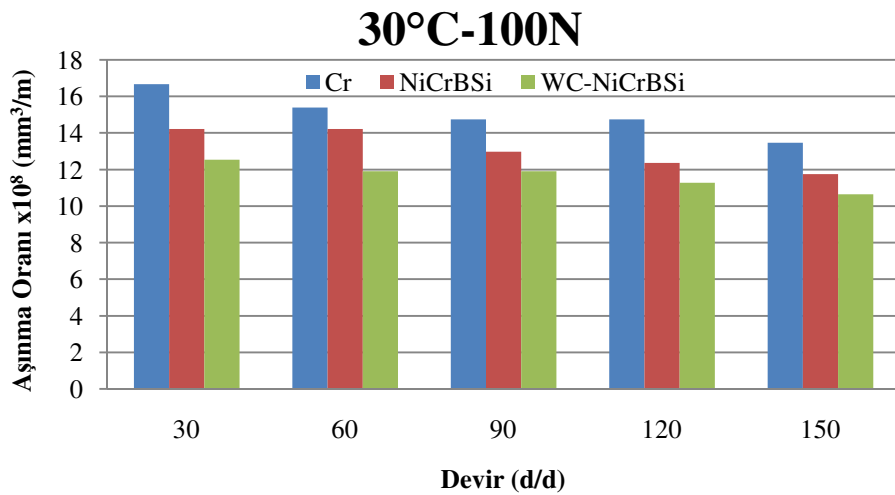
150 d/d'da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 11,5 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 9 kadar düşerek 10,65 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 20 azalarak 9,27 olmaktadır.



Şekil 5.48. 30°C ve 80 N’da segman aşınma oranları

Şekil 5.49’da 30°C ve 100 N’da segman aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d’da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 16,66 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 14 kadar düşerek 14,41 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 36 azalarak 12,36 olmaktadır.

150 d/d’da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 13,46 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 12 kadar düşerek 11,9 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 22 azalarak 10,51 olmaktadır.

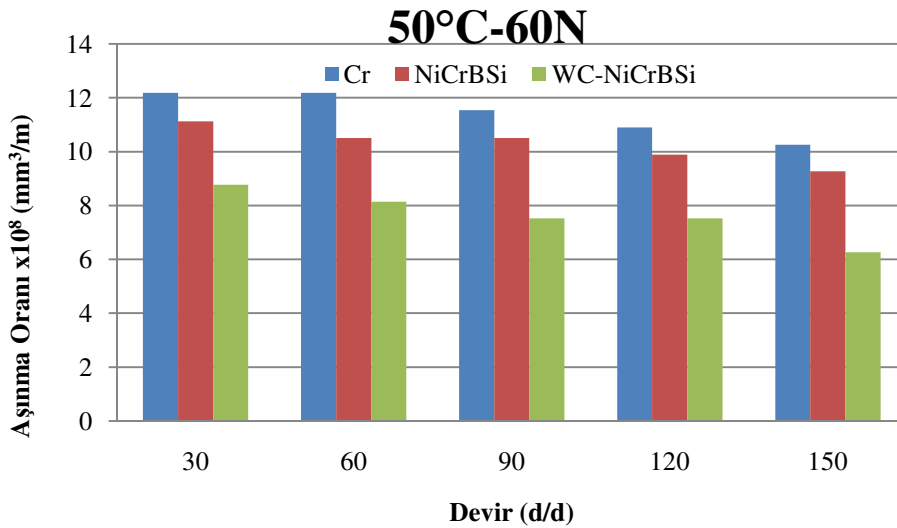


Şekil 5.49. 30°C ve 100 N’da segman aşınma oranları

Şekil 5.50-52’de 50°C sıcaklıkta farkı yüklerdeki aşınma oranları verilmiştir. Aşınma oranları değerlendirilirken en fazla aşınmanın olduğu 30 d/d ve en az aşınmanın meydana geldiği 150 d/d’ daki aşınma oranları karşılaştırılmıştır. Cr kaplı segmana göre NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranları %3-8 değerleri arasında, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranları %23-39 oranında azalmıştır.

Şekil 5.50’de 50°C ve 60 N’da segman aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d’da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 12,17 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 8 kadar düşerek 11,27 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 29 azalarak 8,65 olmaktadır.

150 d/d’da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 10,25 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 9 kadar düşerek 9,39 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 39 azalarak 6,18 olmaktadır.

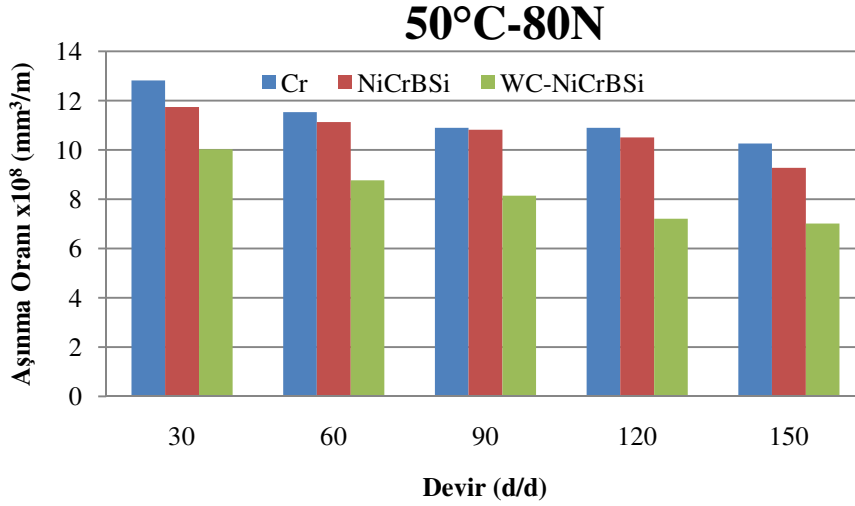


Şekil 5.50. 50°C ve 60 N’da segman aşınma oranları

Şekil 5.51’de 50°C ve 80 N’da segman aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d’da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 12,8 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 8 kadar düşerek 11,9 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 23 azalarak 9,89 olmaktadır.



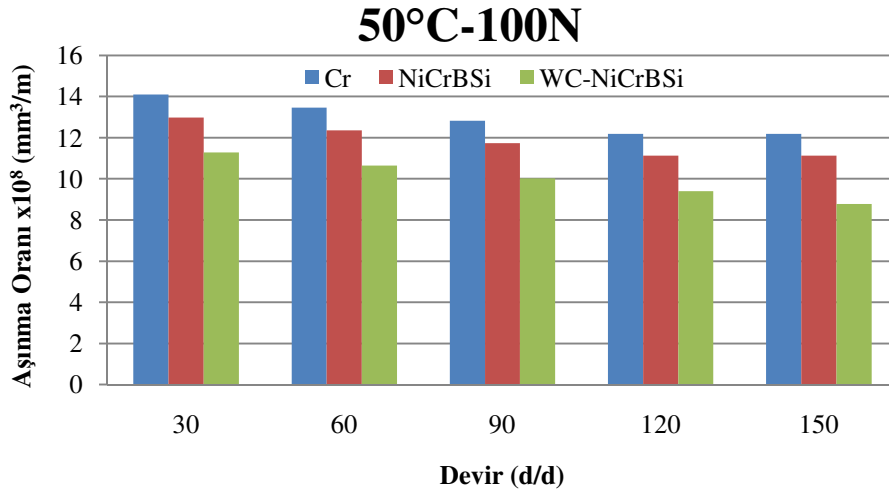
150 d/d'da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 10,3 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 3 kadar düşerek 10,02 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 33 azalarak 6,92 olmaktadır.



Şekil 5.51. 50°C ve 80 N'da segman aşınma oranları

Şekil 5.52'de 50°C ve 100 N'da segman aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d'da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 14,11 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 7 kadar düşerek 13,15 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 22 azalarak 11,12 olmaktadır.

150 d/d'da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 12,17 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 8 kadar düşerek 11,27 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 28 azalarak 8,65 olmaktadır.

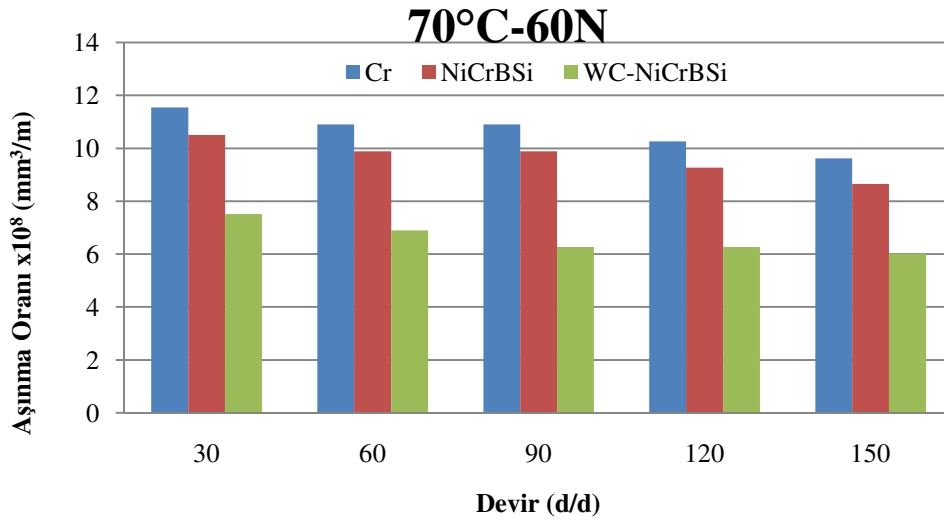


Şekil 5.52. 50°C ve 100 N’da segman aşınma oranları

Şekil 5.53-55’de 70°C sıcaklıkta farkı yüklerdeki aşınma oranları verilmiştir. Aşınma oranları değerlendirilirken en fazla aşınmanın olduğu 30 d/d ve en az aşınmanın meydana geldiği 150 d/d’ daki aşınma oranları karşılaştırılmıştır. Cr kaplı segmana göre NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranları %4-9 değerleri arasında, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranları %25-37 oranında azalmıştır.

Şekil 5.53’de 70°C ve 60 N’da segman aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d’da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 11,53 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 9 kadar düşerek 10,68 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 35 azalarak 7,41 olmaktadır.

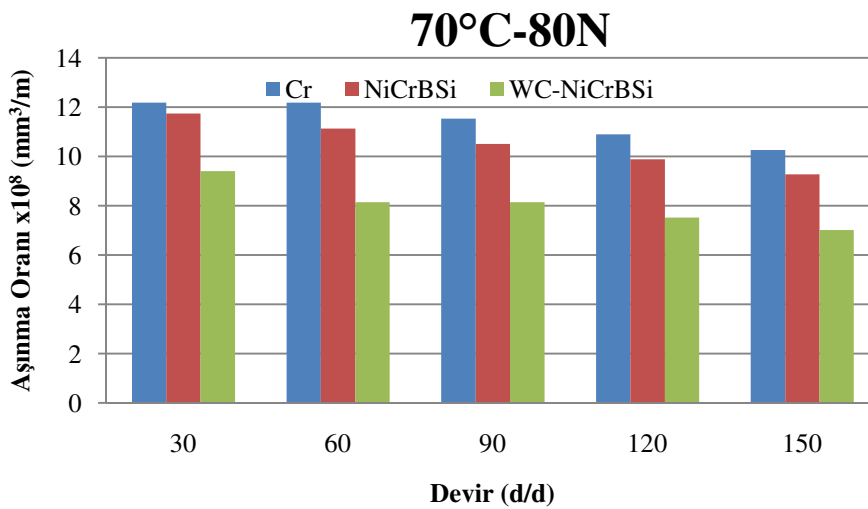
150 d/d’da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 9,61 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 10 kadar düşerek 8,77 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 37 azalarak 5,93 olmaktadır.



Şekil 5.53. 70°C ve 60 N’da segman aşınma oranları

Şekil 5.54’de 70°C ve 80 N’da segman aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d’da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 12,2 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 4 kadar düşerek 11,9 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 25 azalarak 9,27 olmaktadır.

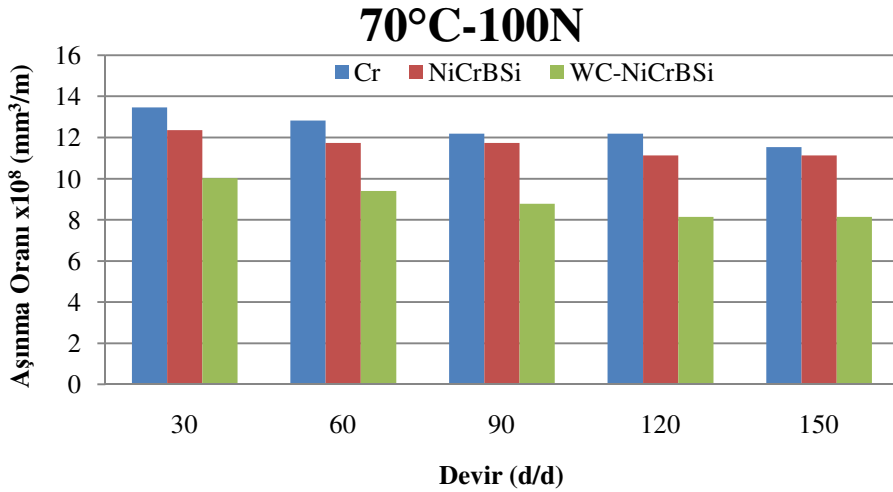
150 d/d’da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 10,3 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 9 kadar düşerek 9,39 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 33 azalarak 6,92 olmaktadır.



Şekil 5.54. 70°C ve 80 N’da segman aşınma oranları

Şekil 5.55’de 70°C ve 100 N’da segman aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d’da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 13,46 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 7 kadar düşerek 12,53 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 27 azalarak 9,88 olmaktadır.

150 d/d’da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 11,53 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 4 kadar düşerek 11,27 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 31 azalarak 8,03 olmaktadır.

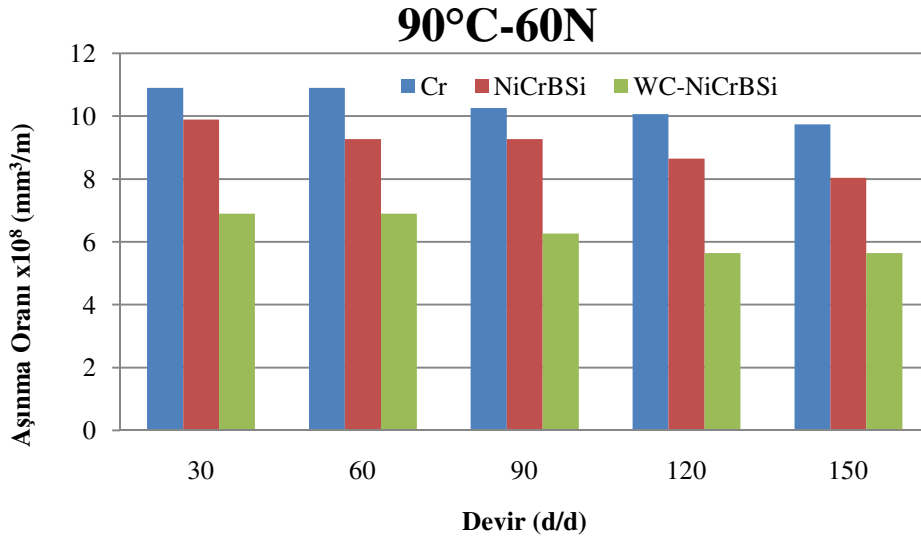


Şekil 5.55 70°C ve 100 N’da segman aşınma oranları

Şekil 5.56-58’de 90°C sıcaklıkta farklı yüklerdeki aşınma oranları verilmiştir. Aşınma oranları değerlendirilirken en fazla aşınmanın olduğu 30 d/d ve en az aşınmanın meydana geldiği 150 d/d’ daki aşınma oranları karşılaştırılmıştır. Cr kaplı segmana göre NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranları %5-8 değerleri arasında, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranları %25-42 oranında azalmıştır.

Şekil 5.56’da 90°C ve 60 N’da segman aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d’da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 10,89 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 7 kadar düşerek 10,04 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 37 azalarak 6,79 olmaktadır.

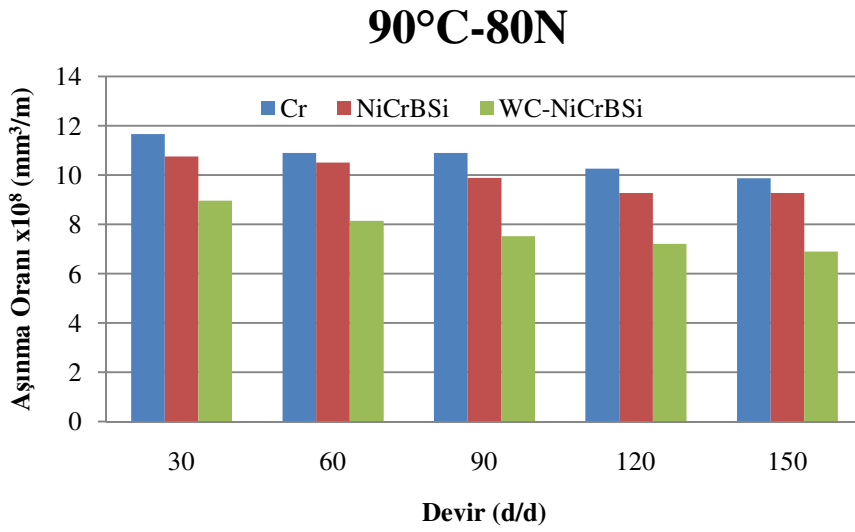
150 d/d'da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 9,74 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 17 kadar düşerek 8,14 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 42 azalarak 5,56 olmaktadır.



Şekil 5.56. 90°C ve 60 N'da segman aşınma oranları

Şekil 5.57'de 90°C ve 80 N'da segman aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d'da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 11,66 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 7 kadar düşerek 10,9 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 25 azalarak 8,84 olmaktadır.

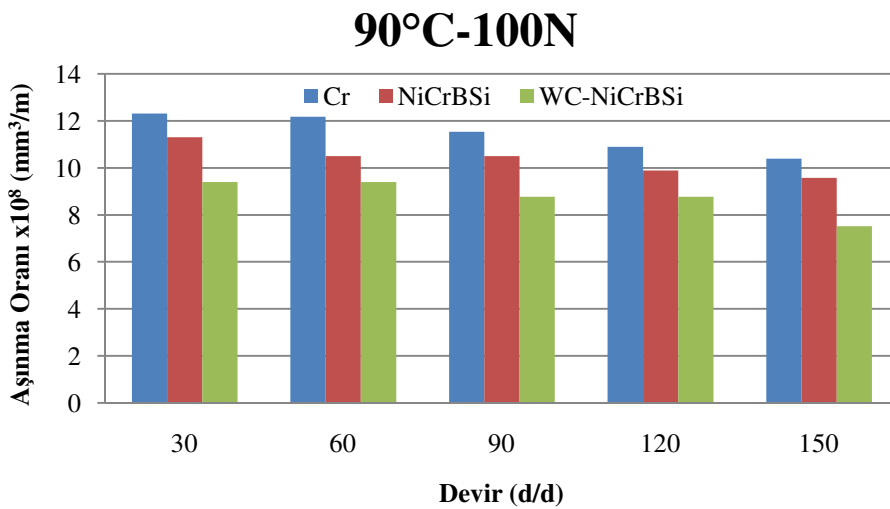
150 d/d'da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 9,87 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 5 kadar düşerek 9,39 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 32 azalarak 6,79 olmaktadır.



Şekil 5.57. 90°C ve 80 N’da segman aşınma oranları

Şekil 5.58’de 90°C ve 100 N’da segman aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d’da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 12,3 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 7 kadar düşerek 11,46 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 26 azalarak 9,27 olmaktadır.

150 d/d’da Cr kaplı segmanın aşınma oranı 10,38 iken NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranı % 8 kadar düşerek 9,71 değerine, WC-NiCrBSi kaplı segmanın ise aşınma oranı % 29 azalarak 7,41 olmaktadır.



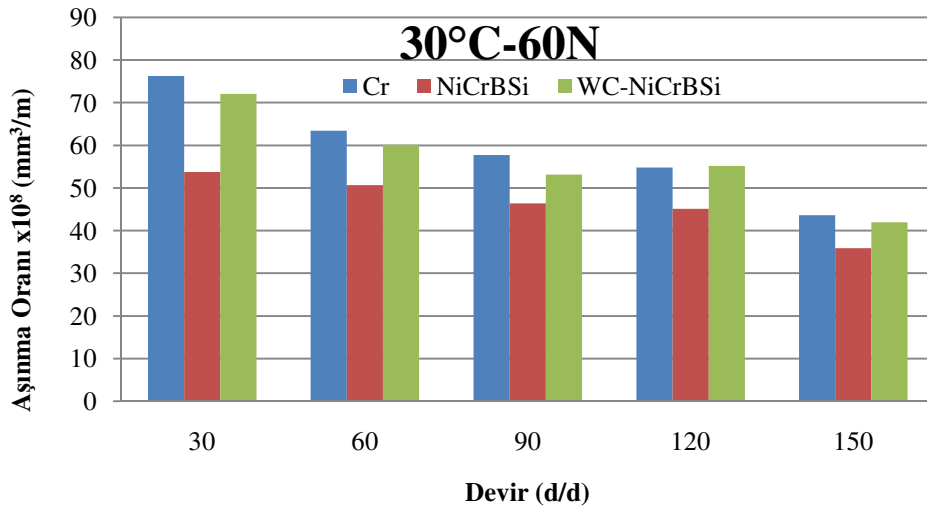
Şekil 5.58. 90°C ve 100 N’da segman aşınma oranları

### 5.9.2. Gömlek aşınmaları

Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi kaplı segmanların çiftleri olan gömlek numunelerinin aşınmaları farklı sıcaklıklar ve yüklerde devre bağlı olarak aşınma oranları Şeklinde verilmiştir. Şekil 5.59-61'de 30°C sıcaklıkta farklı yüklerdeki gömlek aşınma oranları verilmiştir. Aşınma oranları değerlendirilirken en fazla aşınmanın olduğu 30 d/d ve en az aşınmanın meydana geldiği 150 d/d' daki aşınma oranları karşılaştırılmıştır. Cr kaplı segman çifti gömleğe göre WC-NiCrBSi kaplı segman çifti gömleğin aşınma oranları %4-9 değerleri arasında, NiCrBSi kaplı segman çifti gömleğin ise aşınma oranları %11-30 oranında azalmıştır.

Şekil 5.59'da 30°C ve 60 N'da gömlek aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 76,28 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 6 kadar düşerek 72,05 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti gömleğin ise aşınma oranı % 30 azalarak 53,77 olmaktadır.

150 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 43,59 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 4 kadar düşerek 41,97 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğinki ise aşınma oranı % 18 azalarak 35,84 olmaktadır.

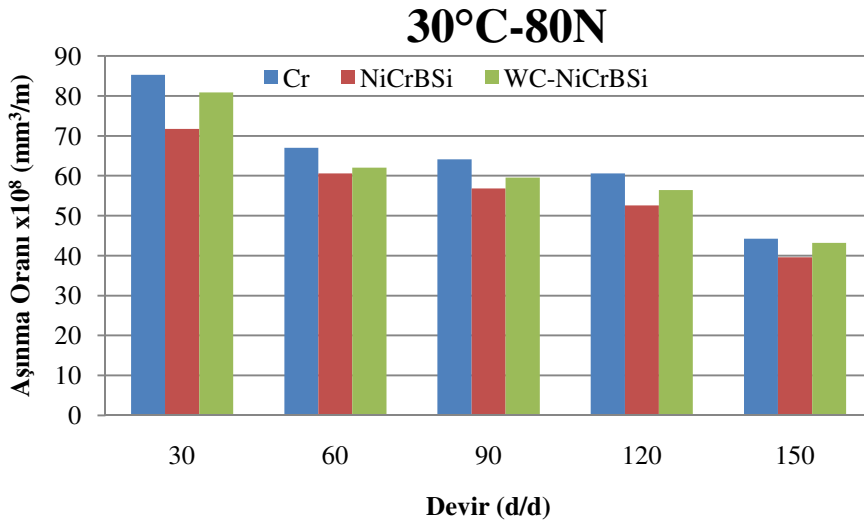


Şekil 5.59. 30°C ve 60N'da gömlek aşınmaları

Şekil 5.60'da 30°C ve 80 N'da gömlek aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 85,25 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 7 kadar düşerek 80,82 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti gömleğin ise aşınma oranı % 16 azalarak 71,69 olmaktadır.

150 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 44,23 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 3 kadar düşerek 43,23 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğinki ise aşınma oranı % 11 azalarak 39,55 olmaktadır.

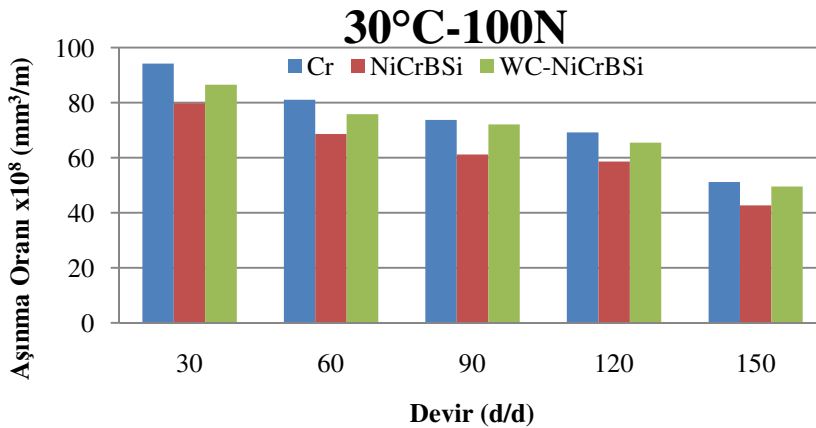




Şekil 5.60. 30°C ve 80N’da gömlek aşınmaları

Şekil 5.61’de 30°C ve 100 N’da gömlek aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d’da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 94,23 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 9 kadar düşerek 86,46 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti gömleğin ise aşınma oranı % 17 azalarak 79,73 olmaktadır.

150 d/d’da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 51,15 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 4 kadar düşerek 49,49 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğinki ise aşınma oranı % 17 azalarak 42,65 olmaktadır.

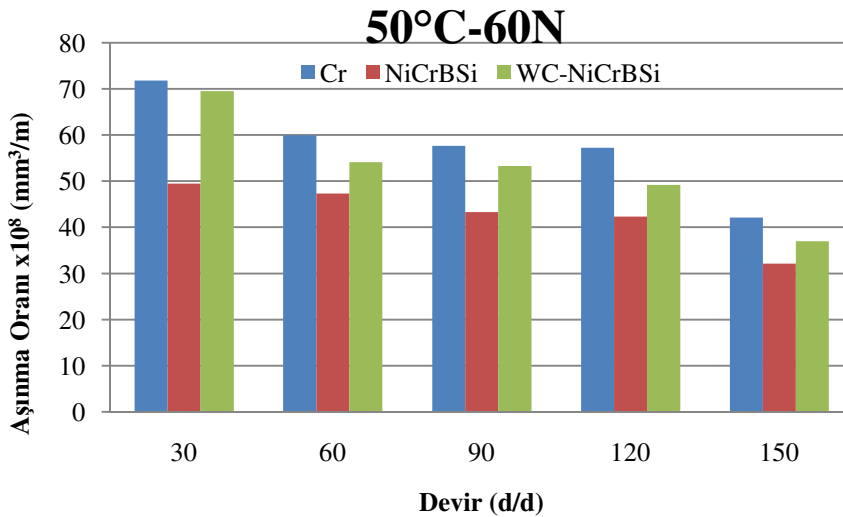


Şekil 5.61. 30°C ve 100N’da gömlek aşınmaları

Şekil 5.62-64'de 50°C sıcaklıkta farklı yüklerdeki gömlek aşınma oranları verilmiştir. Aşınma oranları değerlendirilirken en fazla aşınmanın olduğu 30 d/d ve en az aşınmanın meydana geldiği 150 d/d' daki aşınma oranları karşılaştırılmıştır. Cr kaplı segman çifti gömleğe göre WC-NiCrBSi kaplı segman çifti gömleğin aşınma oranları %1-13 değerleri arasında, NiCrBSi kaplı segman çifti gömleğin ise aşınma oranları %7-31 oranında azalmıştır.

Şekil 5.62'de 50°C ve 60 N'da gömlek aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 71,79 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 4 kadar düşerek 69,54 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti gömleğin ise aşınma oranı % 31 azalarak 49,44 olmaktadır.

150 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 42,12 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 13 kadar düşerek 36,96 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğinki ise aşınma oranı % 24 azalarak 32,13 olmaktadır.

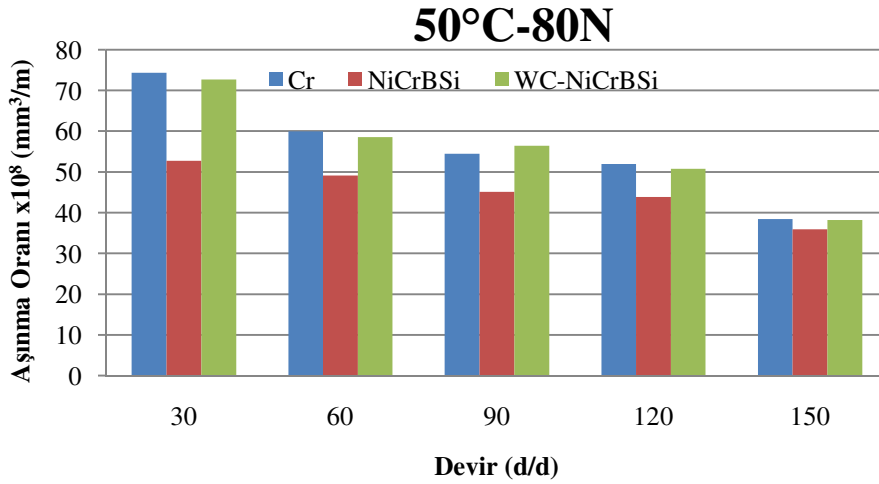


Şekil 5.62. 50°C ve 60N'da gömlek aşınmaları

Şekil 5.63'de 50°C ve 80 N'da gömlek aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 74,35 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın

çifti olan gömleğin aşınma oranı % 3 kadar düşerek 72,68 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti gömleğin ise aşınma oranı % 30 azalarak 52,71 olmaktadır.

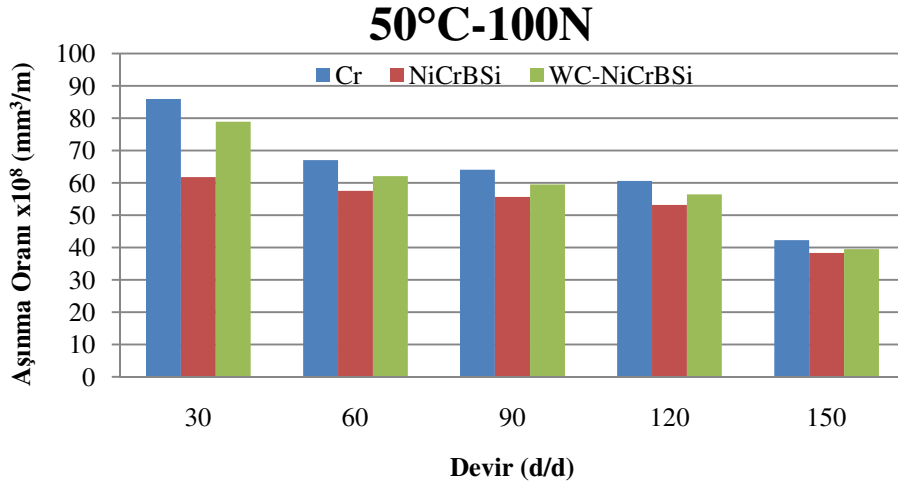
150 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 38,46 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 1 kadar düşerek 38,22 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğinki ise aşınma oranı % 7 azalarak 35,9 olmaktadır.



Şekil 5.63. 50°C ve 80N'da gömlek aşınmaları

Şekil 5.64'de 50°C ve 100 N'da gömlek aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 85,89 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 9 kadar düşerek 78,94 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti gömleğin ise aşınma oranı % 29 azalarak 61,8 olmaktadır.

150 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 42,3 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 7 kadar düşerek 39,47 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğinki ise aşınma oranı % 10 azalarak 38,31 olmaktadır.

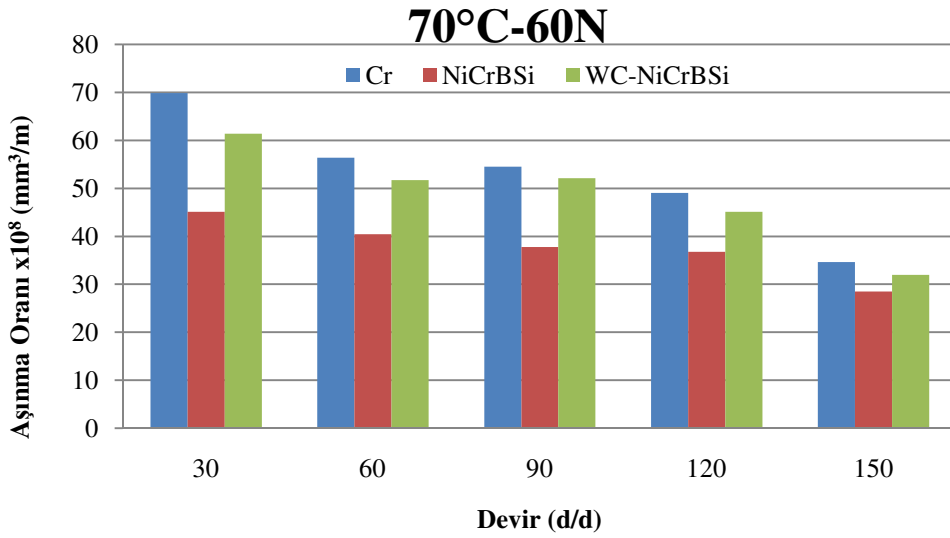


Şekil 5.64. 50°C ve 100N’da gömlek aşınmaları

Şekil 5.65-67’de 70°C sıcaklıkta farklı yüklerdeki gömlek aşınma oranları verilmiştir. Aşınma oranları değerlendirilirken en fazla aşınmanın olduğu 30 d/d ve en az aşınmanın meydana geldiği 150 d/d’ daki aşınma oranları karşılaştırılmıştır. Cr kaplı segman çifti gömleğe göre WC-NiCrBSi kaplı segman çifti gömleğin aşınma oranları %3-14 değerleri arasında, NiCrBSi kaplı segman çifti gömleğin ise aşınma oranları %12-36 oranında azalmıştır.

Şekil 5.65’de 70°C ve 60 N’da gömlek aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d’da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 69,87 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 13 kadar düşerek 61,40 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti gömleğin ise aşınma oranı % 36 azalarak 45,11 olmaktadır.

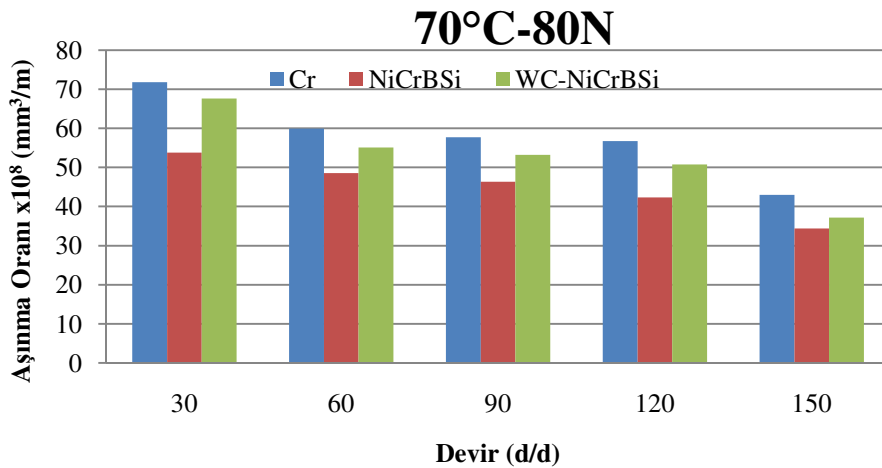
150 d/d’da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 34,62 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 8 kadar düşerek 31,95 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğinki ise aşınma oranı % 18 azalarak 28,49 olmaktadır.



Şekil 5.65. 70°C ve 60N'da gömlek aşınmaları

Şekil 5.66'de 70°C ve 80 N'da gömlek aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 71,79 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 6 kadar düşerek 67,66 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin ise aşınma oranı % 35 azalarak 53,77 olmaktadır.

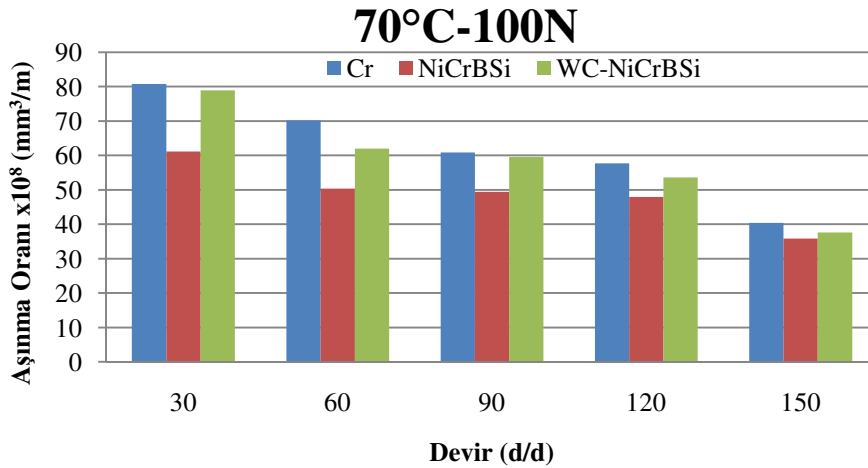
150 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 42,94 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 14 kadar düşerek 37,15 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğinki ise aşınma oranı % 20 azalarak 34,42 olmaktadır.



Şekil 5.66. 70°C ve 80N'da gömlek aşınmaları

Şekil 5.67’de 70°C ve 100 N’da gömlek aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d’da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 80,76 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 3 kadar düşerek 78,94 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti gömleğin ise aşınma oranı % 25 azalarak 61,18 olmaktadır.

150 d/d’da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 40,38 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 7 kadar düşerek 37,59 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğinki ise aşınma oranı % 12 azalarak 35,84 olmaktadır.



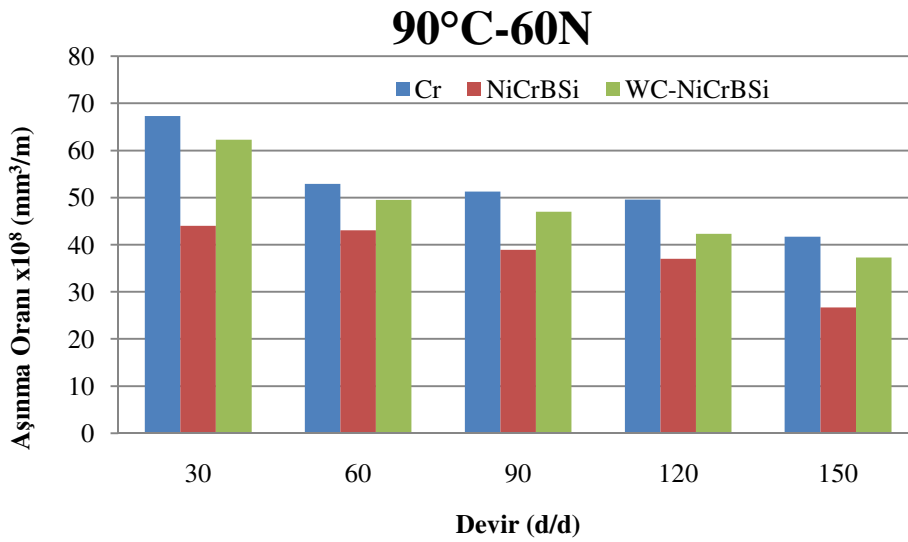
Şekil 5.67. 70°C ve 100N’da gömlek aşınmaları

Şekil 5.68-70’de 90°C sıcaklıkta farklı yüklerdeki gömlek aşınma oranları verilmiştir. Aşınma oranları değerlendirilirken en fazla aşınmanın olduğu 30 d/d ve en az aşınmanın meydana geldiği 150 d/d’ daki aşınma oranları karşılaştırılmıştır. Cr kaplı segman çifti gömleğe göre WC-NiCrBSi kaplı segman çifti gömleğin aşınma oranları %3-14 değerleri arasında, NiCrBSi kaplı segman çifti gömleğin ise aşınma oranları %12-36 oranında azalmıştır.

Şekil 5.68’de 90°C ve 60 N’da gömlek aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d’da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 67,31 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 8 kadar düşerek 62,28 değerine,

NiCrBSi kaplı segmanın çifti gömleğin ise aşınma oranı % 35 azalarak 44,01 olmaktadır.

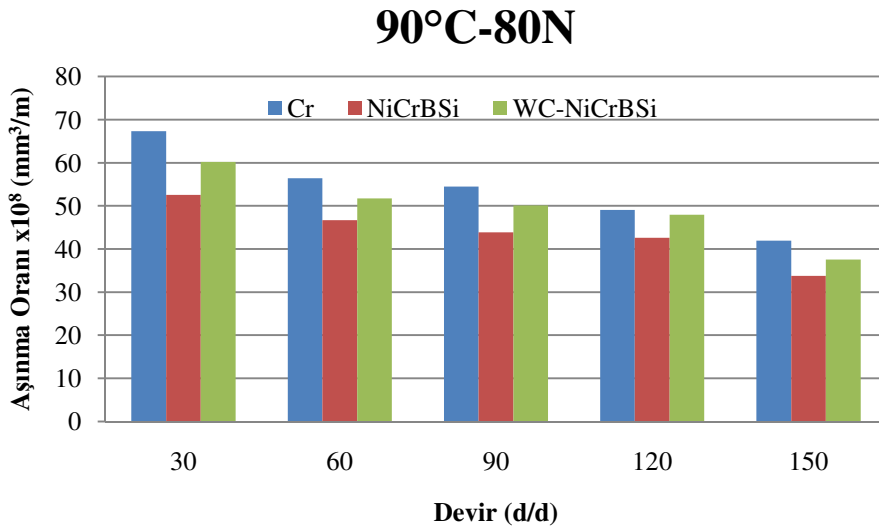
150 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 41,73 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 11 kadar düşerek 37,26 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğinki ise aşınma oranı % 27 azalarak 26,69 olmaktadır.



Şekil 5.68. 90°C ve 60N'da gömlek aşınmaları

Şekil 5.69'da 90°C ve 80 N'da gömlek aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 67,3 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 11 kadar düşerek 60,15 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin ise aşınma oranı % 22 azalarak 52,53 olmaktadır.

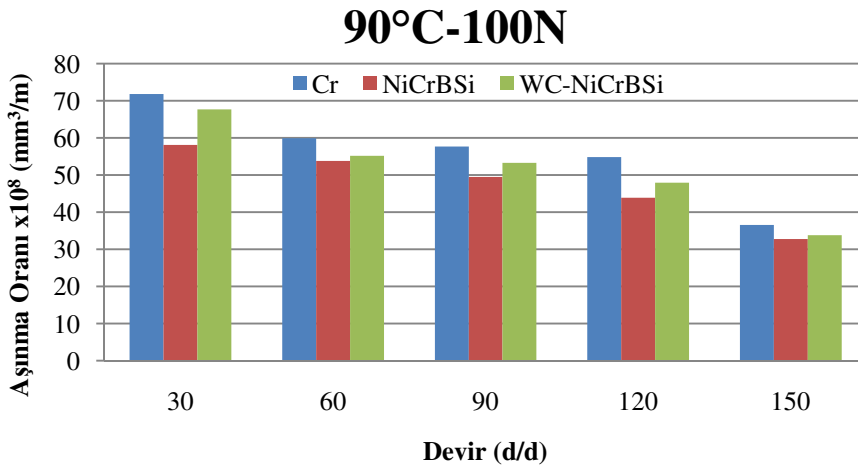
150 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 41,92 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 10 kadar düşerek 37,58 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğinki ise aşınma oranı % 20 azalarak 33,74 olmaktadır.



Şekil 5.69. 90°C ve 80N'da gömlek aşınmaları

Şekil 5.70'de 90°C ve 100 N'da gömlek aşınma oranları verilmiştir. 30 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 71,79 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 6 kadar düşerek 67,66 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti gömleğin ise aşınma oranı % 20 azalarak 58,09 olmaktadır.

150 d/d'da Cr kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı 36,53 iken WC-NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğin aşınma oranı % 8 kadar düşerek 33,83 değerine, NiCrBSi kaplı segmanın çifti olan gömleğinki ise aşınma oranı % 11 azalarak 32,75 olmaktadır.



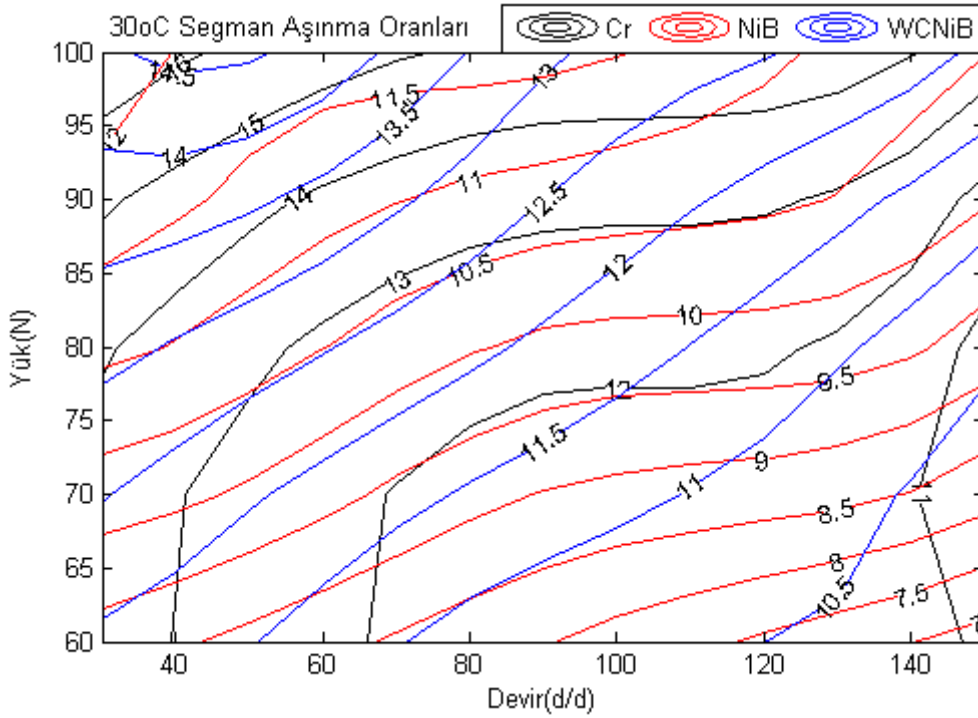
Şekil 5.70. 90°C ve 100N'da gömlek aşınmaları



### 5.9.3 Aşınma oranları contour eğrileri

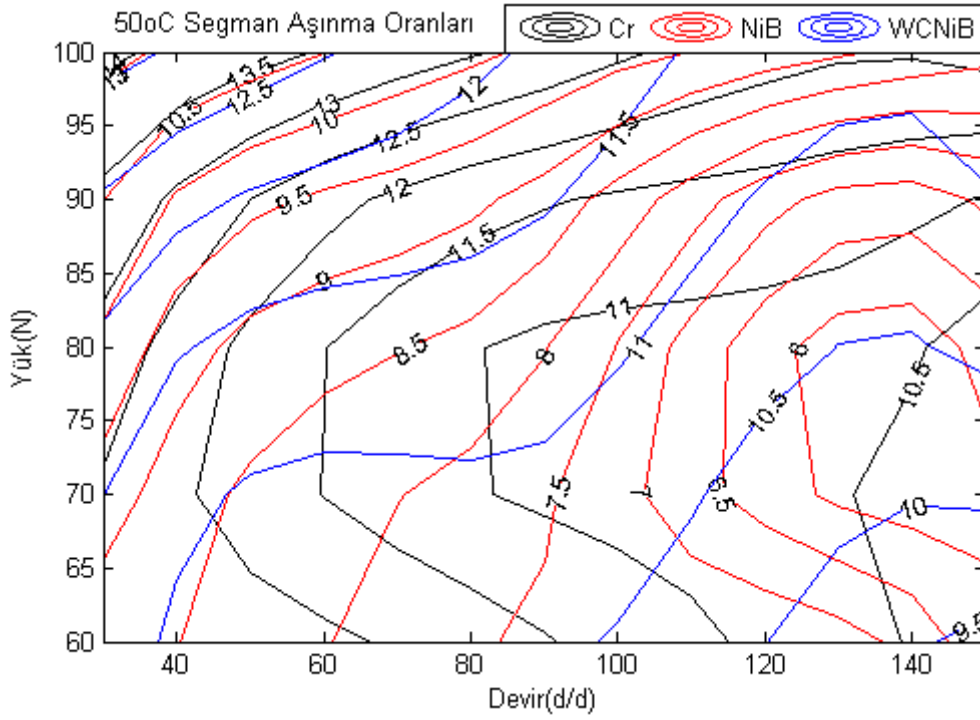
Üretilen segman kaplamalarının ve gömlek numunelerinin aşınma karakteristiklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için farklı sıcaklık, yük ve devir şartlarındaki aşınma oranlarının beraber karşılaştırılması analizler için kolaylık sağlayacaktır. Contour eğrileri, farklı çalışma koşullarının aşınma oranlarına etkisinin bir arada değerlendirilmesi olanağı sunmaktadır. Literatürdeki bazı çalışmalarda bu eğriler aşınma haritaları şeklinde de adlandırılmaktadır. Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi kaplı segmanların aşınma oranlarının, farklı sıcaklık, yük ve devirlerdeki contour eğrileri Şekil 5.71-78'de verilmiştir. Sıcaklık değişimleri her grafik için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Eğrilerde aşınma oranları devir ve sıcaklık artışı ile azalma, yük artışı ile ise artma eğilimi göstermektedir.

Şekil 5.71'de 30°C'deki Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi kaplı segmanların aşınma oranlarının haritaları verilmiştir. Cr kaplı segmanın aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 24 oranında azalma, yükün artması ile % 20 oranında artma görülmüştür. NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 27 oranında azalma, yükün artması ile % 25 oranında artma görülmüştür. WC-NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 16 oranında azalma, yükün artması ile % 18 oranında artma görülmüştür. Bu oranlar karşılaştırıldığında hız değişiminden en fazla etkilenen NiCrBSi kaplama, daha sonra Cr kaplama ve en az etkilenen ise WC-NiCrBSi kaplama olmuştur. Yükün artması ile aşınma oranında en fazla değişim NiCrBSi kaplama, daha sonra Cr kaplama ve en az değişim ise WC-NiCrBSi kaplamada olmuştur.



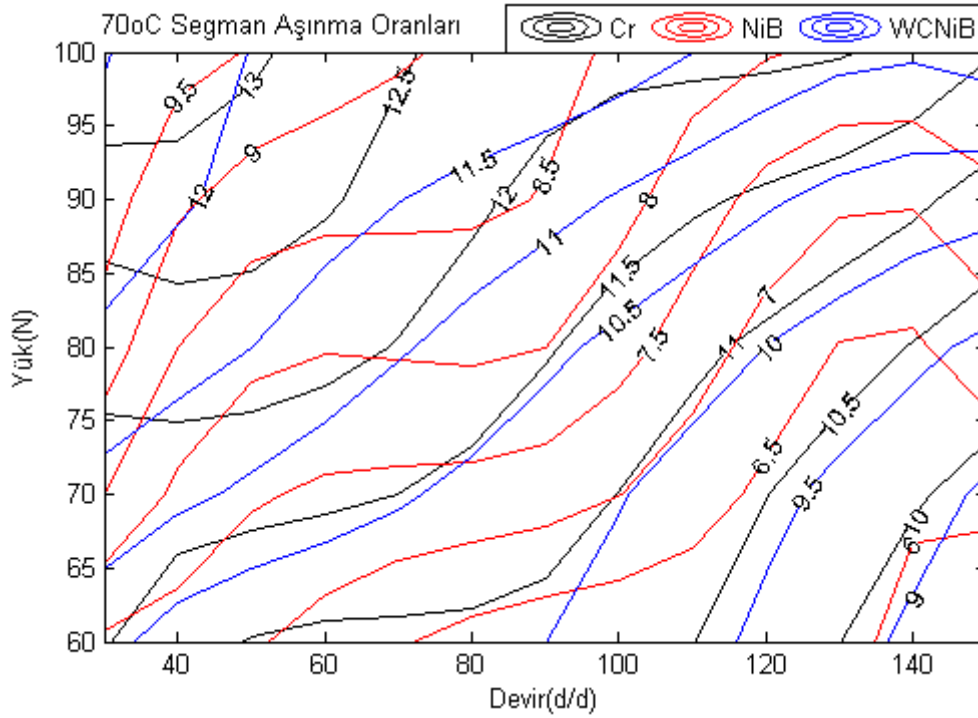
Şekil 5.71. 30°C'de Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi segman aşınma oranları

Şekil 5.72'de 50°C'deki Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi kaplı segmanların aşınma oranlarının haritaları verilmiştir. Cr kaplı segmanın aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 20 oranında azalma, yükün artması ile % 14 oranında artma görülmüştür. NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 29 oranında azalma, yükün artması ile % 23 oranında artma görülmüştür. WC-NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 17 oranında azalma, yükün artması ile % 15 oranında artma görülmüştür. Bu oranlar karşılaştırıldığında hız değişiminden en fazla etkilenen NiCrBSi kaplama, daha sonra Cr kaplama ve en az etkilenen ise WC-NiCrBSi kaplama olmuştur. Yükün artması ile aşınma oranında en fazla değişim NiCrBSi kaplama, daha sonra WC-NiCrBSi kaplama ve en az değişim ise Cr kaplamada olmuştur.



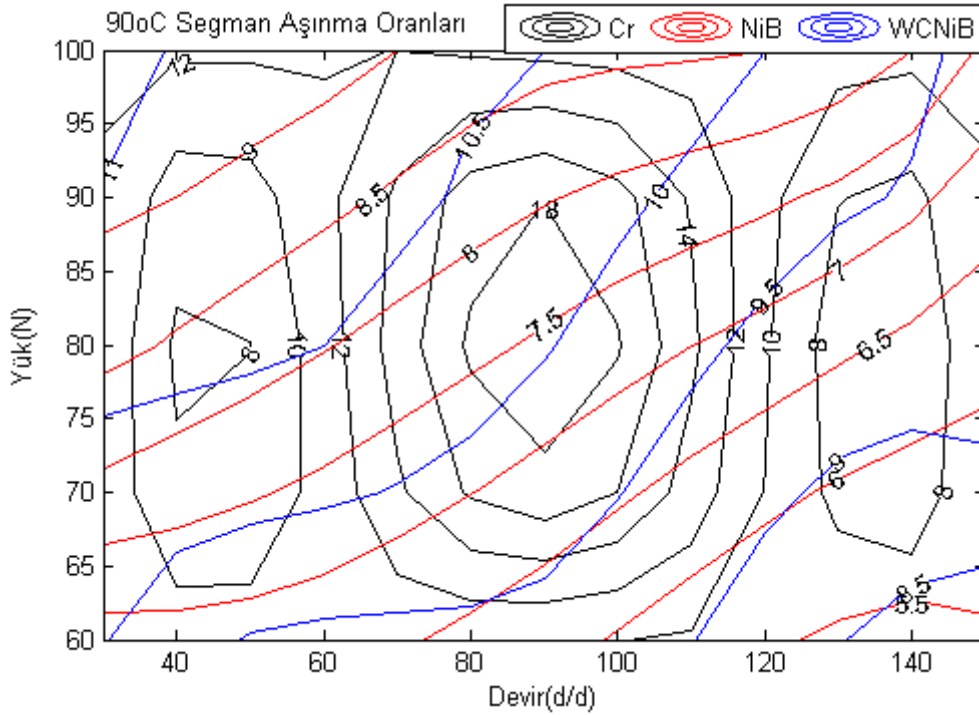
Şekil 5.72. 50°C'de Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi segman aşınma oranları

Şekil 5.73'de 70°C'deki Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi kaplı segmanların aşınma oranlarının haritaları verilmiştir. Cr kaplı segmanın aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 17 oranında azalma, yükün artması ile % 20 oranında artma görülmüştür. NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 20 oranında azalma, yükün artması ile % 20 oranında artma görülmüştür. WC-NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 22 oranında azalma, yükün artması ile % 16 oranında artma görülmüştür. Bu oranlar karşılaştırıldığında hız değişiminden en fazla etkilenen WC-NiCrBSi kaplama, daha sonra NiCrBSi kaplama ve en az etkilenen ise Cr kaplama olmuştur. Yükün artması ile aşınma oranında en fazla değişim NiCrBSi ve WC-NiCrBSi kaplamalarda ve en az değişim ise Cr kaplamada olmuştur.



Şekil 5.73. 70°C'de Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi segman aşınma oranları

Şekil 5.74'de 90°C'deki Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi kaplı segmanların aşınma oranlarının haritaları verilmiştir. Cr kaplı segmanın aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 15 oranında azalma, yükün artması ile % 11 oranında artma görülmüştür. NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 23 oranında azalma, yükün artması ile % 22 oranında artma görülmüştür. WC-NiCrBSi kaplı segmanın aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 19 oranında azalma, yükün artması ile % 12 oranında artma görülmüştür. Bu oranlar karşılaştırıldığında hız değişiminden en fazla etkilenen NiCrBSi kaplama, daha sonra Cr kaplama ve en az etkilenen ise WC-NiCrBSi kaplama olmuştur. Yükün artması ile aşınma oranında en fazla değişim NiCrBSi kaplamada, daha sonra WC-NiCrBSi kaplamalarda ve en az değişim ise Cr kaplamada olmuştur.

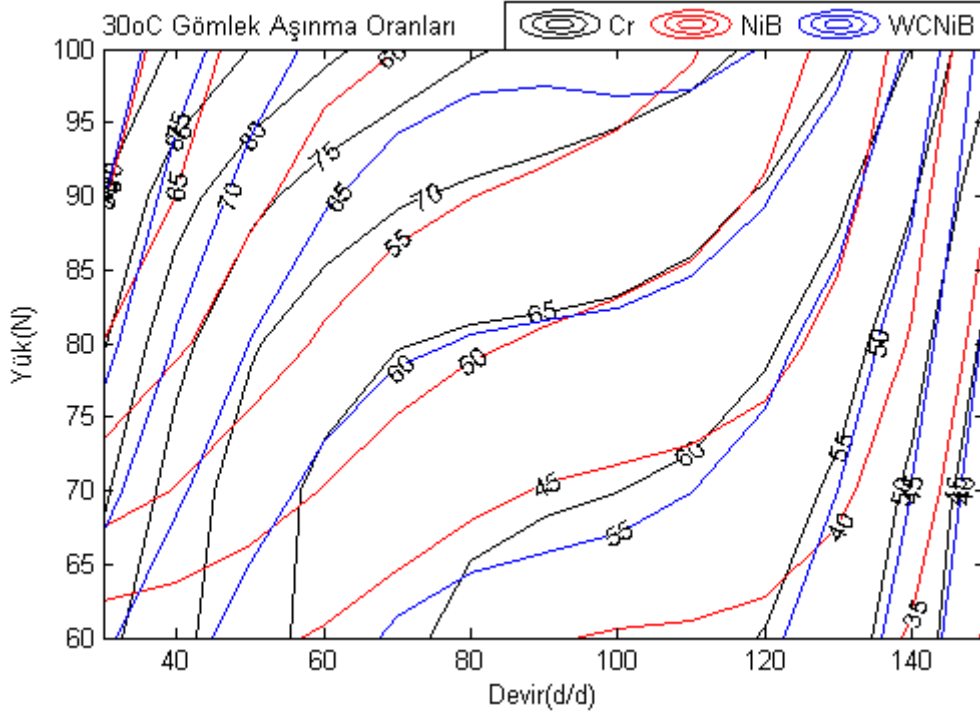


Şekil 5.74. 90°C'de Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi segman aşınma oranları

Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi kaplı segmanların aşınma çiftleri olan gömleklerin farklı sıcaklık, yük ve devirlerdeki aşınma oranlarının contour eğrileri Şekil 5.75-78'de verilmiştir. Sıcaklık değişimleri her grafik için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Eğrilerde aşınma oranları devir ve sıcaklık artışı ile azalma, yük artışı ile ise artma eğilimi göstermektedir.

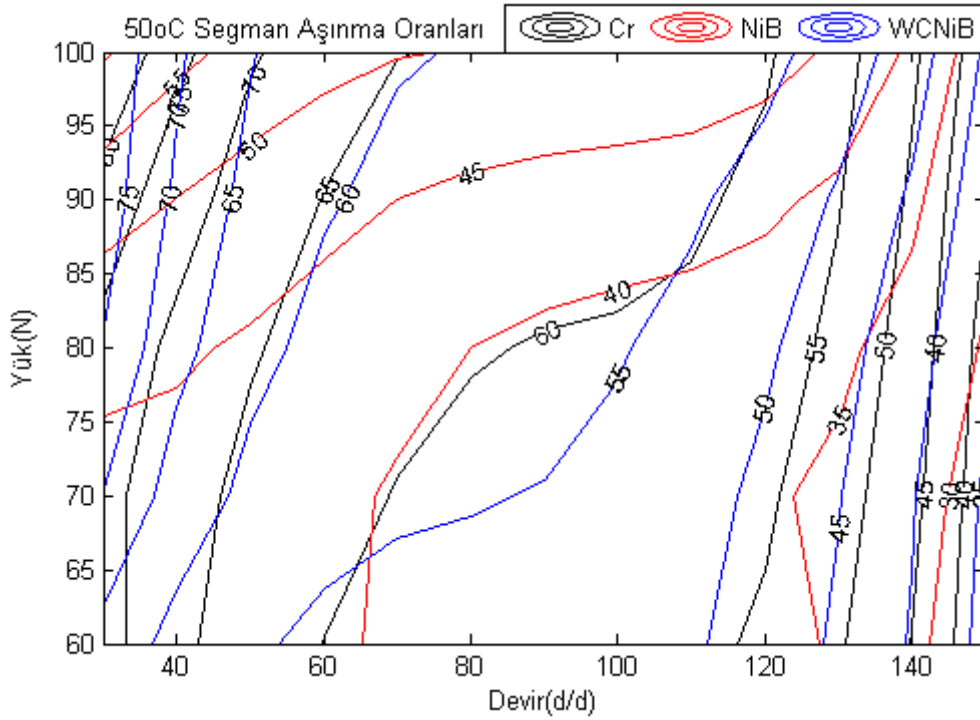
Şekil 5.75'de 30°C'deki Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi kaplı segmanların aşınma çiftleri olan gömleklerin, aşınma oranları harita şeklinde verilmiştir. Cr kaplı segmanın aşınma çifti olan gömleğin aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 43 oranında azalma, yükün artması ile % 19 oranında artma görülmüştür. NiCrBSi kaplı segmanın aşınma çifti olan gömleğin aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 34 oranında azalma, yükün artması ile % 17 oranında artma görülmüştür. WC-NiCrBSi kaplı segmanın aşınma çifti olan gömleğin aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 45 oranında azalma, yükün artması ile %22 oranında artma görülmüştür. Bu oranlar karşılaştırıldığında hız değişiminden en fazla etkilenen WC-NiCrBSi kaplama çifti olan gömlek, daha sonra Cr kaplama çifti olan gömlek ve en az etkilenen ise NiCrBSi kaplama çifti olan gömlek olmuştur. Yükün artması ile aşınma oranında en fazla değişim WC-NiCrBSi kaplama çifti olan

gömlek, daha sonra Cr kaplama çifti olan gömlek ve en az değişim ise NiCrBSi kaplama çifti olan gömlekte olmuştur.



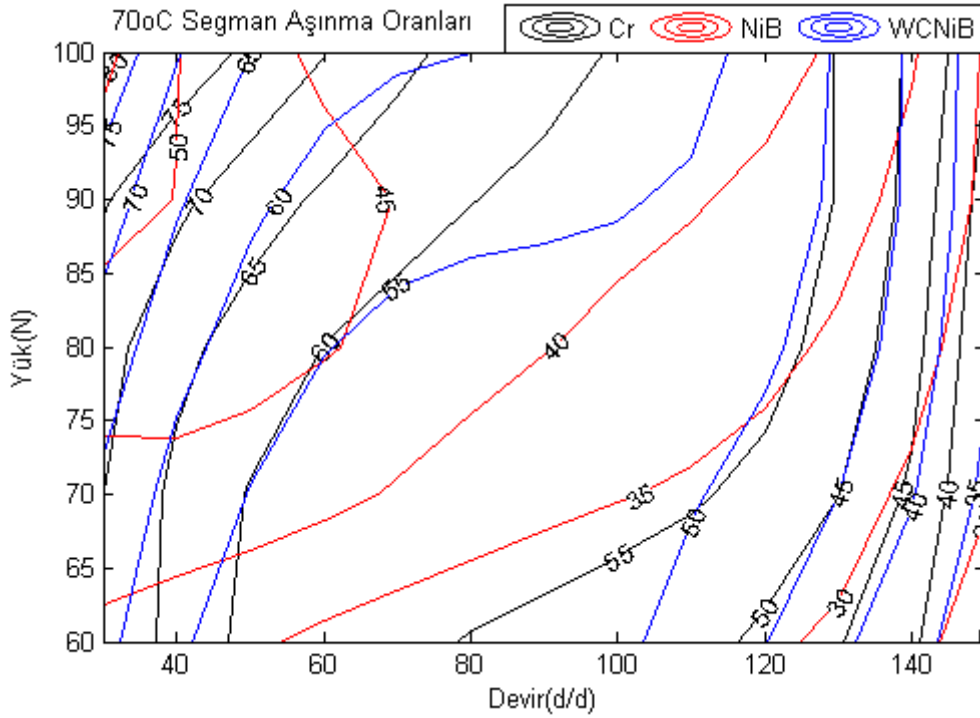
Şekil 5.75. 30°C'de gömlek aşınma oranları

Şekil 5.76'da 50°C'deki Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi kaplı segmanların aşınma çiftleri olan gömleklerin, aşınma oranları harita şeklinde verilmiştir. Cr kaplı segmanın aşınma çifti olan gömleğin aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 46 oranında azalma, yükün artması ile % 16 oranında artma görülmüştür. NiCrBSi kaplı segmanın aşınma çifti olan gömleğin aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 36 oranında azalma, yükün artması ile % 29 oranında artma görülmüştür. WC-NiCrBSi kaplı segmanın aşınma çifti olan gömleğin aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 47 oranında azalma, yükün artması ile %20 oranında artma görülmüştür. Bu oranlar karşılaştırıldığında hız değişiminden en fazla etkilenen WC-NiCrBSi kaplama çifti olan gömlek, daha sonra Cr kaplama çifti olan gömlek ve en az etkilenen ise NiCrBSi kaplama çifti olan gömlek olmuştur. Yükün artması ile aşınma oranında en fazla değişim NiCrBSi kaplama çifti olan gömlek, daha sonra WC-NiCrBSi kaplama çifti olan gömlek ve en az değişim ise Cr kaplama çifti olan gömlekte olmuştur.



Şekil 5.76. 50°C'de gömlek aşınma oranları

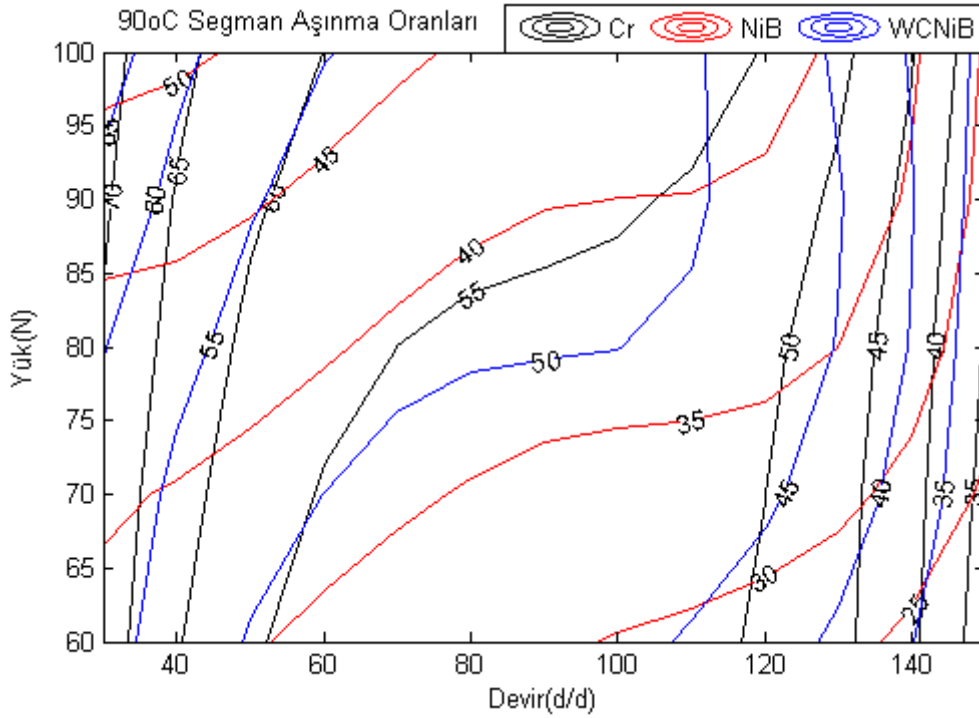
Şekil 5.77'de 70°C'deki Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi kaplı segmanların aşınma çiftleri olan gömleklerin, aşınma oranları harita şeklinde verilmiştir. Cr kaplı segmanın aşınma çifti olan gömleğin aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 47 oranında azalma, yükün artması ile % 14 oranında artma görülmüştür. NiCrBSi kaplı segmanın aşınma çifti olan gömleğin aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 42 oranında azalma, yükün artması ile % 31 oranında artma görülmüştür. WC-NiCrBSi kaplı segmanın aşınma çifti olan gömleğin aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 48 oranında azalma, yükün artması ile %23 oranında artma görülmüştür. Bu oranlar karşılaştırıldığında hız değişiminden en fazla etkilenen WC-NiCrBSi kaplama çifti olan gömlek, daha sonra Cr kaplama çifti olan gömlek ve en az etkilenen ise NiCrBSi kaplama çifti olan gömlek olmuştur. Yükün artması ile aşınma oranında en fazla değişim NiCrBSi kaplama çifti olan gömlek, daha sonra WC-NiCrBSi kaplama çifti olan gömlek ve en az değişim ise Cr kaplama çifti olan gömlekte olmuştur.



Şekil 5.77. 70°C'de gömlek aşınma oranları

Şekil 5.78'de 90°C'deki Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi kaplı segmanların aşınma çiftleri olan gömleklerin, aşınma oranları harita şeklinde verilmiştir. Cr kaplı segmanın aşınma çifti olan gömleğin aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 49 oranında azalma, yükün artması ile % 11 oranında artma görülmüştür. NiCrBSi kaplı segmanın aşınma çifti olan gömleğin aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 38 oranında azalma, yükün artması ile % 25 oranında artma görülmüştür. WC-NiCrBSi kaplı segmanın aşınma çifti olan gömleğin aşınma oranları incelendiğinde, hızın artması ile % 47 oranında azalma, yükün artması ile %16 oranında artma görülmüştür. Bu oranlar karşılaştırıldığında hız değişiminden en fazla etkilenen Cr kaplama çifti olan gömlek, daha sonra WC-NiCrBSi kaplama çifti olan gömlek ve en az etkilenen ise NiCrBSi kaplama çifti olan gömlek olmuştur. Yükün artması ile aşınma oranında en fazla değişim NiCrBSi kaplama çifti olan gömlek, daha sonra WC-NiCrBSi kaplama çifti olan gömlek ve en az değişim ise Cr kaplama çifti olan gömlekte olmuştur.





Şekil 5.78. 90°C'de gömlek aşınma oranları

## 5.10. Motor Deneyleri Sonuçları

Deneylerde kullanılan içten yanmalı motorun yağ ve su sistemi deney koşullarında istenilen sıcaklıklarda ayarlanabilmektedir. Ayrıca elektrikli bir dinamometre yardımıyla motorun deneyler sırasında istenilen devirlerde döndürülmesi sağlanmaktadır. İçten yanmalı motorun sürtünme kayıplarının belirlenmesi deneylerinde, motor buji ateşlemesi yapılarak çalıştırılmamış ve elektrikli dinamometre yardımıyla döndürülmüştür.

Deneylerde, öncelikle motor yağ ve su sıcaklığı deney şartlarına uygun hale getirilmiştir. Daha sonra içten yanmalı motorun devri istenilen değere getirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde yük ölçümü, yük hücresi yardımıyla yaklaşık 50 değerlerin ortalaması alınarak ve 5 defa tekrarlanarak yapılmıştır.

### 5.10.1. Sürtünme momentleri ve güç haritaları

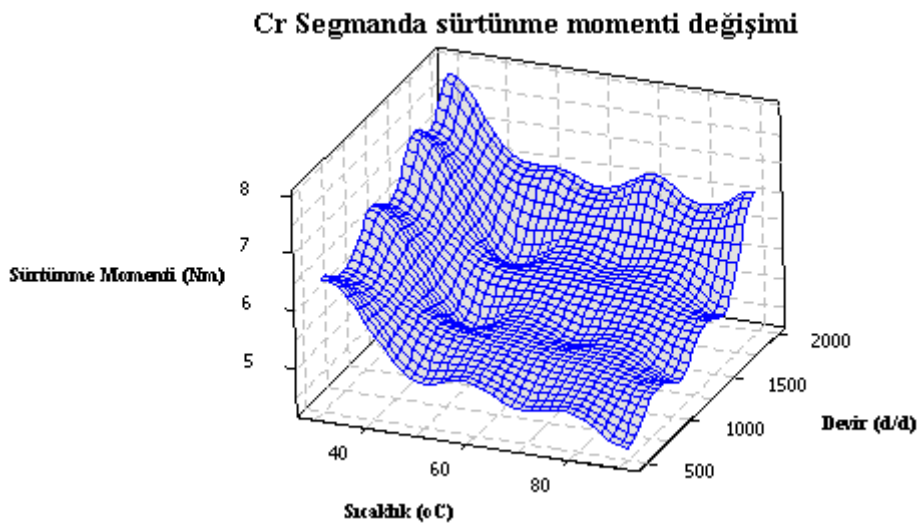
İçten yanmalı motorda ölçülen sürtünme kayıplarının daha iyi anlaşılabilmesi için üç boyutlu moment ve güç grafikleri çizilmiştir. Ölçümlerde değişken olarak karşımıza

çıkan motor devri, motor su ve yağ sıcaklıklarının sürtünmeye etkisi daha net görülecektir. Haritalar çizilirken motor devri ve motor sıcaklığına bağlı olarak sürtünme güçleri ve momentler her bir segman kaplaması için çizilmiştir.

Şekil 5.79-80'de Cr kaplı segman kullanılarak yapılan sürtünme momenti ve güç sonuçları verilmiştir. Motor devrinin artması ile sürtünme momenti ve gücünde artış olmaktadır. Sürtünme momentinde motorun çalışma devir aralıklarında yaklaşık %16-27 arasında artış göstermektedir. Sürtünme gücünde ise %64-73 arasında artış olmaktadır.

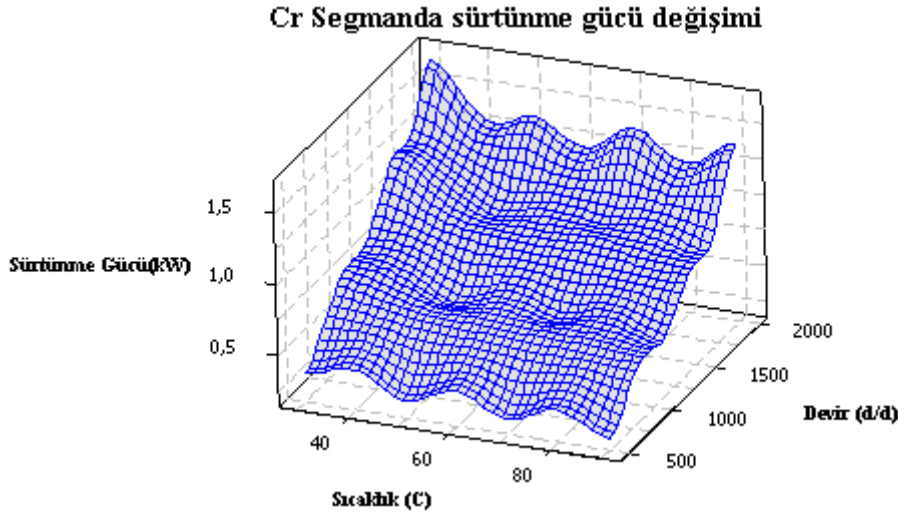
Motor sıcaklığının artması ise motor sürtünmesini azaltmaktadır. Buna bağlı olarak sürtünme momenti ve gücü de azalmaktadır. Sürtünme momenti ve gücünde motorun çalışma başlangıç sıcaklığı olan 30°C ve en yüksek sıcaklık olan 90°C değerleri karşılaştırıldığında yaklaşık olarak %14-37 arasında azalma görülmektedir.

Şekil 5.79'da Cr kaplı segmanın sürtünme momentinin motor devri ve sıcaklığına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Sürtünme momenti 900 d/d iken 4,52 Nm iken motor devri 2100 d/d'ya ulaşınca %27 artarak 7,09 Nm değerini almaktadır. Sıcaklık değişimlerinde ise sürtünme momenti, motor sıcaklığının 30°C olduğunda 6,70 Nm iken sıcaklık 90°C'ye ulaştığında %27 azalarak 4,25 Nm değerini almaktadır.



Şekil 5.79. Cr kaplı segmanın sıcaklık ve devre bağlı sürtünme momenti haritası

Şekil 5.80’de Cr kaplı segmanın sürtünme gücünün motor devri ve sıcaklığına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Sürtünme gücü 900 d/d iken 0,42 kW iken motor devri 2100 d/d’ya ulaşınca %73 artarak 1,56 kW değerini almaktadır. Sıcaklık değişimlerinde ise sürtünme gücü, motor sıcaklığının 30°C olduğunda 0,49 kW iken sıcaklık 90°C’ye ulaştığında %27 azalarak 0,31 kW değerini almaktadır.



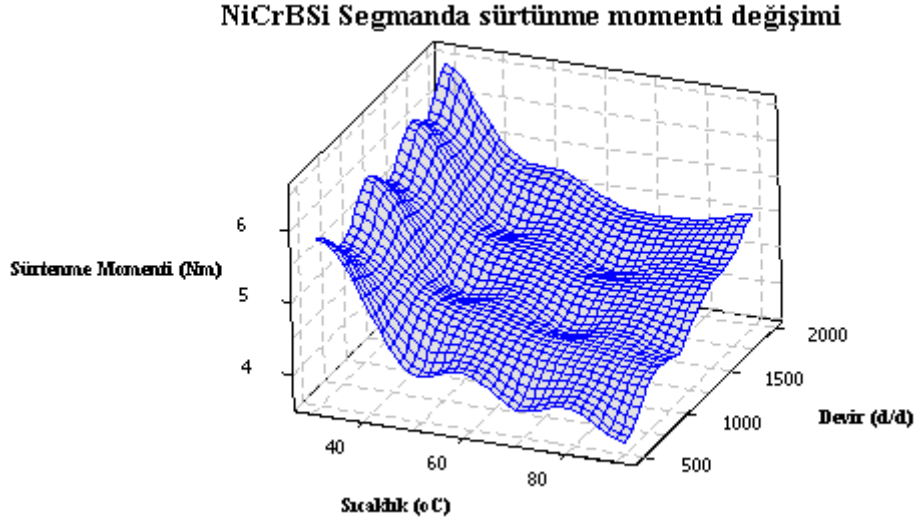
Şekil 5.80. Cr kaplı segmanın sıcaklık ve devre bağlı sürtünme gücü haritası

Şekil 5.81-82’de NiCrBSi kaplı segman kullanılarak yapılan sürtünme momenti ve güç sonuçları verilmiştir. Motor devrinin artması ile sürtünme momenti ve gücünde artış olmaktadır. Sürtünme momentinde bu oran motorun çalışma devir aralıklarında yaklaşık %12-23 arasında artış göstermektedir. Sürtünme gücünde ise %63-67 arasında artış olmaktadır.

Motor sıcaklığının artması ise motor sürtünmesini azalmaktadır. Buna bağlı olarak sürtünme momenti ve gücü azalmaktadır. Sürtünme momenti ve gücünde motorun çalışma başlangıç sıcaklığı olan 30°C ve en yüksek sıcaklık olan 90°C değerleri karşılaştırıldığında yaklaşık olarak %22-38 arasında azalma göstermektedir.

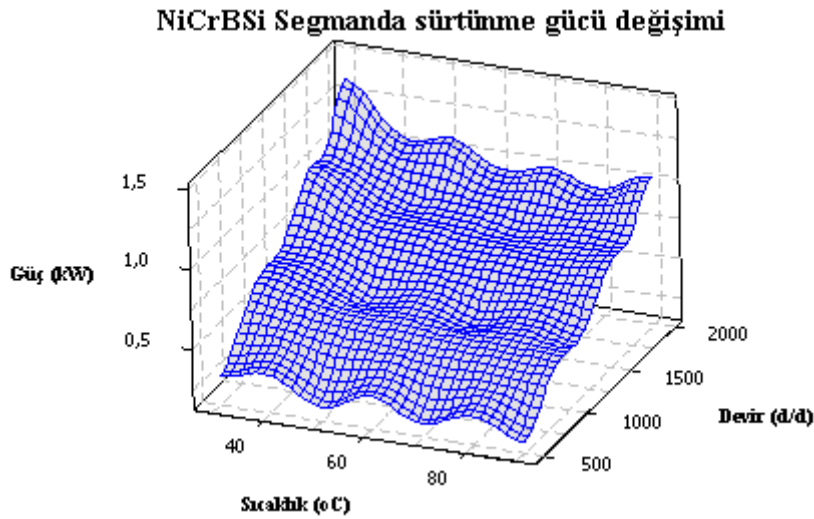
Şekil 5.81’de NiCrBSi kaplı segmanın sürtünme momentinin motor devri ve sıcaklığına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Sürtünme momenti 900 d/d iken 3,98 Nm iken motor devri 2100 d/d’ya ulaşınca % 23 artarak 5,14 Nm değerini almaktadır. Sıcaklık değişimlerinde ise sürtünme momenti, motor sıcaklığının 30°C

olduğunda 5,72 Nm iken sıcaklık 90°C'ye ulaştığında % 38 azalarak 3,56 Nm değerini almaktadır.



Şekil 5.81. NiCrBSi kaplı segmanın sıcaklık ve devre bağlı sürtünme momenti haritası

Şekil 5.82' de NiCrBSi kaplı segmanın sürtünme gücünün motor devri ve sıcaklığına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Sürtünme gücü 900 d/d iken 0,37 kW iken motor devri 2100 d/d'ya ulaşınca %67 artarak 1,13 kW değerini almaktadır. Sıcaklık değişimlerinde ise sürtünme gücü, motor sıcaklığının 30°C olduğunda 0,18 kW iken sıcaklık 90°C'ye ulaştığında %38 azalarak 0,11 kW değerini almaktadır.

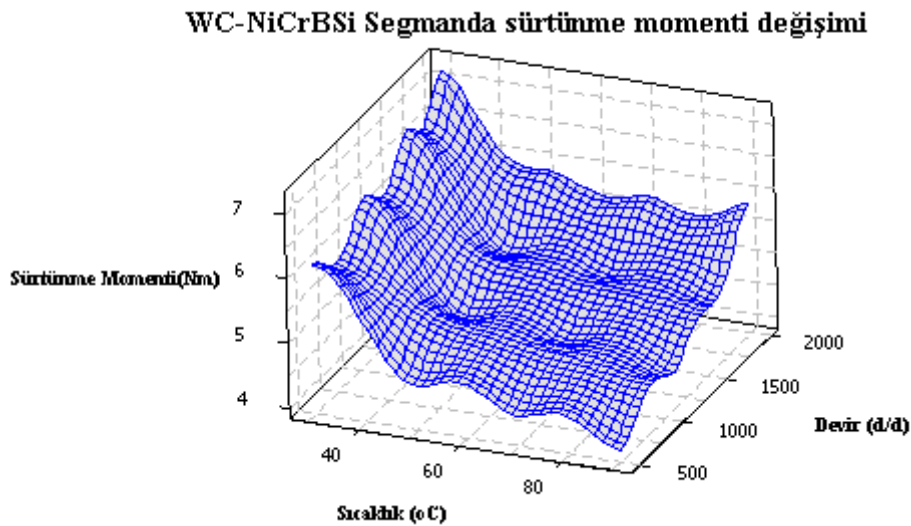


Şekil 5.82. NiCrBSi kaplı segmanın sıcaklık ve devre bağlı sürtünme gücü haritası

Şekil 5.83-84’de WC-NiCrBSi kaplı segman kullanılarak yapılan sürtünme momenti ve güç sonuçları verilmiştir. Motor devrinin artması ile sürtünme momenti ve gücünde artış olmaktadır. Sürtünme momentinde bu oran motorun çalışma devir aralıklarında yaklaşık %14-31 arasında artış göstermektedir. Sürtünme gücünde ise % 64-71 arasında artış olmaktadır.

Motor sıcaklığının artması ise motor sürtünmesini azalmaktadır. Buna bağlı olarak sürtünme momenti ve gücü azalmaktadır. Sürtünme momenti ve gücünde motorun çalışma başlangıç sıcaklığı olan 30°C ve en yüksek sıcaklık olan 90°C değerleri karşılaştırıldığında yaklaşık olarak % 20-37 arasında azalma göstermektedir.

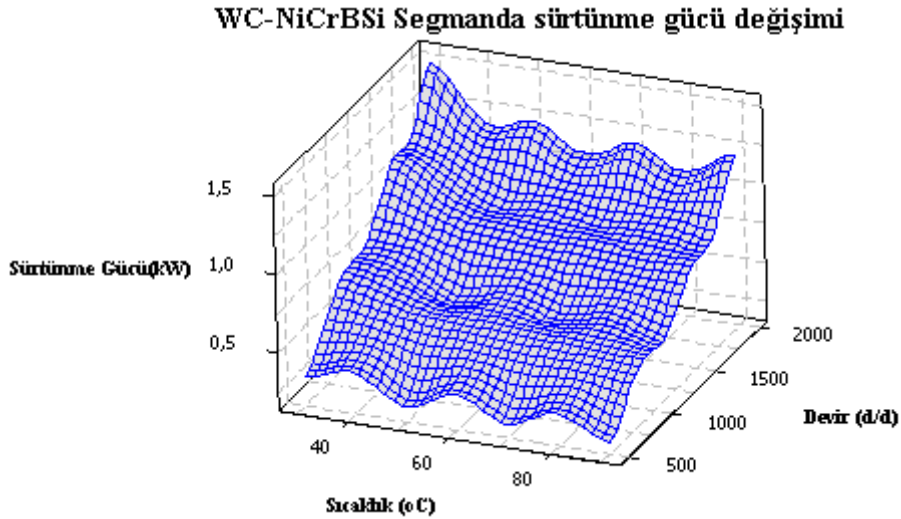
Şekil 5.83’de WC-NiCrBSi kaplı segmanın sürtünme momentinin motor devri ve sıcaklığına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Sürtünme momenti 900 d/d iken 4,25 Nm iken motor devri 2100 d/d’ya ulaşıncaya %31 artarak 6,12 Nm değerini almaktadır. Sıcaklık değişimlerinde ise sürtünme momenti, motor sıcaklığının 30°C olduğunda 6,29 Nm iken sıcaklık 90°C’ye ulaştığında %27 azalarak 4,02 Nm değerini almaktadır.



Şekil 5.83. WC-NiCrBSi kaplı segmanın sıcaklık ve devre bağlı sürtünme momenti haritası

Şekil 5.84’ de NiCrBSi kaplı segmanın sürtünme gücünün motor devri ve sıcaklığına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Sürtünme gücü 900 d/d iken 0,40 kW iken motor

devri 2100 d/d'ya ulaşınca %71 artarak 1,34 kW değerini almaktadır. Sıcaklık değişimlerinde ise sürtünme gücü, motor sıcaklığının 30°C olduğunda 0,46 kW iken sıcaklık 90°C'ye ulaştığında %37 azalarak 0,29 kW değerini almaktadır.



Şekil 5.84. WC-NiCrBSi kaplı segmanın sıcaklık ve devre bağlı sürtünme gücü haritası

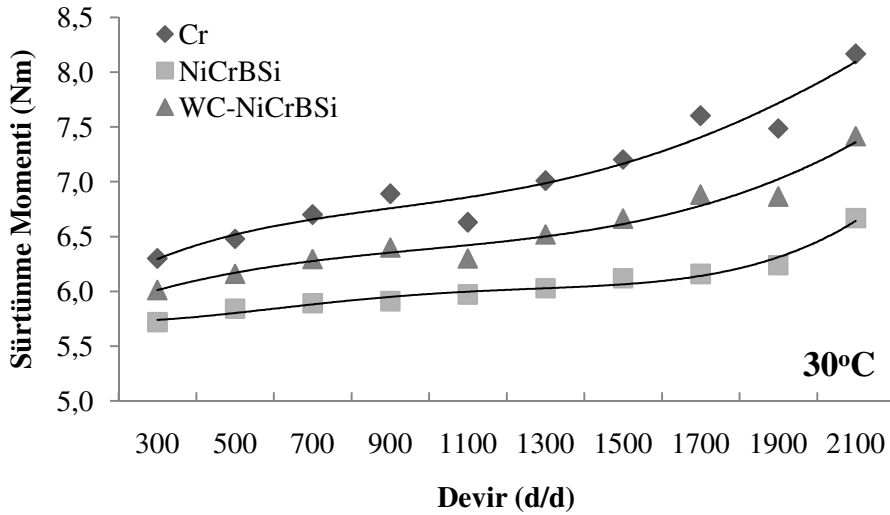
### 5.10.2. Sürtünme momenti karşılaştırmaları

Şekil 5.85-88'de Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi segman kaplamaların, motor yağ ve su sıcaklığının 30, 50, 70, 90 °C olduğu şartlarda devre bağlı olarak motor sürtünme momenti grafikleri verilmiştir. Motor yağ ve su sıcaklığının artması ile motorda ölçülen sürtünme momentinde azalma görölmektedir. Motor devrinin artması ile sürtünme momentinde artış meydana gelmektedir. Motorda NiCrBSi kaplı segman kullanıldığın da motorun sürtünme momenti diğer segmanlara göre daha düşük seviyelerdedir.

Şekil 5.85'de 30 °C sıcaklıktaki motor sürtünme momenti devirlere göre değişimi verilmiştir. Motor devri arttıkça sürtünme momenti artmaktadır. Düşük devirlerdeki (300-500-700 d/d) sürtünme moment değerleri, devir 2100 d/d' ya geldiğinde %12-20 arasında artmaktadır. Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme momenti ortalama 6,493 iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 6 azalarak 6,15 değerine, NiCrBSi kaplamalı segman kullanıldığında ise % 11 azalarak 5,81 değerine ulaşmaktadır.

Orta devirlerde (900-1100-1300-1500 d/d) Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme momenti ortalama 6,934 iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 7 azalarak 6,47 değerine, NiCrBSi kaplamalı segman kullanıldığında ise % 15 azalarak 5,91 değerine ulaşmaktadır.

Yüksek devirlerde (1700-1900-2100 d/d) Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme momenti ortalama 7,75 iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 10 azalarak 7,05 değerine, NiCrBSi kaplamalı segman kullanıldığında ise % 19 azalarak 6,35 değerine ulaşmaktadır.



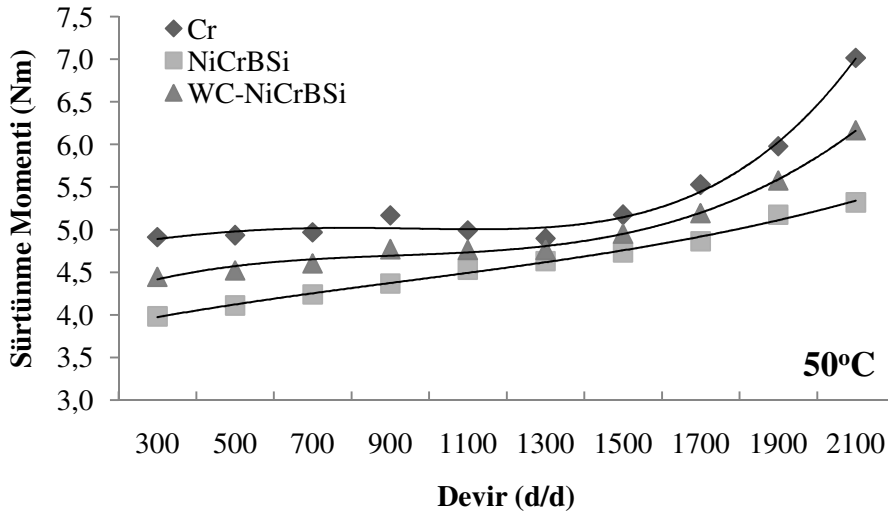
Şekil 5.85. 30 °C’de motor sürtünme momenti değişimi

Şekil 5.86’ da 50 °C sıcaklıktaki motor sürtünme momenti devirlere göre değişimi verilmiştir. Motor yağ ve su sıcaklığı arttıkça aynı devirlerdeki sürtünme momentleri düşmektedir. Düşük devirlerdeki (300-500-700 d/d) sürtünme moment değerleri, devir 2100 d/d’ ya geldiğinde % 26-31 arasında artmaktadır. Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme momenti ortalama 4,939 iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 9 azalarak 4,52 değerine, NiCrBSi kaplamalı segman kullanıldığında ise % 17 azalarak 4,11 değerine ulaşmaktadır.

Orta devirlerde (900-1100-1300-1500 d/d) Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme momenti ortalama 5,05 iken, WC-NiCrBSi

kaplı segmanda ise % 5 azalarak 4,81 değerine, NiCrBSi kaplamalı segman kullanıldığında ise % 10 azalarak 4,56 değerine ulaşmaktadır.

Yüksek devirlerde (1700-1900-2100 d/d) Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme momenti ortalama 6,17 iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 8 azalarak 5,64 değerine, NiCrBSi kaplamalı segman kullanıldığında ise % 18 azalarak 5,12 değerine ulaşmaktadır.



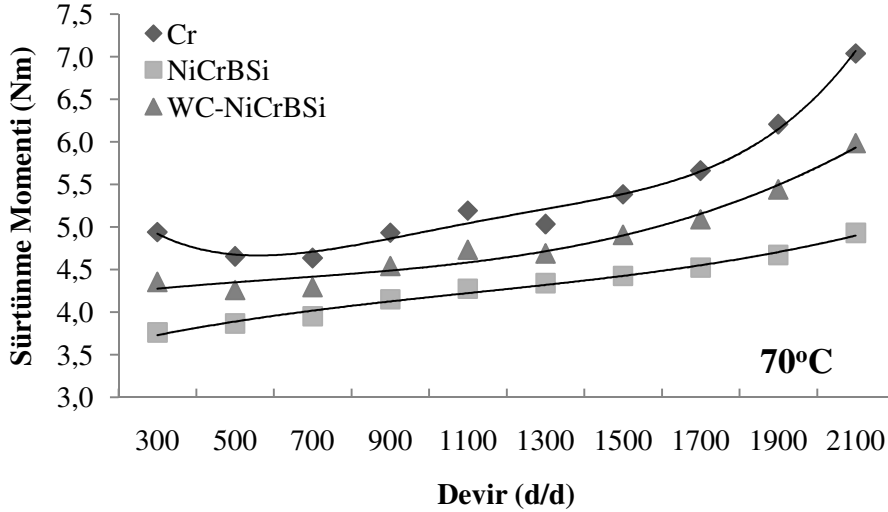
Şekil 5.86. 50 °C’de motor sürtünme momenti değişimi

Şekil 5.87’ de 70 °C sıcaklıktaki motor sürtünme momenti devirlere göre değişimi verilmiştir. Motor yağ ve su sıcaklığı arttıkça aynı devirlerdeki sürtünme momentleri düşmektedir. Düşük devirlerdeki (300-500-700 d/d) sürtünme moment değerleri, devir 2100 d/d’ ya geldiğinde % 25-30 arasında artmaktadır. Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme momenti ortalama 4,74 iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 10 azalarak 4,30 değerine, NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında ise % 19 azalarak 3,86 değerine ulaşmaktadır.

Orta devirlerde (900-1100-1300-1500 d/d) Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme momenti ortalama 5,14 iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 9 azalarak 4,72 değerine, NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında ise % 17 azalarak 4,29 değerine ulaşmaktadır.



Yüksek devirlerde (1700-1900-2100 d/d) Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme momenti ortalama 6,30 iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 13 azalarak 5,51 değerine, NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında ise % 26 azalarak 4,71 değerine ulaşmaktadır.



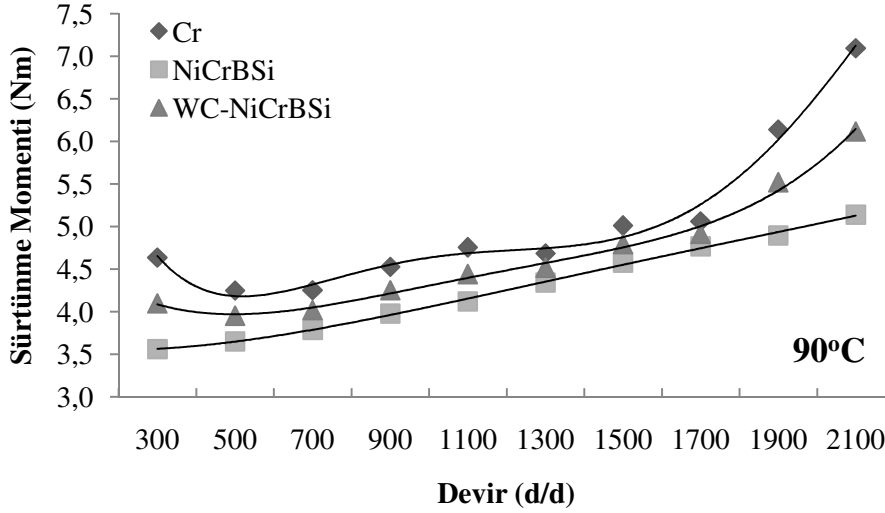
Şekil 5.87. 70 °C'de motor sürtünme momenti değişimi

Şekil 5.88' de 90 °C sıcaklıktaki motor sürtünme momenti devirlere göre değişimi verilmiştir. Motor yağ ve su sıcaklığı arttıkça aynı devirlerdeki sürtünme momentleri düşmektedir. Düşük devirlerdeki (300-500-700 d/d) sürtünme moment değerleri, devir 2100 d/d' ya geldiğinde % 32-35 arasında artmaktadır. Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme momenti ortalama 4,39 iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 9 azalarak 4,03 değerine, NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında ise % 17 azalarak 3,67 değerine ulaşmaktadır.

Orta devirlerde (900-1100-1300-1500 d/d) Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme momenti ortalama 4,74 iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 6 azalarak 4,50 değerine, NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında ise % 11 azalarak 4,25 değerine ulaşmaktadır.

Yüksek devirlerde (1700-1900-2100 d/d) Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme momenti ortalama 6,10 iken, WC-NiCrBSi

kaplı segmanda ise % 10 azalarak 5,52 değerine, NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında ise % 20 azalarak 4,94 değerine ulaşmaktadır.



Şekil 5.88. 90 °C'de motor sürtünme momenti değişimi

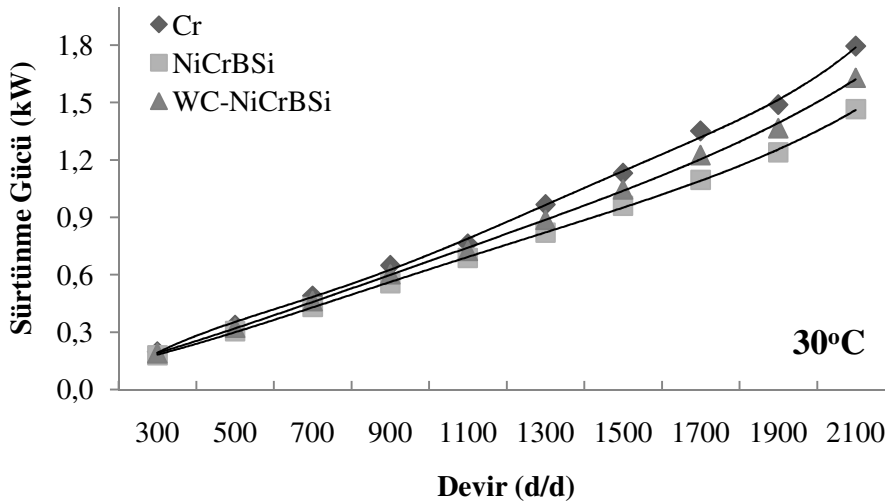
### 5.10.3.Sürtünme gücü karşılaştırmaları

Şekil 5.89-92'de Cr, NiCrBSi ve WC-NiCrBSi segman kaplamaların, motor yağ ve su sıcaklığının 30, 50, 70, 90 °C olduğu şartlarda devre bağlı olarak motor sürtünme gücü grafikleri verilmiştir. Motor yağ ve su sıcaklığının artması ile motorda ölçülen sürtünme momentinde azalma görülmektedir. Motor devrinin artması ile sürtünme gücünde artış meydana gelmektedir. Motorda NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında motorun sürtünme gücü diğer segmanlara göre daha düşük seviyelerdedir.

Şekil 5.89'da 30 °C sıcaklıktaki motor sürtünme gücü devirlere göre değişimi verilmiştir. Motor devri arttıkça sürtünme gücü artmaktadır. Düşük devirlerdeki (300-500-700 d/d) sürtünme güç değerleri motor devri 2100 d/d' ya geldiğinde %88-90 oranında artmaktadır. Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme gücü ortalama 0,34 kW iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 6 azalarak 0,32 kW değerine, NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında ise % 11 azalarak 0,31 kW değerine düşmektedir.

Orta devirlerde (900-1100-1300-1500 d/d) Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme gücü ortalama 0,88 kW iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 8 azalarak 0,82 kW değerine, NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında ise % 14 azalarak 0,76 kW değerine ulaşmaktadır.

Yüksek devirlerde (1700-1900-2100 d/d) Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme gücü ortalama 1,55 kW iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 8 azalarak 1,41 kW değerine, NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında ise % 18 azalarak 1,27 kW değerine ulaşmaktadır.



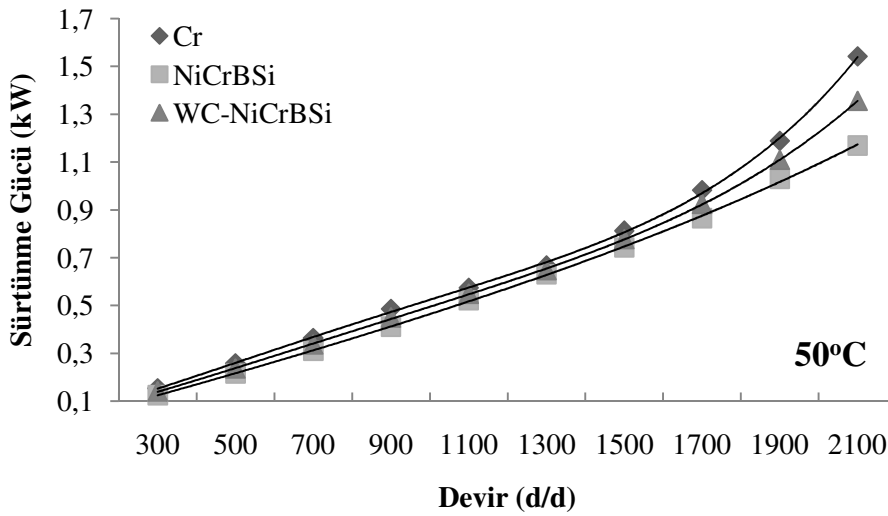
Şekil 5.89. 30°C’de motor sürtünme gücü değişimleri

Şekil 5.90’ da 50 °C sıcaklıktaki motor sürtünme gücü devirlere göre değişimi verilmiştir. Motor devri arttıkça sürtünme gücü artmaktadır. Düşük devirlerdeki (300-500-700 d/d) sürtünme güç değerleri motor devri 2100 d/d’ ya geldiğinde % 90-95 oranında artmaktadır. Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme gücü ortalama 0,26 kW iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 9 azalarak 0,24 kW değerine, NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında ise % 17 azalarak 0,22 kW değerine düşmektedir.

Orta devirlerde (900-1100-1300-1500 d/d) Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme gücü ortalama 0,64 kW iken, WC-NiCrBSi

kaplı segmanda ise % 5 azalarak 0,61 kW değerine, NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında ise % 10 azalarak 0,58 kW değerine ulaşmaktadır.

Yüksek devirlerde (1700-1900-2100 d/d) Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme gücü ortalama 1,24 kW iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 9 azalarak 1,13 kW değerine, NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında ise % 18 azalarak 1,02 kW değerine ulaşmaktadır.

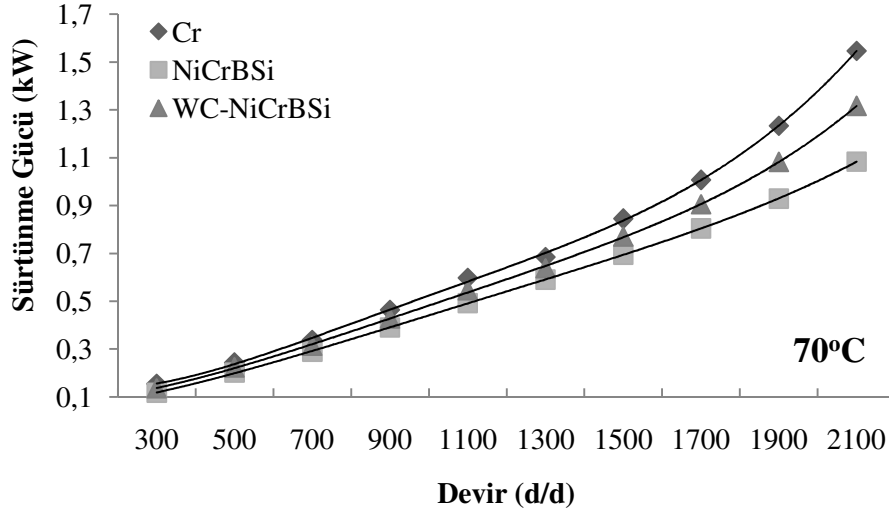


Şekil 5.90. 50°C’de motor sürtünme gücü değişimleri

Şekil 5.91’ de 70 °C sıcaklıktaki motor sürtünme gücü devirlere göre değişimi verilmiştir. Motor devri arttıkça sürtünme gücü artmaktadır. Düşük devirlerdeki (300-500-700 d/d) sürtünme güç değerleri motor devri 2100 d/d’ ya geldiğinde % 90 oranında artmaktadır. Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme gücü ortalama 0,25 kW iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 9 azalarak 0,23 kW değerine, NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında ise % 18 azalarak 0,20 kW değerine düşmektedir.

Orta devirlerde (900-1100-1300-1500 d/d) Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme gücü ortalama 0,65 kW iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 9 azalarak 0,59 kW değerine, NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında ise % 17 azalarak 0,54 kW değerine ulaşmaktadır.

Yüksek devirlerde (1700-1900-2100 d/d) Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme gücü ortalama 1,26 kW iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 17 azalarak 1,10 kW değerine, NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında ise % 26 azalarak 0,94 kW değerine ulaşmaktadır.



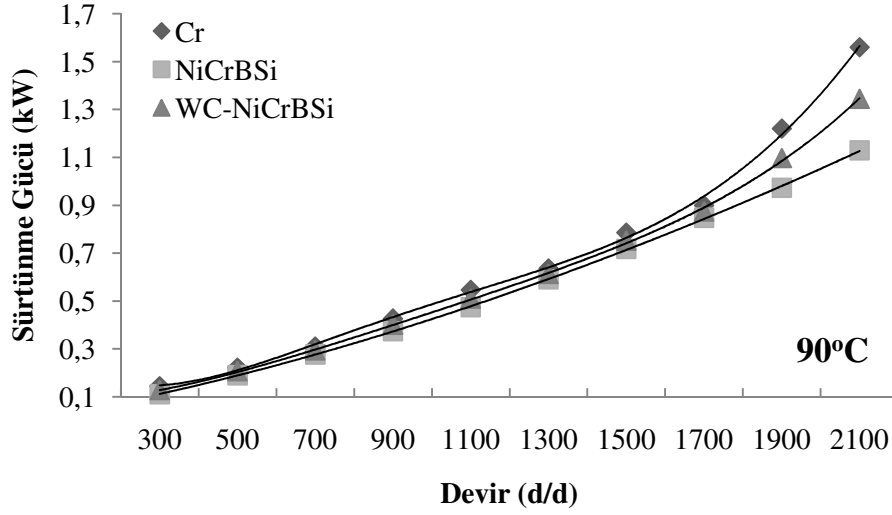
Şekil 5.91. 70°C'de motor sürtünme gücü değişimleri

Şekil 5.92' de 90 °C sıcaklıktaki motor sürtünme gücü devirlere göre değişimi verilmiştir. Motor devri arttıkça sürtünme gücü artmaktadır. Düşük devirlerdeki (300-500-700 d/d) sürtünme güç değerleri motor devri 2100 d/d' ya geldiğinde % 91-95 oranında artmaktadır. Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme gücü ortalama 0,22 kW iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 8 azalarak 0,21 kW değerine, NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında ise % 15 azalarak 0,19 kW değerine düşmektedir.

Orta devirlerde (900-1100-1300-1500 d/d) Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme gücü ortalama 0,59 kW iken, WC-NiCrBSi kaplı segmanda ise % 5 azalarak 0,57 kW değerine, NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında ise % 10 azalarak 0,54 kW değerine ulaşmaktadır.

Yüksek devirlerde (1700-1900-2100 d/d) Cr kaplı segman kullanıldığı deney sonuçlarında düşük devirlerde sürtünme gücü ortalama 1,22 kW iken, WC-NiCrBSi

kaplı segmanda ise % 10 azalarak 1,10 kW değerine, NiCrBSi kaplı segman kullanıldığında ise % 20 azalarak 0,98 kW değerine ulaşmaktadır.



Şekil 5.92. 90°C’de motor sürtünme güçleri değişimi

## **BÖLÜM 6. GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER**

### **6.1.Taguchi Metodu Sonuçları**

Taguchi metodu aşınma deneyleri için uygulanmıştır. Deneysel sayısının daha da artırılabilir ve farklı uygulamaların denenebileceği bu deneylerde öncelikli faktörler belirlenmiş ve etki sıralamaları yapılmıştır. Bu belirlemeler ve sıralamalar deneysel sayısının optimize edilmesi ve çalışmaların etki derecesi yüksek faktörler üzerine yoğunlaşmasını sağlayacaktır.

Segman aşınma değerleri ile ilgili yapılan Taguchi analizlerinde en küçük aşınma oranı en iyi sonuç olarak değerlendirilmiştir. Bu sonuçlara göre segman aşınmasında en iyi sonuçlar düşük yük (60N), yüksek sıcaklık (90°C), yüksek hız (150d/d) ve WC-NiCrBSi kaplama şartlarında elde edilmiştir. Bu sonuçlar literatüre uygun şekilde sonuçlanmıştır. Kaplamalarda en az aşınan segman numunesi, sertlik değeri en yüksek olan WC-NiCrBSi kaplamadır. Bu sonuçlara benzer çalışmalarda da ulaşılmıştır (Martin, 2001; Saito, 1995; Abdel Aal, 2000). Ayrıca segman aşınma oranında faktörlerin (yük, sıcaklık, hız ve kaplama) etki sıralaması yapılırsa, kaplama (626,57), yük (216,31), hız (190,62) ve sıcaklık (54,33) olacaktır. Faktörlerin F değerleri kullanılarak analizi yapılan etki sıralaması deneysel sonuçlarının varyans analizinden elde edilmiştir.

Gömlek aşınma değerleri ile ilgili yapılan Taguchi analizlerinde en küçük aşınma oranı en iyi sonuç olarak değerlendirilmiştir. Bu sonuçlara göre gömlek aşınmasında en iyi sonuçlar düşük yük (60N), yüksek sıcaklık (90°C), yüksek hız (150d/d) ve NiCrBSi kaplama şartlarında elde edilmiştir. Bu sonuçlar literatüre uygun şekilde sonuçlanmıştır. Kaplamalarda en az aşınan segman numunesi, sertlik değeri en yüksek olan WC-NiCrBSi kaplama, gömlek aşınmasında en düşük ikinci aşınma olmuştur. Bunun sebepleri arasında WC partiküllerinin kaplama tabakasından

ayrılarak kaplama tabakasına göre daha yumuşak olan gömlek numunesinin aşınmasında önemli bir rol aldığı düşünülmektedir. Bu partiküller üçlü abrazif aşınmanın oluşmasına katkı yapmaktadırlar. Bu sonuçlara benzer çalışmalarda da ulaşılmıştır (Gruzdys,2008; Martin, 2001). Ayrıca gömlek aşınma oranında faktörlerin (yük, sıcaklık, hız ve kaplama) etki sıralaması yapılırsa, hız (399,07) kaplama (169,25), yük (35,42), ve sıcaklık (15,08) olacaktır. Faktörlerin F değerleri kullanılarak analizi yapılan etki sıralaması deney sonuçlarının varyans analizinden elde edilmiştir.

## 6.2. Sürtünme Katsayısı Sonuçları

Aşınma cihazında yapılan deneylerde sürtünme katsayısı tabla hızının artması ile azalmıştır. Benzer durum aynı hız şartlarında tabla hızının sıfır olduğu ölü noktalarda da görülmüştür. Ölü noktalarda tabla hızının sıfır olası durumunda sürtünme katsayısı artmış, diğer noktalarda ise ölü noktalara göre azalmıştır. Her kaplama malzemesi için geçerli olan bu durum yağlama rejimleri ile ilişkilidir. Bu azalma hızın artması ile yağlama rejiminin hidrodinamik yağlamaya geçmesi ile açıklanabilir. Ayrıca yüzey pürüzlülüklerinin etkisi ile oluşan adezhif etki azalmakta ve böylece sürtünme katsayısında belirgin bir düşüş yaşanmaktadır (Tomanik,2008). Hızın azalması ile yağlama rejimi karma ve sınır yağlama rejimine kaymaktadır. Buda sürtünme katsayısını arttırmaktadır. Sürtünme katsayısının ölü noktalarda yüksek olması yapılan diğer çalışmalarda da tespit edilmiştir (Basinger,2010-Tung,2006-Tan,2011, Yamaguchi,2006).

Farklı segment kaplamaları ile yapılan deneylerin tümünde sürtünme katsayısı sıcaklığın artması ile azalmaktadır. Sürtünme katsayısının azalması yağlama yağının viskozitesinin düşmesi ile açıklanabilir. Sıcaklığın artması ile yağ viskozitesi düşmekte ve yağın yüzey katmanları arasındaki filmin kayma gerilimi zayıflamaktadır (McQueen,2005- Zhang,2002- Etsion,2006- Gao,2004). Yağ viskozitesinin sıcaklık artışı ile düşmesi durumunda ölçülen sürtünme katsayısının artmamasının nedeni olarak, verilen sıcaklık aralığında yağın hidrodinamik sürtünme şartlarını devam ettirmesi gösterilebilir. Sıcaklık artışına bağlı olarak hidrodinamik şartlarda yağ filmi içerisindeki kayma gerilmesi azalmaktadır. Deneyler de kullanılan



10W40 sınıfı yağın sıcaklık artışı ile sürtünme performansındaki artış yağın sentetik ürünlerinin fazlalığı ile ilişkilidir. Günümüzde otomotiv firmaları yeni araçlarında viskozitesi düşük fakat sürtünme performansı yüksek yeni nesil sentetik yağları tercih etmektedirler.

Sürtünme katsayıları yükün artması ile azalmaktadır. Bu eğilim tüm sıcaklıklar ve kaplama malzemeleri için geçerlidir (Etsion,2006). Sürtünme katsayısının değişiminde etkili bir faktörde yüzey pürüzlülüğüdür. Yüksek yüklerde yüzey pürüzlülüğü azalmakta böylece sürtünme katsayısı düşmektedir (Selçuk,2003-Archard,1986). Yüksek yüklerde sürtünme katsayısının diğer bir düşüş nedeni ulaşılan yüksek sıcaklıkların etkisi ile oluşan oksitlenmedir. Oksit tabakası sürtünme katsayısının azalmasında oluşturduğu film tabakası ile etkin olmaktadır.

### **6.3. Aşınma Oranları Sonuçları**

Üretilen kaplamaların aşınma değerleri yükün artması ile artmaktadır. Uygulanan yükün artışı ile aynı hız ve sıcaklık değerlerinde aşınma artmaktadır (Selçuk,2003). Tüm deneylerde hedeflenen menzil kat edilmiştir. Ayrıca 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.

Aşınma değerleri hızın artması ile azalmaktadır. Bu azalma izafi hareket eden parçalar arasında yağlama rejiminin hidrodinamik hal almasından kaynaklanmaktadır (Molinari,2001). Ayrıca hızın artması ile yağlama rejiminin hidrodinamik yağlamaya geçmesi ile açıklanabilir. Ayrıca yüzey pürüzlülüklerinin etkisi ile oluşan adhezif etki azalmakta ve böylece sürtünme katsayısında belirgin bir düşüş yaşanmaktadır (Tomanik,2008).

Aşınma değerleri sıcaklık artışı ile azalmaktadır. Bu eğilim tüm yükler ve kaplamalarda aynıdır. Sıcaklığın artması ile aşınma değerleri düşmüştür. Yağın içerisindeki aşınmayı azaltıcı katkıları, yüzey sıcaklığının artışı ile sürtünen yüzeyler

arasında fiziksel ve kimyasal etkileşime daha çabuk girmektedirler (McQueen,2005-Xu,2004-Gao,2004).

#### 6.4. Motor Deneyleri Sonuçları

Motor deneylerinde, devir arttıkça sürtünmeye harcanan güç artmaktadır (Giannelliand,2003-Wong,2002-Soejima,1994). Deneylerde, sürtünme kaybı kaplama malzemesine bağlı olmaksızın devrin artması ile lineer şekilde artış göstermektedir(Krzymien,2003). Düşük devirlerdeki sürtünme kaybı orta devirlere göre daha azdır. Yüksek devirlerde ise hem düşük devir hem de orta devirlere göre daha fazla sürtünme kaybı olmaktadır. Bu artma direkt olarak silindir-segman sürtünmesi ile ilişkilidir. Ölü noktalarda piston hızının düşmesi ile yağlamada sınır yağlama şartları oluşmaktadır. Düşük devirlerde motor yağlama rejimleri sınır ve karışık yağlamadır. Strok ortasında hidrodinamik, ölü noktalarda ise sınır ve karışık yağlama meydana gelir. Strok ortasında piston hızı maksimumdur. Ölü noktalarda ise piston hızı sıfırdır. Motor devrinin 3000 d/d' nın üzerine çıktığı durumlarda yağ filmi akışkan basınçlarından dolayı bozulur ve sınır ve karışık yağlama meydana gelebilir (Tan,2011). Yüksek devirlerde piston grubundan kaynaklanan sürtünme kaybı artarken mekanik verimde azalma göstermektedir. Bunun nedeni düşük motor devirlerinde, sürtünen parçaların toplam motor verimliliğini yüksek oranda etkilemesidir (Leustek,2005-Golloch,2005).

Motor sürtünmesine en büyük katkıyı piston grubu yapmaktadır. Motor devri attıkça piston grubunun sürtünmeye katkısı azalmakta, sıcaklık azaldıkça ise artmaktadır (Daniels, 2006). Motor sürtünmesinin bu karakteristik yapısı, motorun normal çalışır durumda iken silindir içi basıncın ölçüldüğü yöntem ile benzerlik göstermektedir. Bu karakteristik davranışın sebebi olarak, motor sıcaklığı arttıkça sürtünen yüzeylerin arasındaki yağlama yağının viskoz etkisinin azalması gösterilebilir (Soejima,1994).

Motor içerisindeki yağın sıcaklık şartları soğutma suyunun sıcaklığı ile yakından ilgilidir. Bu yüzden segman-silindir sürtünmesinin ölçümünde, soğutma suyunun sıcaklık değişimi önemlidir (Leustek,2005).Motor deneylerinde aynı devir ve yük şartlarında motor sürtünmesi sıcaklık arştı ile azalmaktadır. Motor sürtünmesi, motor

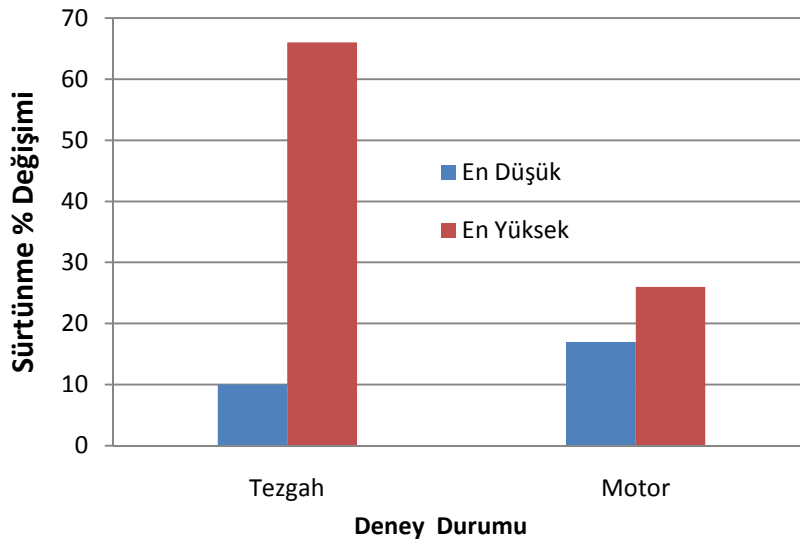
soğutma suyu ve yağın sıcaklığının artması ile azalmaktadır. Bunun sebebi motor yağının sıcaklığa bağlı olarak viskozitesinin azalmasıdır (Daniels, 2006).

Motor yağının sıcaklıkla değişim gösteren viskozitesinin sürtünmeye direkt etkisi vardır. Viskozite motor yağlarının başlıca özelliğidir. Yağ viskozitesi eğer çok düşük ise yağ film kalınlığı sürtünen parçalar arası teması neden olabilir. Yağ viskozitesinin artırılması ise hidrodinamik sürtünme katsayısı için gerekli değildir. Çünkü viskozitesi yüksek yağ ilk çalışma anında pompalama zorluğunda dolayı daha fazla sınır sürtünme ve aşınmaya neden olur. Optimum yağ viskozitesi motorun tasarımına bağlıdır. Motorlarda minimum sınır sürtünme için daha ince yağlar yararlıdır. Çünkü daha düşük viskozite sınır sürtünmeyi azaltmaktadır (Skjoedt,2008). Yapılan çalışmalarda mineral yağların viskoziteleri katkılarla düzenlenerek iyileştirilmişlerdir. Mineral yağlara, sürtünme iyileştirici ilave edilerek yağın viskozitesi düşürülmüştür. Böylece benzinli motorunun sürtünmesini azaltılmış ve yakıt ekonomisi geliştirilmiştir (Benvenuti,2002). Yağ viskozitesi sürtünme kayıpları etkilemek yüksek viskoziteli yağların sürtünme kayıpları daha fazla olmaktadır (Lechner,2002). Yüksek sürtünme gücü, strok konumuna bağlı olarak hidrodinamik rejimden çıkılması, yüksek yağ viskozitesi, yüksek segman tansiyonu ve yüksek motor devrine bağlıdır (Cho,2000). Diğer çalışmalarda bu sonucu desteklemektedir. Sürtünmedeki bir artma kısmen, yüksek hızın sebep olduğu yağlayıcının yüksek kayma etkisi ile açıklanabilir (Durga,1998). Başka bir çalışmada yağ viskozitesi iyileştirici kullanılarak benzinli motorun yakıt ekonomisinde %4'lük bir iyileşme sağlanmıştır (Skjoedt,2008- Tseregounis,1998).

Deneylerde kullanılan yarı sentetik yağın etkisi de sürtünme değerlerini düşürmektedir. Yağın içerisinde bulunan sürtünme ve aşınma geliştiriciler performansı etkilemektedir. Verilen viskozite derecelerine göre sentetik katkılı yağlar motor sürtünmelerini özellikle yüksek sınır sürtünme noktalarında azaltmaktadır. Bu azaltmanın nedenleri, viskozite indekslerini geliştiricilere sahip olmalarıdır. Bu da yağın rahat şekilde yüzeyler arasında geçişini sağlamakta fakat bu yüzeyler arası geçişte yağ işlevini yapmaktadır. Bu işlev ise yağın içerisindeki moleküllerin motorun sürtünen yüzeylerine yapışması ile gerçekleşmektedir (Skjoedt,2008).

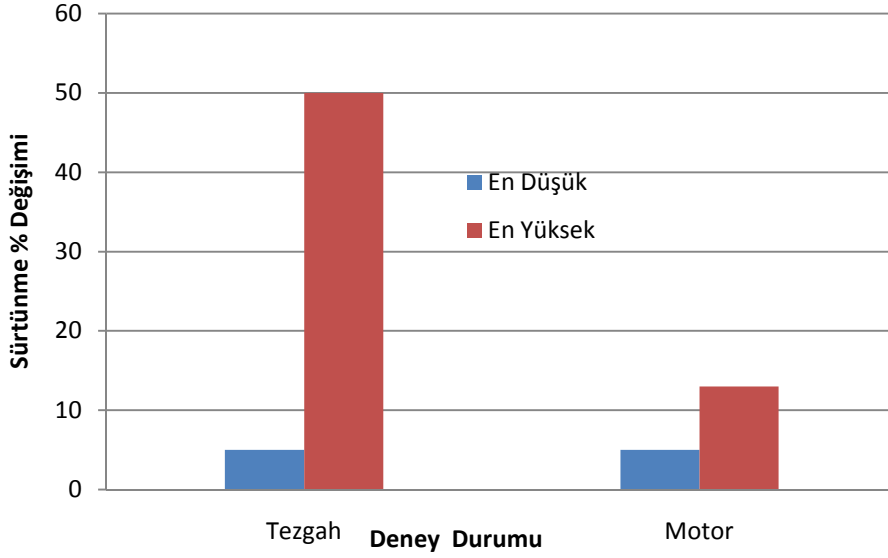
## 6.5. Genel Değerlendirme ve Karşılaştırmalar

Şekil 1.2’de verilen tribolojik test sıralaması bu çalışmada uygulanmıştır. Öncelikle motorlarda kullanılan segman ve gömlek numuneleri aşınma cihazında sadece biri değil her ikisi kullanılarak hem model hem de bileşen testine tabi tutulmuşlardır. Aşınma deneylerinde gerçek çalışma şartlarına en uygun şekilde seçilen deney şartları çalışmanın bu bölümünü daha da realize etmektedir. Aşınma deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma oranları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bundan sonra ürünün testine geçilmiştir. Ürün testi için içte yanmalı motor üzerindeki deney şartları da motorun gerçek çalışma şartlarına uygun şekilde düzenlenmiştir. Daha sonra motor sürtünme deneyleri yapılmıştır. Sırası ile aşınma deneyi sonuçları ile motor deneyi sonuçları, sürtünme ve aşınma kayıpları ve motor performansı açısından karşılaştırılmıştır. Model ve bileşen testleri ile ürün testinde elde edilen sürtünme kaybı düşüş oranları Şekil 6.1-2’de verilmiştir. Model ve bileşenden ürün testine gidildikçe düşüş oranları küçülmektedir. NiCrBSi kaplamada aşınma tezgahın da yapılan deneylerdeki değişim %10-66 arasında değişirken, motor deneylerinde ise %13-26 arasında değişkenlik göstermektedir.



Şekil 6.1. NiCrBSi kaplı segman kullanımında aşınma cihazı ve motor üzerindeki sürtünme % değişimi

WC-NiCrBSi kaplamada aşınma tezgahın da yapılan deneylerdeki değişim %5-50 arasında değişirken, motor deneylerinde ise %5-13 arasında değişkenlik göstermektedir.



Şekil 6.2. WC-NiCrBSi kaplı segman kullanımında aşınma cihazı ve motor üzerindeki sürtünme % değişimi

Çalışma sonuçları göstermiştirki değişim oranları karşılaştırıldığında, her iki kaplama için aşınma cihazında yakalanılan değişim oranlarına motor deneylerinde ulaşamamıştır. Model ve bileşenden ürün testine gidildikçe kaplamalar arası düşüş oranları küçülmektedir. Model ve bileşen testleri ile gerçek çalışma şartlarının değişim aralıklarının bir kısmı çakışmaktadır. Fakat model- bileşen testlerinin değişim oranları gerçek şartlardan daha yüksek çıkmıştır. Bu da gerçek çalışma şartlarının zorlukları ile açıklanabilir.

## KAYNAKLAR

ABDEL-AAL, H.A., The correlation between thermal property variation and high temperature wear transition of rubbing metals, *Wear*, 237, 147–151, 2000

ADAMSON, A.W., *Physical Chemistry of Surfaces*, 4th Ed., John Wiley and Sons, p. 404, 1982

AKALIN, O., D NEWAZ, G.M., A new experimental technique for friction simulation in automotive piston ring and cylinder liners, SAE Paper 981407, 6 p., 1998

ALMEN, J.O., *Mechanical Wear* (ed J.T. Burwell), American Society for Metals, pp. 229–288, 1950.

ANDERSSON, P., Measurements on piston ring friction using a newly developed tribometer, Paper presented at the 10th Nordic Symposium on Tribology – Nordtrib 2002, Stockholm, Sweden, 9th–12th June, 2002

ANGGULO-BROWN, F., FERNANDEZ-BETANZOS, J., DIAZ-PICO, C.A., *Eur. J. Phys.*, 15, (1), 38–42, 1994

ANGULO-BROWN, F., ROCHA-MARTINEZ, J.A., NAVARRETE-GONZALEZ, T.D. A non-endoreversible Otto cycle model:improving power output and efficiency. *Journal of Physics D: Applied Physics* 29:80–83, 1996

ARCHARD, J.F., Friction between metal surface, *Wear*, 113, 3–16, 1986

ARCOUMANİS, C., DUSZYNSKI, M., FLORA, H., OSTOVAR, P., Development of a pistonring lubrication test-rig and investigation of boundary conditions for modelling lubricant film properties, SAE Paper 952468, 19 p. 1995

ARCOUMANIS, C., OSTOVAR, P., MORTIER, R., Mixed lubrication modelling of Newtonian and shear thinning liquids in a piston-ring configuration. Society of Automotive Engineers, Inc. SAE Paper 972924, 26 p., 1997

BANSAL, P., SHIPWAY, P.H. LEEN, S.B., *Acta Mater.* 55-5089, 2007

BASINGER, M., REDING, T., RODRIGUEZ-SANCHEZ, F.S., LACKNER, K.S., MODI, V., Durability testing modified compression ignition engines fueled with straight plant oil, *Energy*, 35, 3204-3220, 2010

- BAYER, R.G., Mechanical Wear Prediction and Prevention, Dekker, pp. 200–291, New York, 1994
- BAYRAK, Z., Taguchi yönteminin kalite kontrolüne uygulanması, Kocaeli Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli, 1996
- BENVENUTTI, L.H., COELHO, E.P.D., FİLHO, A.S., RIBEIRO, E., CAMPOS, J.F.L., POSSUELO, R.B., Fuel economy performance evaluation of 5W-30 low friction oil, SAE Paper 2002-01-3530, 2002
- BHATTACARYYA, S., Energy Convers. Manag., 41, 847–854, 2000
- BHUSHAN, B., Modern Tribology Handbook, Vol.1-Principles of Tribology, edited by B. Bhushan, CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 49-119, 2001
- BHUSHAN, B., GUPTA, B.K., Handbook of Tribology, Mc Graw Hill Inc., s. (15.1-15.71, 9.1-9.60), 1991
- BLANK, D.A., WU C., Energy Convers. Manag., 34, 1266–1279, 1993
- BLAU, J.P., BUDİNSKİ, K.G., Development and use of ASTM standards for wear testing, Wear 225–229, 1159–1170, 1999
- BLAU, J.P., DIAMOND S., SKLAD P.S., Improved Friction Tests for Engine Materials, High Strength Weight Reduction Materials, Progress Report, FY, 2003
- BODGER, B.E., MCGRANN, R.T.R., SOMERVILLE, D.A., Plating Surf. Finish. 84 (9)28, 1997
- BOLANDER, N.W., STEENWYK, B.D., KUMAR, A., SADEGHİ, F., Film thickness and friction measurement of piston ring cylinder liner contact with corresponding modeling including mixed lubrication, 2004 Fall Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division October 24-27, Long Beach, California USA, 2004
- BOLANDER, N.W., STEENWYK, A., SADEGHİ, F., GERBER G.R., Lubrication regime transitions at the piston ring–cylinder liner interface, J01504 # IMechE, Proc. IMechE Vol. 219 Part J: J. Engineering Tribology, 2005
- BOSCH, Automotive Handbook 5th Edition , Tribology Page, 330-333, 2001
- BRANGT O.C., Mechanical properties of HVOF coatings. Journal of Thermal Spray Technology. Vol. 4(2): 147-152, 1995
- BROSZEIT, E., FRIEDRICH, C. BERG, G., Deposition, properties and applications of PVD CrxN coatings. Surface and Coatings Technology, 11-5, pp. 9–16, 1999
- CANIYILMAZ, E., Kalite geliştirmede Taguchi metodu ve bir uygulama, Gazi Üniversitesi Yüksek lisans tezi, Ankara, 2001

- CARRASQUERO, E.J., LESAGE, J., PUCHI-CABRERA, E.S., STAIA, M.H., Fretting wear of HVOF Ni–Cr based alloy deposited on SAE 1045 steel, *Surface & Coatings Technology* 202, 4544–4551, 2008
- CHARLES, P.H., *Thermal Spraying Processes, Preparation, Coating and Application*, *Welding Journal*, 73(4), pp.47-51, 1994
- CHEN, A., QUI, X., SRIDHARAN, K., HORNE, W.G. DODD, R.A., Chromium Plating Pollution Source Reduction by Plasma Source Ion Implantation, *Surf. and Coat. Technol.*, 82, 305-310, 1996
- CHEN, L., WU, C., SUN, F.J., *Non-Equilib. Thermodyn.*, 24, 327–359, 1999
- CHO, T.Y., J.H. YOON, K.S. KIM, N.K. BAEK, S.Y. HWANG, S.J. YOUN, H.G. CHUN, 15th Aero Technology Symposium, Logistics Command ROKAF, September 15, 2006
- CHO, T.Y., YOON, J.H., KIM, K.S., SONG, K.O., JOO, Y.K. , FANG, W., ZHANG, S.H., YOUN, S.J., CHUN, H.G., HWANG, S.Y., A study on HVOF coatings of micron and nano WC–Co powders, *Surface & Coatings Technology* 202, 5556–5559, 2008
- CHO, S.W., CHOI, S.M., BAE, C.S., Frictional modes of barrel shaped piston rings under flooded Lubrication, *Tribology International*, 33, 545–551, 2000.
- COLMONOY, <http://www.wallcolmonoy.com/nickel-based-alloy.html>, 05.01.2011
- COTTON, F.A., WILKINSON, W., *Advance Inorganic Chemistry*, 5th ed., Wiley Interscience, p. 724, 1988
- COY, R.C., Practical applications of lubrication models in engines, *Tribology International*, 31(1998)10, pp. 563–571, 1998
- ÇELİK, E., AVCI, E., YILMAZ, F., Evaluation of interface reactions in thermal barrier ceramic coatings, *Surface and Coatings*, Vol.97, pp.361-365, 1997
- ÇELİK, E., CULHA O., UYULGAN B., AK AZEM N.F., OZDEMIR I., TURK, A., Assessment of microstructural and mechanical properties of HVOF sprayed WC-based cermet coatings for a roller cylinder, *Surface & Coatings Technology* 200, 4320 – 4328, 2006
- DANIELS C.C., BRAUN M.J., The Friction Behavior of Individual Components of a Spark-Ignition Engine During Warm-Up, *Tribology Transactions*, 49: 166-173, 2006
- DEARLOVE, J., CHENG, W.K., Simultaneous piston ring friction and oil film thickness measurements in a reciprocating test rig, *SAE Technical Paper Series* 952470, pp. 29–39, 1995



DIN - German industrial standard DIN 51 834, part 1 and 2, Testing of lubricants - Tribological test in the translatory oscillation apparatus, 6-7 p.

DOWSON, D., ECONOMOU, P., RUDDY, B., STRACHAN, P., BAKER, A., Piston ring lubrication - part ii. theoretical analysis of a single ring and a complete ring pack, Energy Conservation Through Fluid Film Lubrication Technology: Frontier in Research and Design, ASME Winter Annual Meeting , pp. 23–52, 1979

DUFRANE K.F., GLAESER W.A., Wear of Ceramics In Advanced Heat Engine Applications, Proc. Intl. Conf. on Wear of Matl's, ASME, pp. 285-291, 1987

DUFRANE, K.F., Wear performance of ceramics in ring/cylinder applications. Journal of the American ceramic Society, 72, 4, pp. 691–695, 1989

DURGA, V., RAO, N., BOYER, B.A., CIKANEK, H.A., KABAT, D.M., Influence of surface characteristics and oil viscosity on friction behaviour of rubbing surfaces in reciprocating engines, In: Proc. Fall Technical Conference ASME-ICE, Vol. 31–2, Paper No. 98-ICE-131, pp. 23–35, 1998

E3 TAM, <http://www.e3tam.com/temsilcilikler/pcb/kuvvet.htm>, 15.12.2010

EBISAWA, M., HARA T., HAYASHI T., USHIKO M., SAE Paper No.-910835, 1991

ECONOMOU, P., DOWSON, D., BAKER, A., Piston ring lubrication -part i. the historical development of piston ring technology, Energy Conservation Through Fluid Film Lubrication Technology: Frontier in Research and Design, ASME Winter Annual Meeting , pp. 1–22, 1979

ETSION, I., HALPERIN, G., BECKER, E., The effect of various surface treatments on piston pin scuffing resistance, Wear, 261, 785–791, 2006

EVANS, A.G., MARSHALL, D.B., Wear mechanism in ceramics, in Fundamentals of Friction and Wear of Materials, Rigney, D.A. (Ed.), ASM, 439, 1981

EYRE, T.S., DUTTA, K.K., DAVIS, F.A., Characterization and simulation of wear occurring in the cylinder bore of the internal combustion engine. Tribology International, England, 1990

FERGUSON, C.R., KIRKPATRICK, A.T., Internal combustion engines: applied thermosciences, 2nd edn; New York, John Wiley and Sons., 2001

FURUHAMA, S., TAKIGUCHI, M., TOMIZAWA, K., “Effect of Piston and Piston Ring Designs on the Piston Forces in Diesel Engines”, SAE Paper:810977, 1981

FURUHAMA, S., SASAKI, S., New device for the measurement of piston frictional forces in small engines, Musashi Institute of Technology, Tokyo, 1983

- GALLIGAN, J., TORRANCE, A.A., LIRAUT, G., A scuffing test for piston ring/bore combinations Part I. Stearic acid lubrication. *Wear*, 2361–2, pp. 199–209, 1999a
- GALLIGAN, J., TORRANCE, A.A. LIRAUT, G., A scuffing test for piston ring/bore combinations: Part. II. Formulated motor lubrication. *Wear*, 2361–2, pp. 210– 220, 1999b
- 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
- GE, Y., CHEN, L., SUN, F., WU, C., Thermodynamic simulation of performance of an Otto cycle with heat transfer and variable specific heats for the working fluid. *Int J Therm Sci*, 44(5):506–11, 2005
- GE, Y., CHEN,L., SUN, F., Finite-time thermodynamic modelling and analysis of an irreversible Otto-cycle. *Applied Energy*, 85:618–624, 2008
- GERARD, B., Application of thermal spraying in the automobile industry, *Surface & Coatings Technology* 201, 2028–2031, 2006
- GHANI, J.A., CHOUDHURY, I.A., HASSAN, H.H., Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 145 84–92, 2004
- GIANNELLIAND R.A., NAM E., Medium and Heavy Duty Diesel Vehicle Modeling Using A Fuel Consumption Methodology, U.S. EPA NVFEL, 2003
- GLAESER, W.A., *Materials for tribology*. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier Science Publishers B.V., Tribology Series 20, 260 p. ISBN 0-444-88495-5, 1992
- GLIDEWELL, J., KORCEK, S., Piston ring/cylinder bore friction under flooded and starved lubrication using fresh and aged engine oils, *SAE Paper* 982659, 10 p., 1998
- GOLLOCH, R., MERKER, G.P., KESSEN, U., BRINKMANN, S., Functional Properties of Microstructured Cylinder Liner Surfaces for Internal Combustion Engines, *Tribotest Journal* 114, June, 2005
- GONZÁLEZ, R., CADENAS, M., FERNÁNDEZ, R., CORTIZO, J.L., RODRÍGUEZ, E., Wear behaviour of flame sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser, *Wear*, Vol. 262, No. 3-4, pp. 301-307, 2007
- GRUZDYS, E., MESKINIS, S., JURAITIS, A., Influence of WC/Co Concentration on Structure and Mechanical Properties of the Thermally Sprayed WC/Co-NiCrBSi Coatings, *Materials Science*, Vol. 15, No. 1. 2009

GUILMANY, J.M., DOSTA, S., MIGUEL, J.R., The enhancement of the properties of WC-Co HVOF coatings through the use of nanostructured and microstructured feedstock powders, *Surface & Coatings Technology*, 201, 1180–1190, 2006

HAMATAKE, T., WAKURI, Y., SOEJIMA, M., KITAHARA T., Some studies on the tribology of diesel engines, Hamburg, Germany, CIMAC. Proc. 23rd CIMAC world congress on combustion engine technology for ship propulsion, power generation, rail traction, Vol. 4, pp. 1426–1440, 2001

HARTFIELD, W.S., TUNG, S., RIVARD, C. “Development of a Bench Test for the Evaluation of Engine Cylinder Components and the Correlation with Engine Test Results” SAE Paper No: 932693, 1993

HAŞİMOĞLU, C., İÇİNGÜR, Y., Dizel Motorlarda Azot Oksit (NOX) Kontrol Yöntemleri, *Selçuk Teknik Online Dergisi*, ISSN-1302-6178, Vol. 1, No:2, Konya, 2000

HENEIN, N.A., FRAGOULIS, A., NICHOLS, A., “Time Dependent Frictional Torque in Reciprocating Internal Combustion Engines”, *Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, Vol.44, N.4, 313-318, 1988

HERSEY, M., *Theory and Research in Lubrication*. John Wiley & Sons, Inc. 1966

HEYDARZADEH M., KASHI A.A., HADAVI S.M.M., *Mat J., Proc. Tech.* 138, 219–222, 2003

HEYWOOD, J.B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, Singapore, 1988

HOLF, I.H., *Thermal Spraying and Its Application*", *Welding and Metal Fabrication*, pp.266-269 July, 1995

HOSHI, M., BABA, Y., FURUHAMA, S., “A Study of piston Force in an Internal Combustion Engine” *Tribology Transactions*, Vol.32, pp.453-460, 1989

HOU, S.S., *Energy Convers. Manag.*, 45, 3003–3015, 2004

HOWES, C.P., *Thermal spraying: Processes, preparation, coatings and applications*. *Welding Journal* 73(4): 47-51, 1994

HUTCHINGS, I.M., *Tribology, Friction and wear of engineering materials*, pp.22-51, Edward Arnold, UK, 1992

HUTCHINGS, I.M., *Wear – Materials, Mechanisms and Practice*, John Wiley & Sons, Ltd., 2005

İDİZ, S., *Deney tasarımı ve Taguchi Metodu Ürün ve Proseslerinin Optimizasyonu*, Federal Mogul Yayınlar, Maşukiye, Şubat, 1999

JIA, K., FISHER, T.E., Abrasion resistance of nanostructured and conventional cemented carbides. *Wear*,200: 206–14, 1996

KAPSIZ, M., Bir buji ateşlemeli motorda segman üst boşluklarından kaynaklanan HC emisyonlarının azaltılması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Temmuz, 2004

KATO, K., Wear Mechanisms', in *New Direction in Tribology* (ed I. Hutchings), Mechanical Engineering Publications, pp. 39–56, London, 1997

KATO, K., ADACHI, K., *Wear Mechanisms*, CRC Press LLC, 2001

KATO, K., Classification of Wear Mechanisms/Models, *Wear – Materials, Mechanisms and Practice* Edited by G. Stachowiak, John Wiley & Sons, Ltd., 2005

KAWAKITA, J., KURODA, S., FUKUSHIMA, T., KODOMA, T., Development of Dense Corrosion Resistant Coatings by improved HVOF Spraying Process, National Institute for Material Science,1-2-1, Sengen, Tsukuba,Ibaraki 305-0047, Japan, 2003

KIM, H.J., HWANG, S.Y., LEE, C.H., JUVANON, P., Assessment of wear performance of flame sprayed and fused Ni-based coatings. *Surface and Coatings Technology* Vol. 172: 262-269, 2003

KO P.L., ROBERTSON, M.F., Wear characteristics of electrolytic hard chrome and thermal sprayed WC–10 Co–4 Cr coatings sliding against Al–Ni–bronze in air at 21 °C and at –40 °C, *Wear* 252 880–893, 2002

KOCH, F., PIFFO-Piston friction force measurements during engine operation. SAE Paper 960306, 2006

KOÇ, R., Bilgisayar Kontrollu Aşınma Test Cihaz Tasarımı ve İmalatı, 2. Ulusal Tasarım ve İmlat ve Analiz Kongresi, Balıkesir, 11.11.2010

KOWALSKY, K.A., MARANTZ, D.R., HVOF: Particle, Flame Diagnostics and Coating Characteristics, *Proceedings of the 3. National Thermal Spray Conference*, CA, USA, pp. 587-596, 1990

KRZYMIEN A., KRZYMIEN P., Selection Of Lubricating Oil Aimed At Reduction Of IC– Engine Friction Losses, *Journal of KONES Internal Combustion Engines*, vol. 10, No 3-4, 2003

KUBINSKI, J.A., HURKMANS, C.E.F., TNNKT, T., FLEISCHER, T., W., VAN DER KOLK, G.J., Perspective for Replacement of Hard Chromium by PVD, Plating and Surface Finishing, 20-25, October, 1999

KUSTAS, F.M., BUCHHOLTZ, B.W., “Lubricious-surface-silicon-nitride rings for hightemperature tribological applications”. *Tribology transactions*, 39,1, pp. 43–50, 1996

LECHNER G., KNAFL A., ASSANIS D., “Engine Oil Effects on the Friction and Emissions of a Light- Duty, 2.2L Direct - Injection - Diesel Engine Part 1- Engine Test Results” SAE 2002-01-2681, 2002

LEUSTEK, M.E., SETHU, C., BOHAC, S., FILIPI, Z., ASSANIS D. “Crank-Angle Resolved In-Cylinder Friction Measurements With The Instantaneous Imep Method”, WTC-2005-63677, 2005

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

LIU, Y., FISCHER E.T., DENT, A., Comparison of HVOF and Plasma-Sprayed Alumina/Titania Coatings-Microstructure, Mechanical Properties Engineering, Stevens Institute of Technology, Hoboken, NJ 07030, USA, 2002

LOCHNER, R. H., MATAR, J. E., Designing For Quality An Introduction To The Best Of Taguchi And Western Methods Of Statistical Experimental Design, Chapman And Hall, London, Newyork, Tokyo, Melbourne, Madras, 1990

LUNARSKA, E., NIKIFOROW, K., WIERZCHON, T., ULBIN-POKORSKA, I., Effect of plasma nitriding on hydrogen behavior in electroplated chromium coating, Surface and Coatings Technology,145,139-145,2001

MA Y., SHENGHUA L.,YUANSHENG J., YUCONG W., SIMON C.T., “Impacts of Friction-Modified Fully Formulated Engine Oils on Tribological Performance of Nitrided Piston Rings Sliding against Cast Iron Cylinder Bores” Tribology Transactions, 47: 421-429, 2004

MACLEAN, H.L., LAVE, L.B., Pror. Energy Combust. Sci. 29(1), 2003

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

MARTIN A., RODRIGUEZ J., FERNANDEZ J.E., VIJANDE R.,“Sliding wear behaviour of plasma sprayed WC-NiCrBSi coatings at different temperatures” Wear 251 1017–1022, 2001

METCO / Perkin Elmer, Diamond Jet System and Gun Manual, 1989

METCO, web:[http://www.sulzermetco.com/portaldata/13/Resources//documents/processes/HVOF\\_Solutions\\_DE\\_3.pdf](http://www.sulzermetco.com/portaldata/13/Resources//documents/processes/HVOF_Solutions_DE_3.pdf), 2010

MIGUEL, J.M., GUILMANY, J.M., VIZCAINO, S., Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes. Tribology International, Vol. 36: 181- 187, 2003

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

MOLLENHAUER, K., (Ed.). *Handbuch Dieselmotoren (Diesel engines / in German)*. Berlin, Germany, Springer-Verlag, 1023 p. ISBN 3-540-62514-3, 1997

MRDAK.M., VENCIA.A., COSIC.M., “Microstructure and Mechanical Properties of the Mo-NiCrBSi Coating by Atmospheric Plasma Spraying” *FME Transactions*, ,37, 27-32,2009

MÜJDECİ, S., “İçten Yanmalı Motorlarda Meydana Gelen Aşınma Mekanizmaları ve Örnek Motorlardaki Piston, Segman ve Silindir Yüzeylerinde Oluşan Aşınmaların Mikroskopik Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003

NABIL Z., “Advances in trivalent chrome plating”, *Proceedings of the 80th AESF Annual Technical Conference*, Anaheim, CA, USA. Publ by American Electroplaters & Surface Finishers SOC Inc, Orlando, FL, USA. pp 461-470, 1993

NARENDRA, B., DAHOTRE, S. N., *Nanocoatings for engine application*, *Surface & Coatings Technology* 194,58–67, 200

NAVINSEK, B., PANJAN, P., MILOSEV, I., , *PVD Coatings as an Environmentally Clean Alternative to Electroplating and Electroless Process*, *Surf. and Coat. Technol.*, 116-119,476-487, 1999

NAYLOR M.G.S., “Development of Wear-Resistant Coatings for Diesel Engine Components” Report, ORNL/Sub/87-SA581/1, 1992

NAYLOR, M.G., KODALI, P., WANG, J.C., *Diesel Engine Tribology*, *Tribology Handbook* , CRC Pres LLC, 2001

NDCEE. *Regulatory Analysis of the Chromium Electroplating Industry and Technical Alternatives to Hexavalent Chromium Electroplating*, Prepared by the Environmental Information Analysis National Defense Center for Environmental Excellence, January, 1995

NI, NATIONAL INSTRUMENTS Corp.; *Getting Started with LabVIEW*, Part Number 321527D-01, Teksas, ABD,July, 2000

NI, NATIONAL INSTRUMENTS Corp., web: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/209213>, Teksas, ABD,2010

NOORMAN, M.T., ASSANIS, D.N., PATTERSON, D.J., TUNG, S.C., TSEREGOUNIS, S.I., Overview of techniques for measuring friction using bench tests and fired engines, In: *Advances in powertrain tribology*, SAE Paper 2000-01-1780, pp. 1–11, 2000

PARKER, D.W., KURTNER, G.S., HVOF-Spray Technology, Advanced Materials and Processes, V.139, n.4, pp, 68-72, 1991

PARK J., MACKAY S., Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems, Butterworth- Heinemann, Australia, 28.07.2003

PARK, J.Y., KIM, Y.D., KIM, S.P., HAN, S.Y., MAENG, J.S., Robust design of an active micro-mixer based on the Taguchi method. Sensors and Actuators B Chemical. Vol. 129 790-798, 2008

PARLAK, A., Aşırı Doldurmalı Seramik Kaplı Bir Dizel Motorunda Optimum Püskürtme Avansı ve Sıkıştırma Oranının Deneysel Olarak İncelenmesi, SAÜ, FBE, Doktora Tezi, 2000

PARLAK, A., SAHIN, B., YASAR, H., Energy Convers. Manag., 45, 1219–1232, 2004

PARLAK, A., Energy Convers. Manag.,46, (3), 351–359, 2005

PARLAK, A., SAHIN, B., Performance optimisation of reciprocating heat engine cycles with internal irreversibility, Journal of the Energy Institute, Vol,79 No:4, 2006

PATTERSON, D., HILL, S., TUNG, S., Bench Wear Testing of Engine Power Cylinder Components. Presented at the ASME Fall Technical Conference, Muskegon, Michigan, 1991

PATTERSON, D.J., HILL, S.H., TUNG, S.C., Bench wear testing of engine power cylinder components. Journ. STLE Lubrication Engineering, 492, pp. 89–95, 1993

PAWLOWSKI L., The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings, John Wiley & Sons, 414 pp. ISBN 0-47-159253-2, 1995

PCB,PCBPIEZOTRONICS, web:[http://www.pcb.com/spec\\_sheet.asp?model= 260A 11 &item\\_id= 7339](http://www.pcb.com/spec_sheet.asp?model=260A11&item_id=7339), 2011

PETERSON, M.B., WINER, W.O., Wear Control Handbook, American Society of Mechanical Engineers, pp. 1143–1303, 1980

PICAS, J.A., FORN, A., MATTHAUS, G., HVOF coatings as an alternative to hard chrome for pistons and valves, Wear 261, 477–484, 2006

PO, Petrol Ofisi web: <http://www.poas.com.tr/default.aspx?pg=487>, 2011

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

RABINOWICZ, E., Wear coefficients — metals, Wear Control Handbook, Peterson, M.B. and Winer, W.O. (Eds.), ASME, 475, 1980

- RADIL, K. The influence of honing on the wear of ceramic coated piston rings and cylinder liners, *Lubrication Engineering*, 57-7, pp. 10–14, 2001
- RAMESH, M.R., PRAKASH, S., NATH, S.K., SAPRA, P.K., VENKATARAMAN, B., Solid particle erosion of HVOF sprayed WC-Co/NiCrFeSiB coatings, Accepted 17 March, 2010
- RAO V.D.N., KABAT D.M., YEAGER D., ZIZITTER B., SAE Paper No.-970009 1997
- RASTEGAR F., CRAFT A.E., Piston Rings for High Horse Power Diesel Engines”, *Metallurgical Coatings and Thin Films*, Vol. 1, Elsevier, New York, pp. 36-42, 1993
- RASTEGAR, F., RICHARDSON, D.E., Alternative to Chrome: HVOF Cermet Coatings for High Horse Power Diesel Engines, *Surf. and Coat. Technol.*, Surface and Coatings Technology 90,56-163, 1997
- REZEKA, S.F., HENEIN N.A., A New Approach to Evaluate Instantaneous Friction and Its Components in Internal Combustion Engines, SAE Paper 840179, 1984
- RICHARDSON, D.E., Review of power cylinder friction for diesel engines, *Cylinder systems development*, Cummins Engine Company, Columbus, 2000
- ROGL,P., SCHUSTER,J.C., Phase Diagrams of Ternary Boron Nitride and Silicon Nitride Systems, ASM, Materials Park, OH, 1992
- RONALD, W.S., RONALD, D.F., The Future of Thermal Spray Technology, *Welding Journal*, pp.43-50, JULY, 1994
- ROSS , P. J., Taguchi Techniques for Quality Engineerin, McGraw – Hill, Newyork, 1988
- ROSS W., SYKES S., Optimization of a hot-stamping process, Ameriken supplier institute inc., Michigan, 1989
- RYK,G., KLIGERMAN,Y., ETSION,I., Experimental Investigation of laser surface Texturing for Reciprocating Automotive Components, *Tribology Transactions*, Vol.45/ 4,444-449, 2002
- RYK,G., KLIGERMAN Y., ETSION I., SHINKARENKO A., Experimental Investigation of Partial Laser Surface Texturing for Piston-Ring Friction Reduction, *Tribology Transactions*, 48: 583-588, 2005
- RYK G., ETSION I., Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction, *Wear* 261 792–796, 2006
- SADEGHI, F., STEENWYK, B., Experimental Investigation in Parasitic Loss Control Through Surface Modification, Project, Purdue University, USA, 2004



SAHRAOUI T., GUESSASMA S., FENINECHE N.E., MONTAVON G., CODDET C., *Mater. Lett.* 58,654–660, 2004

SCHILLING, A., *Automobile Engine Lubrication – Engine Wear*, Scientific Publications, England, 1972

SAITO Y., MINO K., *ASME J. Tribol.* 117, 524–528, 1995

SARAÇ, S.A., *Metal Kaplama ve Elektrokimyasal Teknolojiler*, Çağlayan Kitabevi, İstanbul 1995

SARI N.Y., YILMAZ M., “Isıl Püskürtme İle Yüzey Sertleştirmede Ni – Esaslı Kaplama Tozları, Malzeme Sempozyumu, Denizli, 2006

SCHILLING, A., *Automobile Engine Lubrication–Engine Wear*, Scientific Publications, England, 1972

SELÇUK, B., İPEK, R., KARAMIŞ, M.B., A study on friction and wear behaviour of carburized, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115 steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 141, 189–196, 2003

SIDHU, T.S., PRAKASH, S., AGRAWAL, R.D., Characterisation of NiCr wire coatings on Ni- and Fe-based superalloys by the HVOF process, *Surface & Coatings Technology* 200, 5542 – 5549, 2006

SIDHU, T.S., PRAKASH, S., AGRAWAL, R.D., A comparative study of hot corrosion resistance of HVOF sprayed NiCrBSi and Stellite-6 coated Ni-based superalloy at 900 °C, *Materials Science and Engineering A* 445–446, 210–218, 2007

SKJOEDT, M., BUTTS, R., ASSANIS, D.N., BOHAC, S.V., “Effects of oil properties on spark-ignition gasoline engine friction” *Tribology International*, 41, 556–563, 2008

SLOAN R.J., *Piston Ring and Liner Wear Simulator and Method of Using Same*, U.S. patent # 5,007,284, 1991

SOEJIMA M., WAKURI Y., KITAHARA T., EJIMA Y., NAKATA Y., Studies on the measuring method of the total friction loss of internal combustion engines, *JSAE Review* 15, 101-107, 1994

STOKES, J., *The Theory and Application of the HVOF Thermal Spray Process*, In Print, 2003

STOKES J., *Production of Coated and Free-Standing Engineering Components Using the HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) Process*, Literature Survey, 2006

STOKES, J., *Theory and Application of the High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Thermal Spray Process*, Dublin City University, ISBN 1-87232-753-2, ISSN 1649-8232, 2008

- STONE, R., Engine Vehicle Fuel Economy. Macmillan Educational Ltd., Houndmills, 1989
- SUI, P.C., ARIGA, S., Piston ring pack friction and lubrication analysis of an automobile engine using a mixed lubrication model, SAE Paper 931937, 15 p., 1993
- ŞIRVANCI, M., Kalite için deney tasarımı Taguchi yaklaşımı, Literatür yayınları, İstanbul, 1997
- SOBOLEV V., GUILMANY J.M., NUTTING J., High Velocity Oxy-Fuel Spraying, Maney, England, 397 pp. ISBN 1-902653-72-6, 2004
- SOEJIMA, M., WAKURI, Y., KITAHARA, T., EJIMA, Y., NAKATA, Y., “Studies on the Measuring of the Total Friction Loss of Internal Combustion Engines” JSAE Review. Vol.15, 101-107, 1994
- TAGUCHI, T., ELSAYED, E., HSIANGT, T., Quality Engineering In Production Systems, McGraw-Hill International Editions, Engineering Series, 1989
- TAKIGUCHI, M., ANDO, H., TAKIMOTO, T., URATSUKA, A., Characteristics of friction and lubrication of two-ring piston, JSAE Review, 17, pp. 11–16, 1996
- TAN, Y.C., RIPIN, Z.M., Frictional behavior of piston rings of small utility two-stroke engine under secondary motion of piston, Tribology International, 44, 592–602, 2011
- TAYLOR, C.M., Automobile engine tribology—design considerations for efficiency and durability, Wear 221, 1–8, 1998
- TAYLOR, C., Engine Tribology. Elsevier Science Publishers, B.V.J., 1993
- TOBAR, M.J., ÁLVAREZ, C., AMADO, J.M., RODRÍGUEZ, G., Yáñez, A., Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi-WC coatings on stainless steel, Surface and Coatings Technology, Vol. 200, No. 22-23, pp. 6313-6317, 2006
- TOMANÍK, E., Friction and wear bench tests of different engine liner surface finishes, Tribology International, 41, 1032–1038, 2008
- TRUHAN, J., QUB J., BLAU, P.J., A rig test to measure friction and wear of heavy duty diesel engine piston rings and cylinder liners using realistic lubricants, Tribology International 38, 211–218, 2005
- TSEREGOUNIS, S.I., MCMILLAN, M.L., OLREE, R.M., Engine oil effects on fuel economy in GM vehicles—separation of viscosity and friction modifier effects, SAE Paper 982502. SAE Trans—J Fuels Lubr;107, 1998

- TUNÇALP K., GÜNER Y., LabVIEW Bilgisayar Programının Uzaktan Eğitimi, IV. Uluslararası Eğitim Teknolojileri Sempozyumu, Sakarya, Kasım, 2004
- TUNG, S.C., TSEREGOUNIS, S.I., An investigation of tribological characteristics of energy-conserving engine oils using a reciprocating bench test, *Advances in powertrain tribology*, SAE Paper 2000-01-1781, pp. 13–21. 2000
- TUNG, S.C., GAO., H., Tribological characteristics and surface interaction between piston ring coatings and a blend of energy-conserving oils and ethanol fuels, *Wear* 255, 1276–1285, 2003
- TUNG, S.C., YONG H., Modeling of Abrasive Wear in a Piston Ring and Engine Cylinder Bore System, *Tribology Transactions*, 47: 17-22, 2004
- TUNG, S.C., MCMILLAN, M.L., BECKER, E.P., SCHWARTZ, S.E., Automotive engine oil. In: Totten GE, editor. *Handbook of lubrication and tribology*. CRC Press, 2006
- URABE, M., TOMOMATSU, T., ISHIKI, K., TAKIGUCHI, M., SOMEYA, T., Variation of Piston Friction Force and Ring Lubricating Condition in a Diesel Engine with EGR, SAE Paper, 982660. 6 p, 1998
- URAS, H.M., PATTERSON, D.J., Measurement of Piston and Ring Assembly Friction Instantaneous IMEP Method, SAE Paper 830416, 1983
- URAS, H.M., “A study of piston-ring assembly friction” Ph.D. The University of Michigan, 1984
- UST, Y., SAHIN, B., SOGUT, O.S., *Appl. Energy*, 82, (1), 23–39, 2005
- WALTER, K.C., SCHEUER, J.T., MCLNTYRE, P.C., KODALI, P., YU, N., NASTASI, M., Increased Wear Resistance of Electrodeposited Chromium Through Applications of Plasma Source Ion Implantation Techniques, *Surf. and Technol.*, 85, 1-6, (1996).
- WALTER, K.C., KERN, K.T., TESMER, J.R., SCARBOROUGH, W.K., WOODRING, J.S., NASTASI, M., Nitrogen and Boron Ion Implantation into Electrodeposited Hard Chrome, *Surf. and Coat. Technol.*, 97: 250-253, 1997
- WAKURI, Y., SOEJIMA, M., EJIMA, Y., HAMATAKE, T., KITAHARA, T., Studies on friction characteristics of reciprocating engines. Society of Automotive Engineers, Inc., SAE Paper, 952471, 15 p., 1995
- WANG, Y., TUNG, S.C., “Scuffing and wear behavior of aluminum piston skirt coatings against aluminum cylinder bore” *Wear* 225–229, 1100–1108, 1999
- WANG, Y., BROGAN, K., TUNG, S.C., “Wear and scuffing characteristics of composite polymer and nickel/ceramic composite coated piston skirts against aluminum and cast iron cylinder bores”, *Wear* 250, 706–717, 2001

- WANG, W., CHEN, L., SUN, F., WU, C., *Energy*, 2, 340–344, 2002
- WANG, L., NAM, K.S., KWON, S.C., Effect of plasma nitriding of electroplated chromium coatings on the corrosion protection C45 mild steel, *Surface & Coatings Technology* 202, 203–20, 2007
- WINNER, W.O., *Wear Control Handbook*, ASME, New York, 1980
- WIT, E., BLANPAÏN, B., FROYEN, L., CELIS, F.P., “The Tribochemical Behaviour of TiN-Coatings During Fretting Wear”, *Wear* 217s (215-224), 1998
- WONG V.W.S., GEORGE T.J., FISKUM R., *Low Engine Friction Technology for Advanced Natural Gas Reciprocating Engines*, Massachusetts Institute of Technology, 2002
- 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
- YAMAGUCHI, E.S., UNTERMANN, M., ROBY, S.H., RYASON, P.R., YEH, S.W., Soot wear in diesel engines, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 220:463, 2006
- YOSHIDA H., KUSAMA K., SAGAWA J., “Effects of Surface Treatments on Piston Ring Friction Force and Wear”, *Society Of Automotive Engineers*, Warrendale.PA, Paper No.900589, February, 1990
- YUPING, W., LIN, P., CHU C., WANG, Z., CAO M., JUNHUA, H., Cavitation erosion characteristics of a Fe–Cr–Si–B–Mn coating fabricated by high velocity oxy-fuel (HVOF) thermal spray, *HVOF Materials Letters*, 61, 1867–1872, 2007
- ZHANG, R., LI, S., JIN, Y., WANG, Y., TUNG, S.C., Tribological behaviors and molecular spectroscopic characterization of a lubricated piston ring/cylinder bore sliding contact under stepwise heating conditions, *Lubrication and Tribology*, 54,2;ABI/INFORM Trade&Industry, 2002
- ZHUO, S., PEIJUN, Z., LEHENG, Z., XINFU, X., AIMIN, H., WENQUAN, Z., “Multi-layer compound coating on cast iron piston ring by multi-arc and magnetron sputtering ion compound plating technique”, *Surface and Coatings Technology*, 131,1–3, pp. 422–427, 2000

## ÖZGEÇMİŞ

Murat KAPSIZ, 1978 yılında İzmir, Karaburun'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Karaburun'da tamamladı. İzmir Bornova Mimar Sinan Teknik Lisesi Motor Bölümünden 1995 yılında mezun oldu. Lisans Eğitimi 2001 yılında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Otomotiv Öğretmenliğinde tamamladı. 2001 yılında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Yüksek Lisans Öğrenimini 2004 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Enstitü Ana Bilimde tamamladı. Aynı yıl SAÜ, FBE.' de doktora Öğrenimine başladı. Halen Sakarya Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmalarına devam etmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.