

$\text{Si}_3\text{N}_4$  ve CNT nano partiküllerin yağ katkısı olarak AISI 4140  
çeliğinin aşınma özelliklerine etkisinin incelenmesi

Mehmet Niyazi Çöl

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

MART 2013

Investigation of the effects of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and CNT nano particles as  
oil additives in the wear properties of AISI 4140 steel

Mehmet Niyazi öl

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department Of Mechanical Engineering

MARCH 2013

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve CNT nano partiküllerin yağ katkısı olarak AISI 4140  
çeliğinin aşınma özelliklerine etkisinin incelenmesi

Mehmet Niyazi Çöl

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Konstrüksiyon - İmalat Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri Çelik

MART 2013

## ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Mehmet Niyazi Çöl'ün YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve CNT nano partiküllerin yağ katkısı olarak AISI 4140 çeliğinin aşınma özelliklerine etkisinin incelenmesi ” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

**Danışman** : Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri Çelik

**İkinci Danışman** : -----

### **Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye:** Prof. Dr. Nejat Kırac

**Üye:** Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri Çelik

**Üye:** Yrd. Doç. Dr. Hakan Gaşan

**Üye:** Yrd. Doç. Dr. Ümit Er

**Üye:** Yrd. Doç. Dr. Mustafa Ulutan

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih  
ve.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK  
Enstitü Müdürü

## ÖZET

Bu çalışmada, makine parçalarının dizayn, imal ve kullanımında, temel mühendislik sorunlarından birini teşkil eden sürtünme – yağlama alanında, kullanılacak yağlayıcı maddelerin etkinliğini artırma yönünde, olası katkı maddelerinden ikisi üzerine ( $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve CNT) teorik ve deneysel araştırma ile bu araştırmanın sonuçları ele alınmıştır.

Çalışma kapsamında, önce katkısız baz yağ ile deneyler tamamlanarak sonuçlar elde edilmiş ve ardından değişik oranlarda  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve CNT nano partiküllerinin baz yağa katılması ile elde edilen süspansiyonların aynı deneylerde ortaya koyduğu sonuçlar gözlenmiştir.

Tüm deneylerde kullanılan test parçaları üzerinde meydana gelen aşınmalar taramalı elektron mikroskobu (SEM) yöntemi ile incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Nano yağ katıkları,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , CNT, aşınma, yağ.

## SUMMARY

This study deals with a theoretical and experimental research on two additives ( $\text{Si}_3\text{N}_4$  and CNT) which possibly increase the efficiency of lubricants in friction-lubricating process that constitutes one of the major engineering problems in the design, production and use of machine parts and looks into the results of this research.

In this study, first experiments with pure base oil are made and the results are gathered and then the results of same experiments using suspensions gained by mixing base oil with  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and CNT nano particulars in different amounts are observed.

The wears on the test specimens which are used in experiments are analyzed through electron microscope (SEM) method.

**Keywords:** Nano oil additives,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , CNT, corrosion, oil.

## TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında, tüm birikimi ile bana yol gösteren, destekleyen ve gayretlendiren danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri Çelik'e, elektron mikroskobu ile yaptığımız çalışmalarda yardımlarını aldığımız Tekniker Kürşat Osman Ay'a teşekkür ederim.

Yaptığım Yüksek Lisans çalışması boyunca tüm desteği ile arkamda hissettiğim ve güç aldığım sevgili eşime teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖZET .....	v
SUMMARY .....	vi
TEŞEKKÜR .....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xviii
1. GİRİŞ VE AMAÇ .....	1
2. AŞINMA .....	3
2.1. Abrasiv aşınma .....	3
2.2. Erozyon aşınması .....	4
2.3. Kaviteasyon aşınması .....	6
2.4. Korozyon ve korozif aşınma .....	7
2.5. Yorulma aşınması .....	9
2.6. Adhezyon ve adhezif aşınma .....	12
2.6.1. Adhezyon mekanizması .....	13
2.6.2. Metal – metal adhezyonu .....	13
3. YAĞLAMA .....	17
3.1. Yağlama Türleri .....	18
3.1.1. Sınır tabaka yağlaması (İnce film yağlaması) .....	18
3.1.2. Hidrodinamik yağlama .....	19
3.1.3. Elastohidrodinamik yağlama .....	19
3.2. Stribeck eğrisi .....	20
3.3. Hamrock Dowson Eşitliği .....	24
3.3.1. Elastohidrodinamik film üzerinde basınç dağılımı .....	24
3.3.2. Elastohidrodinamik film kalınlığı hesabı .....	25
4. KATI CİSİMLERİN TEMAS MEKANİĞİ .....	28
4.1. Hertzian Temas Mekanikliği .....	29
4.1.1. İki kürenin teması .....	30
4.1.2. Paralel eksenli iki silindirin teması .....	32



4.1.3. Eksenleri paralel olmayan iki silindirin teması.....	34
4.2. Yüzey ve yüzey altı gerilmeleri.....	36
4.3. Yüzeylerin birbirlerine izafeten hareket etmeleri.....	38
4.4. Kayma başlangıcı, mikrokayma.....	40
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	41
5.1. Deneyde kullanılan malzemeler.....	41
5.2. SAE 10W40 yağ özellikleri.....	43
5.3. Nano partiküller.....	44
5.4. Malzemelerin hazırlanması ve deney programı.....	45
5.5. Deneyleerde kullanılan cihazlar.....	47
5.6. Deney planı ve deneyin yapılışı.....	49
5.7. Deney sonuçları.....	51
5.8. Deney sonuçlarının irdelenmesi.....	80
6. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	82
KAYNAKLAR DİZİNİ .....	83

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Aşınma türleri. a) Kesme, b) Çatlak, c) Tekrarlı yük nedeni ile yorulma çatlak, d) Tane kopması .....	4
2.2 Erozyon mekanizmaları. a) Abrasif, b) Yorulma, c) Plastik deformasyon, d) Ergime, e) Ergime – süperplastik akma, f) Atomik erozyon .....	6
2.3 Kaviteasyon aşınma mekanizması. a) Kabarcık çarpmasının mekanizması, b) Deney sonucu metalik (indiyum) malzeme yüzeyinde kaviteasyonun yarattığı hasar bulgusu.....	7
2.4 Korozyif madde ve aşınma yüzeyi arasındaki ilişkilerin modeli. a) Adesif aşınma önlenmiştir, b) Temas sonucu film zedelenmiş fakat adesif aşınma önlenmiştir, c) Aşınan film üzerinde oyuklarda meydana gelen anodik çözülme sonucu yoğun korozyon, d) Kontrolsüz adesif aşınma, yüzeyde hızlı korozyon.....	9
2.5 Deformasyona uğramış bir yüzeyde deformasyon seviyeleri.....	10
2.6 Yüzey çatlaklarının ilerleme prosesini gösteren şematik model. a) Yorulma prosesi sonucunda çatlak başlangıcı, b) Hareket düzlemi uzantısında primer çatlak oluşumu, c) Sekonder çatlak başlangıcı, d) Aşınma parçacığının meydana gelmesi. ....	12
2.7 Adhezyon yolu ile metal taşınması. a) Yaklaşma, b) Yapışma, c) Transfer..	14
2.8 Sivri uçların adhesiv teması sonucunda deformasyon oluşumuna alternatif bir model.....	16
3.1 Sınır tabaka yağlaması .....	18
3.2 Hidrodinamik yağlamanın şematik gösterimi .....	19

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
3.3 Elastohidrodinamik yağlamanın şematik gösterimi .....	20
3.4 Stribeck eğrisinin genel biçimi.....	22
3.5 Stribeck eğrisi, $\lambda$ değerleri .....	23
3.6 Elastohidrodinamik temas durumunda hidrodinamik basınç dağılımı.....	25
4.1 İki kürenin teması, a) iki küre elastik temas halinde, b) temas sonucu oluşan yarı eliptik basınç dağılımı .....	31
4.2 Elastik temas halinde paralel eksenli iki silindir.....	32
4.3 Eksenleri paralel olmayan iki silindirin teması .....	34
4.4 $v=0,3$ olan bir malzemede, nominal temas dairesinin altında kalan bölgede, Hertz gerilmesi ( $p_0$ ) ile normalize edilmiş ( $\tau_{\max} / p_0$ ) maksimum kayma gerilmesi konturları.....	37
4.5 Yüzeylerin birbirlerine izafi hareketi. a) eksenleri paralel iki silindirin teması durumunda, temas noktasında yuvarlanma ve/veya kayma hareketi meydana gelebilir, b) üç boyutlu durumda diğerlerine ilaveten bir gövde diğerine göre dönme hareketi de yapabilir.....	38
4.6 Yüzey altı gerilmeler. a) Nominal çizgisel temasta sürtünme traksiyonu nedeni ile meydana gelen yüzey gerilmeleri, b) $m=0,2$ değeri için, kayıcı elastik çizgisel temas alanının altındaki bölgede, birincil kayma gerilmelerinin konturu .....	39

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.7	Yüzey izi. a) Eksenleri paralel silindirler arası temas: Q iz kuvvetinin etkisi altında yüzey izi b) Nominal çizgisel temas durumundaki iki silindirin temas alanının merkezindeki yapışma bölgesinin teğetsel kuvvet etkisi ile küçülmesi ..... 39
5.1	Deneylerde kullanılan AISI 4140 malzemenin geometrisi ..... 41
5.2	Deneylerde kullanılan AISI 4140 malzemenin mikroyapısı ..... 42
5.3	Kesme cihazı (Struers Discotom 50)..... 47
5.4	Zımparalama, parlatma cihazı (StruersTeprafence 4500)..... 48
5.5	Profil ölçüm cihazı (Mitutoyo SJ-400) ..... 48
5.6	Aşınma cihazı. CSM Tribometer..... 49
5.7	Ball – on disc aşınma geometrisi ..... 50
5.8	Su verilmiş AISI 4140 çeliğinin genel mikro yapı görüntüsü, 100x ..... 51
5.9	Kuru koşullarda yapılan aşınma deneyine ait aşınmış bölge mikroyapı görüntü, 400x ..... 52
5.10	Ağırlıkça %0,1 CNT içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x..... 52
5.11	Ağırlıkça %0,2 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x..... 53

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
5.12. Ağırlıkça %0,2 CNT içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x.....	53
5.13. Ağırlıkça %0,05 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ve %0,05 CNT içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x.....	54
5.14. Ağırlıkça %0,13 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ve %0,067 CNT içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x.....	54
5.15. Ağırlıkça %0,1 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x .....	55
5.16. Katkısız SAE10W40 ile yapılan deneye ait aşınma görüntüsü, 400x.....	55
5.17. Ağırlıkça %0,067 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ve %0,13 CNT içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x .....	56
5.18. Ağırlıkça %0,5 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x.....	56
5.19. Ağırlıkça %0,8 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x.....	57
5.20. Ağırlıkça %0,1 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ve %0,1 CNT içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x.....	57
5.21. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,05 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + %0,05 CNT karşılaştırması....	59
5.22. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,1 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + %0,1 CNT karşılaştırması.....	59
5.23. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,1 CNT karşılaştırması.....	60
5.24. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,067 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + %0,13 CNT karşılaştırması..	60

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
5.25. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,1 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> karşılaştırması.....	61
5.26. Aşınma profilinde Base Oil ve % 1 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> karşılaştırması.....	61
5.27. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,2 CNT karşılaştırması.....	62
5.28. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,8 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> karşılaştırması.....	62
5.29. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,13 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + %0,067 CNT karşılaştırması..	63
5.30. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,5 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> karşılaştırması.....	63
5.31. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,2 CNT karşılaştırması .....	64
5.32. Base Oil (10W40) içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği .....	65
5.33. %0,05 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + %0,05 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği .....	66
5.34. %0,1 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + %0,1 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği .....	66
5.35. %0,1 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe- COF grafiği .....	67
5.36. %0,067 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + %0,13 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği.....	67
5.37. %0,1 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği .....	68
5.38. %1 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği .....	68

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
5.39. %0,2 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği .....	69
5.40. %0,8 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği.....	69
5.41. %0,13 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + %0,067CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği .....	70
5.42. %0,5 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği .....	70
5.43. %0,2 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği .....	71
5.44. %0,05 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + %0,05 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili.....	72
5.45. %0,1 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + %0,1 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili .....	72
5.46. %0,1 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili .....	73
5.47. %0,067 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + %0,13 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili .....	73
5.48. %0,1 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili .....	74
5.49. %1 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili .....	74

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
5.50. %0,2 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili .....	75
5.51. %0,8 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili .....	75
5.52. %0,13 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + %0,067CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili .....	76
5.53. %0,5 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili .....	76
5.54. %0,2 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili .....	77
5.55. Base Oil (10W40) içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili .....	77
5.56. Sıralı aşınma değerleri tablosu .....	78
5.57. Karşılaştırmalı aşınma değerleri tablosu .....	78
5.58. Karşılaştırmalı sürtünme katsayısı tablosu .....	79



**ÇİZELGELER DİZİNİ**

<b><u>Çizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1 Bazı metallerin demire karşı adhezyon özellikleri .....	15
3.1 Yağlanan makine komponentleri için tipik (ZN/p) değerleri.....	21
4.1 Normalize edilmiş ( $\tau_{\max} / p_0$ ) maksimum kayma gerilmesi ve değişik Poisson oranları için bu gerilmenin yeri .....	37
5.1 SAE 10W40 yağın özellikleri .....	43
5.2. AISI 4140 kimyasal kompozisyonu.....	46
5.3 AISI 4140 mekanik ve ısıl özellikleri (25°C de).....	46
5.4 Deney planı.....	50
5.5 Aşınma deneylerine ait yüzey iz genişlikleri .....	58

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$\eta$	Dinamik viskozite (Pa.s)
$\omega$	Açısal hız (radyan/saniye)
N	Dönme hızı (d / dk)
U	Yüzeylerin birbirlerine izafi hızı (m/s)
$\nu$	Kinematik viskozite ( $m^2/s$ )
W	Yük (N)
$\sigma^*$	İndirgenmiş yüzey pürüzlüğü ( $\mu m$ )
$\lambda$	Spesifik film kalınlığı ( $\mu m$ )
$h_c$	Merkezi film kalınlığı (m)
$h_o$	Minimum film kalınlığı (m)
$E'$	Azaltılmış (indirgenmiş) elastisite modülü (Pa)
$R'$	Temas eden cismin yüzeyinin azaltılmış yarıçapı (m)
$\alpha$	Basınç – viskozite katsayısı ( $m^2 / N$ )
W	Temas yükü (N)
k	Elipslik parametresi
$R_x$	Yüzeyin x yönündeki azaltılmış yarıçapı (m).

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
R <sub>y</sub>	Yüzeyin y yönündeki azaltılmış yarıçapı (m).
H	Boyutsuz film parametresi
U	Boyutsuz hız parametresi
G	Boyutsuz malzeme parametresi
W	Boyutsuz yük parametresi
h	Deforme olmamış yüzeyler arasındaki mesafe (m).
Δ	Temas eden cisimlerin yaklaşma miktarı (m).
b	Temas dikdörtgeninin yarı genişliği (m)
MoS <sub>2</sub>	Molibden sülfür
R <sub>a</sub>	Yüzey pürüzlüğü (μm)
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Silisyum nitrür
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sülfürik asit
CNT	Karbon N T

## **BÖLÜM 1**

### **GİRİŞ VE AMAÇ**

Makine mühendisliğinin temel sorunlarından biri de, imal edilen makinaların yeterli çalışma ömrüne sahip olmasını sağlamaktır. Makinaların ömrünü olumsuz yönde etkileyen önemli faktörler arasında, aşınma olarak isimlendirdiğimiz olaylar gurubu yer alır. Kısaca aşınma, bir cisimden mekanik etkilerle ve istenmeyen biçimde parçacık kopması olarak isimlendirilebilir. Bu yolla makine parçaları, sahip olmaları gereken uygun geometriyi ve hatta mukavemeti kaybederek kullanılamayacak duruma gelirler. Ayrıca çalışma ömürleri boyunca istenmeyen sürtünmeler nedeni ile önemli ekonomik kayıplar meydana gelir.

Makine mühendisliği, bu soruna çözüm arar ve tedbirler geliştirir. Makine tasarımının değiştirilmesi, parçaların daha az temas etmesini sağlayacak düzenlemeler, farklı malzeme kullanımı gibi önlemler söz konusu olmakla birlikte, bu alanda en etkin uygulama yağlamadır. Çeşitli maddeler yağlayıcı olarak kullanılır ve aşınma olayının etkileri azaltılmaya çalışılır.

Yağlama, temas eden yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısının düşürülmesini sağlayan bir madde kullanarak temasın ve dolayısı ile aşınmanın azaltılması işlemine denir. Bu madde yardımı ile yağsız yüzeyler arasında hızla ve etkili biçimde meydana gelecek aşınma azaltılır ve çoğunlukla yüzeylerin birbirlerine doğrudan teması önlenir.

Yağlama amacı ile katı (PTFE, grafit, hegzagonalbornitrür, molibden sülfür, tungsten sülfür gibi) ve sıvı maddeler kullanılmakta olup makinaların yağlanması için genelde sıvı yağlayıcılar tercih edilmektedir. Sıvı yağlayıcılar, kullanım kolaylığı ve yağlama işlevinin yanında başka yararlar sağlaması (soğutma, aşınan parçacıkların uzaklaştırılması, korozyonu önleme gibi) nedeni ile genelde makine yağlanmasında geniş kullanıma sahiptir (Fernandez Rico, E, et al., 2007 ; Rapoport, L.,et al.,2003).

Sıvı yağlayıcılar mineral, organik ve sentetik olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılmaktadır. Makine parçalarının yağlanması amacı ile genelde mineral esaslı bir baz yağın içine çeşitli katkıların eklenmesi ile elde edilen maddeler kullanılmaktadır.

Yağ katkıları, yağdan beklenen özelliklerin iyileştirilmesi amacı ile baz yağın içine eklenen çeşitli maddelerdir. Bu yolla sürtünme katsayısının düşürülmesi, korozyona karşı koruma, viskozitenin artırılması, yağın ömrünün uzatılması gibi yararlar elde edilmektedir

Yağın içine katkı olarak değişik fiziksel ve kimyasal özelliklerde katkı maddeleri konmaktadır. Bunların arasında “nano” boyutta olan partiküller nano katkıları olarak isimlendirilmektedir. “Nanopartikül” terimi ile 100 nm den küçük partiküller kastedilmektedir.

Nano özellikteki partiküller, tane boyutu küçüldükçe toplam yüzey alanının artması nedeni ile kütlelerine göre çok büyük alana sahip olmakta ve bunun sonucu olarak yağın özelliklerini olumlu yönde değiştirecek sonuçlar elde edilebilmektedir. Bunun yanında küçük boyutları nedeni ile pürüzlülüklerin (asperitilerin) doldurularak daha düzgün yüzeylerin elde edilmesine katkıları olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, baz yağ içine nano yağ katkısı olarak  $Si_3N_4$  ve CNT (Karbon nano tüp) partiküller karıştırılarak kullanılmıştır. Adı geçen bu maddelerle ilgili kapsamlı bilgi deneylerle ilgili bölümde verilmiştir.

Bu tez kapsamında, 2. bölümde aşınma teorisi, 3. bölümde yağlama teorisi, 4. bölümde katı cisimlerin temas mekaniği anlatılmış ve 5. bölümde yapılan deneysel çalışmalar ve sonuçları verilmiştir.

Deneylerin sonucunda, referans yağ içine değişik oranlarda  $Si_3N_4$  ve CNT partikülleri katıldığında, katkısız yağa göre daha iyi tribolojik özellikler elde edildiği görülmüş olup bu katkı oranlarının belli değerlerde optimum sonuç verdiği, daha fazla katkı kullanıldığında elde edilen olumlu sonuçların kaybolduğu görülmüştür.

## BÖLÜM 2

### AŞINMA

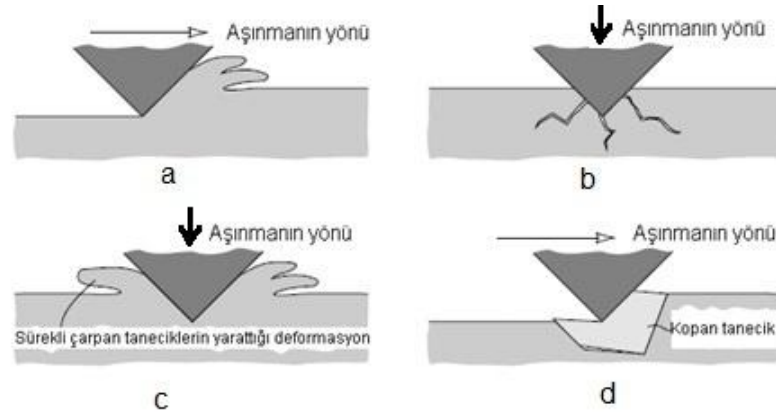
Aşınma, bir cisimden mekanik etkiler sonucu olarak ve istenmeyen biçimde parçacık kopması olayıdır. Makine parçalarında meydana gelen aşınma, birbirlerine göre izafi harekete sahip makine parçası yüzeylerinin, çeşitli mekanik etkiler sonucunda birbirlerinden parça koparması olarak tanımlanabilir. Aşınma olayının türleri aşağıda detaylı biçimde açıklanmıştır.

#### 2.1. Abrasiv aşınma

Katı bir cisim, kendisi ile eşit sertlikte ya da daha sert parçacıklara sahip başka cisim ile temas halinde ise meydana gelir. İçinde az miktarda sert parçacık bulunan yumuşak bir madde, toz halde olsa dahi abrasiv aşınmaya neden olabilir. Örnek vermek gerekirse, az miktarda silika lifleri ihtiva etmesi nedeni ile toz şeker üretimi sırasında yüksek sertlikte çelik makine parçaları dahi aşınmaktadır (Stachowiak, G. and Batchelor, A., 2005), (Blau, P. J. , 1992).

Şekil 2.1-a'da abrasiv aşınmanın klasik modeli görülmektedir. Sert yüzeydeki bir çıkıntı ya da sert tane, karşı cisimden hareket doğrultusunda parçacık koparır. Eğer aşınan malzeme gevrek ise Şekil 2.1-b'deki gibi çatlaklar oluşur.

Gevrek olmayan bir malzeme, küt çıkıntıları olan bir cisim tarafından tekrarlı biçimde zorlanır ise Şekil 2.1-c'de gösterildiği gibi yorulma deformasyonları ve kırılmaları meydana gelir. Seramik gibi tane sınırları nisbeten zayıf olan materyalde, Şekil 2.1-d'de gösterildiği gibi tane kopmaları meydana gelebilir (Stachowiak, G. and Batchelor, A., 2005).



Şekil 2.1. Aşınma türleri. a) Kesme, b) Çatlak, c) Tekrarlı yük nedeni ile yorulma çatlağı, d) Tane kopması.

## 2.2. Erozyon aşınması

Erozyon aşınması, katı ya da sıvı parçacıkların bir cisme sürekli çarpması durumunda gözlenir. Makine parçalarının erozyon aşınmasına maruz kalması sık rastlanan bir durumdur. Tozlu bir alandan geçen jet uçağının türbin kanatlarından, çamurlu suyu aktaran pompanın kanatlarına kadar geniş bir alanda örneklere rastlamak mümkündür. Genelde makine parçasının mukavemetinin yeterli olması, erozyon aşınması karşısında dayanımı garanti etmez.

Erozyon aşınmasının mekanizmasını incelerken, parçacıkların aşınan cisme çarpma açısı, çarpma hızı ve parçacık boyutu ana parametreler olarak ele alınır. Parçacıkların katı ve sert olması durumunda abrasiv aşınma şartlarının meydana gelme olasılığı yüksektir. Sıvı parçacıkların erozyona neden olması durumunda abrasiv aşınma yerine sürekli tekrarlayan çarpmaların yarattığı gerilmeler ana faktör olarak etki ederler.

Şekil 2.2-a'da gösterildiği gibi, sert parçacıkların düşük açı ile aşınan yüzeye çarpması durumunda her bir çarpma abrasiv aşınma olarak düşünülmelidir. Bu yolla aşınan yüzeyden parçacıklar kopar.

Parçacıkların yüzeye çarpma hızı, aşınma işleminde güçlü bir etkiye sahiptir. Eğer parçacık hızı düşük ise, çok sayıda parçacığın tekrarlı olarak aynı noktayı dövmesi sonucunda, Şekil 2.2- b'de gösterildiği gibi yorulma olayı meydana gelir ve bu şekilde başlayan çatlaklar aşınan cisimden parçaların kopmasına neden olur.

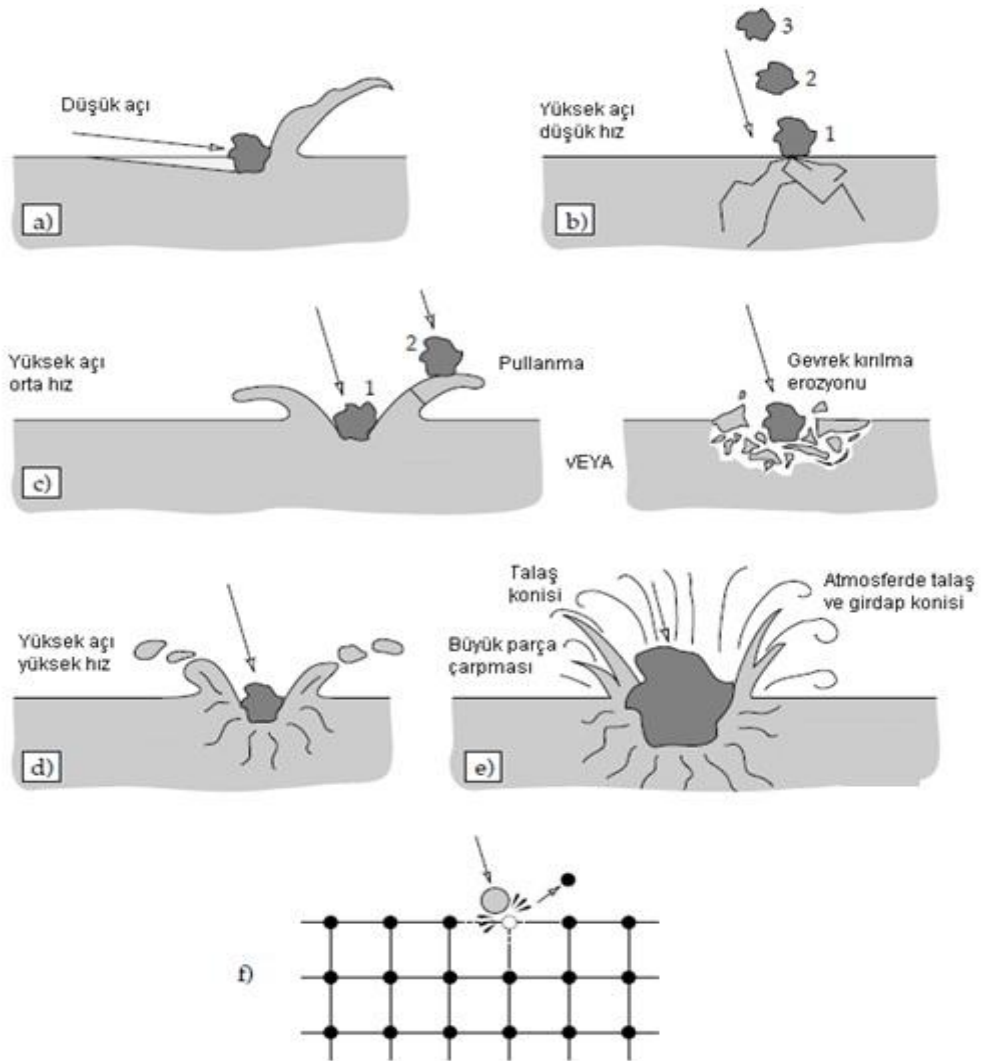
Çarpan parçacıkların formları küt ve hızları örneğin 20 m/s gibi yüksek bir değere ulaştığında ise aşınan cismin özelliklerine bağlı olarak plastik deformasyonlar meydana gelebilir. Bu deformasyonların sonucunda, aşınan cisim üzerinde, Şekil 2.2- c'de görüldüğü gibi pullanma biçimi uzamalar doğar ve bu uzantılar süren çarpmalarla ana cisimden koparlar.

Yüksek hızlı fakat sivri şekillere sahip parçacıkların çarpması sonucunda, yine Şekil 2.2-c'de (sağ tarafta) gösterildiği gibi gevrek kırılma erozyonu doğabilir.

Erozif aşınmanın bir diğer mekanizması ise aşınan cisimde ergimeler meydana gelmesi durumudur. Şekil 2.2-d'de gösterildiği gibi, yüksek hızlı ve yüzeye büyük açı ile (normale yakın) gelen parçacıklar, aşınan cisimde ergimelere neden olabilecek kadar yüksek sıcaklık yaratabilir. Çarpan parçacıkların boyut ve hızlarına bağlı olarak, Şekil 2.2-d ve Şekil 2.2-e'de gösterildiği gibi erozyon mekanizmaları doğabilir.

Şekil 2.2-f'de gösterildiği gibi, atomların kafes yapısını bozarak aşınmaya neden olan atomik erozyon da bir aşınma mekanizmasıdır. Düşük seviyelerdeki yörüngelerde hareket eden uydular (LEO - Lowearthorbit) oksijen ve azot atomlarının çok yüksek hızla çarpması sonucunda aşınmaya maruz kalırlar (Stachowiak, G. and Batchelor, A., 2005).





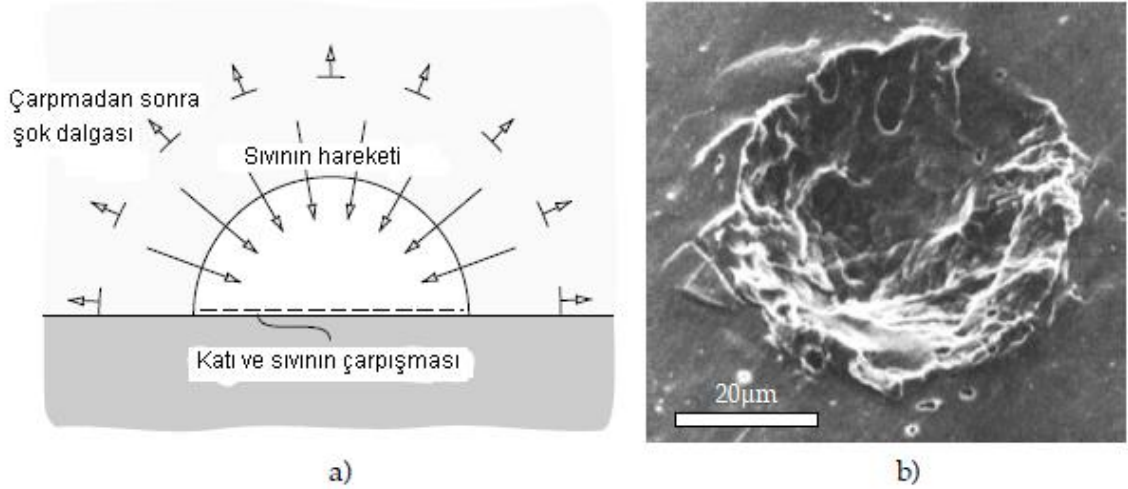
Şekil 2.2. Erozyon mekanizmaları. a) Abrasif, b) Yorulma, c) Plastik deformasyon, d) Ergime, e) Ergime – süperplastik akma, f) Atomik erozyon

### 2.3. Kaviteasyon aşınması

Kaviteasyon aşınması, sıvı (gemi pervanesi) ya da yaş buhar (türbin kanadı) içinde hareket eden katıların yüzeyinde meydana gelir. Aşınma, katı cismin yüzeyinde bir dizi delik ya da çukur oluşumu şeklinde ilerler. Bu yolla makina parçasının tamamı eriyip yok olabilir. Kaviteasyon nedeni ile, aşınan parçanın (pervane gibi) hareketi kısıtlanmak zorunda kalabilir.

Kavitasyon mekanizması: Kavitasyonun karakteristik işleyişi, katı cismin yüzeyinde gaz kabarcığı oluşması ve bu kabarcığın patlaması, açıklanan bu olayın sürekli olarak tekrar etmesi olarak açıklanabilir. Kabarcık oluşmasının nedeni, sıvı içinde erimiş durumda bulunan gazların düşük basınç (veya vakum) nedeni ile sıvıdan ayrılmasıdır. Vakum oluşmasının nedeni, sıvının değişken bir geometrik formdan akmasıdır. Küçük çaplı borudan büyük çaplı boruya geçiş gibi. Pervanenin su içinde hareketi de buna benzer ani geçişler yaratır. Kavitasyonu önlemenin ideal yolu negatif basıncın oluşmasını engellemektir fakat pratikte bunun imkansız olduğu bellidir.

Bir kabarcık katı yüzeyde patladığında, etrafındaki sıvı zerreciklerini de yüzeye doğru büyük hızla savurur. Sıvı ve katı arasındaki bu sert çarpışma büyük gerilmelere neden olabilir. 1,5 GPa basınca ulaşan zorlamalar meydana gelebilmektedir. Bu mekanizmanın sonucunda Şekil 2.3'te gösterildiği gibi metal yüzeyde hasarlar oluşmaktadır (Stachowiak, G. and Batchelor, A., 2005).



Şekil 2.3. Kavitasyon aşınma mekanizması. a) Kabarcık çarpmasının mekanizması, b) Deney sonucu metalik (indiyum) malzeme yüzeyinde kavitasyonun yarattığı hasar bulgusu.

#### 2.4. Korozyon ve koroziif aşınma

Koroziif aşınma, hem yağlı hem de yağsız yüzeylerde olmak üzere geniş bir aralıkta etkilidir. Temel olarak bu tür aşınma, aşınan materyal ile koroziif madde (bir kimyasal madde, reaktif yağlayıcı ya da oksijen gibi) arasındaki bir kimyasal

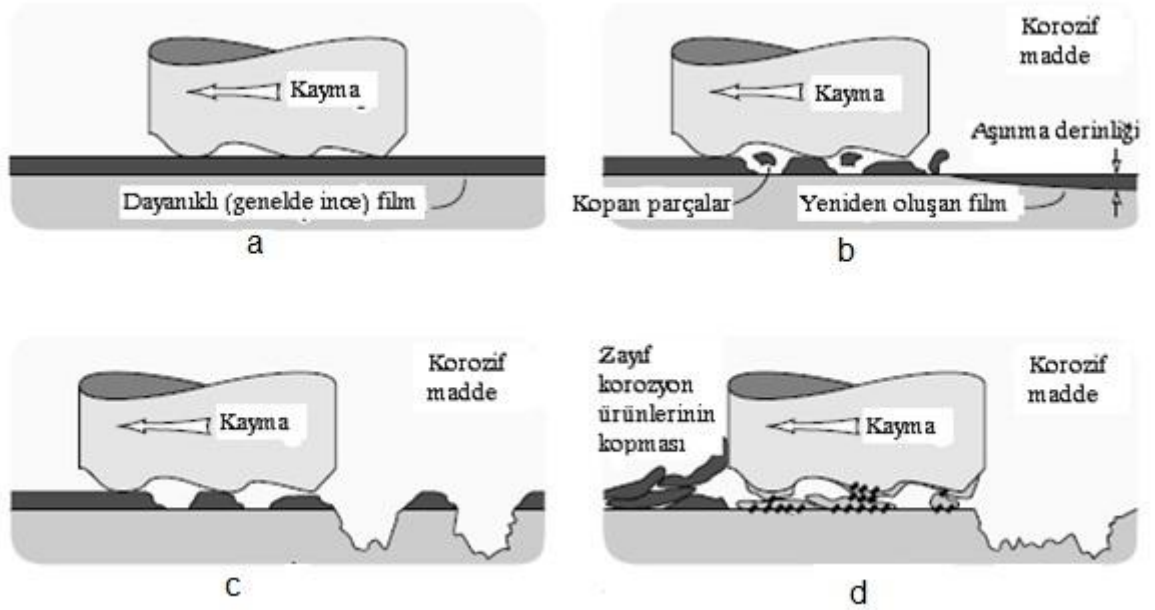
reaksiyondur. Genel olarak korozif aşınma dediğimizde atmosferik oksijenin etkisi ile meydana gelen kimyasal reaksiyonları kastederiz. Bu aşınma türünde ilginç bir karakteristik nokta mevcuttur. Aşınma miktarı hızla artarken sürtünme katsayısı düşer. Aslında bu durum, korozif aşınma mekanizmasının belirlenmesinde yararlı bir unsurdur (Yasuo, K., et al, 2003).

Adezyonu önleme amaçlı yüzey kimyasal reaksiyonları, eğer denetim altında alınmazlarsa, yüzeyden malzeme kaybına neden olabilirler. Eğer bir malzeme (metal) yüzeyde tabaka oluşturacak biçimde korozyona uğramış ise ve aynı zamanda yüzeyi üzerinde kayabilen bir başka cisimle temas halinde ise aşağıdaki 4 durumdan biri ortaya çıkabilir:

- Dayanıklı bir yağlayıcı tabaka oluşur ve bu tabaka hem korozyonu hem de aşınmayı önler,
- Yüzeylerin birbiri üzerinde kayması halinde kısa ömürlü ve dayanıksız bir film tabakası oluşur. Bu filmin hasar görmesi ile yüksek miktarda aşınma ortaya çıkar. Sürtünme katsayısı düşebilir ya da aynı kalabilir.
- Koruyucu yüzey filmi bir nedenle (pitting gibi) aşınabilir. Kalan film parçası ile ana malzeme arasında galvanik pil teşekkül eder. Bunun sonucunda yüzeyde hızlı bir aşınma baş gösterir.
- Korozyon ve aşınma prosesleri kendi başlarına ayrı ayrı etkirler ve bu iki prosesin yaratacağı aşınmanın toplamı kadar aşınma gözlenir.

İlk proses, Şekil 2.4-a'da gösterildiği gibi, dayanıklı bir yağlayıcı tabakanın varlığı sayesinde gerçekleşir. Eğer bu durumda yağlayıcı film, aşınma sözkonusu olabilecek temasları önlemiş ise korozif aşınma meydana gelmez. Korozyonun oluşturduğu film tabakaları genelde dayanıksızdır, o nedenle çok nadir olarak bu durumun gerçekleştiği görülür. İkinci proseste, Şekil 2.4-b'de gösterildiği gibi, yüzeylerin birbiri üzerinden kayması sonucu hasar gören ya da kısa ömürlü olan korozyon filmi oluşmaktadır. Bu durum, korozif aşınmanın en sık görülen çeşididir. Çünkü korozyon tabakalarının çoğu kırılğan oksitleri ya da diğer iyonik bileşenleri

içerir. Örnek olarak tüm demir oksitler çok kırılımandır. Üçüncü proses, Şekil 2.4-c'de gösterildiği gibi, çok korozif ortamların sonucudur. Dördüncü proseste, Şekil 2.4-d'de gösterildiği gibi, kontrolsüz aşınma ve hızlı korozyon durumu açıklanmıştır (Stachowiak, G. and Batchelor, A., 2005).



Şekil 2.4. Korozif madde ve aşınma yüzeyi arasındaki ilişkilerin modeli. a) Adesif aşınma önlenmiştir, b) Temas sonucu film zedelenmiş fakat adesif aşınma önlenmiştir, c) Aşınan film üzerinde oyuklarda meydana gelen anodik çözülme sonucu yoğun korozyon, d) Kontrolsüz adesif aşınma, yüzeyde hızlı korozyon

## 2.5. Yorulma aşınması

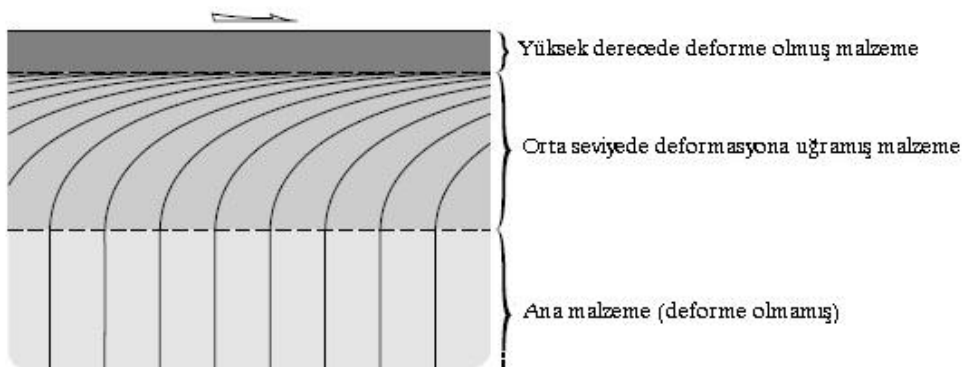
İyi yağlama koşulları sağlanmış parçalar arasında adezyon etkisinin olmadığını kabul etmemize rağmen yine de aşınma olabilmektedir. Bunun nedeni bir yüzeydeki çıkıntıların (pürüzlerin) diğer yüzeye kadar uzanması sonucunda meydana gelen deformasyonlardır. Pürüzlülüklerin (Asperitilerin) diğer yüzeye teması sırasında

yüksek gerilmeler oluşur. Bu durum birçok defa tekrar edince yorulma çatlakları ve sonucunda aşınma meydana gelir. Bu şartlar altında oluşan aşınma, çatlak başlangıcı, çatlak büyümesi ve kırılma biçiminde gelişir. Aşınmış yüzeylerde, aşınmamış olanlara göre büyük miktarda deformasyon görülür. Gerilme ve malzemenin mikro yapısındaki değişimler, aşınma prosesinde güçlü etkiye sahiptir.

Literatürde “temas yorulması” ya da “yüzey yorulması” isimleri ile adlandırılan olaylar, yüzey üzerinde başka bir cismin tekrarlı yuvarlanması sonucunda oluşan yorulma kaynaklı hasarlardır. Bu olaya rulmanlarda ve benzeri yuvarlanmalı mekanizmalarda rastlanmaktadır.

Aşınmış yüzeyler üzerinde yapılan araştırmalar, aşınan yüzeyin altına uzanan bir deformasyon bölgesinin var olduğunu göstermektedir.

Örnek olarak, belli bir sürtünme katsayısının etkisi altında ve yüzeye dik yönde büyük bir yükün tesirindeki malzeme, yüzeyden itibaren içeri doğru 0.1 mm mesafede, yüzeylerin birbiri üzerinden kayması yönünde deformasyona uğramaktadır. Buna ek olarak, hemen yüzeyde bulunan malzeme, aşınma yönüne paralel çizgiler halinde deforme olmaktadır. Buna karşılık, uygun yağlama şartlarında birbiri üzerinde hareket eden yüzeylerde bu etki çok azalmakta hatta kaybolmaktadır. Şekil 2.5'te aşınan yüzey ve bu yüzeyin altındaki bölgenin deformasyon biçim ve seviyeleri gösterilmiştir.

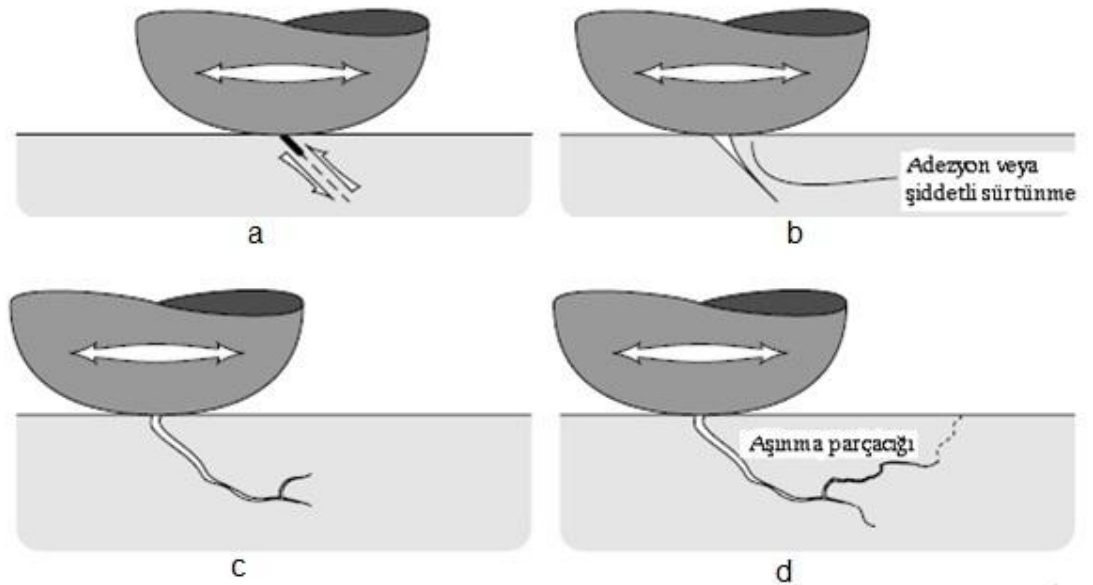


Şekil 2.5. Deformasyona uğramış bir yüzeyde deformasyon seviyeleri

Yukarıda açıklanan mekanizma, deformasyona uğrayan malzemenin orijinal tane yapısını bozarak dislokasyonlara yol açar. Bazı malzemeler dislokasyona daha eğilimlidir. Bu eğilim malzemenin istifleme hatası enerjisi (stacking fault energy, SFE) ile ilişkilidir. Yüksek SFE değerine sahip olan malzemelerin dislokasyona uğrama eğilimleri daha yüksektir. Örnek olarak alüminyum, bakır ve demir yüksek SFE değerlerine sahiptirler ve dolayısı ile kolaylıkla dislokasyona uğramış hücreler meydana gelebilir.

Yüksek enerjiye sahip hücre sınırları, düzgün olmayan dağılımın ve çatlak başlangıcının muhtemel noktalarıdır. Aşınma ile yerinden kopacak parçacık, yüzeylerin birbirlerine izafeten yaptıkları kayma hareketine dik düzlemde bulunan hücre duvarlarında yer alabilir. Bu durumda çatlak, hücre sınırlarında başlar. Alternatif olarak, çatlak başlangıcı yüzeyin altındaki bir zayıf noktada başlar ve takiben yüzeye ulaşıp aşınma parçacığının cisimden kopması ile sürer.

Yüzey çatlağının başlama ve ilerleme mekanizması, Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Yüzeydeki zayıf bir noktadan başlayan primer çatlak, malzemenin içine doğru, zayıf düzlemler boyunca (kayma düzlemleri ya da dislokasyon hücre sınırları) ilerler. Primer çatlaktan gelişen bir sekonder çatlak meydana gelir ya da primer çatlak ilerlediği yönde başka bir yüzey altı çatlak ile buluşur. Bu şekilde gelişen çatlak tekrar yüzeye ulaştığında kopacak bir parça meydana gelmiş olur.



Şekil 2.6. Yüzey çatlağının ilerleme prosesini gösteren şematik model; a) Yorulma prosesi sonucunda çatlak başlangıcı, b) Hareket düzlemi uzantısında primer çatlak oluşumu, c) Sekonder çatlak başlangıcı, d) Aşınma parçacığının meydana gelmesi.

Sonuç olarak, yeterince yağlama sağlanmamış yüzey temaslarında, birbirleri üzerinden tekrarlı kayma koşullarında, yüzeyden başlayan çatlaklar ilerleyerek aşınma parçalarının malzemeden kopması sonucunu doğurabilir (Stachowiak, G. and Batchelor, A., 2005).

## 2.6. Adhezyon ve adhesif aşınma

Adhesif aşınma, yüksek aşınma miktarları ve aynı zamanda yüksek ve değişken sürtünme katsayısı ile karakterize edilen önemli bir aşınma türüdür. Birbiri üzerinde kayan yüzeyler adhesiv aşınma nedeni ile hızla hasara uğrar ve kayma hareketi sürtünme katsayısının yüksekliği nedeni ile durabilir. Metaller adhesiv aşınmaya eğilimlidir. Bu nedenle yağlamanın kesintiye uğraması durumunda metal yüzeyler hızla adhesiv aşınma nedeni ile zarar görecektir. Birbiri üzerinde hareket eden

yüzeyle adhezyon etkisinden uzaklaştırılmazsa aşınma kaçınılmazdır (Stachowiak, G. and Batchelor, A., 2005).

### **2.6.1 Adhezyon mekanizması**

Belli koşullar mevcut olduğunda, katıların çoğu, temas ettiği diğer katılarıyla yapışmaya eğilimlidir. Tesadüfen yan yana gelmiş katıların tümünde bu etkinin görülmemesinin nedeni, arada oksijen, yağ, su ya da kirleticiler gibi ortamların varlığıdır.

Atmosferimiz ve organik maddeler, yüzeylerin adhezyonunu engelleyen tabakalar oluşturur. Ayrıca yüzey düzgünlüğü ve sertlik de adhezyon yeteğini azaltan unsurlardır.

Adhezyon ve kayma konusunda, yüksek vakum altında gerçekleştirilen tribolojik deneyler, açık havada elde edilenlerden çok farklı sonuçlar vermektedir (Stachowiak, G. and Batchelor, A., 2005).

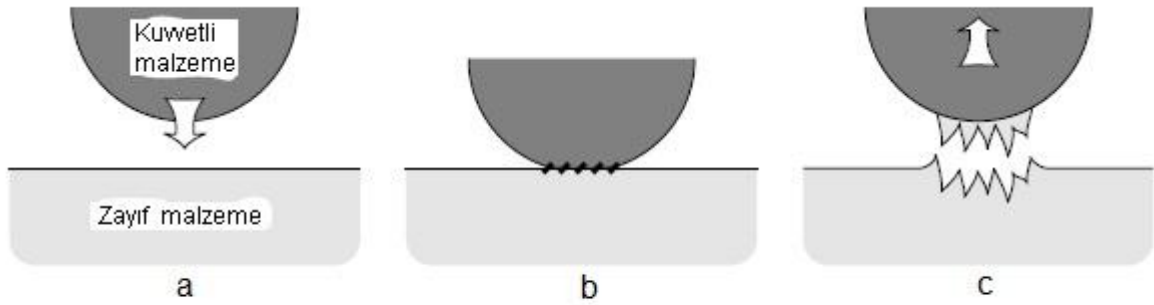
### **2.6.2. Metal-metal adhezyonu**

Altın, platin gibi soy metalleri bir kenara bırakırsak, normal atmosfer şartlarında hemen hemen tüm metallerin yüzeyi bir oksit tabakası ile kaplıdır. Bu tabaka bazen sadece birkaç nanometre kalınlıkta dahi olabilir. Fakat çıplak metal yüzeylerin temasını, dolayısı ile adhezif aşınmayı önler.

Vakum altında yapılan deneyler göstermektedir ki, kontaminasyondan arındırılmış metal yüzeyler arası adhezyon eğilimi çok yüksektir (Stachowiak, G. and Batchelor, A., 2005).



Deney sonuçları göstermektedir ki, yüksek adhezyonun var olması halinde kuvvetli malzeme, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi zayıf malzemeden parça koparmaktadır.



Şekil 2.7. Adhezyon yolu ile metal taşınması; a) Yaklaşma, b) Yapışma, c) Transfer

Metaller arası adhezyon, bazı cihazlarla ölçülebilir. Bu amaçla sivri test malzemesi, düzlemsel yüzeye sahip karşı malzemeye vakum şartları altında belli kuvvetle bastırılır. Adhezyon, bu malzemeleri tekrar birbirlerinden ayırmak için gereken kuvvetin ölçüsü ile karakterize edilir.

Değişik malzemelerin demire karşı 0.2 mN kuvvet uygulanarak ve  $10^{-10}$  Torr vakumda yapılan adhezyon testlerinin sonucu Çizelge 2.1'de görülmektedir. Çizelge incelendiğinde, adhezyon (ya da ayırma) kuvvetinin her zaman cisimlere uygulanan bastırma kuvvetinden fazla olduğu anlaşılmaktadır. En yüksek adhezyona, benzer metaller arasında (demir – demir gibi) rastlanmaktadır. Bununla birlikte benzer olmayan çok sayıda metal arasında da yüksek adhezyon görülmektedir.

Adhezyon kuvveti ile basma kuvveti arasındaki oran bazen 20 ya da daha yüksek değerlere çıkabilmektedir. Yapışma bir anda meydana gelmekte, orta ve düşük sıcaklıklarda da elde edilebilmektedir (Stachowiak, G. and Batchelor, A., 2005).

Çizelge 2.1. Bazı metallerin demire karşı adhezyon özellikleri

Metal	Demir içinde çözünebilirlik (atomik %)	Demire karşı adhezyon Kuvveti (mN)
Demir		>4,0
Kobalt	35	1,2
Nikel	9,5	1,6
Bakır	<0,25	1,3
Gümüş	0,13	0,6
Altın	<1,5	0,5
Platin	20	1,0
Alüminyum	22	2,5
Kurşun	Çözünmez	1,4
Tantalyum	0,20	2,3

Metaller arasındaki yüksek adhezyon, temas eden yüzeyler arasında elektron transferi ile izah edilebilir. Metallerde çok sayıda serbest elektron mevcuttur ve değen yüzeylerde bu elektronlar bir metalden diğerine geçerek yapışmayı sağlamaktadır.

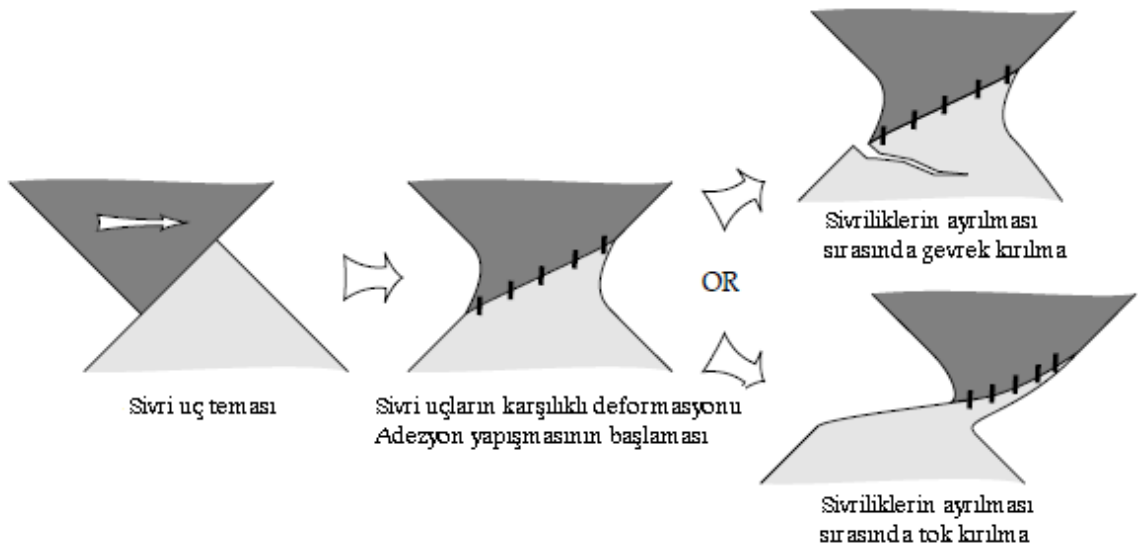
Yüzeyler arasında elektron transferini açıklamak için “Jellium modeli” kullanılabilir. Bu modelde, elektronların rijid bir yapı tarafından çevrelenmediği dikkate alınarak, yüzeyler arasındaki mesafenin yeterince küçük (<1nm) olduğunda bir cisimden diğerine elektron geçişi olabileceği kabul edilir. Bu yolla değişik atomik yapıya sahip olmalarına rağmen iki cisim birbirine yapışabilir.

Teorik olarak, iki metal temasta olduğunda daha yüksek elektron yoğunluęuna sahip olan cisim diğerine elektron verir.

Metaller genelde 4 ana tip kristal yapıdadır. Bunlar; yüzey merkezli kübik (YMK), hacim merkezli kübik (HMK), sıkı düzen hegzagonal (SDH) ve tetragonal yapılardır.

Deneysel olarak bulunmuştur ki, sıkı düzen hegzagonal (SDH) yapıdaki metaller, diğer kristal yapılara göre çok daha az adhezyon eğilimi göstermektedir. Bunun yanında yüksek sertlik, büyük elastisite modülü ve büyük yüzey enerjisi de adhezyonu azaltıcı etkiye sahiptir.

Adhezyon etkisi ile yüzeylerden parça kopmasının mekanizması konusunda, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi, çeşitli modeller mevcuttur. (Stachowiak, G. and Batchelor, A., 2005).



Şekil 2.8. Sivri uçların adhesiv teması sonucunda deformasyon oluşumuna alternatif bir model.

## BÖLÜM 3

### YAĞLAMA

Yağlama, temas eden yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısının düşürülmesini sağlayan bir madde kullanarak temasın ve dolayısı ile aşınmanın azaltılması işlemine denir. Bu madde yardımı ile yağsız yüzeyler arasında hızla ve etkili biçimde meydana gelecek aşınma azaltılır ve çoğunlukla yüzeylerin birbirlerine doğrudan teması önlenir.

Makine parçaları, imal tarihinden başlayarak, çalışmaları dahi yıpranırlar. Çeşitli etkenler makine parçalarının ömrünü azaltıcı ve uygun özelliklerini yok edici yönde hareket ederek parçanın nitelik kaybetmesine neden olurlar. Bu etkenlerin en önemlilerinden biri sürtünme nedeni ile doğan hasarlardır. Makine mühendisliği açısından yağlama, sürtünmenin olumsuz etkilerini azaltmak amacı ile kullanılan önlemlerin en önemlilerinden biridir.

Yağlama ile, temas edecek yüzeylerin birbirlerine temas etmeleri ve bunun yaratacağı sonuçlar azaltılır. Yüzeylerin birbirlerinden parça koparması belli seviyelerde engellenir. Yağlama olarak isimlendirdiğimiz işlemler kullanılmasa idi, makine parçalarının nitelikli ömürleri çok kısa olur ya da bazı makineleri çalıştırmak hiç mümkün olmazdı. Örneğin yağlama olmadan bir içten yanmalı motorun çalıştırılması mümkün değildir.

Yağlama işlemi ile aşağıdaki yararların elde edilmesi beklenir:

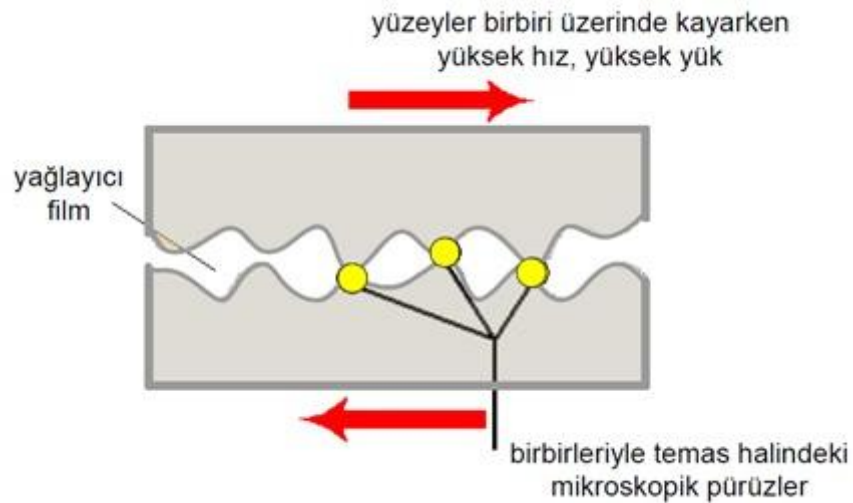
- Yüzeyler arası sürtünme katsayısının ve aşınmanın azaltılması,
- Makine parçalarının soğutulması,
- Korozyona karşı koruma,
- Aşınma ve diğer nedenlerle makine parçaları etrafında yer alabilecek istenmeyen partiküllerin uzaklaştırılması.
- Mekanik şokların emilerek darbelerin söndürülmesi.

### 3.1. Yağlama Türleri

Aşağıda, birbiri üzerinden kayan cisimlerin temas durumlarına ve yağlayıcı sıvının içinde bulunduğu fiziksel şartlara göre farklılaşan başlıca yağlama türleri ele alınmıştır.

#### 3.1.1. Sınır tabaka yağlaması (İnce film yağlaması)

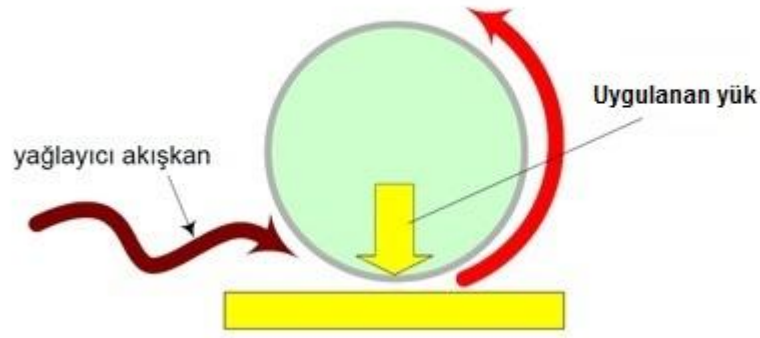
Yük ve hızın artması ve/veya yağlayıcı akışkanın özelliklerindeki farklılık, iki yüzey arasındaki yağ filminin çok incelmesine neden olur ve film bazı noktalardan kopar. Bu olayın sonucunda, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, yüzeydeki tepe noktaları (çıkıntılar) birbiri ile direkt temas eder. Yağ filmi sürtünmeyi azaltma ve aşınmayı önleme görevini yerine getiremez. Sınır tabaka yağlaması durumunda, yük, yağ tabakasından çok yüzeyin çıkıntıları tarafından taşınır (Beşergil, 2009).



Şekil 3.1. Sınır tabaka yağlaması

### 3.1.2. Hidrodinamik yağlama

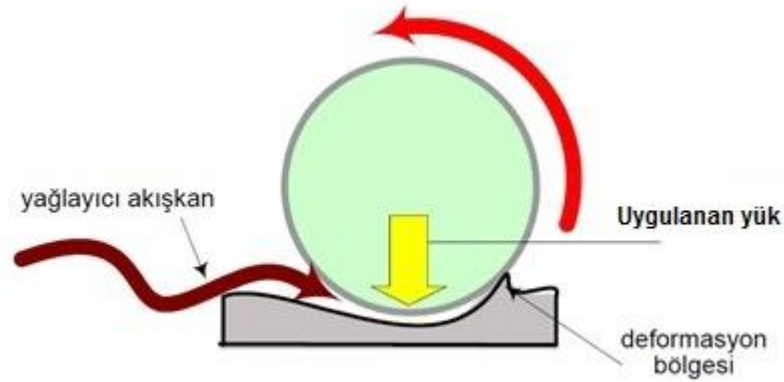
Yüzeyler arasında teması önleyen sürekli bir yağ filminin varlığı, hidrodinamik yağlama durumunu karakterize eder. Yağ filmi, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, her iki yüzeye tam temas halinde olup kesintisizdir, yüzeylerin hiçbir noktası karşı yüzey ile temas etmez. Yüzeylerde yağın basıncı nedeni ile herhangi bir deformasyon meydana gelmez. Hızın ve viskozitenin artması yağ filmi kalınlığının artmasına, yüzeyleri birbirine bastıran normal kuvvetin artması ise film kalınlığının düşmesine neden olur (Beşergil, 2009).



Şekil 3.2. Hidrodinamik yağlamanın şematik gösterimi

### 3.1.3. Elastohidrodinamik yağlama

Yağlayıcı üzerindeki yük veya basıncın yağa, üzerinde bulunduğu yüzeydekenden daha fazla kayma gerilmesi uygulaması durumunda yağ filmi kopar ve Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, yüzeyler birbiriyle temas ederek deforme olurlar (Beşergil, 2009).



Şekil 3.3. Elastohidrokinematik yağlamanın şematik gösterimi.

### 3.2. Stribeck eğrisi

Yağlama tekniği açısından, karşılıklı çalışan yüzeyler arasında uygun yağlayıcının tatbik edilmiş olması tek başına belirleyici değildir. Yüzeylerin düzgünsüzlüğü, viskozite, izafi hız gibi parametrelerin farklılaşması ile değişik yağlama tipleri meydana gelir. Yağlamanın ve yağlamadan beklenen yararların etkinliği açısından yağlama tipleri çok önemlidir. Bunlar, yağ filminin etkinliğini, buna bağlı olarak yüzeylerin birbirlerinden ayrılmasını ve dolayısı ile sürtünmeyi belirler. XIX. yüzyıl sonlarında, Berlin’de profesör olan Richard Stribeck, kaymalı yataklar üzerine kapsamlı araştırmalar yaparak yağlama tipleri (rejimleri) üzerine sistematik bir metod geliştirmiştir. Stribeck’in bulguları sonucunda, yağlayıcının dinamik viskozitesi ( $\eta$ ), milin yatak içinde dönme açısal hızı ( $\omega$ ) ve yüzeylerin birbirine temas basıncı ( $p$ ) ile sürtünme katsayısını ilişkilendiren eğri ortaya çıkmıştır. Takiben Hersey, McKee ve diğerlerinin çalışmaları ile boyutsuz parametre gurubu (hız x viskozite/basınç) notasyon değiştirerek ( $ZN/p$ ) biçimini almıştır. Burada  $Z$  dinamik viskoziteyi,  $N$  dönme hızını ve  $p$  basıncı göstermektedir. Çizelge 3.1’de çeşitli sistemlerde ( $ZN/p$ ) değerleri verilmiştir (Blau, P. J., 2009).

Çizelge 3.1. Yağlanan makine komponentleri için tipik (ZN/p) değerleri

Komponent	Dinamik viskozite (cP)	ZN/p
Otomobil ana yatakları	7	15
Gemi motorları ana yatakları	30	20
Sabit montajlı buhar makinaları ana yatakları	15-60	20
Buhar türbini ana yatakları	2-16	100
Döner pompalar şaft yatakları	25	200

Stribeck yasasına göre, aşağıdaki formül hidrodinamik yağlamanın sınırlarını göstermektedir.

$$\text{Log } U + \text{log } v - \text{log } W = \text{sabit}$$

U: Yüzeylerin birbirlerine izafi hızı (m/s)

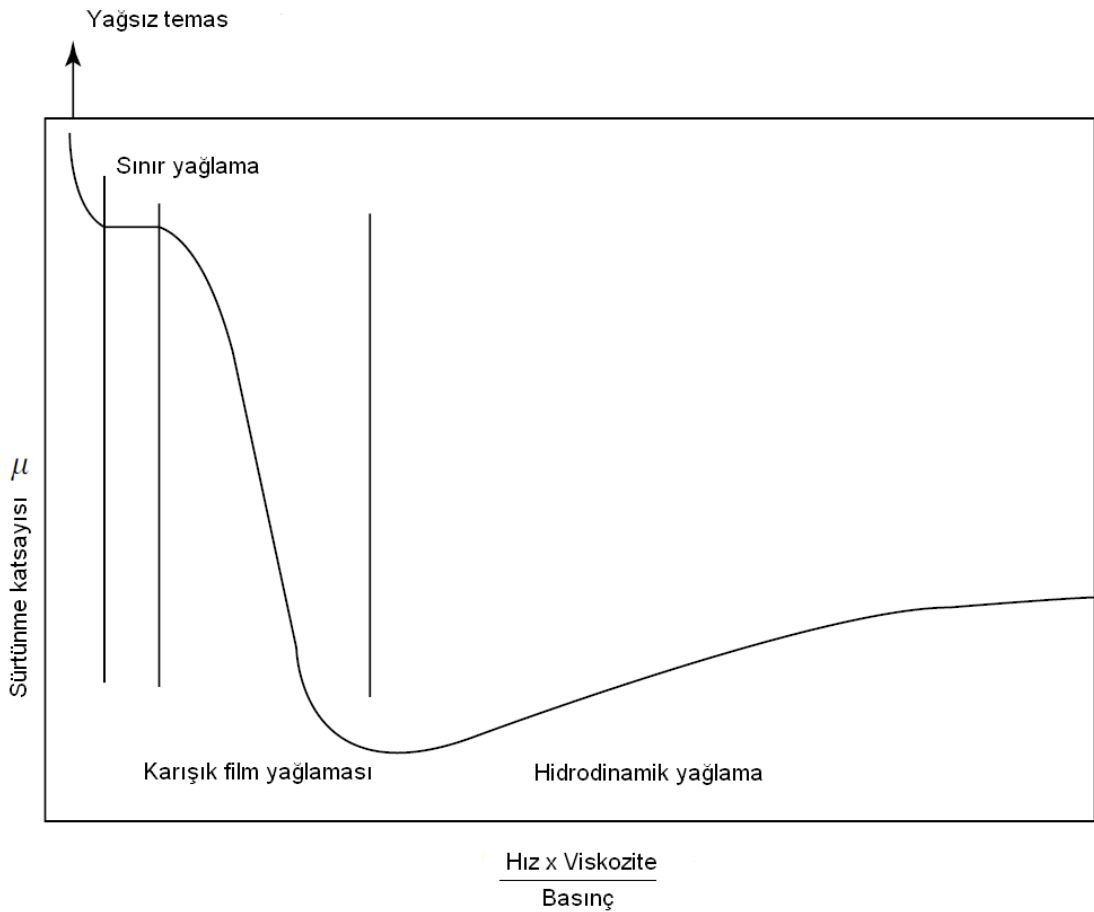
v: Kinematik viskozite ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

W: Yük (N)

Şekil 3.4'te görülen Stribeck eğrisi, yatakların tasarımında ve yağlama alanında değişik davranış tiplerini açıklamada geniş biçimde kullanılır. Yüksek basınçta ya da viskozite ve hızın yetersiz olduğu durumlarda yüzeyler birbirine temas ederek yüksek bir sürtünme durumu ortaya çıkabilir. Bu durumda sürtünme katsayısının tipik olarak 0,2 – 0,5 aralığında olduğu görülür. Eğrinin sol üst tarafındaki yatay bölüm bu değere karşılık gelmekte olup “sınır yağlama” şartlarını temsil eder. Sınır yağlama şartlarında sürtünme katsayısı, kuru sürtünme durumundan daha düşüktür. Eğriyi sağa doğru takip ettiğimizde hızla düşüş gösterdiği görülmektedir. Bu alan “karışık yağlama rejimi”



dediğimiz şartların yerine geldiği bölgedir. Karışık yağlama bölgesinde, sınır yağlama ile hidrodinamik (veya elastohidrodinamik) yağlama şartlarının karışık olarak yer aldığı bilinmektedir. Eğrinin minimum yaptığı noktadan sağa doğru devam edildiğinde “hidrodinamik” ya da “elastohidrodinamik” yağlama şartları hakim olur. Bu alanda sürtünme katsayısı çok düşer. Değişik döner yatak elemanları için sürtünme katsayısı tipik olarak 0,0010 ila 0,0018 aralığında bulunur.



Şekil 3.4. Stribeck eğrisinin genel biçimi

Değişik yağlama şartlarını belirleyebilmek için kullanılan diğer bir parametre de “spesifik film kalınlığı veya lambda oranı” dır.

$$\lambda = h / \sigma^* \quad (3.1)$$

$h$ : temas alanında minimum yağ filmi kalınlığı ( $\mu\text{m}$ ),

$\sigma^*$ : İndirgenmiş yüzey pürüzlüğü

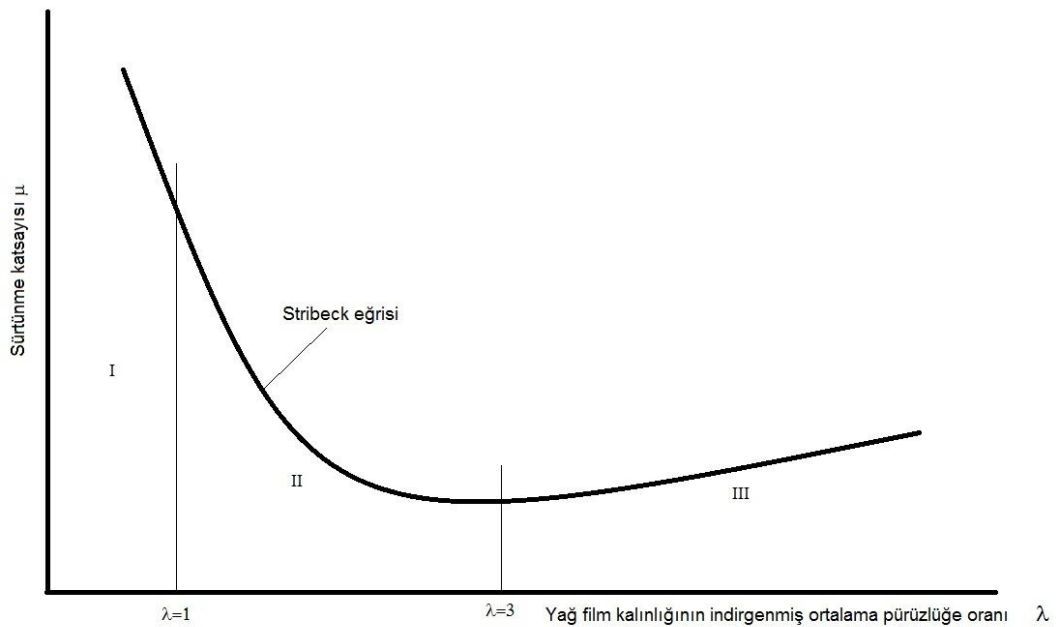
$$\sigma^* = (\sigma_1 + \sigma_2)^{1/2} \quad (3.2)$$

Burada;

$\lambda < 1$  sınır tabaka yağlaması,

$1 < \lambda < 3$  karma yağlama (sınır tabaka yağlaması, hidrodinamik ve elastohidrodinamik yağlama),

$3 < \lambda$  sıvı yağlama (hidrodinamik yağlama).



Şekil 3.5. Stribeck eğrisi,  $\lambda$  değerleri (Woydt and Wäsche, 2010)

### 3.3. Hamrock-Dowson Eşitliği

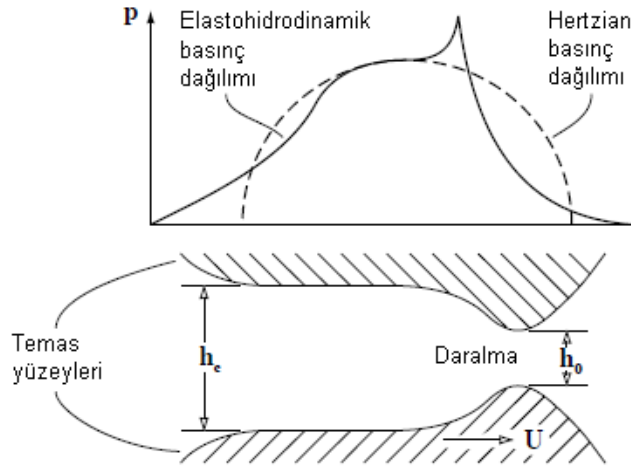
Elastohidrokinamik yağlama koşullarında, birbirini üzerinden kayan yüzeyler arasında meydana gelen yağ filminin kalınlığı, Hamrock ve Dowson tarafından geliştirilen formül yardımı ile hesaplanabilmektedir.

#### 3.3.1. Elastohidrokinamik film üzerinde basınç dağılımı

Hertzian teoriye göre, iki yüzeyin statik teması durumunda basınç dağılımı yarı küresel ya da elipsoidal profildedir. Temas eden yüzeylerin, ortamda piezoviskoz bir akışkan (yağ gibi) var iken birbirlerine izafeten hareket etmeleri durumunda basınç alanı değişecektir. Yüzeylerin birbirine göre hareket etmeleri bir hidrokinamik film tabakası meydana getirerek basınç dağılımının belli bir alanda değişmesine neden olur. Bu değişimin en büyük etkisi temas alanının giriş ve çıkış bölümlerinde gözlenir.

Dönme hareketinin ve yağ filminin mevcut olmasının birlikte yarattığı etki kuru temas alanından biraz daha büyük bir etki alanı meydana getirir. Bunun sonucunda, giriş bölgesinde hidrokinamik basınç, kuru Hertzian basınçtan daha düşük olmaktadır. Çok sayıda deneyle bu ifadenin doğruluğu gösterilmiştir. Temas alanında yüzeyler hemen hemen düzlemsel ve paraleldir. Bu alandaki film kalınlığına “merkezi film kalınlığı” denir ve ‘ $h_c$ ’ notasyonu ile gösterilir. Yağ, temas alanında ani bir viskozite yükselmesine uğrar ve alanı terk ederken aynı biçimde viskozite aniden düşer. Akımın sürekliliğini sağlamak ve yağın viskozite düşüşünü karşılamak için çıkışta bir daralma oluşur. Şekil 3.6’da gösterildiği gibi, minimum film kalınlığı ‘ $h_o$ ’, daralmanın olduğu kısımda meydana gelir.

Minimum film kalınlığı, temas yüzeylerindeki pürüzlerin karşılıklı etkileşimini belirlemesi açısından önemlidir. Viskozitenin çıkıştaki düşüşü, girişteki yükselmesinden daha keskin biçimde meydana gelir. Daralma bölgesinde darbe biçiminde bir basınç şoku meydana gelir ve bu yükselip alçalmanın düşüş kısmında basınç, kuru Hertzian basınçtan daha aşağı düşer. Bu basınç şokunun maksimum basınç değerinde genelde maksimum Hertzian temas basıncının üzerine çıkarılır. Bunun ardından yağın yetersiz gelmesi nedeni ile yağsız temas koşullarına kadar düşülür.



Şekil 3.6. Elastohidrodinamik temas durumunda hidrodinamik basınç dağılımı.  $h_c$  merkezi film kalınlığı,  $h_0$  minimum film kalınlığıdır.

Basınç şokunun ölçüsü ve dikliği, büyük ölçüde yağlayıcının basınç-viskozite karakteristiğine bağlıdır. Elastohidrodinamik yağ filminin daralma bölgesinin son kısmı, noktasal temas meydana gelmesi açısından daha belirleyicidir. Bu durumda temas daireseldir ve daralmanın son kısmı temas bölgesinin sınırlarına kadar uzanacak biçimde bir eğri formunu alır. Bu olay “at nalı” daralması adı ile bilinir. Minimum film kalınlığı, at nalının iki ucunda yer alır ve merkezi film kalınlığının %60'ı kadardır (Stachowiak, G. and Batchelor, A., 2005).

### 3.3.2. Elastohidrodinamik film kalınlığı hesabı

Elastohidrodinamik yağlamanın Hamrock ve Dowson tarafından analizi sonucunda bu alanda önemli bilgilere ulaşılmıştır. Bu analiz sonucunda, elastohidrodinamik yağlama koşullarında minimum yağ filmi kalınlığını veren formül ortaya çıkarılmıştır. Hamrock ve Dowson tarafından ortaya konan bu formül, her türlü (noktasal, doğrusal veya eliptik, vs) temas koşuluna tatbik edilebilmekte ve günümüzde elastohidrodinamik film kalınlığını hesaplama amacı ile rutin olarak kullanılmaktadır. Formül, güvenilir biçimde değişik malzeme kombinasyonları için tatbik edilmekte olup,

3-4 GPa basınç altındaki demir – demir temaslarında dahi doğru sonuç verdiği bilinmektedir. Formülün, merkezi ve minimum film kalınlıklarını hesaplamak için kullanılan nümerik formu şu şekildedir (Stachowiak, G. and Batchelor, A., 2005);

$$\frac{h_c}{R} = 2.69 \left( \frac{U \eta_0}{E' R'} \right)^{0.67} \left( \alpha E' \right)^{0.53} \left( \frac{W}{E' R'^2} \right)^{-0.067} \left( 1 - 0.61 e^{-0.73k} \right) \quad (3.3)$$

$$\frac{h_o}{R} = 3.63 \left( \frac{U \eta_0}{E' R'} \right)^{0.68} \left( \alpha E' \right)^{0.49} \left( \frac{W}{E' R'^2} \right)^{-0.073} \left( 1 - 0.61 e^{-0.68k} \right) \quad (3.4)$$

$h_c$  : merkezi film kalınlığı (m),

$h_o$  : minimum film kalınlığı (m),

$U$  : giriş yüzey hızı (m/s), Yani:  $U=(U_A + U_B)/2$ , A ve B temas eden cisimlerin hızlarıdır,

$\eta_0$  : yağlayıcının atmosferik basınç altındaki viskozitesi (Pa.s),

$E'$  : indirgenmiş elastisite modülü (Pa),

$R'$  : temas eden cismin yüzeyinin azaltılmış yarıçapı (m),

$\alpha$  : basınç – viskozite katsayısı ( $m^2 / N$ ),

$W$  : temas yükü (N),

$k$  : elipslik parametresi,  $k=a/b$  , a: harekete dik yöndeki eksen uzunluğu, b: hareket yönündeki eksen uzunluğuk parametresi, aşağıdaki formülden hesaplanabilir:

$$k= 1,0339 (R_y / R_x)^{0,636} \quad (3.5)$$

$R_x$  ve  $R_y$  ; yüzeyin x ve y yönündeki azaltılmış yarıçaplarıdır.

Görüldüğü gibi, çizgisel temas durumunda  $k= h$  olur. Noktasal temas halinde ise  $k=1$  dir.

Yukarıdaki formüller,  $k=0,1$  ile  $k=h$  değerleri arasında uygulanabilir. Formüllerdeki boyutsuz parametreler, literatürde aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Boyutsuz film parametresi .....	$H = \frac{h}{R'}$
Boyutsuz hız parametresi .....	$U = \left( \frac{U \eta_0}{E' R'} \right)$
Boyutsuz malzeme parametresi .....	$G = \left( \alpha E' \right)$
Boyutsuz yük parametresi .....	$W = \left( \frac{W}{E' R'^2} \right)$
Boyutsuz elipslik parametresi.....	$k = \frac{a}{b}$

## BÖLÜM 4

### KATI CİSİMLERİN TEMAS MEKANİĞİ

Birbiriyle temas halinde çalışan makine parçalarının temas sırasında oluşan gerilmeye ve temas yüzeyi geometrisine bağlı aşınmaları söz konusudur. Uygulanan yükten bağımsız olarak temas geometrisi, karşılıklı çalışan cisimlerde hasar oluşumuna neden olabilir.

Bir cisim diğerine temas ettiğinde, cisimler arası arakesit “yeterince” küçük ise cismin tüm kesiti ile reaksiyon veremediği durumlar ortaya çıkabilmektedir. Sivri bir cismin, düz bir yüzeye bastırılması durumunda, cisim, uygulanan yüke sorunsuz biçimde dayanabilecek mukavemette olsa dahi temas alanında hasar meydana gelebilir.

Söz konusu mekanik olayların, temel mukavemet teorileri ile çözülmesi mümkün değildir. Farklı kabul ve yaklaşımların kullanılması gerekmektedir. Bu yönde ilk sonuç alıcı çalışmaları 1881 yılında gerçekleştiren kişi Heinrich Hertz olmuştur.

Takip eden bölümlerde, gerek Hertz, gerekse sonra gelen temas mekaniği araştırmacıları tarafından ortaya konmuş olan analitik ve deneysel sonuçlar ele alınacaktır. Bu çerçevede;

- İdeal ve gerçek katıların teması,
- Cisimlerin statik ve dinamik temas durumları,
- Temas eden cisimlerin birbirlerine izafeten hareketleri ve bunların sonuçları,
- Temas mekaniği için nümerik yöntemler,
- Temas mekaniğinde deneysel yöntemler,
- Düzgün olmayan yüzeye sahip cisimlerin teması,
- Temasın plastik deformasyon meydana getirmesi,
- Tekrarlı temas konuları, çalışma kapsamı içinde ele alınacaktır.

#### 4.1. Hertzian Temas Mekanığı

İki katı (solid) cisim, temas durumunda iken, birbirlerine doğru (dik yönde) belli bir kuvvetle bastırıldığında, her ikisi de elastik ve/veya plastik şekil değişimine maruz kalırlar. Bu durum, makro ölçekte incelendiğinde (yani cismin bütünü göz önüne alarak) idealize edilmiş geometrik şekillerin temas ettiği var sayıldığında, yüzeyleri pürüzsüz iki geometrik yapının teması problemine indirgenmiş olur.

Diğer yandan cismin bütünü değil, fakat sadece temas eden noktaları ele alan mikroskopik ölçekteki inceleme sonucunda, pürüzlü yüzeylerin çok sayıda noktasal temasları modeline ulaşılır.

Gerçekte cisimler, düzgünlükleri nedeni ile yüzeylerinde mevcut olan sonsuz sayıda çıkıntıları vasıtası ile birbirlerine temas ederler.

Bu durumu gözde canlandırma açısından, mükemmel biçimde işlenmiş ve pürüz giderme operasyonları ile parlak yüzeyli hale getirilmiş iki dişli çarkın karşılıklı çalışmasını ele alalım. Temas etmekte olan iki diş, geometrileri belli iki yüzey halinde, birbirlerine kuvvet uygulayarak bir doğru parçası boyunca birbirlerini zorlamaktadırlar.

Temas eden diş profilleri, yeterince büyüterek gözlendiğinde ise, temas eden yüzeylerin pürüzsüz olmadığı, çok sayıda girinti ve çıkıntıya sahip oldukları ve aralarındaki temasın sadece çıkıntı tepeleri arasında meydana geldiği görülecektir.

Cisimlerin teması durumunda birbirlerine uyguladıkları kuvvet nedeni ile elastik (ve/veya plastik) şekil değişimleri meydana gelmesi sonucunda temas eden alan büyür ve uygulanan yük, gerilme halinde cisim tarafından taşınır. Bu durumun bazı geometrik şekiller için (küre, silindir, elipsoid gibi) mekanik analizi ilk defa 1881 yılında Heinrich Hertz tarafından yapılmış olup aşağıdaki kabullerin doğruluğu halinde Hertzian çözüm önerilmiştir.

- 1- Temas eden malzemeler için Hooke kanunu geçerlidir, yüzeyler pürüzsüz, sürekli, birbiri ile çakışmayan ve sürtünmesizdir. Dolayısı ile meydana gelen kuvvetler sadece yüzeylerin normali doğrultusundadır.



- 2- Temas eden alanlar, cisimlerin kendilerine oranla küçüktür. Dolayısı ile deformasyonlar nedeni ile cisim üzerinde oluşan gerilmeler küçüktür.
- 3- Her bir cisim, temas alanında, bir elastik yarı alan olarak kabul edilecektir.
- 4- Deforme olmamış yüzeyler arasındaki mesafe aşağıdaki formülle ifade edilecektir.

$$h = Ax^2 + By^2 \quad (4.1)$$

x ve y, temas alanındaki iki cismin ortak teğetsel düzlemine cisim üzerindeki noktaların ortogonal koordinatlarıdır. Burada vurgulanması gereken bir nokta, 4. kabulün sadece parabolik temas yüzeyleri için geçerli olduğudur.

Hertzian analiz, yukarıda açıklandığı gibi, temel geometrik şekiller için temas gerilme ve şekil değiştirmelerini formüle etmektedir. Birkaç geometrik örneğe ait sonuçlar aşağıda verilmiştir (Williams and Dwyer-Joyce, 2000).

#### 4.1.1 İki kürenin teması

$R_1$  ve  $R_2$  yarıçaplarına sahip, 1 ve 2 isimli kürelerin birbirlerine doğru Şekil 4.1'de gösterildiği gibi, P kuvveti ile bastırıldığını varsayalım. Bu durumda temas alanını oluşturan dairenin yarıçapı:

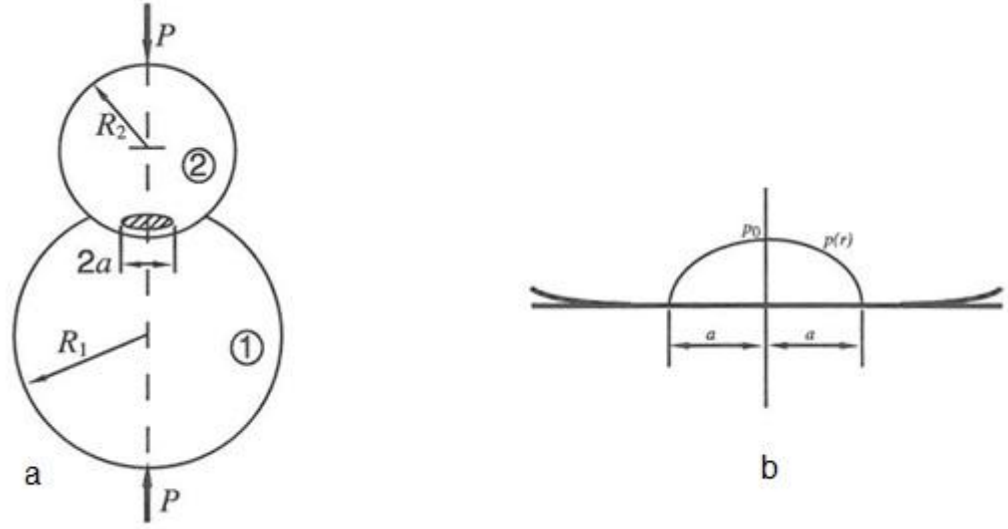
$$a = (3PR/4E)^{1/3} \quad (4.2)$$

İndirgenmiş temas elastisite modülü ( $E^*$ ) aşağıdaki formülden bulunur:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (4.3)$$

İndirgenmiş eğrilik yarıçapı ( $R$ ) şu formülle elde edilir:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (4.4)$$



Şekil 4.1. İki kürenin teması, a) iki küre elastik temas halinde, b) temas sonucu oluşan yarı eliptik basınç dağılımı.

Burada dışbükey (konveks) yüzeylerin yarıçapları pozitif, içbükey (konkav) yüzeylerin yarıçapları ise negatif işaret alırlar.

Bu tez kapsamında yapılan deneylerde “Ball-on-disc” geometrisi kullanılmıştır. Dolayısı ile  $R_1=3$  mm,  $R_2=\infty$  değerleri dikkate alındığında indirgenmiş eğrilik yarıçapı  $R=R_1$  olmaktadır.

Sonuçta meydana gelen yüzey basınçları yarı eliptik formda, aşağıda denklemi verilen bir eğri ile ifade edilebilir.

$$p(r) = p_0 (1 - r^2 / a^2)^{1/2} \quad \text{burada } r^2 = x^2 + y^2 \text{ dir.} \quad (4.5)$$

Bu dağılım, Şekil 4.1'de gösterilmiş olup Hertzian temas karakteristiğini ortaya koymaktadır. Maksimum basınç ( $p_0$ ) simetri ekseninde meydana gelir. Ortalama basınç ( $p_m$ ) için şu formül kullanılabilir:

$$p_0 = 3/2 p_m = 3P / 2\pi a^2 \quad (4.6)$$

Burada  $p_0$  değerine bazı kaynaklarda Hertz gerilmesi de denir. Bu yükleme koşulları altında, iki kürenin merkezleri birbirlerine aşağıdaki formülle ifade edilen küçük bir değerde yaklaşır.

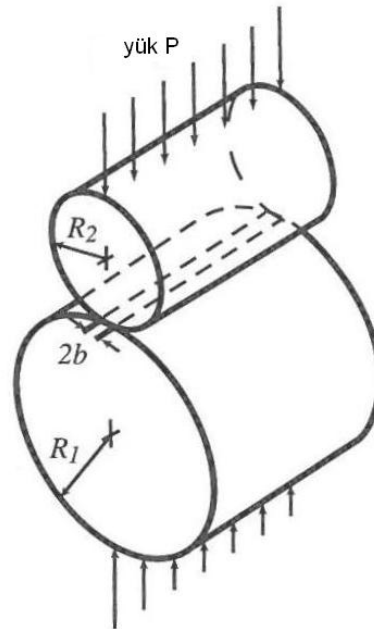
$$\Delta = a^2 / R = a\pi p_0 / 2E^* = (9P^2 / 16 RE^{*2})^{1/3} \quad (4.7)$$

Eğer temas eden yüzeylerden biri düzlem ise bu durumda o yüzeyin yarıçapı sonsuz olacak ve indirgenmiş ortak yarıçap diğer kürenin yarıçapına eşit bulunacaktır.

#### 4.1.2. Paralel eksenli iki silindirin teması

Şekil 4.2 de gösterildiği gibi, daire kesitli iki silindir eksenleri paralel kalmak kaydı ile ve birim boyuna gelen P değerindeki bir yük ile birbirlerine doğru bastırıldığında temas dikdörtgeninin yarı genişliği “b” aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$b = (2PR / \pi E^*)^{1/2} \quad (4.8)$$



Şekil 4.2. Elastik temas halinde paralel eksenli iki silindir. P, birim boy için yük değeridir.

R ve E\*, indirgenmiş ortak yarıçap ve indirgenmiş ortak temas elastisite modülüdür. Temas basıncı yine yarı elips formunda olup aşağıdaki fonksiyonla ifade edilir:

$$p(x) = p_0 (1 - r^2/b^2)^{1/2} \quad (4.9)$$

burada x değeri, silindir eksenlerini birleştiren düzleme dik doğrultudaki mesafedir.

Maksimum basınç değeri:

$$p_0 = (PE^* / \pi R)^{1/2} \quad (4.10)$$

Ortalama basınç P/2b değerine eşit olup aşağıdaki biçimde ifade edilir.

$$P_m = \pi p_0 / 4 \quad (4.11)$$

Bu yükleme koşulları altında, iki silindirin merkezleri birbirlerine aşağıdaki formülle ifade edilen küçük bir değerde yaklaşır.

$$\Delta = (1 - \nu_1^2) [\ln (4R_1/b) - 1/2] / E_1 + (1 - \nu_2^2) [\ln (4R_2/b) - 1/2] / E_2 \quad (4.12)$$

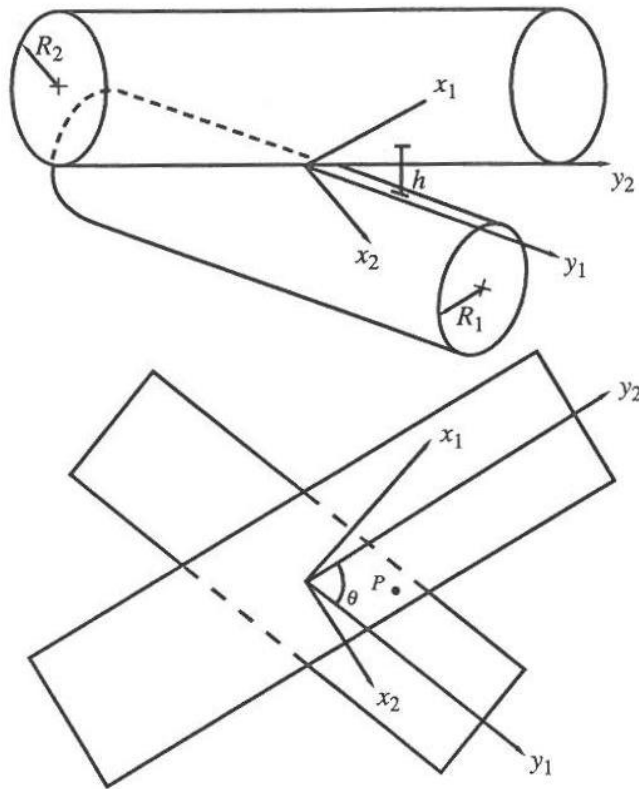
Kürelerin temasında olduğu gibi, burada da eğer temas eden yüzeylerden biri düzlem ise bu durumda o yüzeyin yarıçapı sonsuz olacak ve indirgenmiş ortak yarıçap diğer silindirin yarıçapına eşit bulunacaktır.

### 4.1.3. Eksenleri paralel olmayan iki silindirin teması

Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, üstteki silindir  $R_1$  yarıçapına ve alttaki silindir  $R_2$  yarıçapına sahip olsun. Bu silindirlerin eksenleri arasındaki açığı  $\Theta$  ile ve silindirlerin temas noktasını  $O$  ile isimlendirelim ve alttaki silindirin eksenine paralel,  $O$  dan geçen eksene  $y_1$ ,  $O$ 'dan geçen ve  $y_1$ 'e dik olan eksene  $x_1$  isimlerini verelim. Böylece üstteki silindire bağlı  $Ox_1y_1$  eksen takımı elde edilir. Benzer biçimde alttaki silindir için  $Ox_2y_2$  eksen takımı oluşturalım.

Orijine yakın bölgede, silindirlerin açılı kesitlerini parabol olduğunu göz önünde tutarak, birinci silindirdeki  $x_1, y_1$  noktası ile ikinci silindirdeki  $x_2, y_2$  noktası arasındaki mesafeyi ( $h$ ) aşağıdaki formülle (4.13) hesaplarız:

$$h = (x_1^2 / 2R_1) + (x_2^2 / 2R_2) \quad (4.13)$$



Şekil 4.3. Eksenleri paralel olmayan iki silindirin teması

Yukarıda açıklanan ek olarak ortak bir eksen takımı (Oxy) da tanımlanabilir. Bu eksen takımının  $Ox_1$  eksenini ile  $\alpha$  açısı yapan Ox eksenini olduğunu varsayalım. Hertzian analizin 4. kabulünü ( $h=Ax^2+By^2$ ) hatırlayarak bu kabulün doğruluğunu temin edecek A ve B değerlerini bulalım.

$$B-A = \frac{1}{2} [1/R_1^2 + 1/R_2^2 + (2/R_1R_2) \cos 2\theta]^{1/2} \quad (4.14)$$

ve;

$$B+A = \frac{1}{2} (1/R_1 + 1/R_2) \quad (4.15)$$

$\alpha$  açısı da şu formülle bulunur:

$$(R_1/R_2) \sin 2\alpha = \sin 2(\Theta - \alpha) \quad (4.16)$$

Bu durumda 4. kabul formülü ( $h=Ax^2+By^2$ ) şu şekilde yazılır:

$$h = (x^2 / 2 R') + (y^2 / 2 R'') \quad (4.17)$$

burada;  $R' = 1/2A$  ve  $R'' = 1/2B$  olarak tanımlanır.

$R'$  ve  $R''$  izafi eğriliğin asal yarıçapları olarak adlandırılır.

(4.17) formülünden görüleceği gibi deforme olmamış yüzeyler arası mesafelerin konturu bir elipsdir. Bu elipsin eksenlerinin birbirine oranı  $(R'/R'')^{1/2}$  değerine eşittir.

Normal doğrultudaki P yükü silindirlere uygulandığında temas alanı bir elipse dönüşür. Bu elipsin yarı eksen uzunluklarını a ve b ile isimlendirelim. b/a oranı yükten bağımsız olup sadece  $R'/R''$  oranına bağlıdır. Büyük gerilmelere yol açmayan temaslarda yani A/B oranının 5 in altında kaldığı durumlarda b/a oranı aşağıdaki biçimde tanımlanır:

$$b/a = (A/B)^{2/3} \quad (4.18)$$

Eşdeğer yarıçap ( $R_e$ ) şu formülle bulunur:

$$R_e = (R'' \times R')^{1/2} = \frac{1}{2} (AB)^{-1/2} \quad (4.19)$$

Bu eşitlik kullanılarak temas alanı belirlenebilir ya da dairesel temas eşitliğinden yararlanarak ve bu eşitlikte R yerine  $R_e$  konarak Hertz gerilmeleri bulunabilir.

Cisimlerin birbirine yaklaşma mesafesi (4.12) formülünde R yerine  $(AB)^{-1/2}$  konarak hesaplanır.

Eğer iki silindirin eksenleri birbirine paralel ise  $\Theta = 0$  , ve denklemler (A,Bve C) yardımı ile;

$$1/R' = 1/R_1 + 1/R_2 \quad (4.20)$$

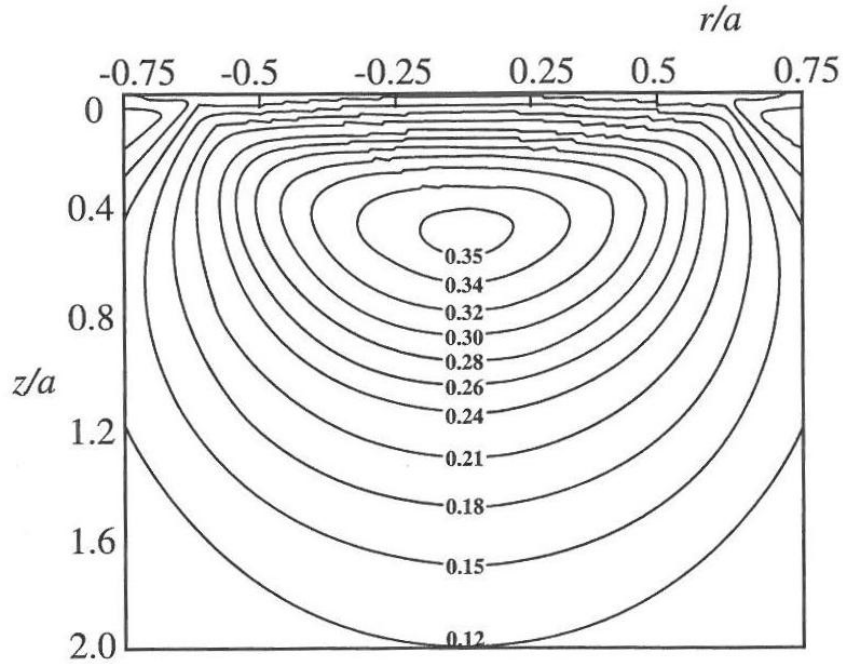
Diğer yandan, iki silindirin eksenleri birbirine dik ise  $\Theta = 90$  ,  $R' = R_1$  ve  $R'' = R_2$  ve bunların sonucunda:

$$h = x^2 / 2R_1 + y^2 / 2R_2 \quad (4.21)$$

Dolayısı ile eksenleri birbirine dik durumdaki eşit çapa sahip iki silindirin temasında, temas alanının daire olduğu görülmektedir.

## 4.2. Yüzey ve yüzey altı gerilmeleri

Geometrileri çakışmayan cisimlerin teması sırasında temas bölgesinde hem yüzeyde hem de yüzey altında gerilmeler oluşmaktadır. Bunun yanında, ağır yüke maruz makine parçalarında plastik şekil değiştirme başlangıcı yüzeyde değil, yüzeyin altında meydana gelmektedir. Şekil 4.4'te yüzeyden itibaren gerilmelerin dağılımı gösterilmiştir. Şekilden anlaşılacağı gibi maksimum gerilmeler yüzeyin hemen altında ( $z/a=0,4$ ) oluşmaktadır.



Şekil 4.4.  $\nu=0,3$  olan bir malzemede, nominal temas dairesinin altında kalan bölgede, Hertz gerilmesi ( $p_0$ ) ile normalize edilmiş ( $\tau_{\max} / p_0$ ) maksimum kayma gerilmesi konturları.

Malzeme içinde maksimum kayma gerilmesinin yeri yukarıda verilen nokta olduğu için plastik şekil değiştirme de bu noktadan başlayacak demektir. Çizelge 4.1'de gösterildiği gibi, ( $\tau_{\max} / p_0$ ) değeri ve malzeme içindeki yeri, Poisson oranının değeri ile ilgilidir.

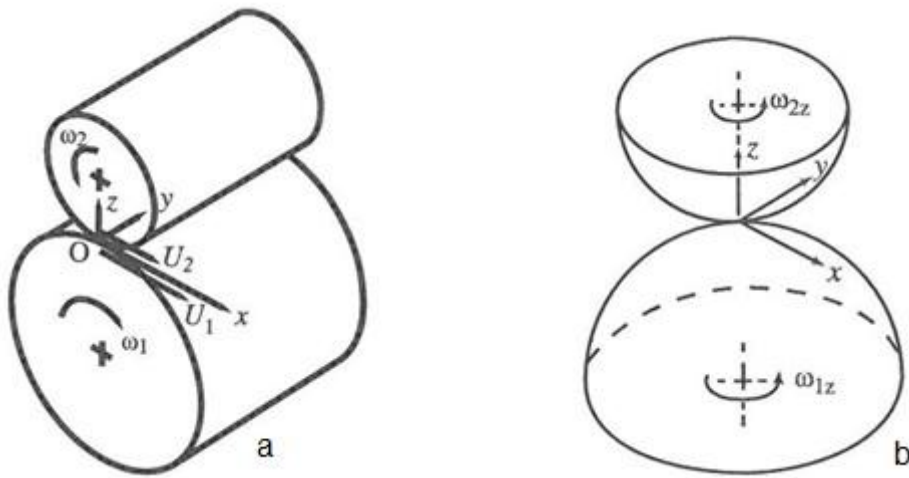
Çizelge 4.1. Normalize edilmiş ( $\tau_{\max} / p_0$ ) maksimum kayma gerilmesi ve değişik Poisson oranları için bu gerilmenin yeri.

Poisson oranı	Malzeme	$\tau_{\max} / p_0$	$z/a$
0,2	Cam	0,335	0,45
0,3	Çelik	0,31	0,48
0,33	Alüminyum	0,303	0,50
0,5	Lastik	0,267	0,55



### 4.3. Yüzeylerin birbirlerine izafeten hareket etmeleri

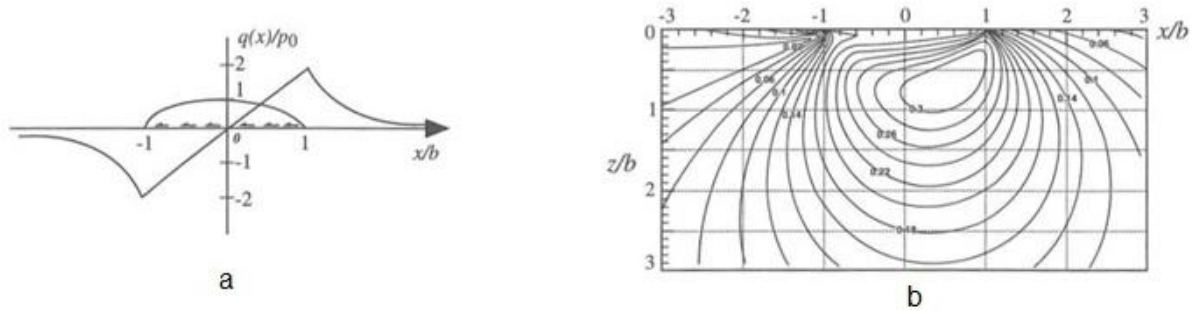
Temas halindeki iki cisim, Şekil 4.5'te gösterildiği gibi, sabit değillerse ve teması kesintiye uğratmadan hareket ediyorlar ise, bu durumda yuvarlanma (rolling), kayma (sliding) ve dönme (spinning) hareketlerinden birini ya da aynı anda birden fazlasını yapıyorlar demektir.



Şekil 4.5. Yüzeylerin birbirlerine izafeten hareketi. a) eksenleri paralel iki silindirin teması durumunda, temas noktasında yuvarlanma ve/veya kayma hareketi meydana gelebilir. b) üç boyutlu durumda diğerlerine ilaveten bir gövde diğerine göre dönme hareketi de yapılabilir.

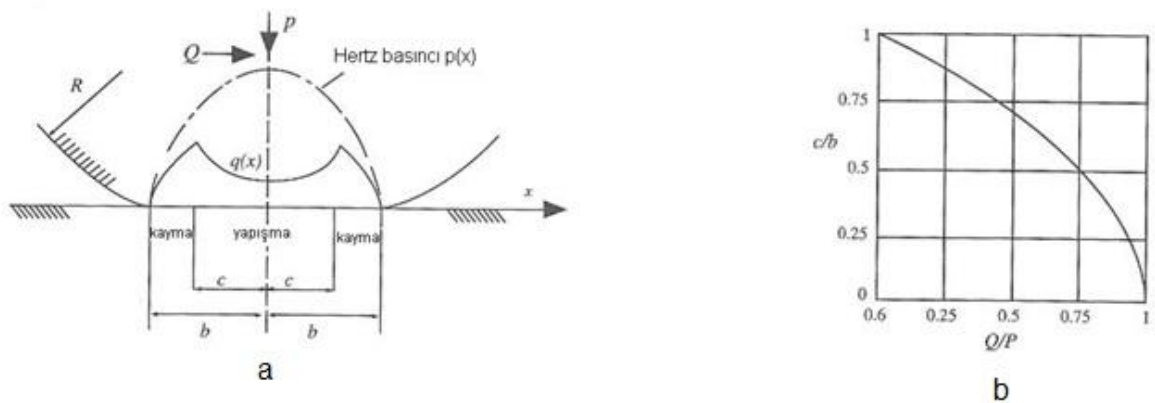
Sürtünmesiz şartlarda cisimlerin birbirlerine izafeten yaptıkları hareketin yukarıda açıklanmış olan statik temas koşullarını değiştirecek etkisi yoktur. Bununla birlikte gerçek şartlarda, harekete zıt yönde daima bir sürtünme kuvvetinin var olduğunu hesaba katmamız gerekir. Bu durumda yüzeyleri birbirine bastıran normal kuvvet ile temas alanına teğet doğrultuda etkiyen sürtünme kuvvetinin birlikte var olduğu düşünülmelidir. Bu durum, gerilme dağılımının simetrisini bozarak yüzey altı gerilme dağılımını asimetrik forma sokar.

Şekil 4.6'da gösterildiği gibi, maksimum gerilmeler temasın çıkış tarafına yakın bölgede meydana gelir. Yüzeylerin birbirini üzerinden kayması sonucunda yukarıda açıklandığı gibi gerilme dağılımının simetrisi bozulur ve gerilme seviyeleri yükselir, bunun sonucunda maksimum gerilme değerine sahip kısım yüzeye yaklaşır.



Şekil 4.6. Yüzey altı gerilmeler. a) Nominal çizgisel temasta sürtünme izi nedeni ile meydana gelen yüzey gerilmeleri, b)  $m=0,2$  değeri için, kayıcı elastik çizgisel temas alanının altındaki bölgede, birincil kayma gerilmelerinin konturu

Eksenleri paralel silindirin teması durumunda Şekil 4.7'de gösterildiği gibi yüzey izi meydana gelir.



Şekil 4.7. Yüzey izi. a) Eksenleri paralel silindirler arası temas:  $Q$  iz kuvvetinin etkisi altında yüzey izi, b) Nominal çizgisel temas durumundaki iki silindirin temas alanının merkezindeki yapışma bölgesinin teğetsel kuvvet etkisi ile küçülmesi.

#### **4.4. Kayma başlangıcı, mikrokayma**

Cisimler birbiri üzerinde yanal yüklerin etkisinde olmadan statik durumda iken, küçük bir yük etkisinde teğetsel doğrultuda yüklendiklerini düşünelim. Bu yükün cisimlerin arasındaki sürtünmeyi yenmeye yetmeyecek seviyede olduğunu varsayarsak izafi hareketin başlamayacağını anlarız. Bu durumda kuvvetin şiddetine bağlı olarak temas bölgesinin dış konturunda iki cismin birbirinden ayrılması şeklinde mikro kaymalar meydana gelir. Teğetsel kuvvetin artması durumunda mikro kayma bölgesi dıştan içe doğru genişler ve sonunda tüm temas alanını kaplar. Bu noktada izafi hareket başlayarak cisimler birbiri üzerinden kayarlar.

## BÖLÜM 5

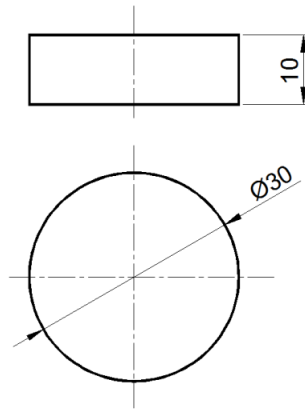
### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez kapsamında,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve CNT nano partiküllerin SAE 10W40 motor yağı içinde oluşturacakları yağlama etkisi hem tek başlarına hem de karma olarak kullanımları ile ölçülmüştür. Çalışmada referans deney olarak katkısız yağ ortamında AISI 4140 çeliğin sınır yağlama şartlarında aşınması ele alınmış, bunu takiben değişik katkılı yağlar ile hazırlanan yağlayıcı ortamda ölçülen sürtünme katsayısı ve aşınma oranları, referans deney ile karşılaştırılmıştır.

#### 5.1. Deneyde kullanılan malzemeler

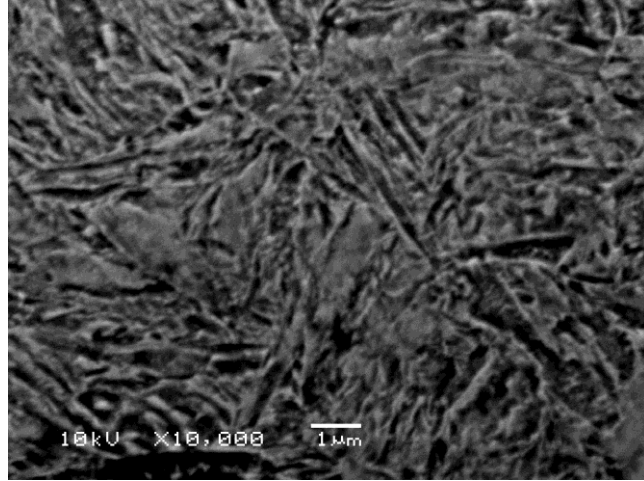
Deneylerde altlık malzeme olarak AISI 4140 çeliği kullanılmıştır. Özellikle otomotiv sanayiinde yaygın kullanımı olduğu için bu malzeme seçilmiştir. (Subaşı, M., Karataş, Ç., 2010).

Aşınma profilinin daha kolay analiz edilebilmesi için malzeme  $860^\circ\text{C}$  de bir saat ostenitlendikten sonra yağ ortamında su verilmiş, ardından  $280^\circ\text{C}$  de 20 dakika menevişleme işlemi yapılmıştır. Bu işlem sonrası kullanılan malzeme sertliği 52,1 HRC değerine ulaşmıştır. Altlık malzemeler standart metallografik süreçte yaş kesme metoduyla, Şekil 5.1'de gösterildiği gibi,  $\Phi 30$  mm çapta 10 mm lik dilimler halinde kesilmiştir



Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan AISI 4140 malzemenin geometrisi

Altlık malzemeye ait mikroyapı görüntüsü Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Elde edilen yapı tamamen martenzittir.



Şekil 5.2. Deneylede kullanılan AISI 4140 malzemenin mikroyapısı

Kesilen numuneler otomatik numune zımparalama ve parlatma cihazında hazırlanmıştır. Zımparalama işlemi üç kademedede 220, 400 ve 800 grid manyetik zımpara ile soğutucu olarak su kullanılarak yapılmıştır. Her bir kademe zımparalama 50 N yük ve 10 dk sürede otomatik tutucu ile yapılmıştır.

Parlatma işlemi de benzer şekilde otomatik cihazda iki kademedede yapılmıştır. Birinci kademedede 6 µm elmas solüsyonu ile parlatılan numuneler, %2 lik Nital ile ara dağlama işlemine tabi tutulmuş ve ardından 3 µm elmas solüsyonu ile tekrar parlatılmıştır. Parlatılmış numunelerin yüzey pürüzlülükleri tüm numunelerde Ra=0,02 µm seviyesine getirilmiştir.

Aşınma testleri, ball-on-disk geometrisinde DIN 50324 standardında yapılmıştır. Deneylede karşı cisim olarak  $\Phi 3$  mm, WC-%6 bilye kullanılmıştır. Küresellikleri ve bileşimleri sertifikalı olan bilyeler, Redhill Precision firmasından temin edilmiştir. Kullanılan bilyelerin sertliği 91,6 HRC ve elastisite modülü 690 GPa dır. Deneylede bu düzeyde sert karşı cisim kullanılarak aşınmanın sadece altlık malzemedede oluşması hedeflenmiştir.

## 5.2. SAE 10W40 yağ özellikleri:

SAE kısaltması, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki "Otomotiv Mühendisleri Birliği" isimli organizasyonun (Society of Automotive Engineers) baş harfleridir. Bu örgütün yayınladığı standart ile motor yağları sınıflandırılmıştır.

SAE harflerinden sonra gelen rakam (çalışmamızda kullandığımız yağdaki 10 rakamı) baz yağın viskozitesini yani polimer eklenmeden önceki temel viskozitesini gösterir. W harfi kış kelimesini (winter) kelimesini karakterize etmektedir. Son sayı (40) ise, yağın yüksek sıcaklıktaki viskozitesini gösterir. Kullanılan SA 10W40 motor yağına ait bilgiler Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. SAE 10W 40 yağın özellikleri

Kinematik viskozite 40°C de (ASTM D445)	90,8 mm <sup>2</sup> /s
Kinematik viskozite 100°C de (ASTM D445)	14,1 mm <sup>2</sup> /s
Viskozite indeksi	ISO 2909 871
Özgül ağırlık	15 °C de 0,871 gr/cm <sup>3</sup>
Parlama noktası	210°C, COC ISO 25092
Akma noktası	-33°C ISO 3016

Viskozite				
Değerleri	0°C	10°C	40°C	100°C
10W40 yağ	874cst	440 cst	91 cst	14 cst

### 5.3. Nano partiküller.

Kullanılan katkılardan  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , toz silisyumun  $1300^\circ\text{C} - 1400^\circ\text{C}$  ye ısıtılıp azot atmosferi içinde bırakılması ile elde edilen bir malzemedir. Kimyasal olarak çoğunlukla inert bir madde olan  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , sıcak  $\text{H}_2\text{SO}_4$  veya HF vasıtası ile ayrışabilmektedir.

$\text{Si}_3\text{N}_4$ , geniş sıcaklık aralığında yüksek mukavemete, düşük termal genleşme katsayısına ( $3,3 \times 10^{-6} \text{ } 1^\circ\text{C}$ ), yüksek elastisite modülüne (310 Gpa) sahip bir seramik malzemedir. Seramik malzemeler için yüksek sayılabilecek seviyede kırılma tokluğuna ( $5,7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) sahiptir. Özgül ağırlığı  $3,2 \text{ gr/cm}^3$  tür. Çoğunlukla yüksek sıcaklık uygulamalarında (gaz türbini parçaları gibi), çok yüksek aşınma direnci istenen yerlerde (kesici takımlar gibi) kullanılır. Uzay mekiklerinin motorlarındaki yatakların bazıları  $\text{Si}_3\text{N}_4$  den imal edilmektedir.

Deneylerde kullanılan  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , Alfa – Aesar firmasından temin edilmiştir. %98,5 saflıktadır.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  nano partiküller amorf yapıdadır ve 40-100 nm partikül boyutundadır.

$\text{Si}_3\text{N}_4$  bilinen en sert materyallerden biridir. Günümüze kadar yağ katkısı olarak kullanılması üzerine yapılmış az sayıda çalışma mevcuttur. Literatürde elmas partiküllerin yağ katkısı olarak kullanılması üzerine yapılmış çalışmalara rastlanmaktadır. (Chou, C.C. and Lee, S.H., 2008), (Chou, C.C. and Lee, S.H. 2010), (Chua, H.Y., et al., 2010).

CNT kısaltılmış adı ile ifade edilen “Karbon Nano Tüp” malzeme, karbon atomlarının altıgen oluşturacak biçimde birbirleri ile bağlanarak oluşturdukları kafesin silindirik biçiminde şekillenmesidir. Bu yapı sayesinde, CNT yüksek mukavemet değerlerine sahip olmaktadır. Çok yüksek (1,0-1,4 TPa) elastisite modülüne ve çekme mukavemetine (kopma gerilmesi 30 GPa) sahiptir. Özgül ağırlığı  $1,31 \text{ gr/cm}^3$  olup  $3000^\circ\text{C}$  ye kadar stabildir. Deneylerde kullanılan CNT, Alfa – Aesar %99,2 saflıktadır. CNT nanopartiküller ortalama 3 – 20 nm boyutta olup çok duvarlı "multiwall" özelliktedir.

$\text{Si}_3\text{N}_4$  ve CNT partiküllerin yalnız başına ya da birlikte kullanılmasında da katkı oranının önemli olduğu deney sonuçlarından görülmektedir. Belli miktarın üzerine çıkıldığında  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve CNT parçacıklar yağ içinde aglomere olmakta ve bu durum yağlama yeteneğini azaltmaktadır.

#### **5.4.Malzemelerin hazırlanması ve deney programı**

AISI 4140, endüstriyel uygulamalarda yaygın biçimde kullanılan düşük karbon alaşımlı bir çelik türüdür. Kimyasal bileşimi karbon miktarı bakımından sertleştirilmeye elverişli olan ve ıslah işlemi sonunda belirli yükler altında yüksek tokluk özelliği gösteren alaşımlı yapı çeliğidir. İndüksiyon ile sertleştirilebilir.

Otomotiv ve uçak sanayiinde krank mili, aks mili ve kovani, yivli mil ve benzeri sünekliliği yüksek parçaların imalatında, ayrıca dişli çark yapımında kullanılır. Kullanılan malzemenin özellikleri Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

Temas eden makina elemanları çoğunlukla yağ içinde, yağlama koşullarında kullanılmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda, makina üretiminde sıkça kullanılan bir çelik malzeme, çalıştığı ortam koşullarında yani yağ banyosu içinde sürtünme açısından incelenmiştir.



Çizelge 5.2. AISI 4140 kimyasal kompozisyonu.

%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Mo
0,38-0,43	0,75-1,00	0,035 (max)	0,04 (max)	0,15-0,30	0,80-1,10	0,15-0,25

Çizelge 5.3. AISI 4140 mekanik ve ısıl özellikleri (25°C de).

Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	7,7 – 8,03
Poisson oranı	0,27 – 0,30
Elastisite modülü (GPa)	190 – 210
Max. çekme mukavemeti (MPa)	655
Akma gerilmesi (MPa)	417,1
Uzama (%)	25,7
Kesit daralması (%)	56,9
Sertlik (HB)	197
Darbe dayanımı (J)	54,5
Isıl genişleme katsayısı (10 <sup>-6</sup> /°C)	12,3
Isıl iletkenlik (W/m-K)	42,7
Özgül ısı (J/kg-K)	473

### 5.5. Deneylerde kullanılan cihazlar.

Deneylerde kullanılan numunelerin ısıtılması işlemi Protherm PFL-1500 model fırında yapılmıştır. Metallografik numune hazırlama sürecinde, kesme Struers Discotom 50, zımparalama Struers Tefraforce 4500 cihazında yapılmıştır.

Hazırlanan tüm numunelerin hem aşınma deneyi öncesinde ve hem de aşınma deneyi sonrasında yüzey pürüzlülükleri Mitutoyo SJ-400 cihazında ölçülmüştür.

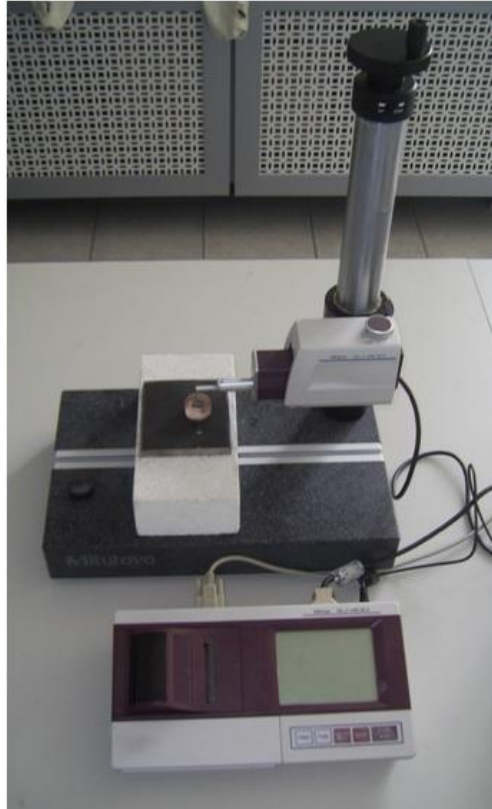
Aşınma testleri CSM Tribometer cihazı ile ball-on-disc geometrisinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan cihazlar, Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Kesme cihazı (Struers Discotom 50)



Şekil 5.4. Zımparalama, parlatma cihazı (StruersTegraforce 4500)



Şekil 5.5. Profil ölçüm cihazı (Mitutoyo SJ-400)



Şekil 5.6. Aşınma cihazı. CSM Tribometer.

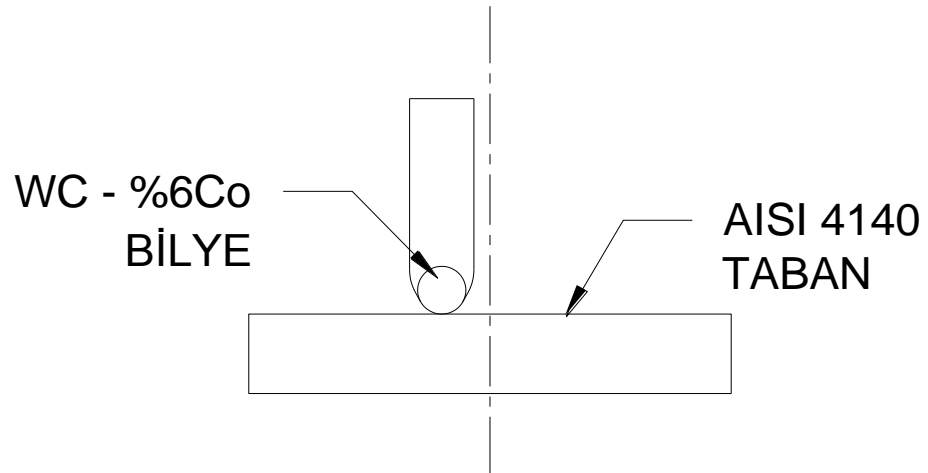
### 5.6. Deney planı ve deneyin yapılışı

SAE 10W40 yağ içine nano sert partiküller katarak aşınma özelliklerini iyileştirmek amacı ile deneyler yapılmıştır. Yağ içine katılacak katkı oranları, literatürde benzer şekilde nano partikül katkısı ile yapılan çalışmalar ve bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu amaçla amorf  $\text{Si}_3\text{N}_4$  nano partiküller yağ katkısı olarak %0,1 - %0,2 - %0,5 ve %0,8 ağırlık oranlarında kullanılmıştır. Ayrıca CNT, %0,1 ve %0,2 ağırlık oranlarında kullanılmış olup,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ile CNT partikülleri ortak etkisini araştırmak için toplam %0,1 ve %0,2 ağırlık oranlarının bir kısmı  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve bir kısmı CNT nano partiküller olacak şekilde numuneler hazırlanmıştır. Tüm deney planı çizelge 5.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Deney planı.

Numune no	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	CNT
	Katkı oranı	
0	0	0
1	0,1	0
2	0,2	0
3	0,5	0
4	0,8	0
5	0	0,1
6	0	0,2
7	0,05	0,05
8	0,1	0,1
9	0,13	0,067
10	0,067	0,13

Aşınma deneyleri 50 mL tank içinde sabitlenmiş ve tamamen yağ içinde kalan numunelere ball – on – disc geometrisinde uygulanmıştır. Aşınma geometrisi Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



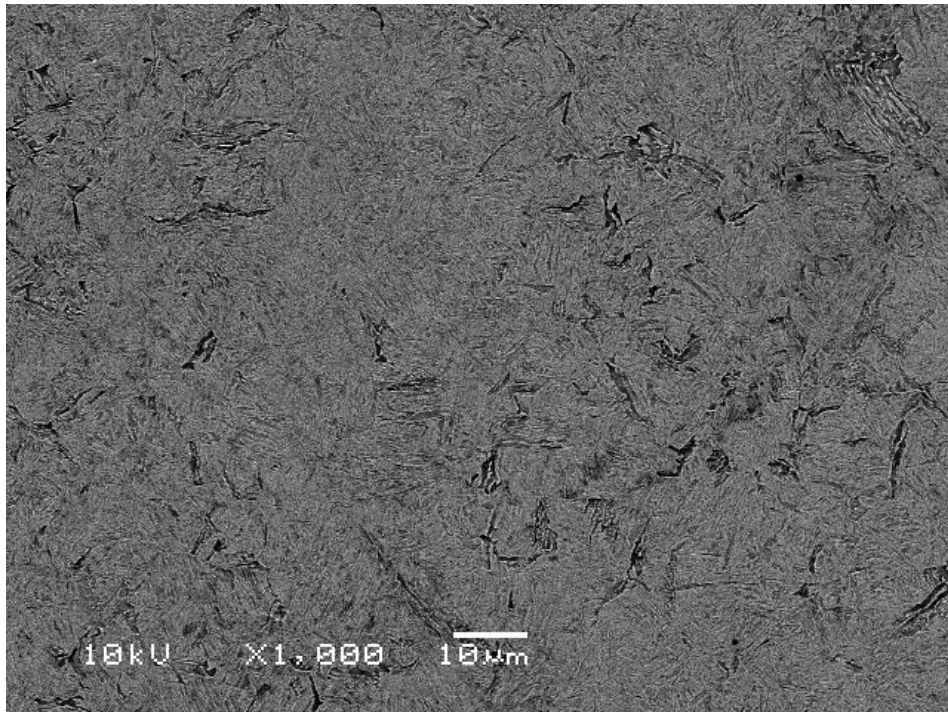
Şekil 5.7. Ball - on - disc aşınma geometrisi.

Deneylerimizde, yüzeylerin birbiri üzerinden kayması için seçilen hız değerleri, sınır tabaka yağlama koşullarını sağlayacak aralıkta tutulmuştur. Bu yolla sivri çıkıntuların birbirleri ile temas etmesi hedeflenmiştir.

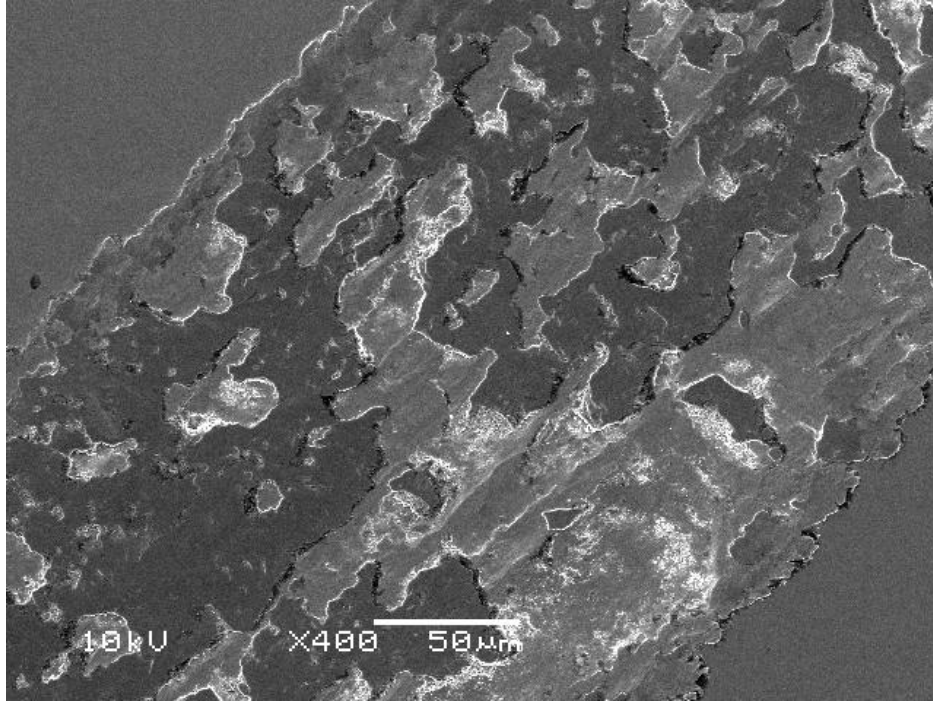
Bu koşullarda, eğer yağ içinde yüzey pürüzlerini doldurmaya yetecek düzeyde partikül var ise aşınma azalmakta, partikül miktarının bundan çok olması durumunda ise tekrar aşınma artmaktadır.

### 5.7. Deney sonuçları

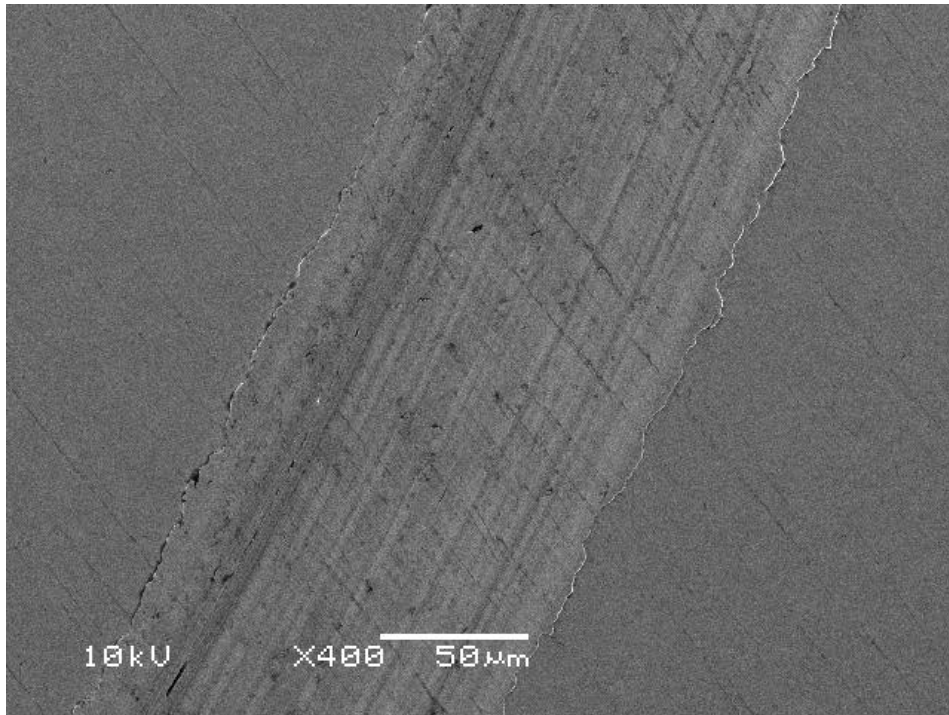
Deney sonuçları 3 temel başlık altında toplanmıştır. Öncelikle aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri optik mikroskoplar ve SEM ile alınmış olup aşağıdaki şekillerde (Şekil 5.8 ..... Şekil 5.20) gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Su verilmiş AISI 4140 çeliğinin genel mikro yapı görüntüsü, 1000x.

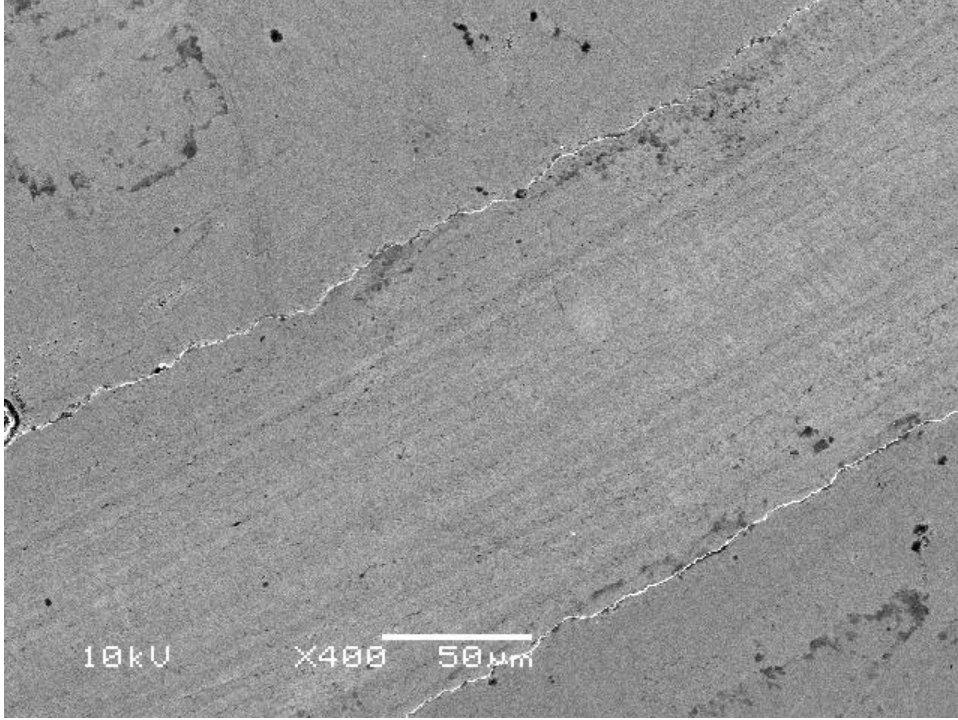


Şekil 5.9. Kuru koşullarda yapılan aşınma deneyine ait aşınmış bölge mikroyapı görüntü, 400x.

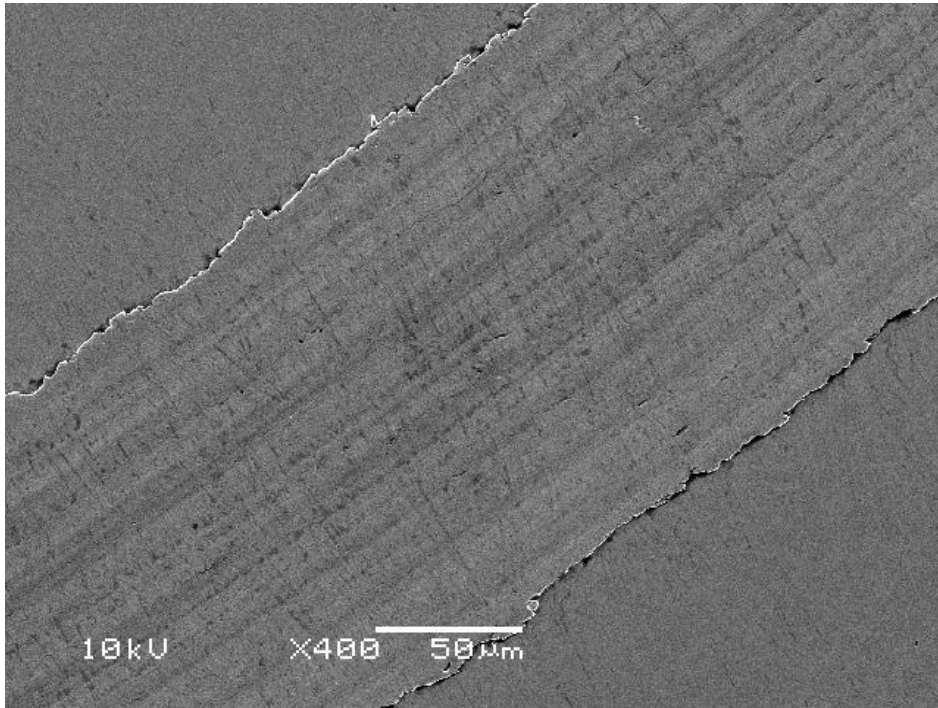


Şekil 5.10. Ağırlıkça %0,1 CNT içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x.



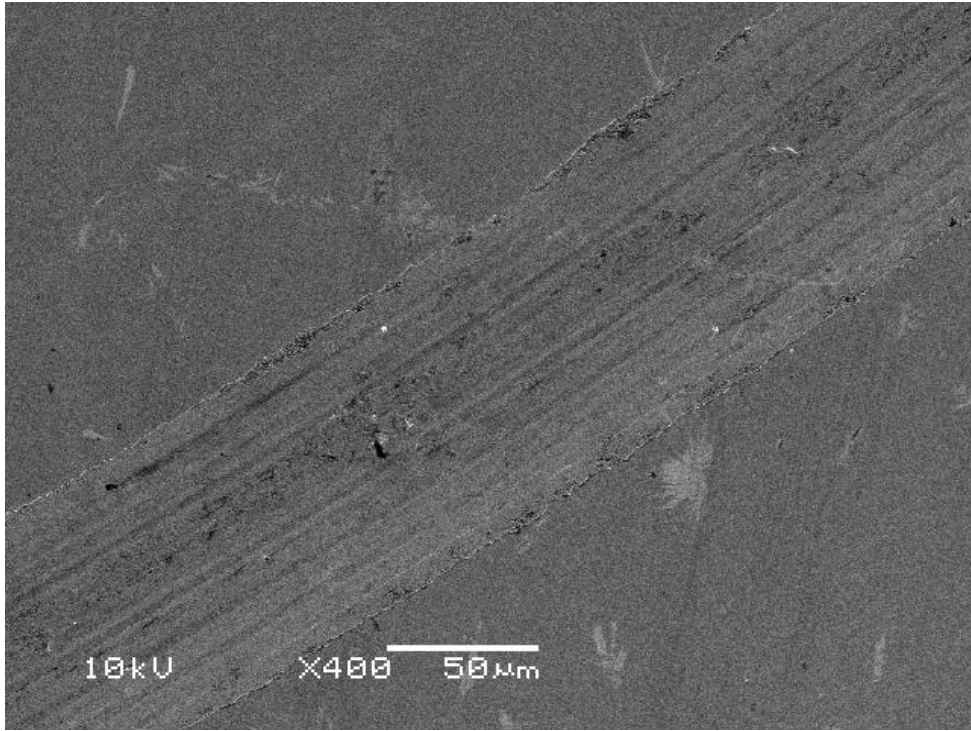


Şekil 5.11. Ağırlıkça %0,2  $\text{Si}_3\text{N}_4$  içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x.

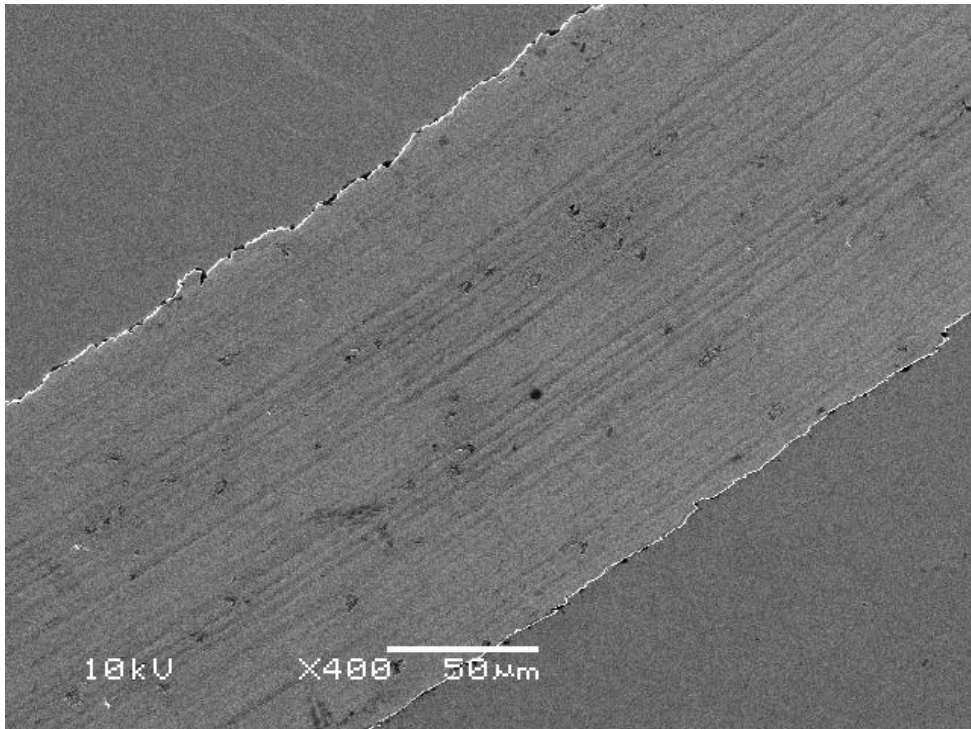


Şekil 5.12. Ağırlıkça %0,2 CNT içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x.

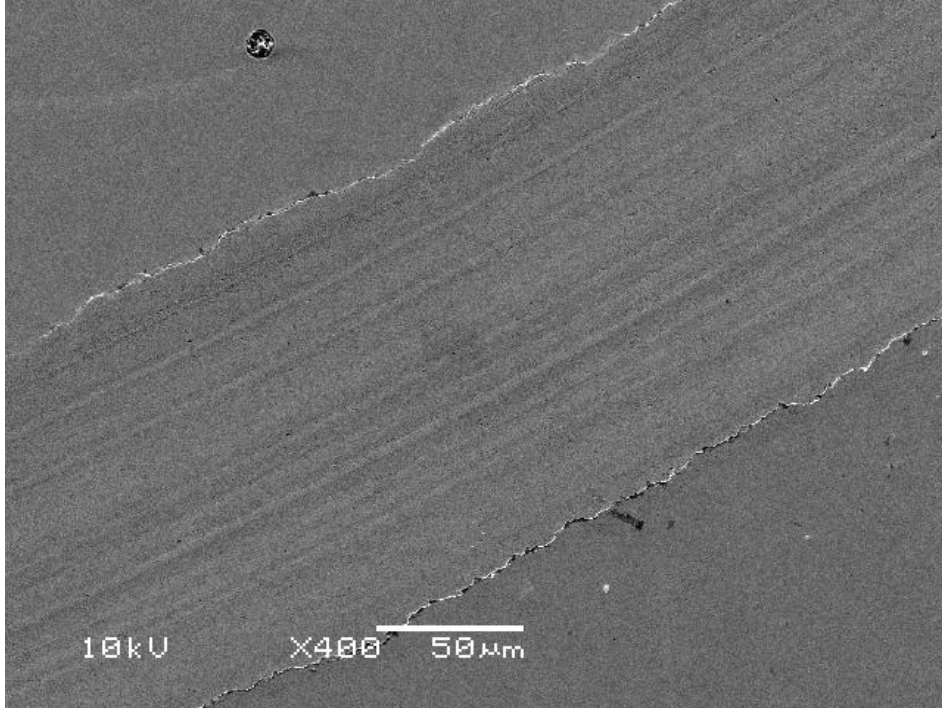




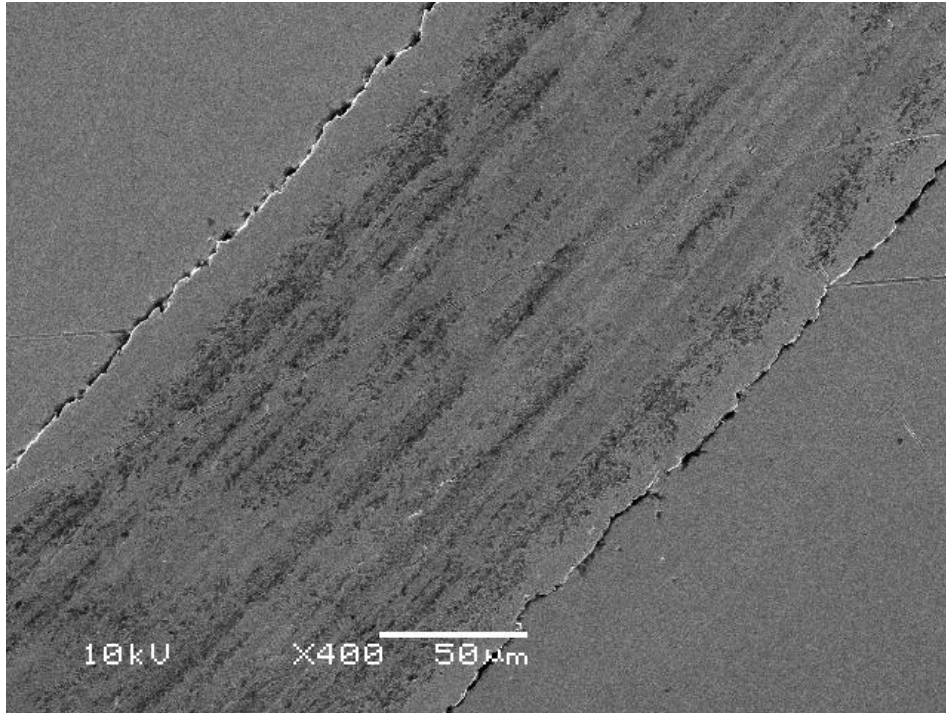
Şekil 5.13. Ağırlıkça %0,05 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve %0,05 CNT içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x.



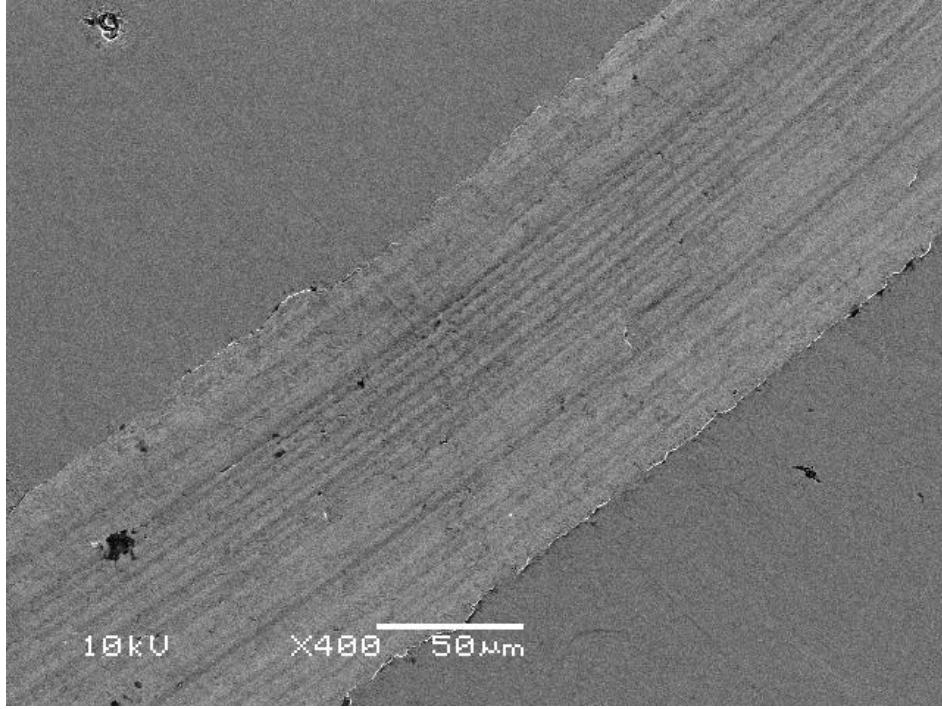
Şekil 5.14. Ağırlıkça %0,13 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve %0,067 CNT içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x.



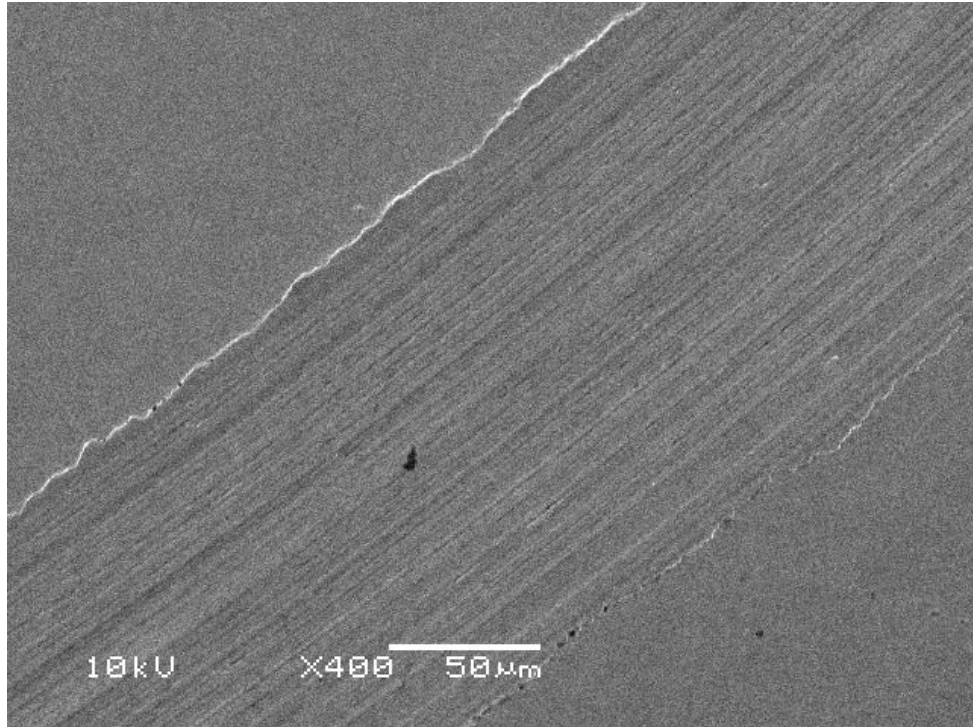
Şekil 5.15. Ağırlıkça %0,1  $\text{Si}_3\text{N}_4$  içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x.



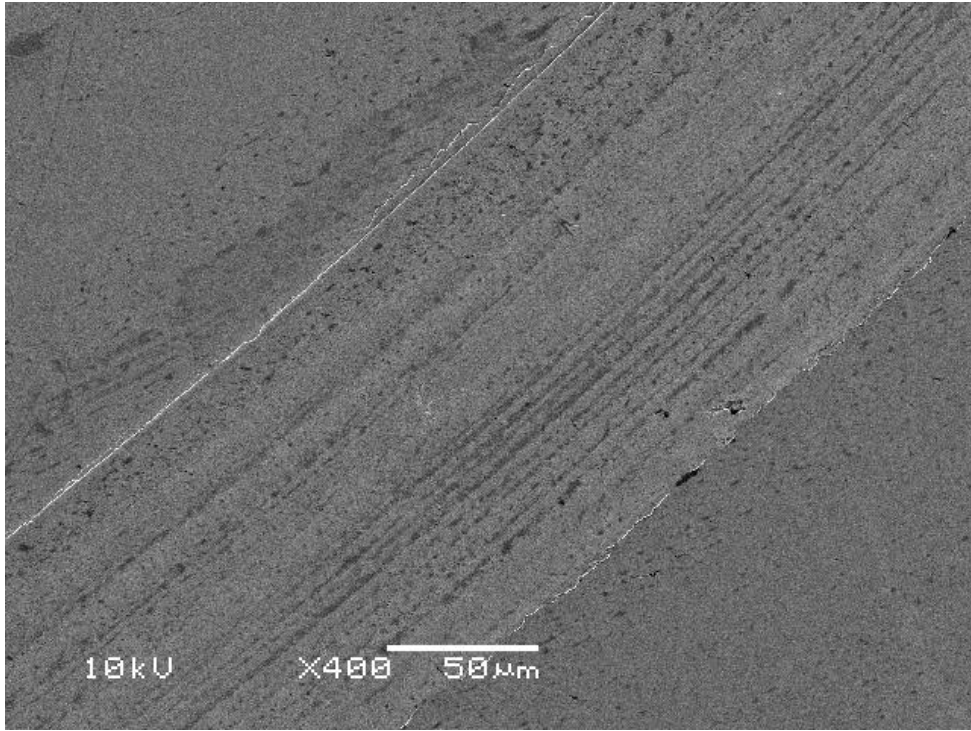
Şekil 5.16. Katkısız SAE10W40 ile yapılan deneye ait aşınma görüntüsü, 400x.



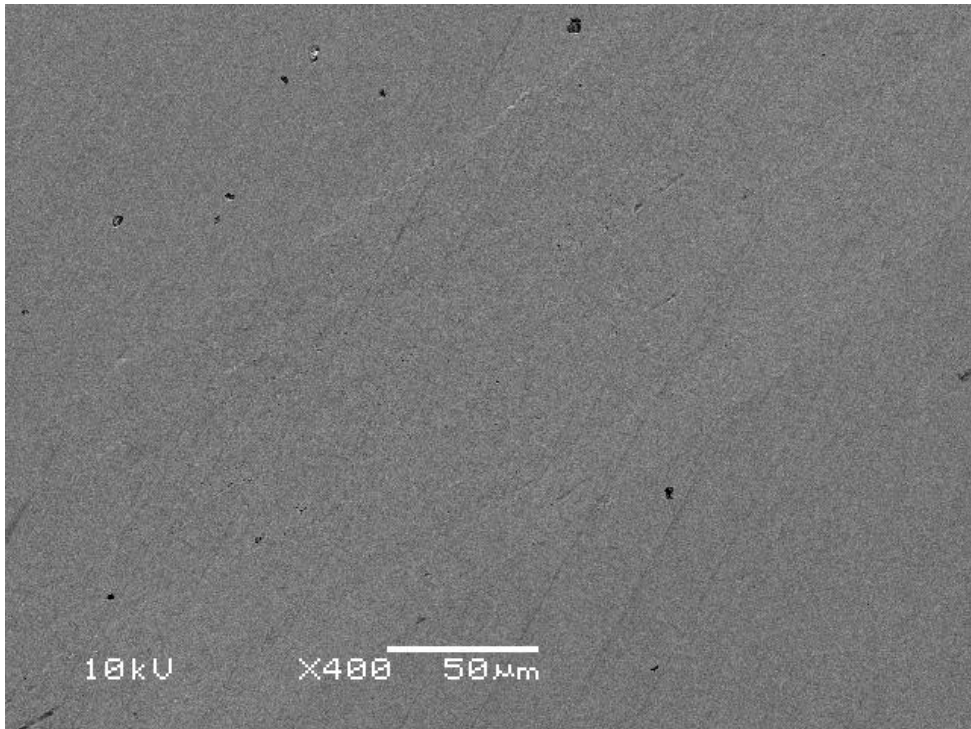
Şekil 5.17. Ağırlıkça %0,067 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve %0,13 CNT içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x.



Şekil 5.18. Ağırlıkça %0,5 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x.



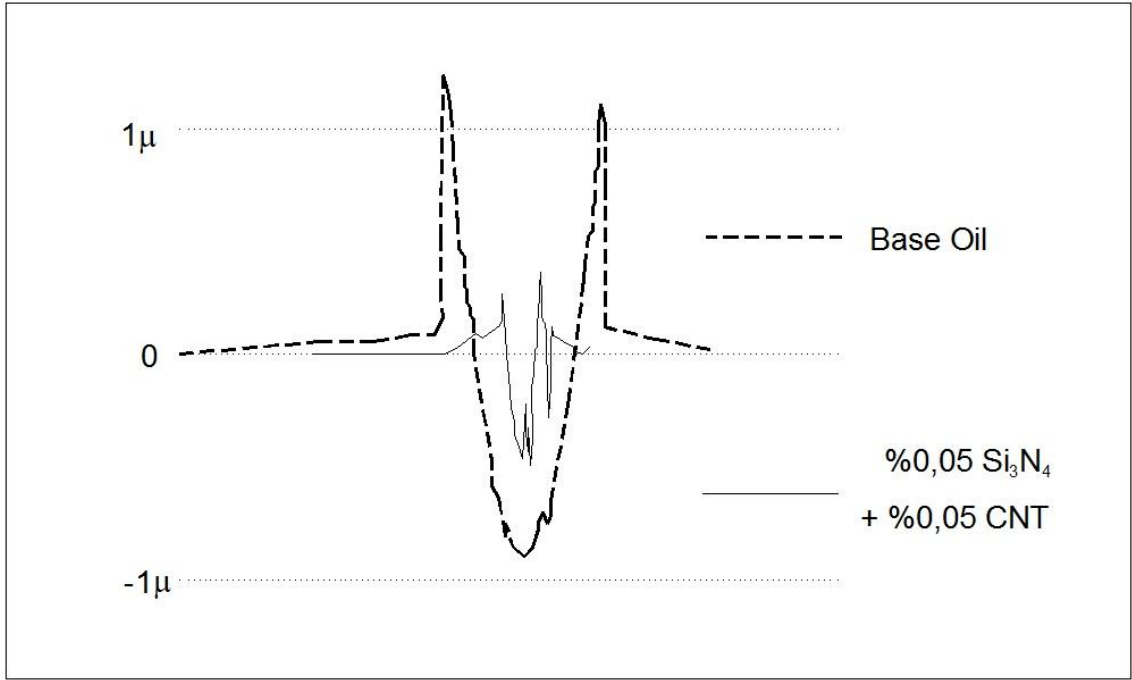
Şekil 5.19. Ağırlıkça %0,8  $\text{Si}_3\text{N}_4$  içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x.



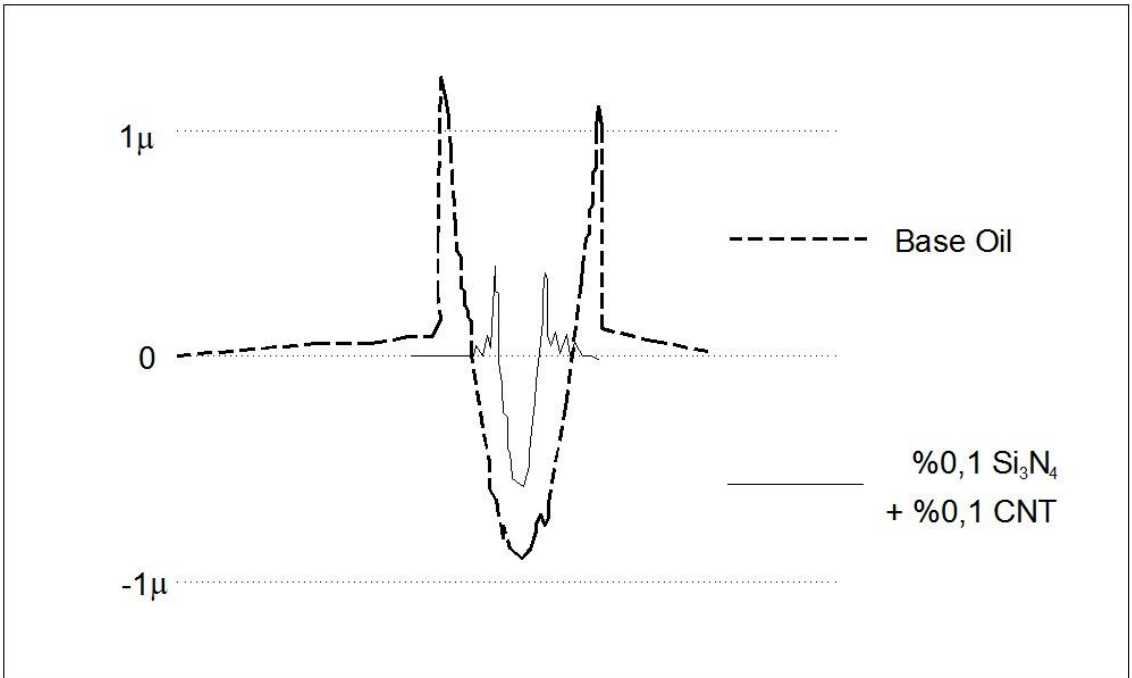
Şekil 5.20. Ağırlıkça %0,1  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve %0,1 CNT içeren SAE 10W40 yağı ile yapılmış numuneye ait aşınma bölgesi, 400x.

Çizelge 5.5. Aşınma deneylerine ait yüzey iz genişlikleri

50 $\mu$ skalada iz genişliği ( $\mu$ )						
Resim no	1. ölçüm	2. ölçüm	3. ölçüm	4. ölçüm	5. ölçüm	Ortalama
1-1	147	149	146	150	145	147,4
2-1	131	128	132	132	127	130,0
3-1	124	122	122	120	121	121,8
4-1	92	89	90	90	89	90,0
5-1	137	139	138	143	140	139,4
6-1	130	126	129	129	130	128,8
7-1	137	135	138	138	137	137,0
8-1	156	156	157	155	155	155,8
9-1	116	120	120	116	119	118,2
10-1	159	158	159	157	157	158,0
base	163	166	164	164	166	164,6
kuru	238	241	242	240	243	240,8

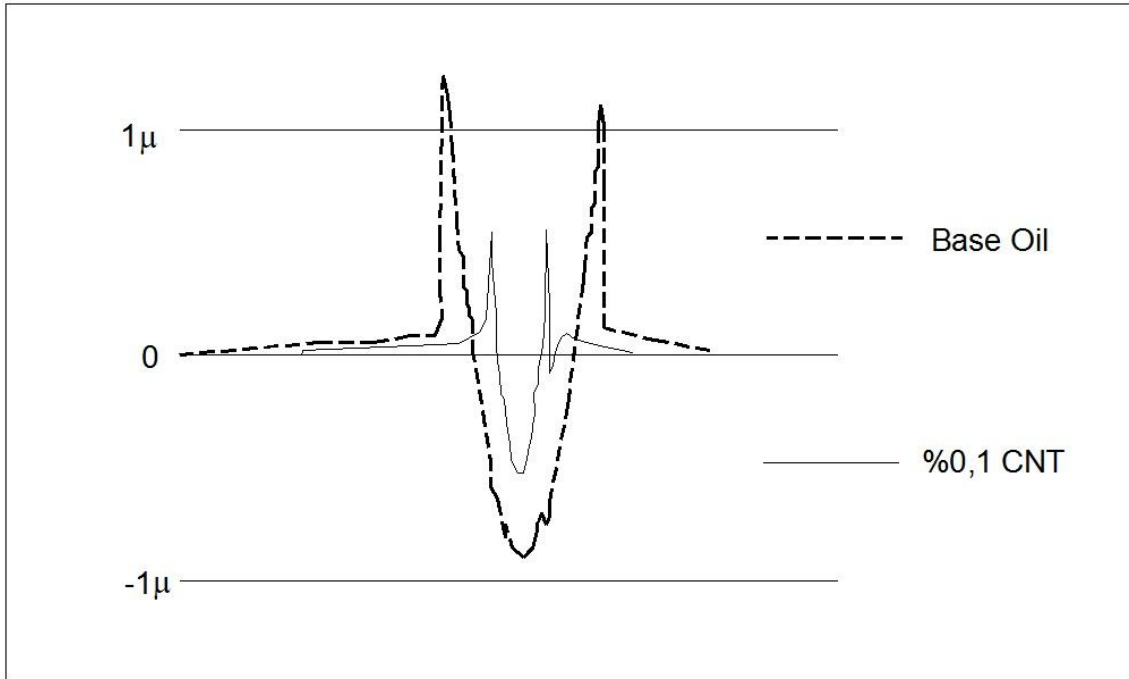


Şekil 5.21. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,05 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> + %0,05 CNT karşılaştırması

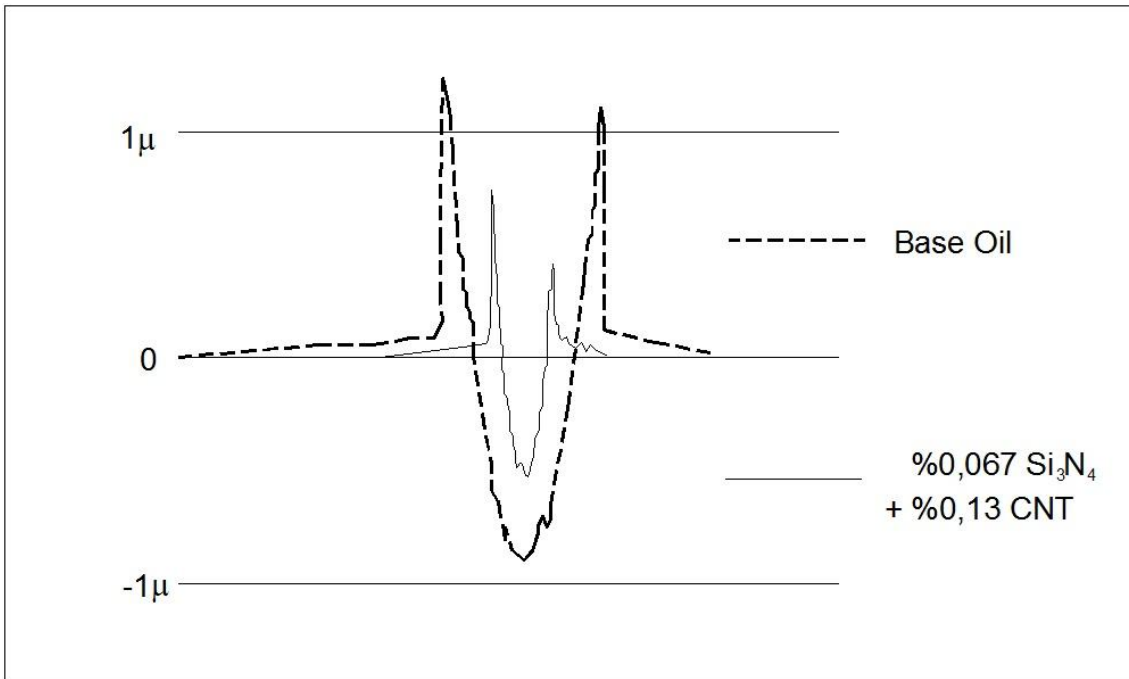


Şekil 5.22. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,1 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> + %0,1 CNT karşılaştırması

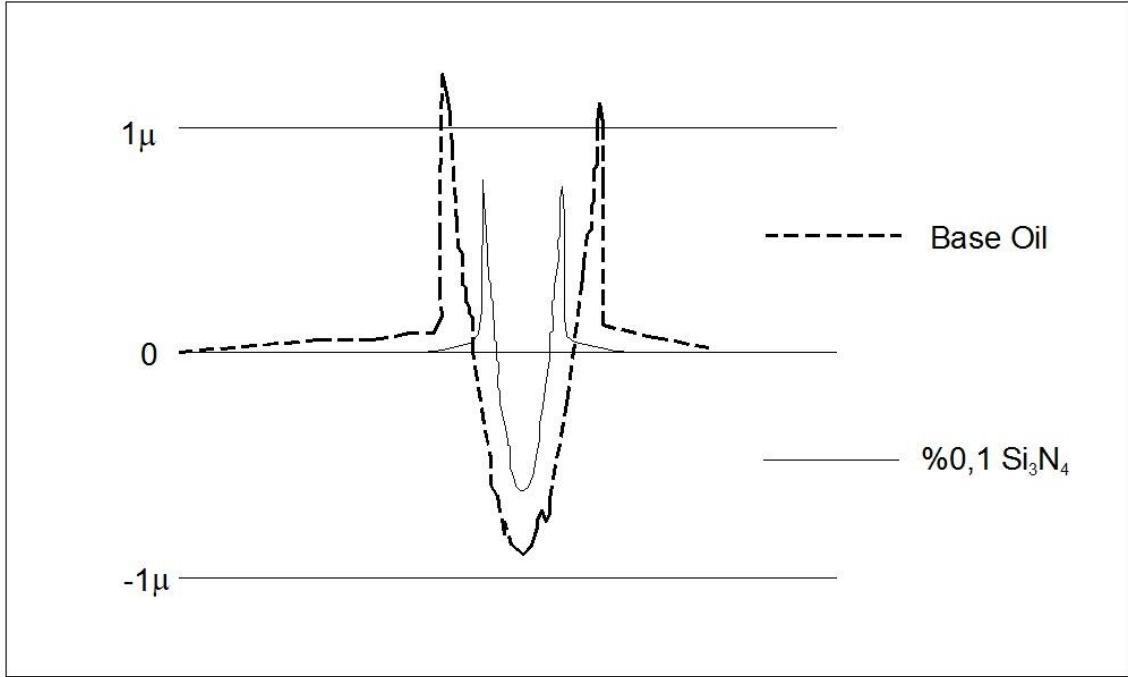




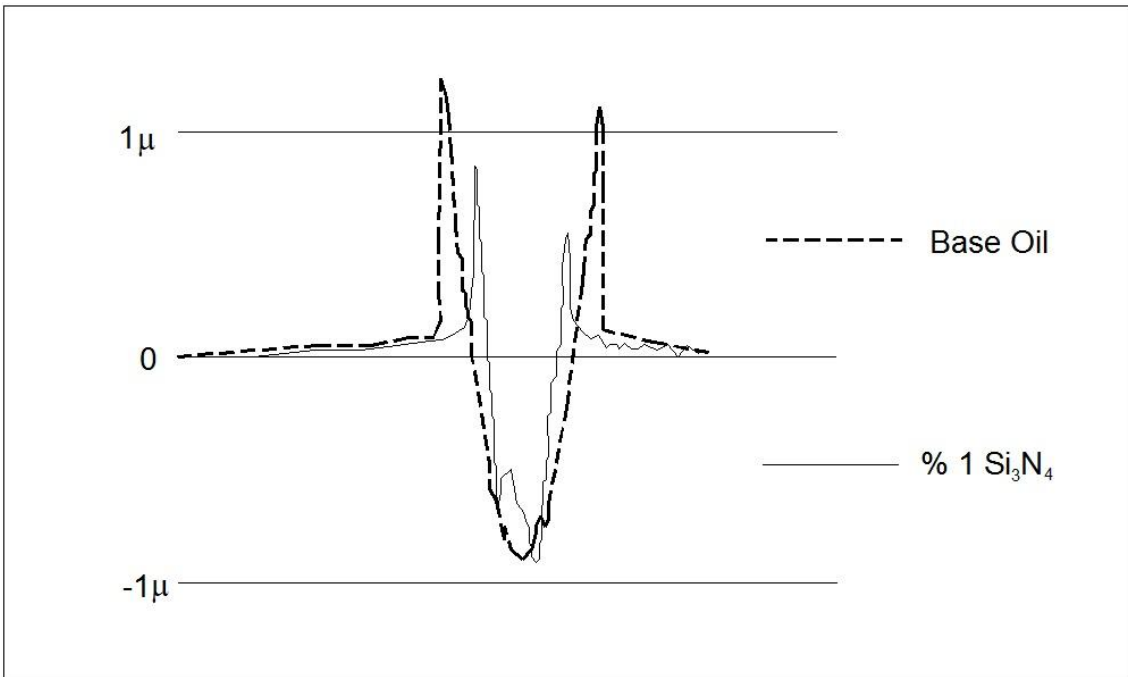
Şekil 5.23. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,1 CNT karşılaştırması



Şekil 5.24. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,067 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> + %0,13 CNT karşılaştırması

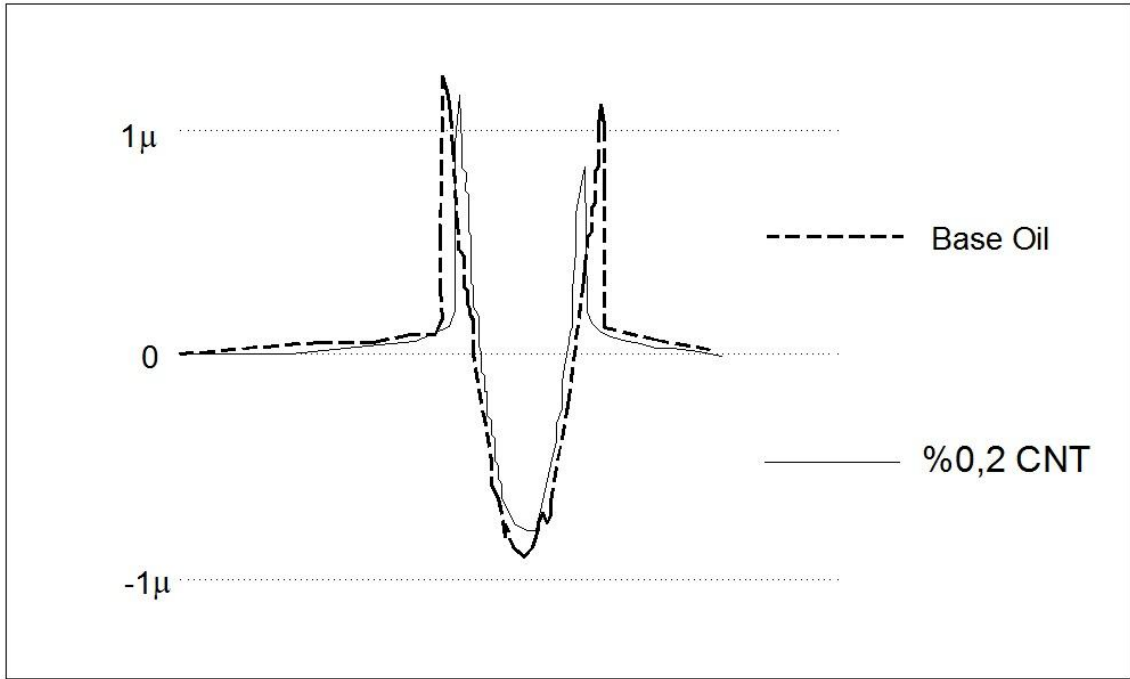


Şekil 5.25. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,1  $\text{Si}_3\text{N}_4$  karşılaştırması

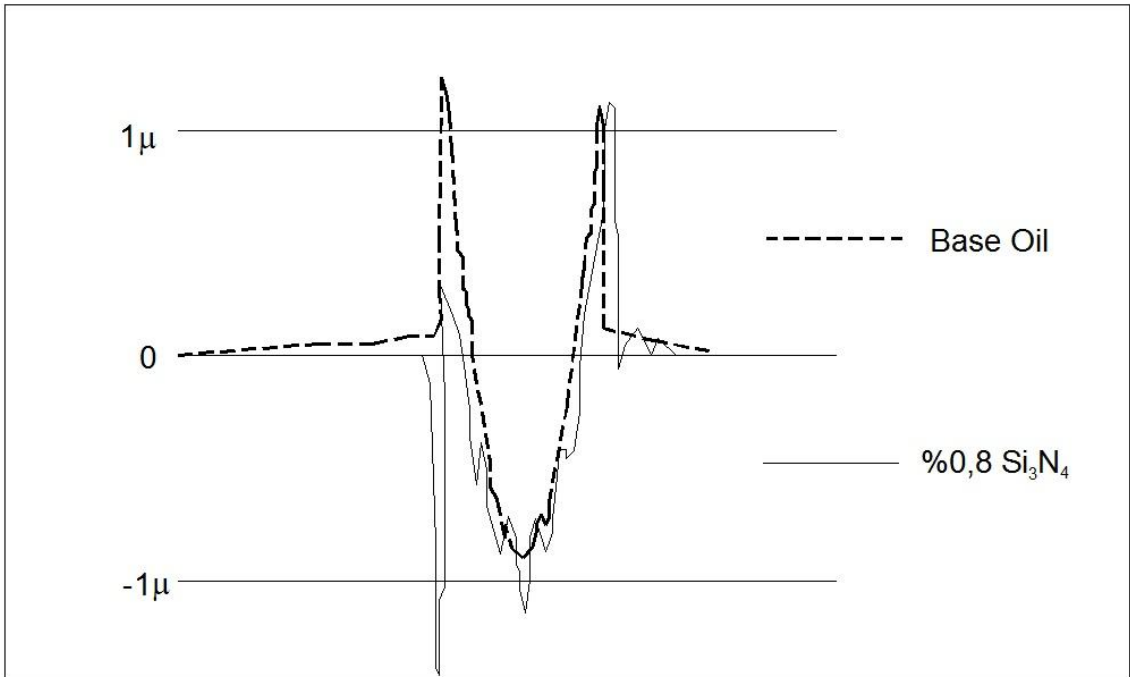


Şekil 5.26. Aşınma profilinde Base Oil ve %1  $\text{Si}_3\text{N}_4$  karşılaştırması

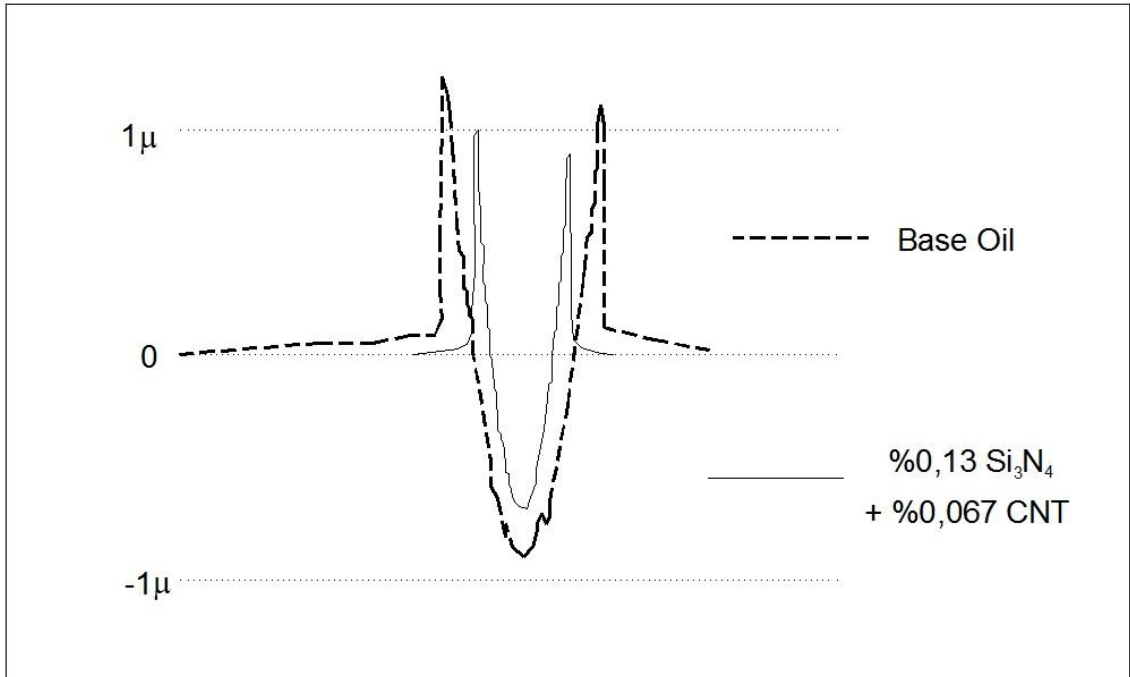




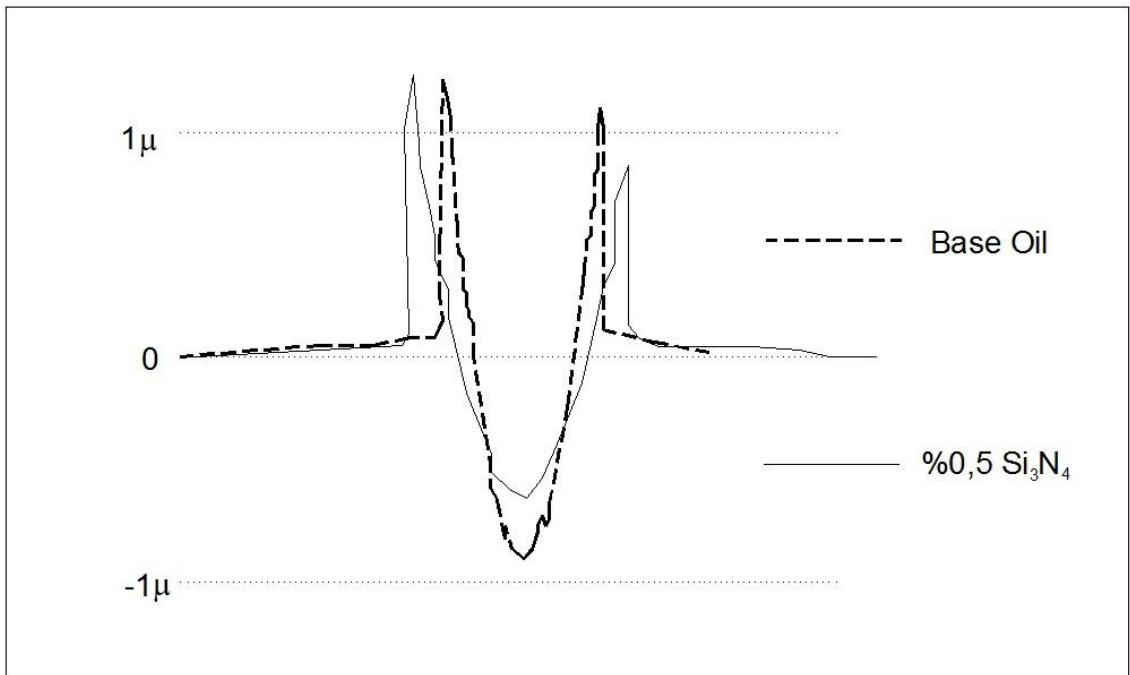
Şekil 5.27. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,2 CNT karşılaştırması



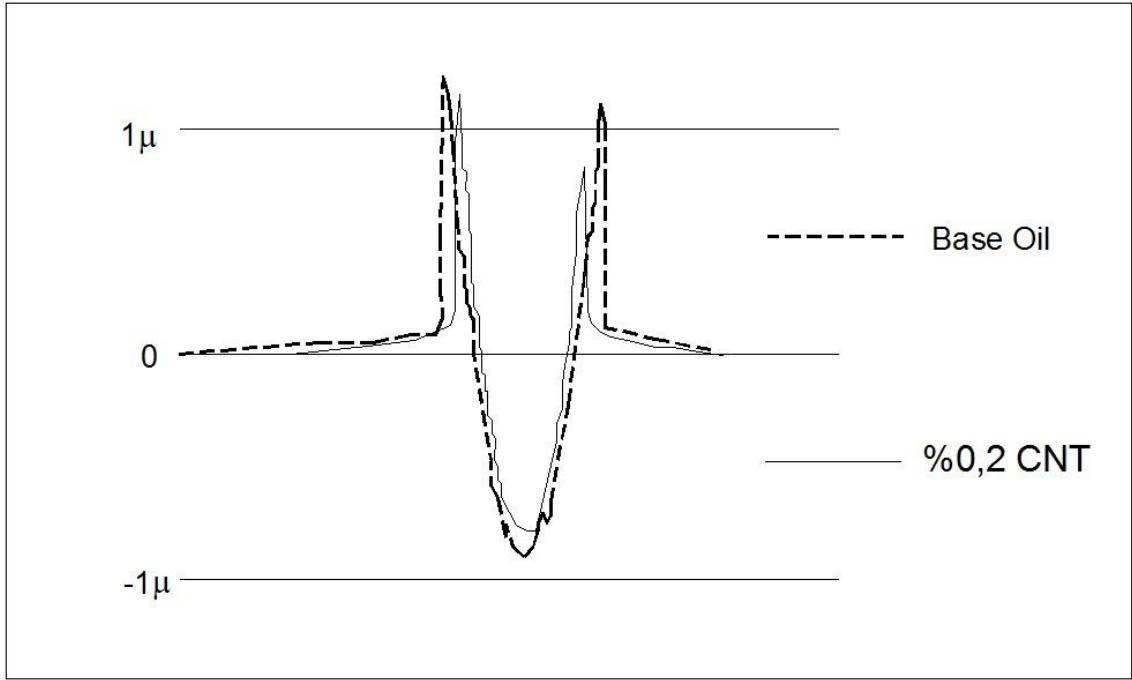
Şekil 5.28. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,8 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> karşılaştırması



Şekil 5.29. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,13  $\text{Si}_3\text{N}_4$  + %0,067 CNT karşılaştırması

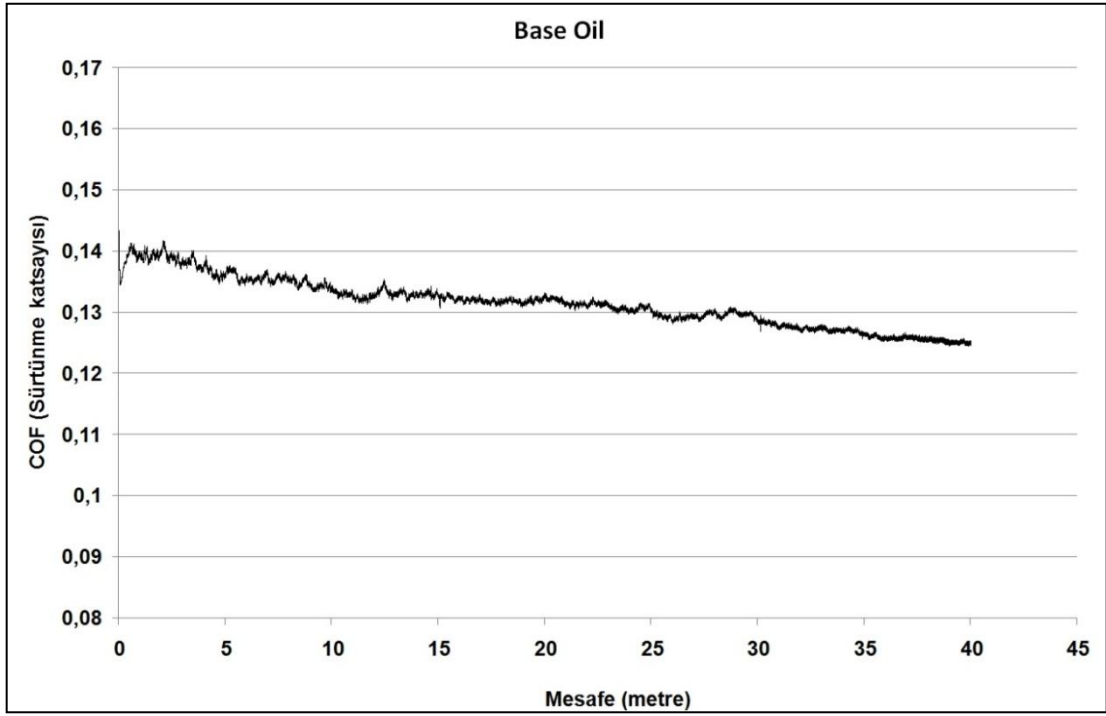


Şekil 5.30. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,5  $\text{Si}_3\text{N}_4$  karşılaştırması

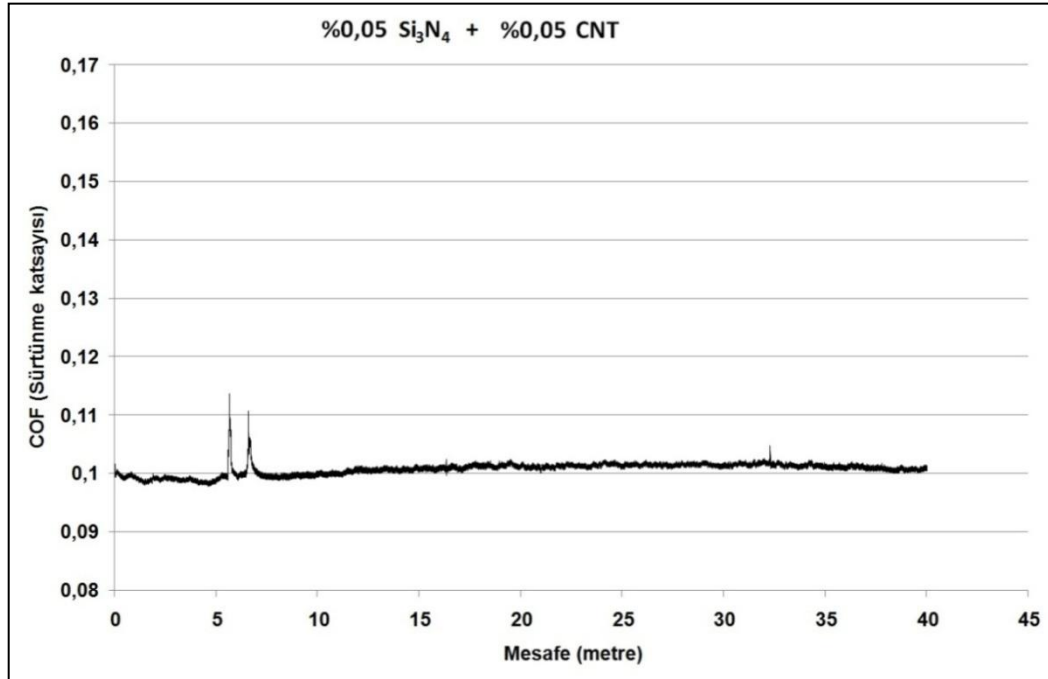


Şekil 5.31. Aşınma profilinde Base Oil ve %0,2 CNT karşılaştırması

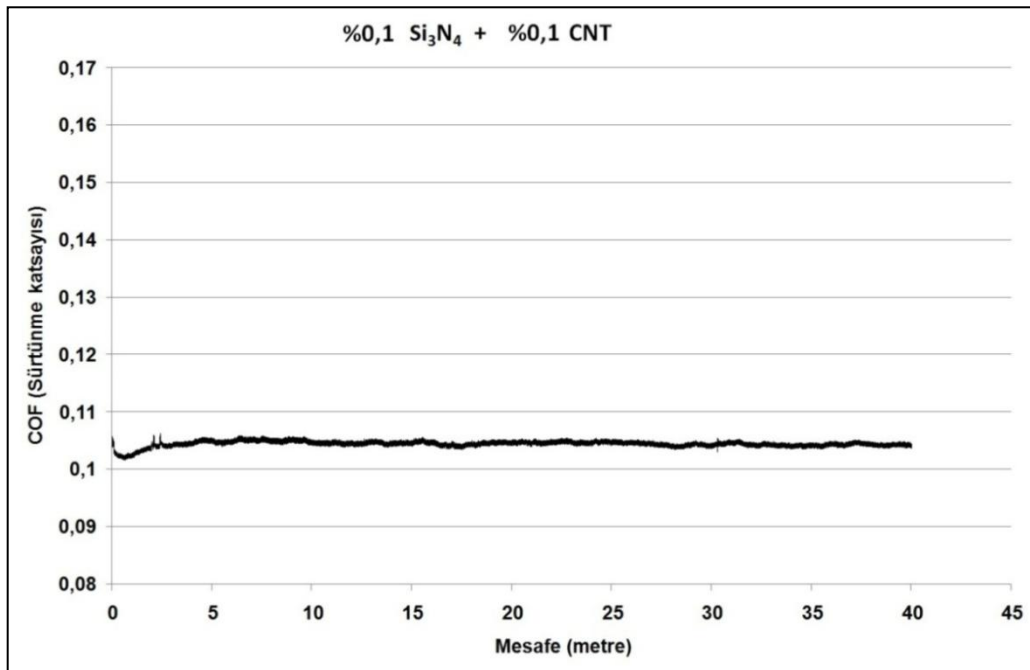
Aşınma deneylerine ait COF – Mesafe eğrileri aşağıda verilmiştir. (Aşınma deneyleri %35 bağıl nem ve 20 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.)



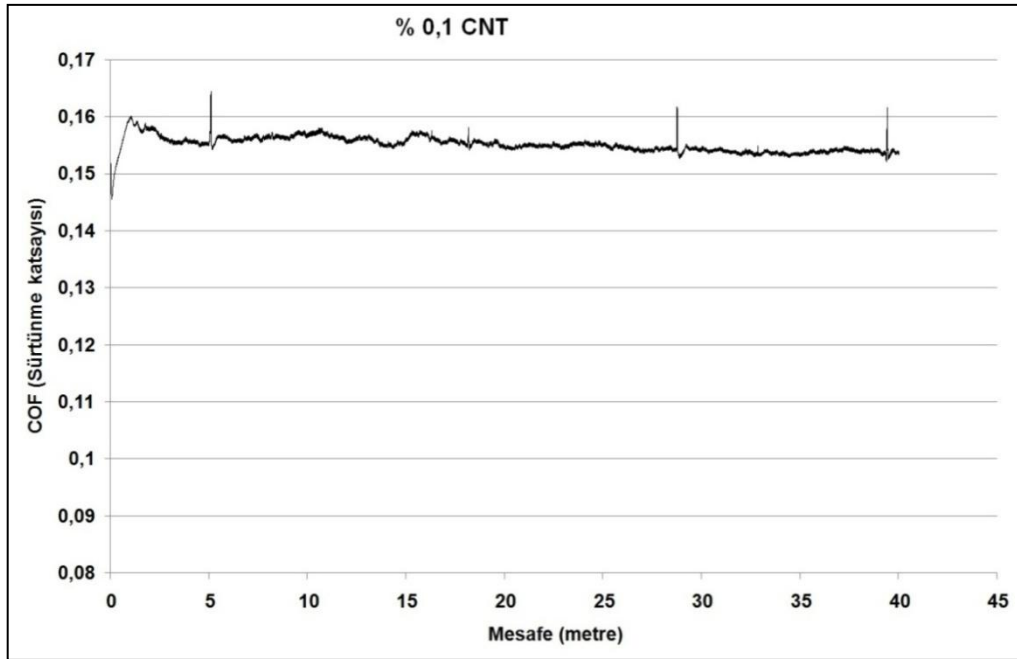
Şekil 5.32. Base Oil (10W40) içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği



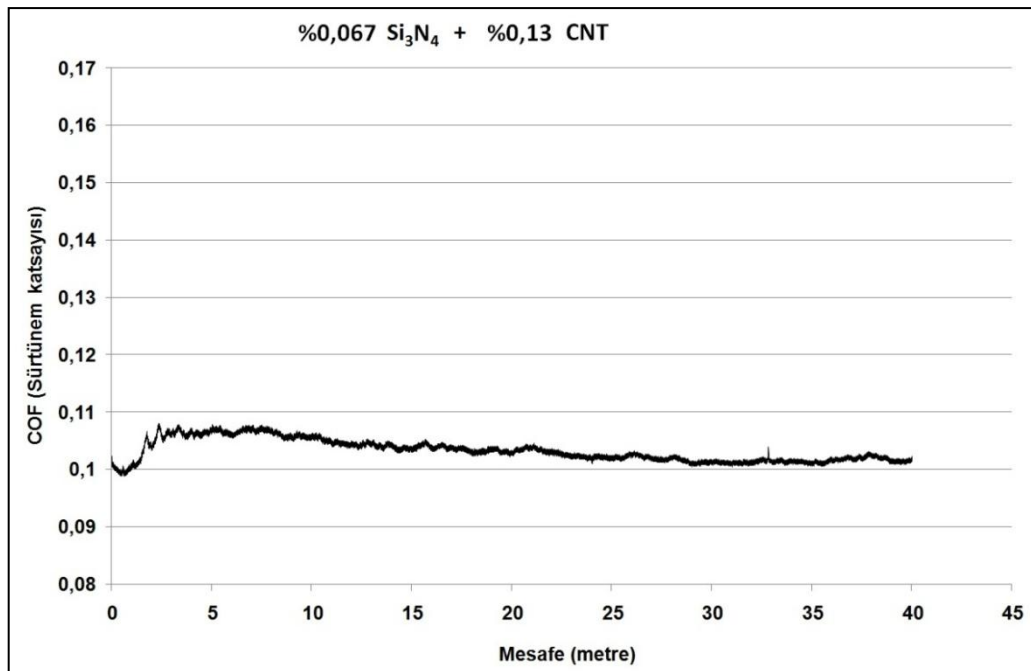
Şekil 5.33. %0,05 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> + %0,05 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği



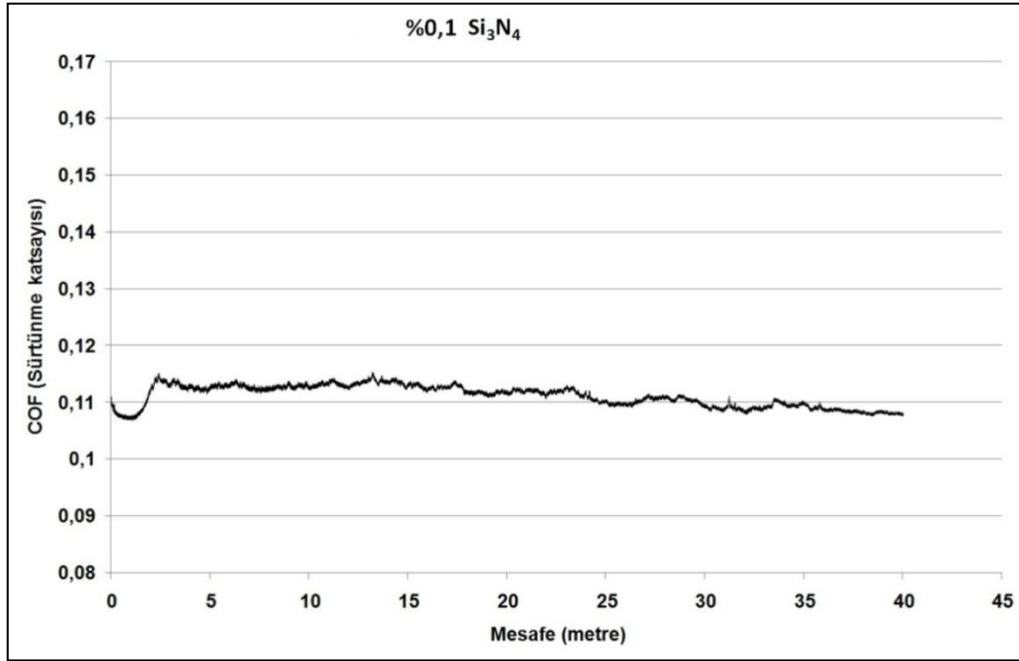
Şekil 5.34. %0,1 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> + %0,1 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği



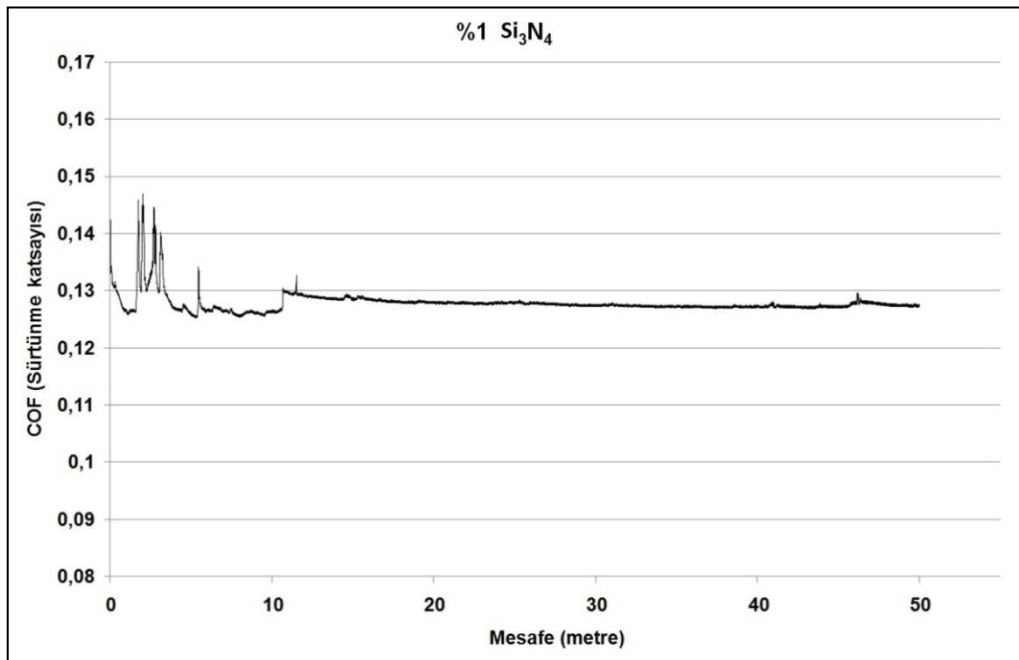
Şekil 5.35. %0,1 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe- COF grafiği



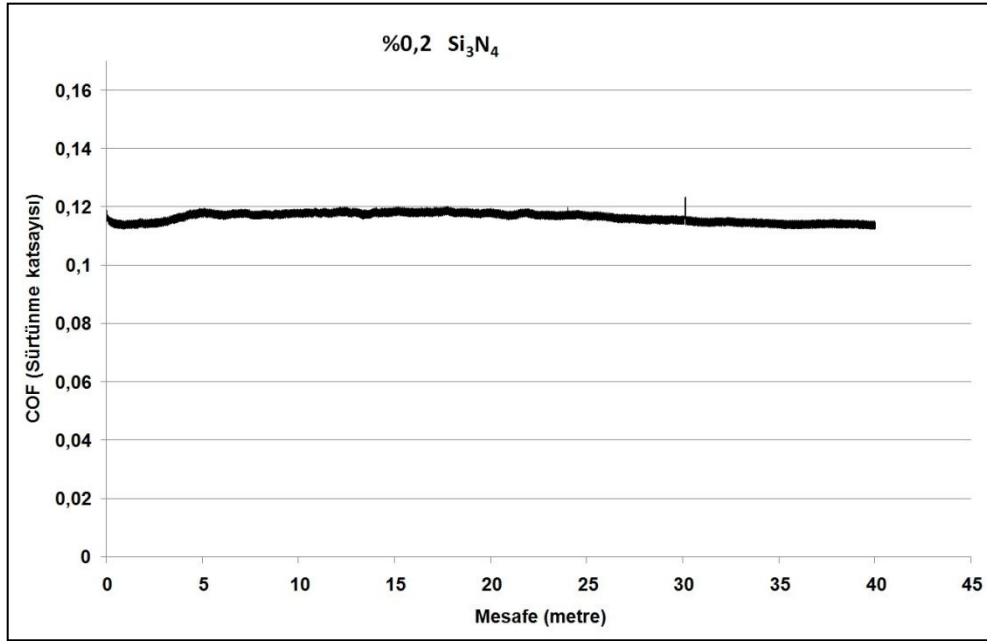
Şekil 5.36. %0,067 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> + %0,13 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği.



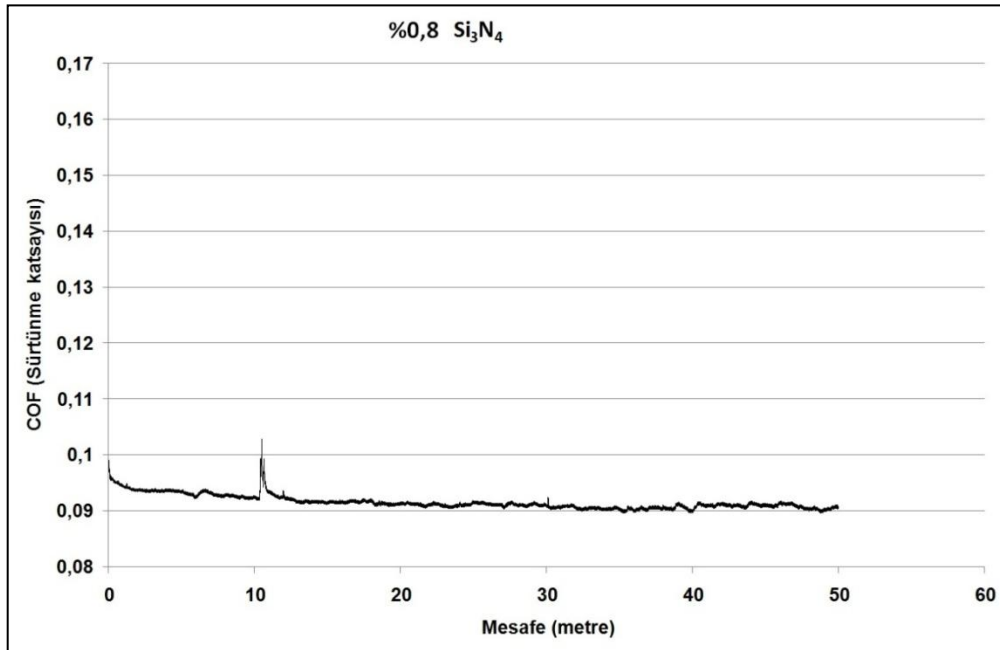
Şekil 5.37. %0,1 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği



Şekil 5.38. %1 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği

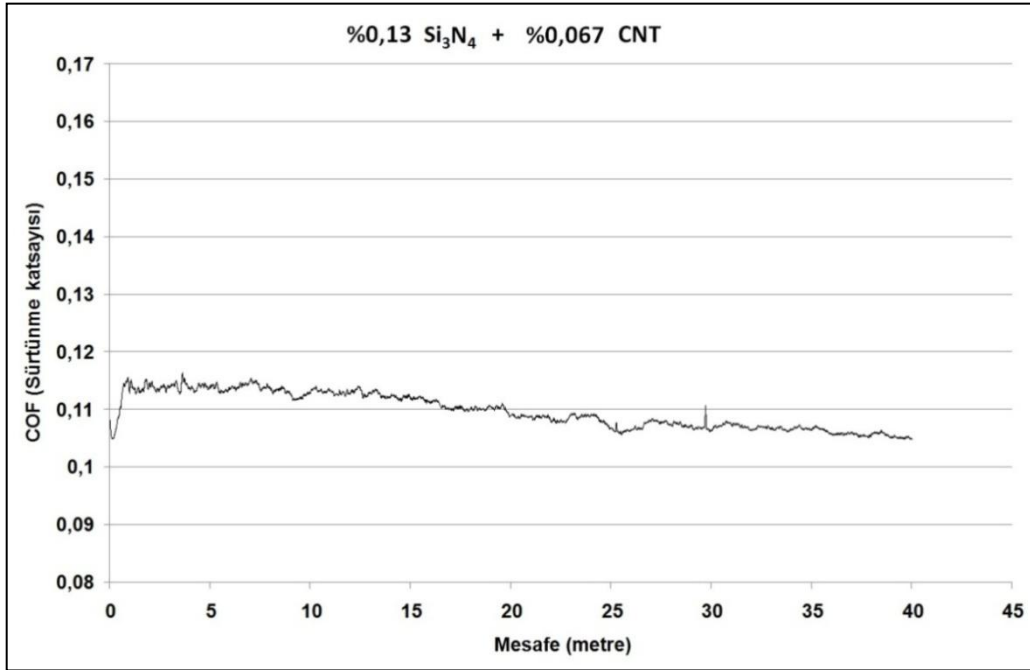


Şekil 5.39. %0,2 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği

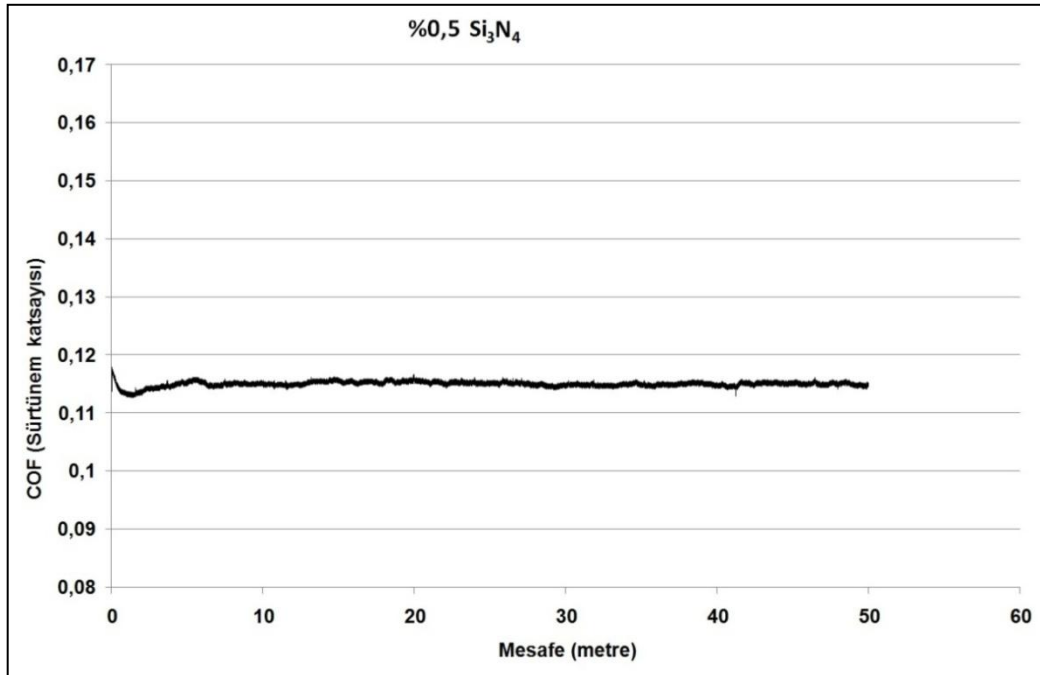


Şekil 5.40. %0,8 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği

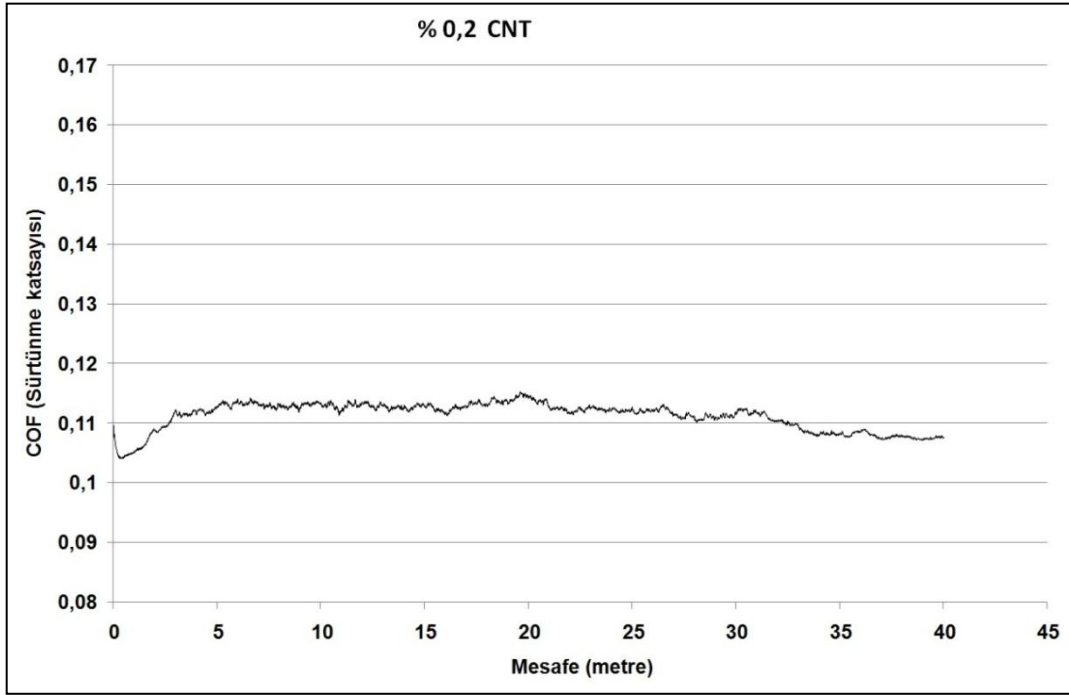




Şekil 5.41. %0,13 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> + %0,067CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği

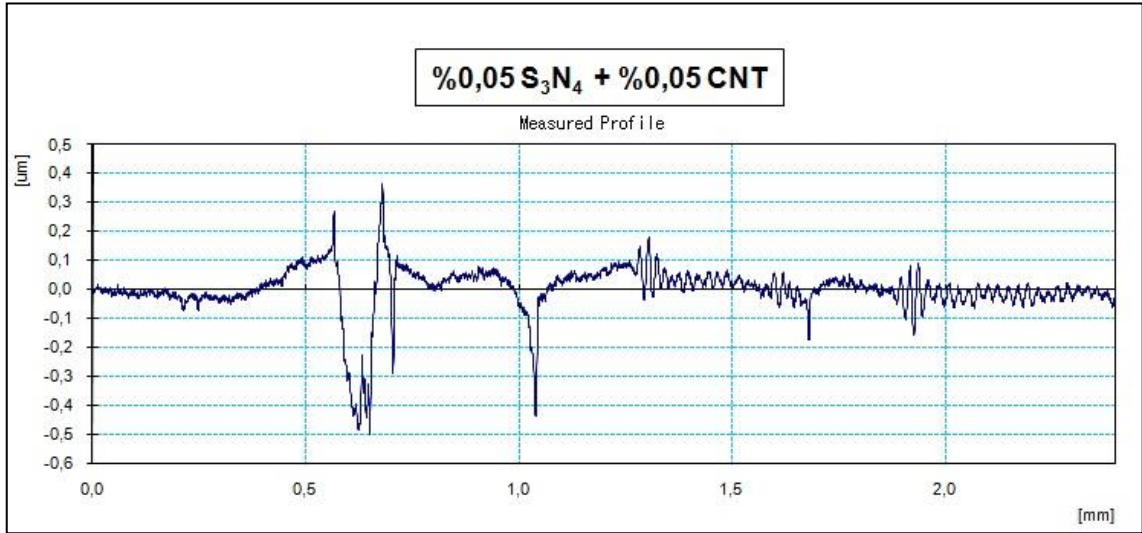


Şekil 5.42. %0,5 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği

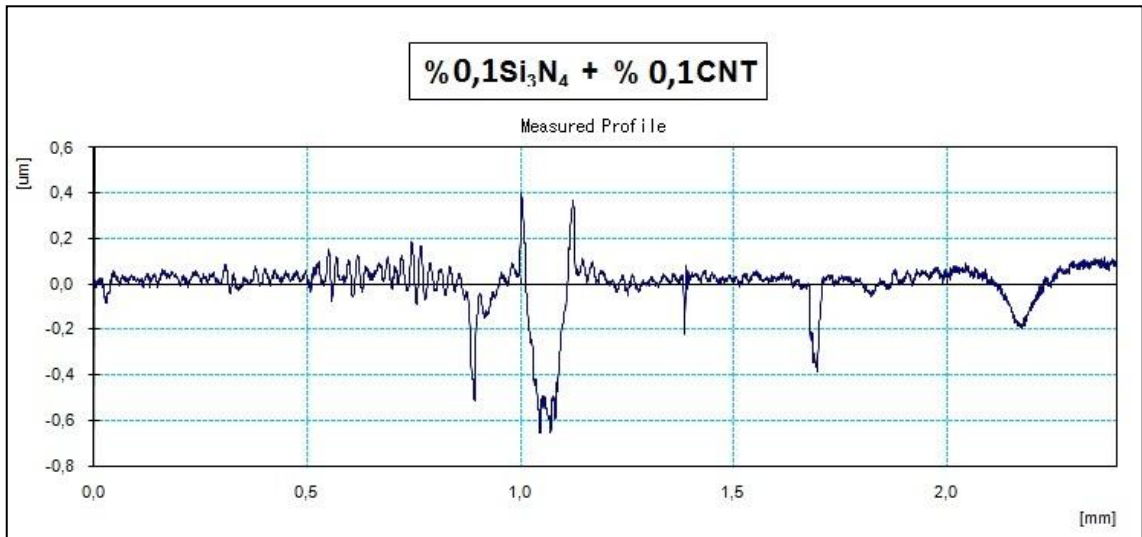


Şekil 5.43. %0,2 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinin mesafe-COF grafiği

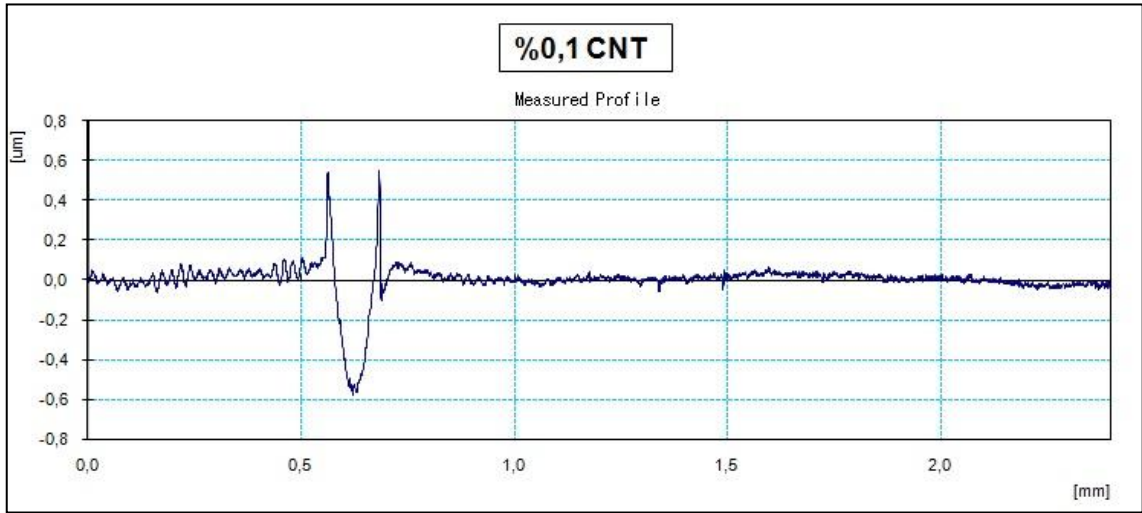
Aşınma profilleri ve buna bağlı aşınma oranları.



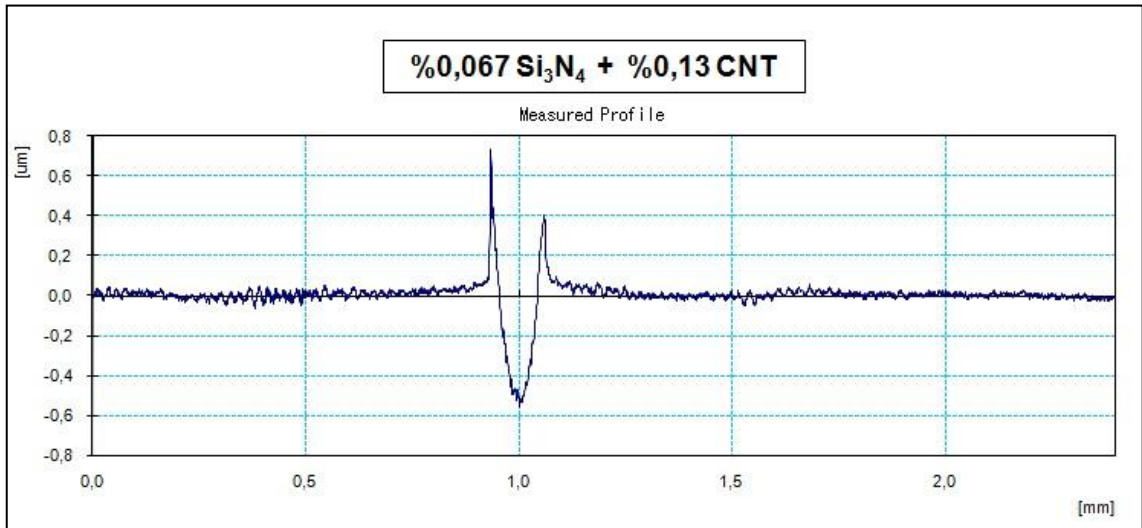
Şekil 5.44. %0,05 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> + %0,05 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili



Şekil 5.45. %0,1 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> + %0,1 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili



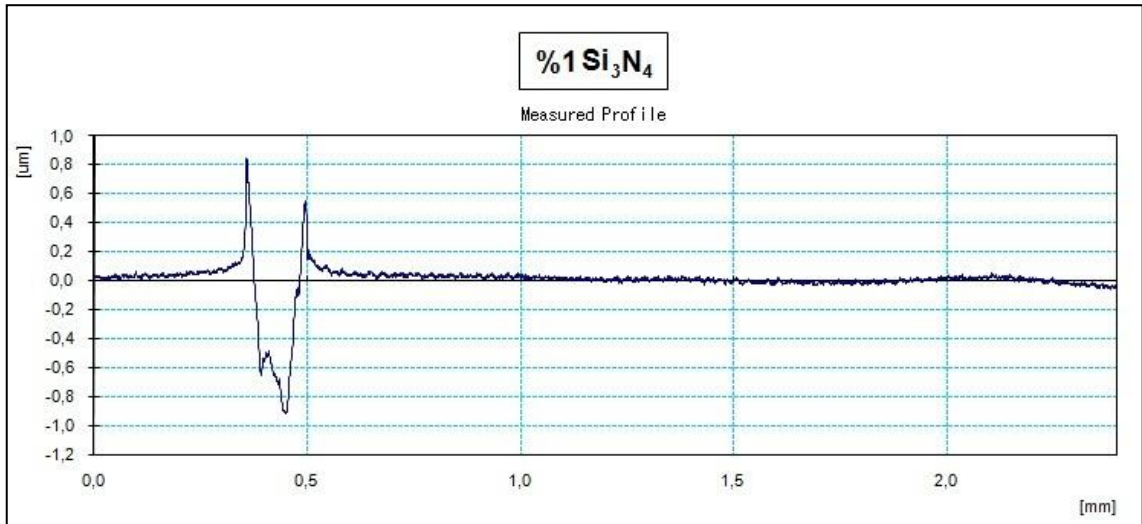
Şekil 5.46. %0,1 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili



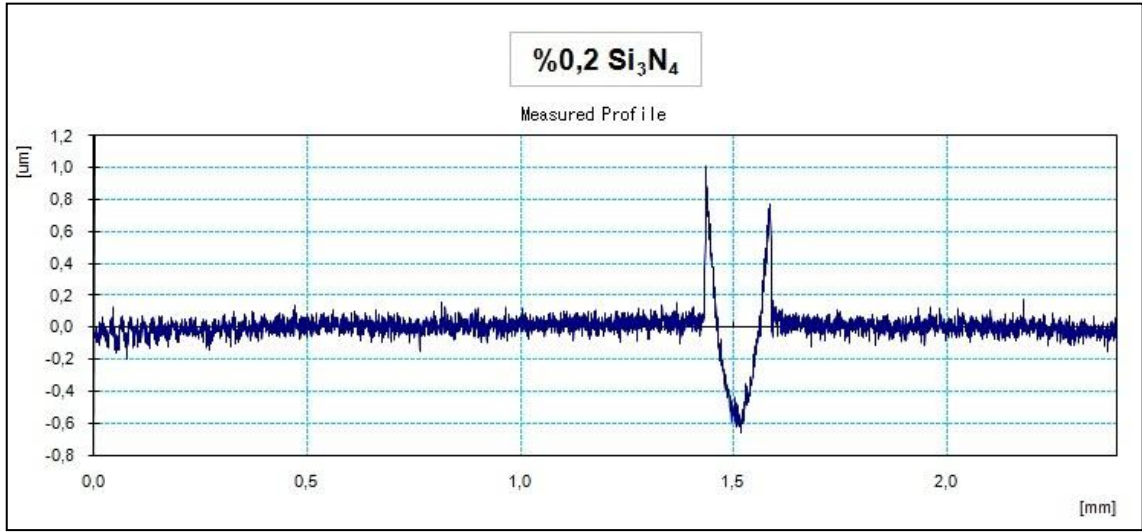
Şekil 5.47. %0,067 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> + %0,13 CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili



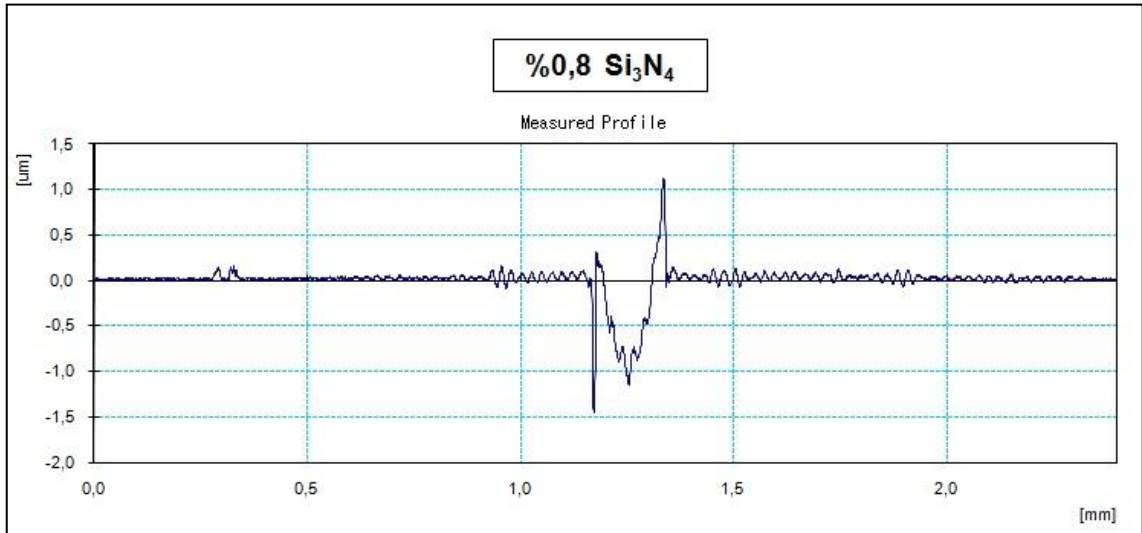
Şekil 5.48. %0,1 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili



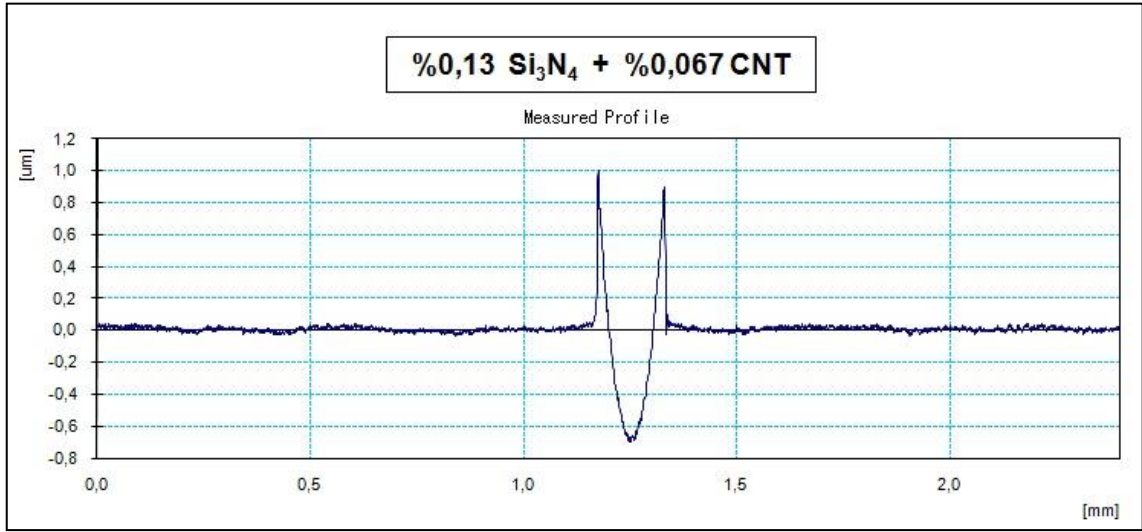
Şekil 5.49. %1 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili



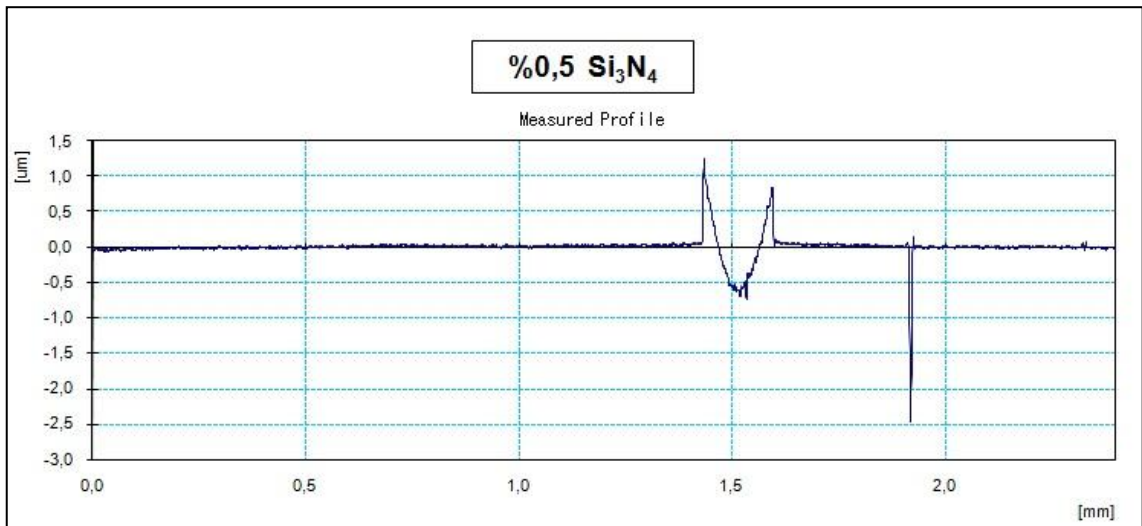
Şekil 5.50. %0,2 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili



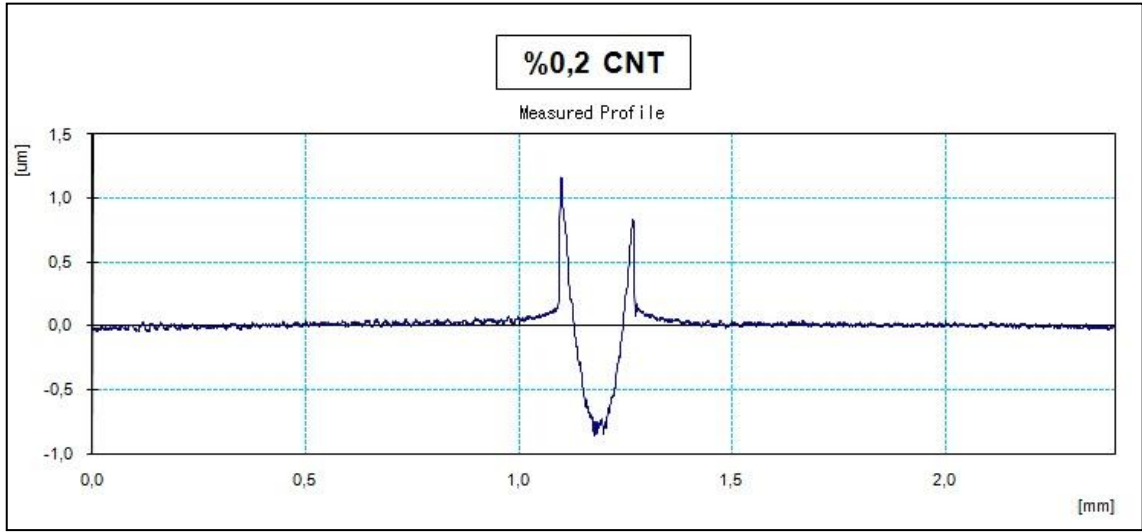
Şekil 5.51. %0,8 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili



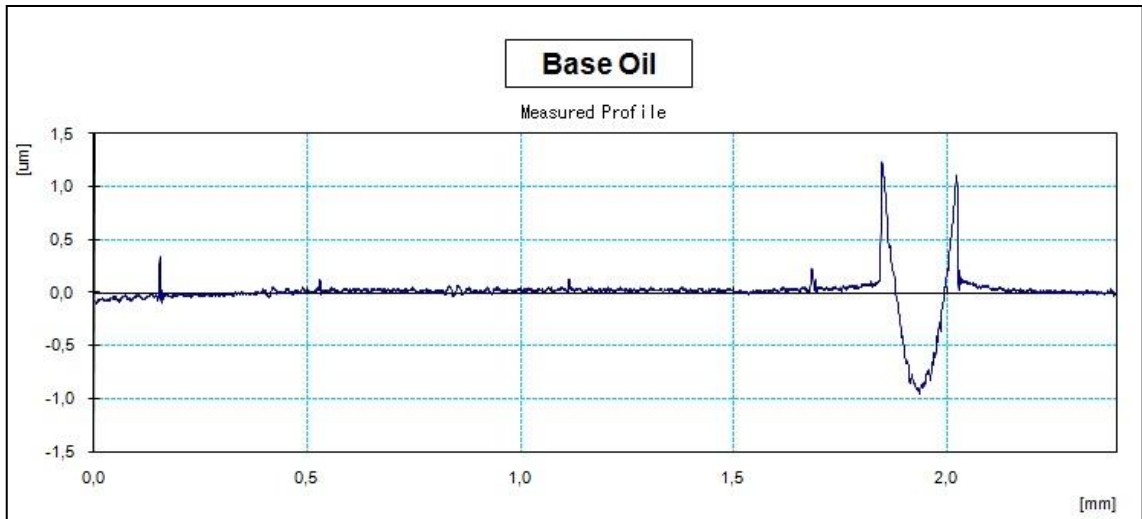
Şekil 5.52. %0,13 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> + %0,067CNT katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili



Şekil 5.53. %0,5 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> katkılı yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili

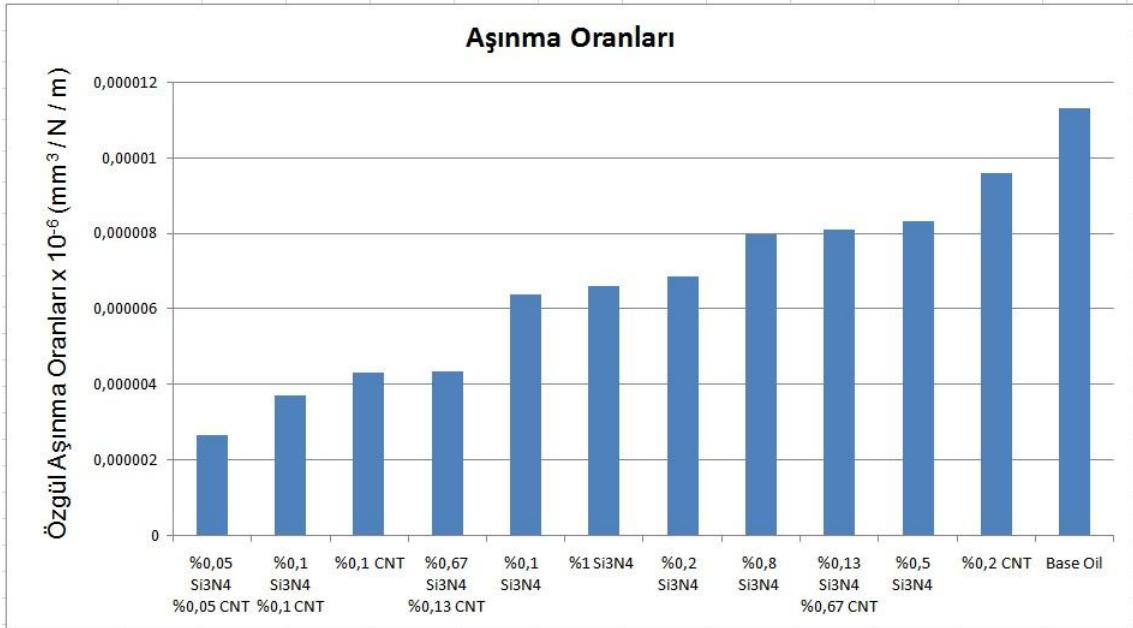


Şekil 5.54. %0,2 CNT katkıli yağ içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili

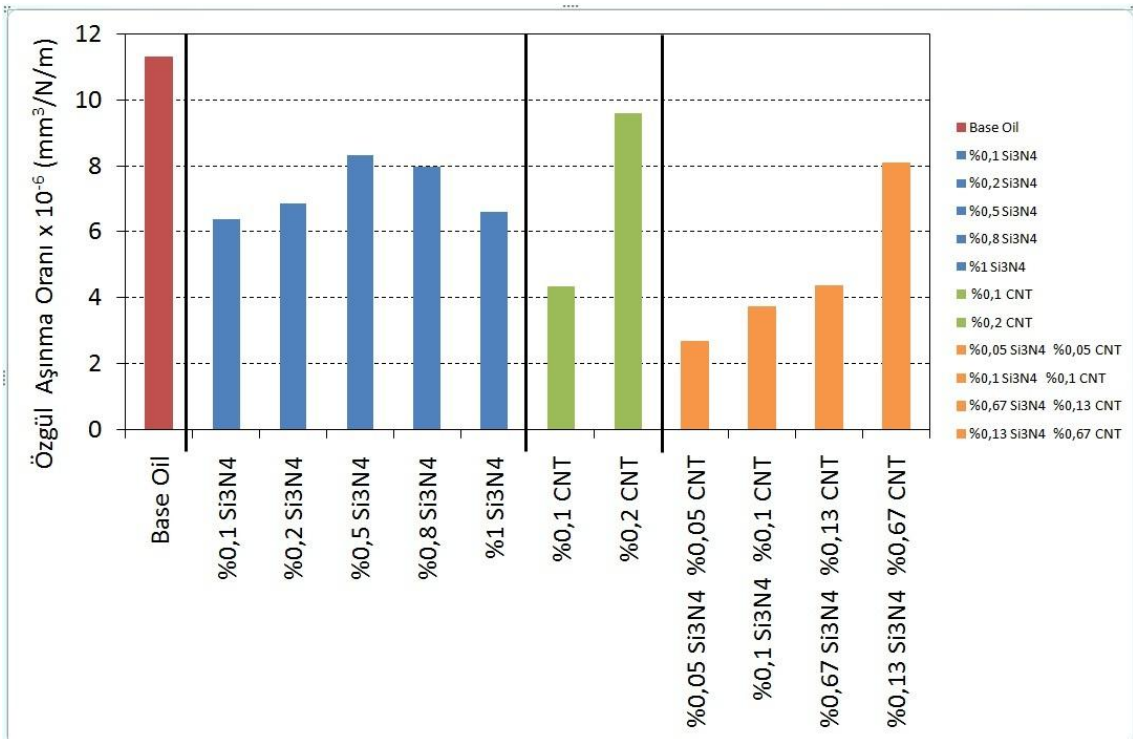


Şekil 5.55. Base Oil (10W40) içinde yapılan Ball-on-disc deneyinde aşınma profili

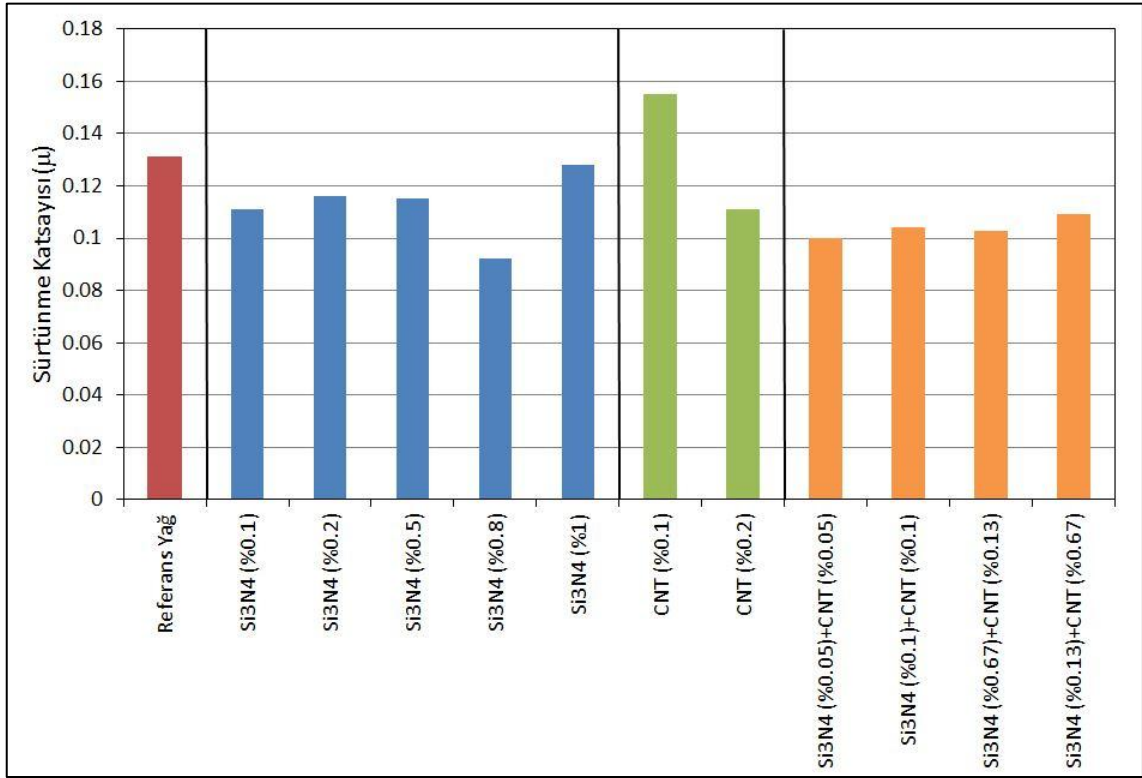




Şekil 5.56. Sıralı aşınma değerleri tablosu



Şekil 5.57. Karşılaştırmalı aşınma değerleri tablosu



Şekil 5.58. Karşılaştırmalı sürtünme katsayısı tablosu

### 5.8. Deneysel sonuçlarının irdelenmesi

Yapılan deneysel çalışmalar, nano partiküllerin yağ katkısı olarak kullanımlarının aşınma özellikleri ve sürtünme davranışı üzerine olumlu etki yaptığını göstermiştir.

Bu çalışmada, literatürden farklı olarak, farklı nano partiküllerin bir arada meydana getireceği etki ortaya çıkarılmak istenmiş ve bu amaçla, literatürde kullanım örneği pek bulunmayan  $\text{Si}_3\text{N}_4$  seramik nano amorf partiküller ile, kullanım örneklerine sık rastlanan çok duvarlı karbon nano tüp kullanılmıştır.

Genel olarak nano partiküllerin ağırlıkça %0,5'ten daha düşük katkı oranlarında iyi sonuçlar elde edildiği bilinmektedir. Bu nedenle her iki partikül için öncelikle tekil deneyler yapılmış, ardından bu partiküllerin farklı oranlarda birlikte kullanımlarının oluşturduğu etki incelenmiştir. Sonuç olarak aşağıdaki yargılara varılmıştır;

1.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  oldukça sert ve aşındırıcı özelliklere sahip olmasına rağmen nano amorf yapıda partiküllerin yağ katkısı olarak kullanımında aşınma oranının azaldığı görülmüştür. Muhtemelen yüzeydeki mikro pürüzler içine nano partiküller dolarak tamir etkisi yapmaktadır. Genişleyen yüzey ile temas gerilmesinin düşmesine paralel olarak aşınma oranı da düşmektedir.

2.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  partikül miktarının ağırlıkça %0,1 olması durumunda aşınma oranının daha az olduğu, artan partikül miktarına bağlı olarak aşınma oranının artmaya başladığı gözlenmiştir. Nano partiküllerin kullanıldığı çalışmaların tümünde buna benzer sonuçlar elde edilmektedir (Vadiraj, A, et al., 2012), (Chou, C.C. and Lee, S.H.,2010) (Caixiang , G.U., et al, 2008), (Hernandez Battez, A., et al., 2008), (Huanga, H.D., et al.,2006).

3. CNT katkısının düşük miktarlarının da aşınmayı referans yağa göre düşürdüğü, ancak buradaki başarının  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 'ten daha kötü olduğu anlaşılmaktadır. CNT miktarındaki artışa bağlı olarak aşınmanın artması, kullanılan çok duvarlı karbon nano

tüpün kristal geometrisine ve bağ enerjilerinin tabaka içi ve tabakalar arası farklılığına bağlanabilir.

4. Tekil olarak kullanımlarında  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve CNT'nin her ikisinin de düşük miktarlarda katılmalarının aşınma üzerine olumlu etkisinin olduğu deney sonuçlarından anlaşılmaktadır. Bu bulgudan hareketle, toplam ağırlık oranı aynı olacak şekilde (toplam %0,1 ve toplam %0,2) her iki tür partikülün ortak kullanımında çok daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmektedir.

5. Tekil etkide %0,2 civarında en iyi sonuçlar elde edilmesine rağmen, partiküllerin birlikte kullanımlarında %0,05  $\text{Si}_3\text{N}_4$ + %0,05 CNT katkısının en iyi sonucu verdiği görülmüştür.

6. Hem aşınma oranı hem de sürtünme katsayısı diyagramları incelendiğinde, nano partiküllerin tekil etkilerinin daha kararsız olduğu, ancak ikili etkilerde daha kararlı bir seyir izlediği görülmektedir.

Sonuç olarak; Nano partiküllerin aşırı sert formlarının dahi yağ katkısı olarak aşınmayı önleyici etkisi olduğu deneysel olarak gösterilmiştir.

## BÖLÜM 6

### GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışma kapsamında  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve CNT nano partiküllerin SAE 10W40 yağ içine değişik oranlarda hem tek başlarına, hem de birlikte katılması sonucunda meydana gelen tribolojik farklılıklar incelenmiştir.

$\text{Si}_3\text{N}_4$  ve CNT nano partiküller, referans yağ içine değişik oranlarda katılarak, sınır yağlama koşullarında, ball-on-disc düzeninde bir seri deney yapılmıştır. Deney sonuçları, hem elde edilen tribolojik ölçümlerin değerlendirilmesi, hem de elektron mikroskopu yöntemi ile incelenmiştir.

Sonuç olarak referans yağın sağladığı aşınma önleme, sürtünme katsayısı düşürme gibi tribolojik faydaların hepsinden daha olumlu sonuçlar alınmış, benzer çalışmaların da gösterdiği gibi katkı maddelerinin optimum oranlarda kullanılmasının en uygun sonuçları verdiği gösterilmiştir.

Referans yağa göre %0,05  $\text{Si}_3\text{N}_4$  + %0,05 CNT içeren yağın en iyi sonucu verdiği, aşınma oranının %78 azalttığı ve sürtünme katsayısını %24 düşürdüğü görülmüştür.

$\text{Si}_3\text{N}_4$  ve CNT nano partiküllerin belli miktarlardan daha yüksek oranlarda yağa katılması durumunda elde edilen sonuçların olumsuz yöne kaydığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak nano partiküllerin aglomerasyonu düşünülmektedir. İleride yapılacak çalışmalar için, yukarıda belirtilen nano partiküllerin yağa katılmasında uygun yüzey örten maddelerin kullanılması önerilebilir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Battez, A.H., Fernandez Rico, J.E., Navas Arias, A, Viesca Rodriguez, J.L., Chou Rodriguez, R, Diaz Fernandez, J.M., 2006, The tribological behaviour of ZnO nanoparticles as an additive to PAO6.
- Battez, H, A., Gonzalez, R., Viesca, J.L., Fernandez, J.E., Diaz Fernandez, J.M., Machadoc, A., Choud,R., Riba, J., 2008,CuO, ZrO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants
- Battez, H, A.,Viescaa,J.L., Gonzalez, R., Blancob, D., Asedegbegab, E., Osorioa, A., 2010, Friction reduction properties of a CuO nanolubricant used as lubricant for a NiCrBSi coating.
- Beşergil, B.,2009,Yağlama, 2-4
- Blau,P. J. , 1992, "Friction, Lubrication and Wear Technology"
- Blau, P. J., 2009, Friction Science and Technology From Concepts To Applications, 2, 226 -Stribeckcurve-
- Chau-Chang Chou, Szu-Hsien Lee, 2010, Tribological behavior of nanodiamond-dispersed lubricants on carbon steels and aluminum alloy.
- Chou, C.C., Lee, S.H., 2008,Rheological behavior and tribological performance of a nanodiamond-dispersed lubricant

- Fernandez Rico, E., Minondo, I., Garcia Cuervo, D., 2007, The effectiveness of PTFE nanoparticle powder as an EPadditive to mineral base oils.
- GU Caixiang , LI Qingzhu , GU Zhuoming , ZHU Guangyao, 2008, Study on application of CeO<sub>2</sub> and CaCO<sub>3</sub> nanoparticles in lubricating oils.
- Hsiao Yeh Chua, Wen Chen Hsub, Jen Fin Linb, 2010, The anti-scuffing performance of diamond nano-particles as an oil additive.
- Huanga, H.D., Tu, J.P., Ganb, L.P., Li, C.Z., 2006, An investigation on tribological properties of graphite nanosheets as oil additive.
- Kalina, M., Kogovseka, J., Remskar, M., 2012, Mechanisms and improvements in the friction and wear behavior using MoS<sub>2</sub> nanotubes as potential oil additives.
- Liu, W., Chen, S, 2000, An investigation of the tribological behaviour of surface-modified ZnS nanoparticles in liquid paraffin.
- Rapoport, L., Leshchinsky, V., Lapsker, I., Volovik, Y., Nepomnyashchy, Lvovsky, O.M., Popovitz-Biro, R., Feldman, Y., Tenne, R., 2003, Tribological properties of WS<sub>2</sub> nanoparticles under mixed lubrication.
- Stachowiak, G. W., Batchelor, A.W., 2005, Engineering Tribology, Second Edition, 312, 384, 483 – 527
- Subaşı, M., Karataş, Ç., AISI 4140 Çeliğinde Sertlik, Yorulma Dayanımı İlişkisi, 2010
- Vadiraj, A., Manivasagam, G., Kamani, K., Sreenivasan, V.S., 2012, Effect of Nano Oil Additive Proportions on Friction and Wear Performance of Automotive Materials, 8-9, Tribology in Industry

- Williams, J. A., Dwyer-Joyce, R. S., 2000, Modern Tribology Handbook I, Volume one, Section 3, Contact Between Solid Surfaces, 121-150
- Woydt, M., Wäsche, R., 2010, The history of the Stribeck curve and ball bearing steels: The role of Adolf Martens, 2
- Yasuo, K., Takao, K., Koitsu, M., Obata, F., Yoshiki, Y. and Taichi, F., 2003, "Friction and wear characteristics of iron oxide coating", Nihon Kikai, Gakkai Nenji, Taikai Koen Ranbunshu, 4, 133-134.
- Zhang, W., Zhou, M., Zhu, H., Tian, Y., Wang, K., Wei, J., Ji, F., Li, X., Li, Z., Zhang, P., Wu, D., 2011 Tribological properties of oleic acid-modified graphene as lubricant oil additives.