T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Co_3O_4 KATKILI ZİRKONYA (8YSZ) SERAMİKLERİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hakan TEKİN

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2015

T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Co_3O_4 KATKILI ZİRKONYA (8YSZ) SERAMİKLERİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hakan TEKİN

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2015

Doç. Dr. Bülent AKTAŞ danışmanlığında, Hakan TEKİN'in hazırladığı **"Co_3O_4 Katkılı Zirkonya (8YSZ) Seramiklerin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi"** konulu bu çalışma 15/09/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Doç. Dr. Bülent AKTAŞ .....

Üye : Prof. Dr. Murat KISA .....

Üye : Prof. Dr. Süleyman TEKELİ .....

Bu Tezin Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım

Prof. Dr. Sinan UYANIK
Enstitü Müdürü

Bu çalışma HÜBAK Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No:14150

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ vi
SİMGELER DİZİNİ vii
KISALTMALAR DİZİNİ viii
1.GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 4
2.1. Sürtünme 9
2.1.1. Sürtünme teorisi 9
2.2. Aşınma 14
2.2.1. Aşınmayı etkileyen faktörler 15
2.2.2. Triboloji 16
2.2.2.1. Tribolojinin esasları 16
2.2.2.2. Tiribolojik sistemi meydana getiren temel unsurlar 18
2.3. Aşınma çeşitleri 20
2.3.1. Adhesiv aşınma 21
2.3.2. Abrasif aşınma 24
2.3.3. Yorulma aşınması 26
2.3.4. Korozif aşınma 27
2.4. Seramik 28
2.4.1. Mühendislik seramikleri 29
2.5. Zirkonya 31
2.5.1. Zirkonyanın kulanım alanları 32
2.5.2. ZrO_2'nin kristal yapısı 34
2.5.2.1. Monoklinik ZrO_2 35
2.5.2.2. Tetragonal ZrO_2 36
2.5.2.3. Kübik ZrO_2 37
3. MATERYAL ve YÖNTEM 39
3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Örneklerin Hazırlanması 39
3.2. Mikroyapı İncelemeleri ve Tane Boyutunun Belirlenmesi 40
3.3. Aşınma Deneyleri 42
3.3.1. Malzemelerin yüzey profillerinin ölçümü 44
3.3.2. Aşınma değerlerinin hesaplanması 45
3.3.2.1. Aşınma hacimlerinin hesaplanması 45
3.3.2.2. Spesifik aşınma miktarının hesaplanması 46
3.3.2.3. Bilyedeki aşınma miktarının hesaplanması 47
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 49
4.1. 8YSZ'nin Tane Yapısına ve Mikroyapısına Co_3O_4 Katkısının Etkisi 49
4.2. 8YSZ'nin Aşınma Davranışına ve Özelliklerine Co_3O_4 İlavesinin Etkileri 53
4.2.1. 8YSZ'nin sürtünme katsayısına Co_3O_4 ilavesinin etkileri 54

4.2.2. Deney numunelerinin aşınma sonrası yüzey profilleri 58
4.2.3. 8YSZ'nin aşınma miktarına Co_3O_4 ilavesinin etkisi 62
4.2.4. 8YSZ'nin Spesifik aşınma miktarına Co_3O_4 ilavesinin etkisi 63
4.2.5. Aşındırıcı bilyedeki aşınma miktarları 66
4.2.6. Co_3O_4 katkılı 8YSZ seramiklerin aşınma izlerinin karakterizasyonu 67
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 73
5.1. Sonuçlar 73
5.2. Öneriler 74
KAYNAKLAR 75
ÖZGEÇMİŞ 81

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Co_3O_4 KATKILI ZİRKONYA (8YSZ) SERAMİKLERİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hakan TEKİN

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Bülent AKTAŞ
Yıl: 2015, Sayfa : 81

Bu çalışmada, % 8 mol yitria ile kararlı hale getirilmiş kübik zirkonyanın (8YSZ) mikroyapısına, aşınma ve yüzey özelliklerine Co_3O_4 ilavesinin etkileri araştırıldı. 8YSZ ve ağırlıkça %1-15 oranlarında Co_3O_4 tozları, kolloidal işlemle alaşımlanarak numuneler üretildi. Katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numuneler 1500 ^oC'de 1 saat süre ile sinterlendi. Sinterleme sonrası numuneler 1500 ^oC'de 10 ve 50 saat süre ile tavlandı. Mikroyapı sonuçları, Co_3O_4'in 8YSZ içerisinde sınırlı oranda çözünebildiğini ve çözünemeyen Co_3O_4'in ise ikincil faz olarak tane sınırlarında çökeldiğini gösterdi. Ayrıca 8YSZ'ye Co_3O_4 ilavesi, tane boyutunda bir artış meydana getirdi. Aşınma deneyleri, kuru sürtünme kayma ve oda sıcaklığı şartlarında, Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelere karşı Al_2O_3 seramik aşındırıcı bilye kullanılarak yapıldı. Ağırlıkça %15 Co_3O_4 ilavesinin, 8YSZ'nin aşınma hacmini 0,30'dan 0,11 mm^3'e azalttığı, sürtünme katsayısını ise 0,76'dan 0,74'e düşürdüğü tespit edildi. Co_3O_4 ilaveli 8YSZ numunelerde aşınma miktarının katkısız 8YSZ'ye göre daha az olmasının nedeni; Co_3O_4'in sürtünme yüzeylerinde ince bir yağlayıcı film tabakası oluşturmasıdır. Aşınma karakterizasyonu sonuçlarına göre; kuru kayma sürtünmesi şartlarında, Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin, Al_2O_3 seramik aşındırıcı bilye karşısında abrasiv aşınma mekanizması ile aşındığı gözlemlendi. Aşınma izleri, katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerde aşınmanın, tanelerde mikro çatlakların oluşması ve bu çatlakların ilerlemesiyle malzeme yüzeyindeki tanelerden kopmalar şeklinde gerçekleştiğini gösterdi. Numunelerin tane boyutundaki artışla beraber aşınma miktarının arttığı bulundu. Ayrıca, Co_3O_4 ilavesi ile 8YSZ seramiklerin aşınma dirençleri ve yüzey özelliklerinin arttırılabileceği tespit edildi.

ANAHTAR KELİMELER: Kübik zirkonya (8YSZ), Co_3O_4, kuru sürtünme kayma aşınması, sürtünme.

ABSTRACT

MSc Thesis

THE INVESTIGATION ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF CO_3O_4-DOPED ZIRCONIA (8YSZ) CERAMICS

Hakan TEKİN

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Associate. Prof. Dr. Bülent AKTAŞ
Year: 2015 , Page: 81

In this study, the effects of Co_3O_4 addition on microstructure, wear and surface properties of 8 mol% yttria-stabilized cubic zirconia (8YSZ) were investigated. Specimens were produced by doping 1-15 wt.% Co_3O_4 to 8YSZ powder using colloidal process. Undoped and Co_3O_4-doped 8YSZ samples were sintered at 1500 °C for 1 h. After sintering, the samples were annealed at 1500 °C for 10 and 50 h. Microstructure results showed that the Co_3O_4 could dissolve the limited amount in 8YSZ, and insoluble Co_3O_4 precipitated as a secondary phase at grain boundaries of 8YSZ. Additionally, the addition of Co_3O_4 to 8YSZ caused an increase in the grain size. Wear tests were performed by using Al_2O_3 ceramic abrasive ball against a counterface Co_3O_4-doped 8YSZ specimens at dry friction sliding and room temperature conditions. It was found that the wear volume of 8YSZ decreased from 0.30 to 0.11 mm^3, and also friction coefficient reduced from 0,76 to 0,74 with 15 wt.% Co_3O_4 addition. The reason is why the wear amount of Co_3O_4-doped 8YSZ specimens were less than that of undoped 8YSZ, Co_3O_4 was to create a thin lubricating film layer on the friction surfaces. According to the wear characterization result; it was observed that undoped and Co_3O_4-doped 8YSZ specimens, against a counterface Al_2O_3 ceramic ball, wore with abrasive wear mechanism at dry sliding friction conditions. Wear tracks showed that the wear of undoped and Co_3O_4-doped 8YSZ specimens occured with create the microcracks at the grains, progress these cracks and remove particles from these grains in the material surface. It was found that wear amount increased with increasing in grain size of specimens. Furthermore, it was determined that Co_3O_4 addition to 8YSZ could strengthen interestingly wear resistance, and surface properties of 8YSZ ceramics.

KEYWORDS: Cubic zirconia (8YSZ), Co_3O_4, dry sliding wear, friction.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince gerek konu seçiminde ve gerekse çalışmamın bütün sahalarında bilgi ve yardımlarından yararlandığım, değerli bilgilerini benden esirgemeyen, çalışma azmini ve hırsını örnek alabileceğim kıymetli hocam Doç. Dr. Bülent AKTAŞ'a en içten teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Laboratuvar çalışmalarımda bana bütün imkanını sağlayan, SEM cihazının kullanımında yardımcı olan, Harran Üniversitesi Merkezi Laboratuvarda görev yapan Eyüp YAŞAR'a verdiği emeklerinden dolayı çok müteşekkirim.

Tüm çalışmam boyunca her türlü maddi, manevi destekleri ve dualarıyla yanımda olan anneme, babama ve kardeşlerime en içten duygularımla minnettarım.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Sürtünme kuvveti 10
Şekil 2.2. Statik sürtünme kuvveti 10
Şekil 2.3. İzafi hareket eden yüzeyler arasındaki teorik kuru sürtünmenin şematik gösterimi. 12
Şekil 2.4. Kuru sürtünme halinde yüzeylerin durumu; 1. Pislik tabakası, 2. Absorbsiyon tabakası, 3. Oksit tabakası, 4. Soğuk şekillendirilmiş tabaka, 5. Metal içi 13
Şekil 2.5. Stribeck Eğrisi 14
Şekil 2.6. Yüzey topografyası 15
Şekil 2.7. Tribolojinin diğer bilimlerle olan ilişkisi 17
Şekil 2.8. Sürtünme ve aşınmayı etkileyen faktörler 18
Şekil 2.9. Sürtünme ve aşınmayı etkileyen faktörler 19
Şekil 2.10. Çok iyi torna edilmiş bir metal yüzeyinin mikroskop altındaki şematik görünüşü. 19
Şekil 2.11. Dört aşınma mekanizmasının şematik gösterimleri 20
Şekil 2.12. Adhezif aşınmanın meydana geldiği yüzey 22
Şekil 2.13. İki elemanlı ve üç elemanlı abrasif aşınma oluşum etkileri 25
Şekil 2.14. Yorulma ve Delaminasyon aşınmanın temel mekanizması 26
Şekil 2.15. ZrO_2'nin farklı kristal yapıları; a) kübik b) tetragonal c) monoklinik 35
Şekil 2.16. Monoklinik zirkonyanın kristal yapısı. 36
Şekil 2.17. Tetragonal zirkonya birim hücre yapısı içinde hacim merkezli tetragonal yapı. 36
Şekil 2.18. Sıcaklıkla bağlantılı olarak zirkonyum oksitin faz değiştirmesi 37
Şekil 2.19. Kübik zirkonyanın kristal yapısı. 38
Şekil 3.1. ZEISS Marka Evo 50 modeli taramalı elektron mikroskobu 41
Şekil 3.2. Sinterleme işlemlerinde kullanılan kutu tipi yüksek sıcaklık fırını. 41
Şekil 3.3. EMS 550 marka kaplama cihazı. 42
Şekil 3.4. TRD marka aşınma test cihazı. 43
Şekil 3.5. Aşınma deney cihazının şematik gösterimi 43
Şekil 3.6. Aşınma test cihazı bilgisayar yazılımı 44
Şekil 3.7. Profilmetre cihazı 44
Şekil 3.8. Aşınma sonrası profilmetreden alınan yüzey profil görüntüsü 45
Şekil 3.9. 1500 ^oC'de 1 saat sinterlenmiş ağırlıkça %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunenin aşınma sonrası yüzey profil görüntüsü 45
Şekil 3.10. Autocad programında örnek hacim hesabı 46
Şekil 3.11. Bilye üzerinde aşınan bölgenin ortalama aşınma uzunluğu ve SEM görüntüsü 47
Şekil 3.12. Kesik küre hacim hesabında kullanılacak uzunluklar. 47
Şekil 4.1. 1500 ^oC'de 1 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin mikroyapıları; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ. 50
Şekil 4.2. 1500 ^oC'de 10 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin mikroyapıları; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ. 51
Şekil 4.3. 1500 ^oC'de 50 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin mikroyapıları; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ. 52
Şekil 4.4. Katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin 1500 ^oC'de 1, 10 ve 50 saat tavlama sonrası tane boyutları. 53
Şekil 4.5. 1500 ^oC'de 1 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin sürtünme katsayısı sonuçlarını gösteren grafikler; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ 55
Şekil 4.6. 1500 ^oC'de 10 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin sürtünme katsayısı sonuçlarını gösteren grafikler; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ 56

Şekil 4.7. 1500 ^{o}C'de 50 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin sürtünme katsayısı sonuçlarını gösteren grafikler; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ …….. 57
Şekil 4.8. 1500 ^{o}C'de 1 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin aşınma bölgelerinin yüzey profilleri; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ 58
Şekil 4.9. 1500 ^{o}C'de 10 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin aşınma bölgelerinin yüzey profilleri; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ. 60
Şekil 4.10. 1500 ^{o}C'de 50 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin aşınma bölgelerinin yüzey profilleri; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ. 61
Şekil 4.11. Co_3O_4 katkı miktarı ile 8YSZ'nin aşınma hacmindeki değişim. 62
Şekil 4.12. Katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin spesifik aşınma miktarları ……. 64
Şekil 4.13. Aşınma deneylerinde kullanılan karşı aşındırıcı bilye malzemedeki aşınan bölgelerin SEM görüntüleri; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ. 66
Şekil 4.14. 1500 ^{o}C'de 1 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin aşınma izleri; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ..... 68
Şekil 4.15. 1500 ^{o}C'de 10 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin aşınma izleri; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ..... 70
Şekil 4.16. 1500 ^{o}C'de 50 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin aşınma izleri; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ..... 72

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2.1 Malzeme özelliklerinin adezif aşınmaya etkisi 23
Çizelge 2.2. Mühendislik seramiklerinin fonksiyonlarına göre sınıflandırılması. 30
Çizelge 2.3. Bazı mühendislik malzemelerinin özellikleri 31
Çizelge 2.4. ZrO_2 kristal formları ve dönüşüm sıcaklıkları 34
Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan tozların kimyasal bileşimleri 39
Çizelge 4.1. Ortalama sürtünme katsayısının tavlama süresine göre değişimi. 58
Çizelge 4.2. Katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin tavlama süresine göre aşınma hacimleri 63
Çizelge 4.3. Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin farklı tavlama sürelerine göre spesifik aşınma miktarları 64
Çizelge 4.4. Katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin tribolojik ve mekanik özellikleri 65
Çizelge 4.5. Bilyedeki aşınma miktarları. 67

SİMGELER DİZİNİ

Q : Aktivasyon enerjisi (kjoul/mol)

R : Gaz sabiti

T : Mutlak sıcaklık (K)

n : Tane büyüme üssü

σ : Elektriksel iletkenlik

V : Gerilim (Volt)

I : Akım şiddeti (Amper)

R : Direnç (Ohm)

A : Kesit alanı (cm^2)

L : Kalınlık (cm)

$\boldsymbol{\varepsilon}$: Elektriksel geçirgenlik

K_{IC} : Kırılma tokluğu (MPa. $m^{1/2}$)

K_I : Gerilme şiddet faktörü

H_V : Vickers sertliği (GPa.)

P : Uygulanan yük (kg)

d : İz köşegen uzunluğu (mm)

c : Çentik ucundaki çatlak uzunluğu (μm)

E : Young modülü (GPa.)

α : Termal genleşme katsayısı

KISALTMALAR DİZİNİ

8YSZ : %8 mol yitriya ile kararlı hale getririlmiş kübik zirkonya

XRD : X ışını kırınım deseni

k-ZrO_2 : Kübik zirkonya

t-ZrO_2 : Tetragonal zirkonya

m-ZrO_2 : Monoklinik zirkonya

TSZ : Tamamen kararlı hale getirilmiş zirkonya

KSZ : Kısmen kararlı hale getirilmiş zirkonya

TZP : Tetragonal zirkonya polikristali

YSZ : Yitriya ile kararlı hale getirilmiş zirkonya

SEM : Taramalı elektron mikroskobu

EDS : Enerji dispersive x ışını spektrometre

8Y-CSZ : %8 mol yitriya ile kararlı hale getirilmiş kübik zirkonya

k_w : Spesifik aşınma miktarı

V_w : Aşınma hacmi

F : Uygulanan yük

S : Kayma mesafesi

V_B : Bilyedeki aşınma hacmi

1. GİRİŞ

Aşınma, bir birleşme yüzeyi ile etkileşim içinde olan bir yüzeyden materyalin uzaklaştırılmasının olgusu anlamında kabul edilmektedir. Son yıllarda hemen hemen bütün makineler, dayanıklılıkları, aşınmayla ilgili olarak emniyet kaybı ve makinelerin aşınma problemleri minimuma indirgenmeye çalışılmaktadır. Dolayısıyla, aşınmanın kontrolü, geleceğin ileri ve güvenilir teknolojisi için, güçlü bir gereksinim haline gelmiştir (Yıldız, 2006).

Aşınmanın bazı araştırmacılara göre çeşitli tarifleri yapılmıştır. Teknik anlamda aşınma, cisimlerin yüzeylerinde, mekanik etkenlerle (Mekanik bir sebep veya mekanik bir enerji verilmesi sonucu) malzeme yüzeyinden mikro taneciklerin kopup ayrılması nedeniyle istenmeyen bir değişikliğin meydana gelmesidir (Gürleyik, 1975; Ulusoy, 1977). Başka bir ifadeyle aşınma malzeme yüzeylerine gaz, sıvı ve katıların etkisi neticesinde malzemenin yüzeyinde mikro taneciklerin kopması sonucu meydana gelen yüzey bozulmasıdır (Moore, 1974). DIN 50320 ve ASTM G40-93 standartlarına göre aşınma, "kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması sonucu mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılmasıyla meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması" şeklinde tanımlanmaktadır (Yılmaz, 1997). DIN 50320' ye göre aşınmanın başka bir tarifi; aşınma, katı cisim yüzey bölgesinden tribolojik zorlanma sonucu sürekli ilerleyen malzeme kaybıdır (Demirci, 1982).

Aşınma mekanizmaları, sürtünme süresince meydana gelen kompleks değişikliklere bağlı olarak tanımlanmaktadır. Genelde aşınma, tek bir aşınma mekanizması süresince yer almamaktadır. Sistemde bu şekilde, her bir tür aşınmadaki her bir aşınma mekanizmasının anlaşılması önemli hale gelmektedir. Aşınma, kimyasal bozulma veya iletişim ara yüzeyinde erime suretiyle mikro çatlama sebebiyle, fiziksel ayrılma olarak, malzemenin kaldırılması sonucuyla vuku bulmaktadır. Bu bağlamda aşınmanın birkaç tipi mevcuttur. Aşınma şiddeti, aşınma

yüzey pürüzlülüğü ve aşınma parçacık şekli, bize aşınmanın vasıflandırılması konusunda önemli bilgi vermektedir (Gür, 2006).

Aşınma, çeşitli makine ve teçhizatın kullanım ömürlerinin çok kısa olmasına dolayısıyla endüstriyel uygulamalarda maddi kayıplara sebep olan bir olgudur. Günümüzde aşınma mekanizmaları ve aşınmanın önlenmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Bu konunun, özellikle makine tasarımlarında dikkate alınması gerekir. Çünkü aşınma olayı kontrol edilemediği zaman makine ve teçhizatın hasara uğraması; zaman, malzeme, enerji ve emek kayıplarına sebeb olmaktadır. Aşınmanın en yoğun görüldüğü sektörler madencilik ve mineral endüstrisi, tarım ve kimya endüstrisi, malzeme için yüksek sıcaklık ve ağır çalışma koşulları içeren nükleer santraller olarak örneklendirilebilir. Bu sektörlerde kullanılan, mali değeri yüksek bazı makine parçaları, dozer çeneleri ve taş kırıcı silindirler gibi sürekli aşınmaya maruz kalan iş parçalarının çalışma şartları nedeniyle kullanılamayacak hale gelmeleri sonucu parça değişimi kaçınılmaz hale gelmektedir. Aynı zamanda aşınma, temas eden yüzeylerde oluşan sürtünme etkileriyle güç kaybına, ölçü ve yüzey toleranslarının bozulmasına sebebiyet vermektedir. Bu nedenle malzeme seçiminde aşınma, göz önüne alınması gereken en önemli unsurlardan birisidir (Büyükkelleci, 2008).

Son yıllarda, zirkonya seramikler; diş implant malzemesi ve protez malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Zirkonya diş implantları ve bazı vücut protezleri çalışırken sürtünmeden dolayı aşınmaya maruz kalmaktadırlar. Bu yüzden zirkonya seramiklerin aşınma özelliklerinin incelenmesi ve aşınma dayanımını arttırıcı çalışmaların yapılması önemlidir. Ayrıca Zirkonya, sıcaklık ve dengeleyici katkı oranlarına bağlı olarak monoklinik, tertragonal ve kübik kristal yapılarda bulunur. Zirkonyanın fazları arasında florit yapıdaki kübik zirkonya, geniş bir sıcaklık ve oksijen kısmi basıncında yüksek oksijen iyon iletkenliği ve kimyasal dengeye sahiptir. Böylece kübik zirkonya oksijen sensörü, ısı bariyeri ve katı oksit yakıt hücresi elektroliti olarak yaygınca kullanılır (Aktaş, 2008). Bir oksit seramiği olan zirkonya, yüksek dayanım, mükemmel aşınma direnci, yüksek sertlik, mükemmel kimyasal direnç, yüksek tokluk, refrakterlik özelliği ve iyi oksijen iyon

iletkenliği gibi birçok üstün özellik gösterir. Zirkonya, uygun tane boyutuna bağlı olan yüksek dayanım ve kırılma tokluğuyla bağdaşlaşmış yüksek sertlik özelliklerinden dolayı, bıçaklarda, makaslarda, plastik film, manyetik şerit ve diğer sert ve kaba materyalleri kesmede kullanılan jiletlerde kullanılabilir. Zirkonya, tetragonalden monokliniğe faz dönüşümu ile tokluğu geliştirilebildiği için özel bir malzemedir. Aynı zamanda kimyasal direnç, yüksek sertlik ve aşınma direnci kaygan yüzeylerde sürtünmeyi minimize etmek üzere iyi yüzey işlenme ve montaj sırasında veya operasyonda darbeden dolayı oluşan hasarı önlemek için yüksek tokluk özellikleri nedeniyle contalarda, valflarda ve pompa çarklarında kullanılabilir. Kimyasal kararlılığı sebebiyle ortopedik implantlarda ve ısıl şok direnci ve aşınma direnci sebebiyle refrakter uygulamalarda kullanılabilir. Ayrıca dirençli ısıtma elemanları, oksijen sensörleri ve katı oksit yakıt hücrelerindeki elektrolitler de zirkonyadan yapılabilir. Zirkonyanın bu tip elektriksel ve elektronik uygulamaları oldukça yüksek elektronik iletkenliğine ve tamamen stabilize edilmiş malzemenin yüksek oksijen iyon iletkenliğine bağlıdır (Arın, 2007).

Bu çalışmanın amacı; farklı oranlarda Co_3O_4 katkılı %8 mol yitriya ile kararlı hale getirilmiş kübik zirkonya (8YSZ) seramiklerin tribolojik özelliklerini araştırmaktır. Ağırlıkça %1-15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ seramiklerin kuru kayma şartlarında, Al_2O_3 aşındırıcı bilya kullanarak ball-on-disc aşınma test cihazında aşınma deneyleri yapılmış ve aşınma miktarları hesaplanmıştır. Aşınma sonrası numunenin yüzey özellikleri, profilmetre ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Aşınmanın meydana geldiği bütün sistemlerde aşınmaya karşı tasarım açısından bütün önlemler alındıktan sonra kullanılan konstrüksiyon elemanlarının ve takım malzemelerinin aşınmaya karşı korunması hem işletme ekonomisi hem de sistemin sağlıklı çalışabilmesi açısından son derece önemlidir. Aşınma temelde bir malzeme yüzeyi problemi olduğu için aşınmanın önlenmesine veya yavaşlatılmasına yönelik önlemler malzeme yüzeyinde yoğunlaştırılmıştır (Nair ve ark., 2000; Yıldızlı, 2002).

Yapılan çalışmalarda azotlu ortamdaki aşınmanın, karbondioksitli ortamda meydana gelen aşınmadan daha fazla olduğu ispat edilmiştir. Yüzeyler arasında bulunan oksit, CO_2, nem ve N gibi maddeler adhesiv aşınma miktarının azalmasını sağlar (Odabaş, 1987; Kılınç, 1993; Korkut, 1991).

Hurricks yaptığı çalışmalarında aşınma durumunda malzemelerin davranışını; gerilme seviyelerine, temas şekline, ortaya çıkan ısıya ve çevrenin doğasına bağlı olarak tarif etmiş ve bunların sonucu olarak aşınmanın bir sistem özelliği olarak araştırılması gerektiğini belirtmiştir (Hurricks, 1972; Hurricks, 1973).

Yu ve Bhole (1990), Kanada ekonomisinin aşınmadan kaynaklanan yıllık 3,9 milyar dolar kaybı olduğunu ve bu miktarın yalnız abrasif aşınmadan dolayı meydana gelen kısmının yılda 2,5 milyar dolar dolaylarında olduğunu bildirmişlerdir. Almanya'da ise abrasif aşınmadan kaynaklanan maddi zararın yıllık 5 milyar DM'dan fazla olduğu belirtilmiştir. Bu maddi değerlerin endüstriyel alanlara göre dağılımı; metalürji dallarında 2 milyar DM, linyit ve antrasit madenciliğinde 1,5 milyar DM, öğütme, ziraat, inşaat iş kollarında ise 1 milyar DM ve plastik imalat sanayinde 0.5 milyar DM olarak belirlenmiştir (Karamış, 1985; Tarhuni, 1996; San ve ark., 1996).

San ve arkadaşlarının 1997 yılındaki çalışmalarında, OECD araştırma grubunca yapılan bir araştırmada, aşınmadan dolayı oluşan ekonomik kaybın

A.B.D.'de Gayri Safi Milli Hasıla'nın % 2,5'ni, Almanya'da ise % 4.5'ni meydana getirdiğini belirtmişlerdir (San ve ark., 1997).

Aşınma yüzeyin hemen yakınındaki malzemenin aşırı gerilmelerinin sonucunda birbiri ile etkileşim durumundaki makine parçalarının hasara uğramasına neden olmaktadır. Aşınma, parçanın boyutsal değişikliğini veya yüzey hasarını sonuçlandırarak titreşim veya eksen kaçıklığı gibi ikincil problemlere neden olur. Gerilimli yüzeyde veya yüzeye yakın bölgede oluşan çatlakların ilerlemesi bazen parçaların kırılmasına yol açabilir. Bu durum makinalara ciddi zarar verir ve büyük malikayıplar meydana gelir (Kaluç, 2000; Aydın, 2009).

Makinelerde ortaya çıkan arızaların ve konstrüksiyon elemanlarının kullanım dışı kalmalarının en önemli sebeplerinden birisi, hatta en önemlisi aşınmadır. Aşınma çoğu zaman makine veya sistemin teknik ömrünü tayin eder. Sürtünme nasıl bir enerji kaybı ise aşınma da tekrar kazanılamayan bir madde kaybı sebebidir. Bu yüzden, dünyada her yıl önemli ölçüde ekonomik kayıplar meydana gelmekte, buna paralel olarak, kayıpların önlenebilmesi için çeşitli tedbirler geliştirilmeye çalışılmaktadır (Güneş, 2006; Aydın, 2009).

Son yıllarda sağlanan gelişmelerle, aşınma dayanımını arttırmaya yönelik yüzey kaplama teknikleri, mühendislik takım ve elemanlarının seçim ve tasarımında çok önemli değişikliklere sebep olmuştur (Güneş, 2006; Aydın, 2009). Aşınmaya karşı alınan tedbirler aşınmayı tamamen ortadan kaldırmayıp, aşınmanın türüne ve tribolojik faktörlere bağlı olarak aşınma hızını yavaşlatmak sureti ile malzemelerin çalışma ömrünü arttırır (Nair ve ark., 2000; Yıldızlı, 2002).

Zirkonya (ZrO_2) üstün özellikleri olan bir seramik malzemedir. Düşük ısıl iletkenliği, iyi korozyon direnci ve dönüşüm toklaştırıcı etkisi nedeniyle yüksek kırılma tokluğu sayesinde özellikle yüksek sıcaklığa maruz kalınan ortamlarda koruyucu olarak (termal bariyer) ve aşınmaya dirençli malzeme olarak kullanılmaktadır (Yılmaz, 1992; Ramasw, 1999).

Battez ve arkadaşları (2008), yaptıkları çalışmada CuO, ZrO_2 ve ZnO

nanopartikülleri yağ katkısı olarak kullanmışlardır. Yağ olarak polyalphaolefin seçilmiştir. ZnO, CuO ve ZrO_2 partiküller sırasıyla 20, 30-50 ve 20-30 nm büyüklüklerindedir ve yağa ağırlıkça %0.5, %1.0 ve %2.0 oranlarında katılmışlardır. Block-on-ring kullanılan test düzeneğinde 31 HRC sertliğinde, AISI 1045 çeliğinden bir ayrıtın uzunluğu 12.7 mm, küp bir bloktan ve blokla temas halinde, 65-66 HRC sertliğinde, AISI D3 çeliğinden 60 mm çapında halka şeklinde bir aşındırıcı karşı malzemeden faydalanılmıştır. Testler 165 N yük altında, 2 m/s hızla, 3066 m mesafe kat edilerek gerçekleştirilmiştir. Blokların aşınma yüzeylerinde bulunan elementler SEM ve EDS analizleri ile belirlenmiştir. Sonuç olarak, bütün nanopartikül içeren yağların sade yağa göre sürtünme katsayısını ve aşınmayı azalttığı gözlemlenmiştir. ZrO_2 ve ZnO içeren karışımlar birbirlerine benzer aşınma ve sürtünme davranışları sergilerken CuO içerenler daha farklı özellikler göstermiştir. En üstün tribolojik özelliklere %0.5 konsantrasyonundaki ZnO ve ZrO_2 katkılı çözeltilerde rastlanmıştır. İlginç bir durum ise tüm çözeltiler içinde %2.0 CuO içeren çözeltinin en yüksek sürtünme katsayısına sahip iken bu konsantrasyonda en düşük aşınmaya sahip olmasıdır. Bu durum aşınma ve sürtünme parametrelerinin yağ seçiminde birlikte dikkate alınması gerektiğinin bir kanıtı niteliğindedir. Ayrıca yağdaki artan katkı konsantrasyonunun aşınma yüzeylerinde katkı maddelerinin birikimine yol açtığı, ancak bu birikimin farklı tribolojik etkilere neden olabileceği anlaşılmıştır.

Alüminanın aşınması ve sürtünmesi mikroyapı değişikliğiyle azaltılabileceği Zum Gahr tarafından gösterildi. Bir CO_2 lazer kullanarak alüminanın yüzey değişikleri aşınmada önemli bir azalma gösterdi fakat sürtünme katsayısı nispi olarak yüksek kalmıştır (0.4-0.8). Zum Gahr ayrıca alumina ve zirkonyanın azalan tane boyutu aşınmayı önemli bir şekilde azaltacağını gösterdi (Zum Gahr, 1996).

Woydt ve arkadaşları bazı zirkonya esaslı seramikler geliştirdiler (Woydt, 1991). Bu malzemeler üzerine uygulanmış kayma testleri sürtünme katsayılarının 0.5-1 arasında değiştiğini gösterdi. Zirkonyanın sürtünme katsayısı üzerine çevrenin etkileri Stochawiak ve arkadaşları tarafından yoğun bir şekilde çalışıldı (Stachowiak ve ark., 1993). Onlar havada zirkonyanın sürtünme katsayısının 0.5 ve 0.64 aralığında normal yükün (2-5 N) bir fonksiyonu olarak değiştiğini gösterdiler.

Alumina ve zirkonyanın kendiliğinden uyumlu kuru kayma testleri Kerkwijk tarafından yapıldı. Deney sonuçları, zirkonyanın zirkonya seramiğe karşı kayma testlerinde 0.8'e kadar yüksek bir sürtünme katsayısı gösterdi ve alumina seramiğe karşı alumina kayma testinde ise 0.55 değerinde bir sürtünme katsayısı gösterdi (Kerkwijk, 1999). İnce taneli zirkonya seramikler He tarafından geliştirildi (He, 1995). Sinterleme işlemi yüksek aşınma dirençle sonuçlanan zirkonya seramikler optimize edilmiştir. Zirkonya ile toklaştırılmış alüminanın optimize edilmiş bir sinterleme işlemi Kerkwijk tarafından gerçekleştirilmiştir (Kerkwijk, 1999). Hacimce %11 ZrO_2 ve hacimce %89 α-alüminanın oluşturduğu kompozisyon aşırı yüksek bir aşınma dirençli malzeme olduğunu gösterdi. Bu malzemeler üzerine uygulanmış olan kendiliğinden uyumlu kuru kayma testleri aynı zamanda nispi olarak yüksek bir sürtünme katsayısına ($f \cong 0.43$) sahip olduğunu gösterdi.

Sert yüzeyler arasında ince yumuşak bir ara yüzey tabakasının olması sürtünmeyi azaltabileceği bilinmektedir (Halling, 1981). Sürtünme katsayısının değeri Halling tarafından gösterildiği gibi ara yüzey tabakasının kalınlığının bir fonksiyonu olarak değişiklik gösterir (Halling, 1981). Bu fikir Wang ve arkadaşları tarafından kısmen dengelenmiş zirkonyaya uyguladılar (Wang, 1993). Wang ve arkadaşları kısmen dengelenmiş zirkonya seramik 50 nm kalınlığında bakır oksitle kaplandı. Kuru kayma testleri 0,98 N normal yükle ve 12 mm/s kayma hızıyla bu malzemelere uyguladılar ve elde edilen sürtünme katsayısının 0.2 değerinden düşük olduğunu gösterdiler.

Zirkonya seramik tozları, ısıl püskürtme yöntemleri kullanılarak metal yüzeyine başarıyla kaplanabilmektedir. Bu kaplamaların yoğunlukları, içerdikleri gözeneklerinden dolayı düşük olur. Püskürtme teknikleri ile üretilen zirkonya kaplamalar 1975 yılından itibaren gittikçe önem kazanmışlardır. Zirkonyanın ergime noktası çok yüksek (2710 °C) ve henüz plazma yöntemi iyi gelişmemiş olduğundan bu tarihten önce malzemenin kaplanması pek mümkün olamamıştır (Yılmaz, 1992).

Zirkonyumun, sağlam oluşu ve korozyona olan direncinden dolayı Diş hekimliğinde kullanımı gündeme gelmiştir. Sertlik ve dayanıklılık açısından

alüminyuma göre daha üstün mekanik özelliklere sahiptir (Küçükoğlu, 2008).

Luthardt 2002'de yaptığı araştırmada 40 adet disk şeklinde örnek kullanmıştır (36 x 3mm). Örneklerin üzerini porselen kaplamıştır, daha sonra basınç altında ve değişik grenlerdeki frezeler kullanarak aşındırma yapmıştır. Bu tip aşındırmaların zirkonyum üzerine etkisi olmadığı ancak örneklerin iç yüzeyinde aşındırma yapıldığında kırılma direncinin %50 düştüğü görülmüştür (1419 MPa/680 MPa) (Luthardt ve ark., 2002).

Basu ve arkadaşları ZrO_2- TiB_2 kompozitlerini araştırmış ve hacimce %30 TiB_2 olan tam olarak yoğun tetragonal ZrO_2 kompozitlerinin 10 $Mpa.m^{1/2}$ kırılma tokluğuna ve 13 GPa değerinde sertliğe sahip olduklarını bulmuştur. Kalıntı gerilmeler tetragonal ZrO_2 matris dönüşebilirliğinde ve kompozitlerin genel tokluğunda önemli rol oynar ve TiB_2 çatlak sapması aktif ve önemli bir toklaştırma mekanizmasıdır. Yttria dağılımı, t-ZrO_2 fazının dönüşebilirliği ve dönüşüm tokluğu kontrolünde ek bir değişken olarak tanımlanmıştır (Basu ve ark., 2002).

Yapılan literatür incelemesinde, bir çok alanı kapsayan geniş bir kullanım yelpazesine sahip ZrO_2 seramiklerin aşınma özelliklerinin incelendiği çalışmalar bulunmakla birlikte kübik zirkonya (8YSZ) seramiklerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği gösterilen Co_3O_4'in aşınma dayanıma etkisi ile ilgili bir çalışmaya raslanmamıştır (Aktaş ve ark., 2015). Yapılan tez çalışması bu bakımdan özgündür ve bulgular bu alandaki literatüre katkı yapmıştır.

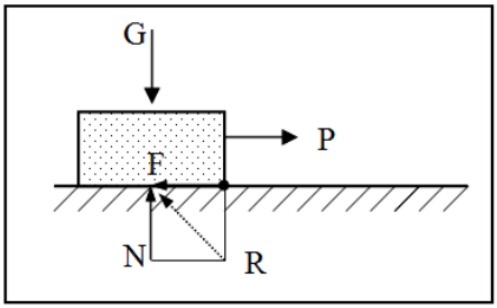
2.1. Sürtünme

Sürtünme katı bir cismin, temas ettiği bir başka cisme göre teğetsel olarak hareket ettiğinde veya böyle bir hareketi ürettiği anda, bu harekete karşı oluşan dirençtir. Bir katı cismin kendisiyle temas eden başka bir cismin bağıl hareketine veya hareket ihtimaline karşı gösterdiği dirençtir (İpek, 1987; İpek 1992). Sürtünme, birbirine göre izafi hareket eden cisimlerin birbirlerine uyguladıkları direnç olarak da tanımlanabilir (Aydın, 2009).

Gerçek anlamda kuru sürtünme, her türlü yabancı maddeden tam olarak arındırılmış yüzeylerin, mutlak vakumda birbirlerine göre izafi olarak hareket ettirilmeleri (sürtünmeleri) halinde meydana gelmektedir. Oysa mevcut sistemlerin büyük çoğunluğu normal atmosfer şartlarında çalışmaktadır. Atmosfer şartlarındaki sürtünme durumunda ise, yüzeyler çok iyi bir şekilde temizlenmiş olsalar dahi, yüzeyde çok ince oksit tabakaları oluşmaktadır. Bu oluşum, yüzeylerin aşınma ve sürtünme davranışlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Genel olarak, yabancı maddelerden arındırılmış yüzeylerin atmosfer şartlarındaki sürtünme hali, pratik anlamda "kuru sürtünme" olarak kabul edilmektedir.

2.1.1. Sürtünme teorisi

G ağırlığındaki bir cismin kuru ve yağlanmamış yatay bir düzlem üzerinde olduğunu kabul edelim. Yüzey cisme, N dayanma kuvveti ile karşı koyacak ve cismi dengeleyecektir. Cisme yatay P kuvveti uygulanacak olursa, iki kuvvetin meydana getirdiği dengedeki kuvvetler değişmediği halde, P kuvveti yalnız kuvvet olacağı için sistemin dengesi bozulur. Cisimde hareket P'nin belirli bir değerinden sonra başlar. Buna sebep birbirine değen iki yüzey arasında meydana gelen ve P kuvvetini dengelemeye çalışan F sürtünme kuvvetidir (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Sürtünme kuvveti (Bayvas, 1978).

Şu halde hareket ancak P belirli bir değer aldıktan sonra başlıyor demektir. Bu durumda P=F'dir. F kuvveti statik sürtünme kuvvetinin en büyük değerini aldıktan sonra ancak cismin harekete geçebildiği açıktır. Eğer F<P ise, cisim harekete başlamış veya hareket halindedir. Yapılan deneyler sonucunda, $\frac{\mathbf{F}}{\mathbf{G}} = \frac{\mathbf{P}}{\mathbf{G}} = \mu$ olduğu görülmüştür. μ oran sabiti "Sürtünme Katsayısı" adını alır. Statik dengede F'nin alabildiği değere statik sürtünme kuvveti denir. Şekil 2.2.'de statik sürtünme kuvveti görülmektedir.

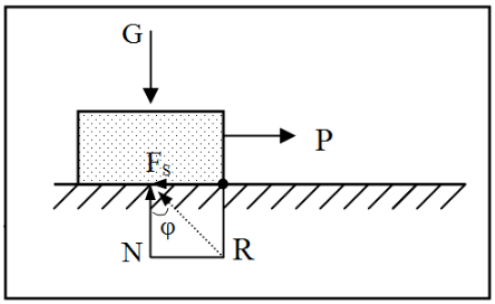
$$\boldsymbol{F_s = N.\mu_s} \qquad (2.1)$$

Burada;

N: Dayanma kuvveti

μ_s : Statik sürtünme katsayısı

F_s : Statik sürtünme kuvvetidir.



Şekil 2.2. Statik sürtünme kuvveti (Bayvas, 1978).

Cisim hareket haline geçtikten sonra sabit hızlı bir hareket yapabilmesi için P kuvvetinin şiddetinin azaltılması gerektiğini deneyler göstermiştir. Buradan P=F eşitliğinden, F sürtünme kuvveti de azalacaktır. Bu durumda meydana gelen

sürtünme kuvvetine kinetik sürtünme kuvveti denir (Mert, 2007).

$$F_k = N.\mu_k \quad (2.2)$$

μ_k: Kinetik sürtünme katsayısıdır

F_k **:** Kinetik sürtünme kuvveti

Sürtünme olayını açıklamaya çalışan birçok teori vardır. Bunlardan gerçeğe en yakın olanı Bowden ve Tabor'un kaynak bağları teorisidir. Bowden ve Tabor (1950), sürtünmenin meydana gelmesinde en büyük etkenin, yüzeylerin birbirine değen tepeciklerindeki adhezif veya kohezif bağlar olduğunu, bunlara ilaveten tepeciklerdeki deformasyonların da direnç arttırıcı etkilerinin bulunduğunu ileri sürmüşlerdir. Bowden ve Tabor sürtünme kuvvetini klasik olarak 3 temel başlık altında ifade etmişlerdir (Bhushan, 2000).

1-Sürtünme kuvveti belli temas ortamına bağlı değildir.

2-Sürtünme kuvveti, normal yük ile orantılıdır.

3-Kinetik sürtünme kuvveti hıza bağlı değildir ve statik sürtünme kuvvetinden azdır.

Sürtünme kanunu ile ilgili,

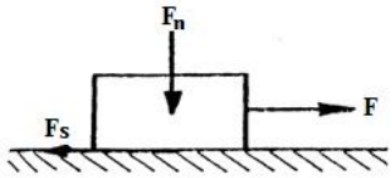
1. Sürtünme kuvveti, cisme uygulanan yükle doğru orantılıdır. (Amonton'un 1. Kanunu)
2. Sürtünme kuvveti, cisimlerin temas ettiği alandan bağımsızdır. (Amonton'un 2. Kanunu)
3. Kinetik sürtünme kayma hızından bağımsızdır. (Coulomb Sürtünme Kanunu)

temel kanunlar vardır.

Pratikte sürtünme denilince akla gelen bu sürtünmedir. Aşınma, enerji kaybı ve sıcaklık yükselişi gibi olaylar kuru sürtünme sonucu oluşmaktadır. Fiziksel anlamda kuru sürtünme sadece vakum ortamında mevcuttur. Kuru sürtünme olayı incelenirken temas yüzeylerinin pürüzlü oldukları ve tam olarak temiz olmadıkları dikkate alınmaktadır.

Kuru sürtünme, hiçbir şekilde yağlanmamış iki katı cisim birbiri üzerinde kayma hareketi yaptığında karşılaşılan sürtünme halidir. En hassas işlemede bile yüzey pürüzleri mevcut olacağından, cisimlerin birbirlerine gerçekten temas ettikleri alan küçüktür ve bu noktalardaki yüzey basıncı hesaplanan ortalama basıncın çok üstündedir, bu yüksek basınç plastik deformasyona, temas eden tepeciklerin birbirleriyle kaynak bağlantısı oluşturmasına sebep olur. Hareket sürecinde bu kaynak noktacıkları kesilir, kopar; sürtünmeyi oluşturan başlıca etken de bu kesme kuvvetleridir.

Teorik olarak birbirine göre bağıl hareket yapan iki elemanın yüzeyleri arasında oluşan kuru sürtünme Şekil 2.3'de ifade edilmektedir.



Şekil 2.3. İzafi hareket eden yüzeyler arasındaki teorik kuru sürtünmenin şematik gösterimi.

$$\mu = F_s/F_n \quad (2.3)$$

$$F_s = \mu . F_n \quad (2.4)$$

F_n : Normal Kuvvet

F_T : Teğetsel Kuvvet

F_s : Sürtünme Kuvveti

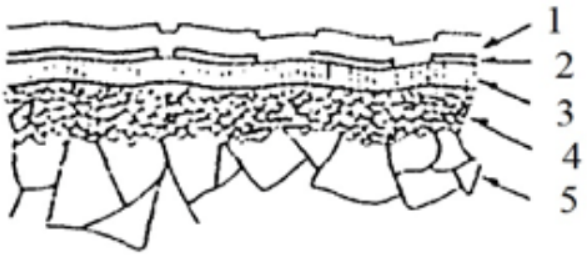
μ : Sürtünme Katsayısı

Şekil 2.3. 'de cisimlerin herhangi birine teğetsel kuvvet uygulanırsa iki durum ortaya çıkar:

1. Cisimlerden herhangi birine uygulanan teğetsel kuvvet, sürtünme kuvvetine eşit ve zıt yönlü ise cisimler birbiri üzerinde kaymazlar. Bu durumda hareket olanağı mevcut olmadığından yüzeyler arasında statik sürtünme adı verilen bir direnç oluşur.
2. Cisimlerden herhangi birine uygulanan teğetsel kuvvet, sürtünme kuvvetinden büyük ve zıt yönlü ise cisimler birbiri üzerinde kayarlar. Aşınma

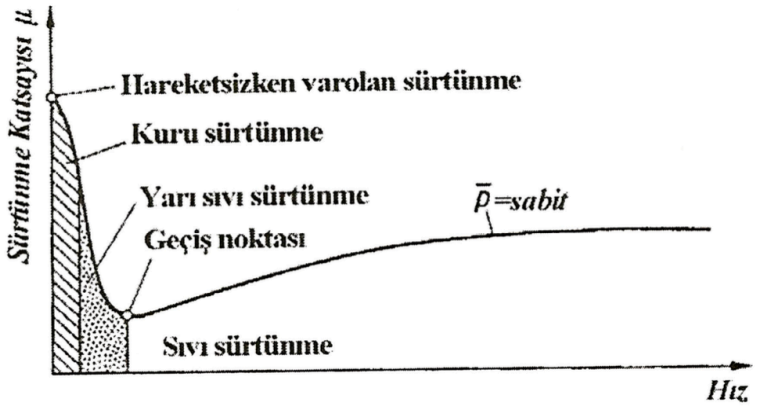
ve enerji kaybı bu tür sürtünme durumlarında meydana gelir.

Temas halindeki yüzeylerin arasında çevresel koşulların etkisiyle oksit, yağ, su buharı, pislik vs. gibi yüzey tabakaları bulunur. Absorpsiyon yolu ile oluşan bu tabakalar metal yüzeylere kuvvetli bir şekilde bağlanmakta ve sadece etkin fiziksel ve kimyasal yöntemlerle temizlenebilmektedir. Bu olaylar sonucunda sürtünme mekanizması Şekil 2.4'de gösterildiği gibi yük uygulanmadan önce temas halindeki tabakalar arasında bir bağlantı oluşturur. Bu tabakaların izafi hareketi sonucu yırtılmadan kaynaklanan metal-metal teması oluşur. Bu temas bölgelerinde soğuk kaynama olayı meydana gelir. Sürtünme esnasında bu kaynama noktaları ya hareketi engeller ya da yüzeylerden parçalar koparak yırtılmasına ve dolayısıyla makine parçalarının aşınarak kullanılmaz hale gelmesine neden olur. Bu duruma göre sürtünme metal kaynak bağları ile çeşitli kimyasal bileşikleri içeren tabakalar arasındaki bağların oluşturduğu dirençtir.



Şekil 2.4. Kuru sürtünme halinde yüzeylerin durumu; 1. Pislik tabakası, 2. Absorbsiyon tabakası, 3. Oksit tabakası, 4. Soğuk şekillendirilmiş tabaka, 5. Metal içi.

İki katı cisim arasındaki izafi harekete göre sürtünme hallerinden birinden diğerine geçiş ve sürtünme katsayısının kalitatif değişimi Stribeck Eğrisi'nden Şekil 2.5'de görülebilir (Babalık, 2006).



Şekil 2.5. Stribeck Eğrisi (Babalık, 2006).

2.2. Aşınma

Aşınma çok geniş tanımlara sahiptir. ASLE (American Society of Lubrication Engineers)' ye göre aşınma; mekanik etkilerle malzeme kaybı olarak tanımlanır. OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) araştırma grubuna göre, yüzeyde relatif hareketin sonucu olarak cisimden sürekli malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Alman DIN 50320 normuna gore ise aşınma, kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı, gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenilmeyen yüzey bozulması şeklinde tanımlanmaktadır (Peterson, 1976; Aydın, 2009).

Makinelerde ortaya çıkan arızaların ve konstrüksiyon elemanlarının kullanım dışı kalmalarının en önemli sebeplerinden birisi, hatta en önemlisi aşınmadır. Aşınma çoğu zaman makine veya sistemin teknik ömrünü tayin eder. Sürtünme nasıl bir enerji kaybı ise aşınma da tekrar kazanılamayan bir madde kaybı sebebidir. Bu yüzden, dünyada her yıl önemli ölçüde ekonomik kayıplar meydana gelmekte, buna paralel olarak, kayıpların önlenebilmesi için çeşitli tedbirler geliştirilmeye çalışılmaktadır (Güneş, 2006; Aydın, 2009).

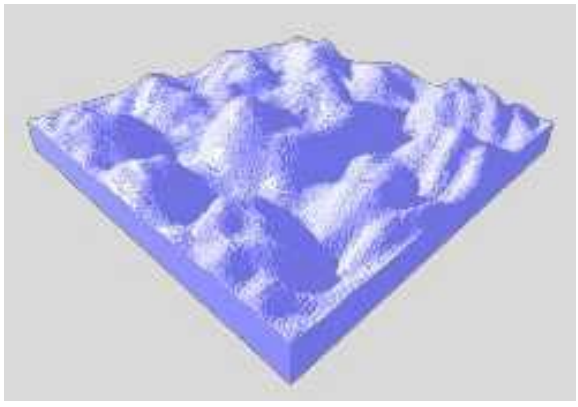
Aşınmanın meydana geldiği bütün sistemlerde aşınmaya karşı tasarım açısından bütün önlemler alındıktan sonra kullanılan konstrüksiyon elemanlarının ve

takım malzemelerinin aşınmaya karşı korunması hem işletme ekonomisi hem de sistemin sağlıklı çalışabilmesi acısından son derece önemlidir. Aşınma temelde bir malzeme yüzeyi problemi olduğu için aşınmanın önlenmesine veya yavaşlatılmasına yönelik önlemler malzeme yüzeyinde yoğunlaştırılmıştır (Nair ve ark., 2000; Yıldızlı, 2002).

Son yıllarda sağlanan gelişmelerle, aşınma dayanımını arttırmaya yönelik yüzey kaplama teknikleri, mühendislik takım ve elemanlarının seçim ve tasarımında çok önemli değişikliklere sebep olmuştur (Güneş, 2006; Aydın, 2009). Aşınmaya karşı alınan tedbirler aşınmayı tamamen ortadan kaldırmayıp, aşınmanın türüne ve tribolojik faktörlere bağlı olarak aşınma hızını yavaşlatmak sureti ile malzemelerin çalışma ömrünü arttırır (Nair ve ark., 2000; Yıldızlı, 2002).

2.2.1. Aşınmayı etkileyen faktörler

İlk yüzey durumu (topografya), yük altında pürüzlerin davranışı, yükleme ve kayma hızı gibi işlem koşullarıdır. Çok iyi parlatılmış yüzeyler bile mükemmel pürüzsüzlüğe ve düz yüzeye sahip olamazlar değişen oranlarda yüzey pürüzlülüğü içerirler (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Yüzey topografyası

İki yüzey karşılıklı yüklendiğinde, sadece yüksek noktalardan ya da pürüzlüklerden temasa geçer. Gerçek temas alanı görünen temas alanından çok daha küçük olduğundan, pürüzlükler çok yüksek yüklemeye maruz kalırlar.

Aşınmayı etkileyen faktörleri şu şekilde sınıflandırabiliriz (Kayalı, 1993; Aydın, 2009);

a) Ana malzemeye bağlı faktörler: Malzemenin kristal yapısı, malzemenin sertliği, elastisite modülü, deformasyon davranışı, yüzey pürüzlülüğü ve malzemenin boyutu.
b) Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi.
c) Ortamın etkisi: Sıcaklık, nem, atmosfer.
d) Servis şartları: Basınç, hız, kayma mesafesi.

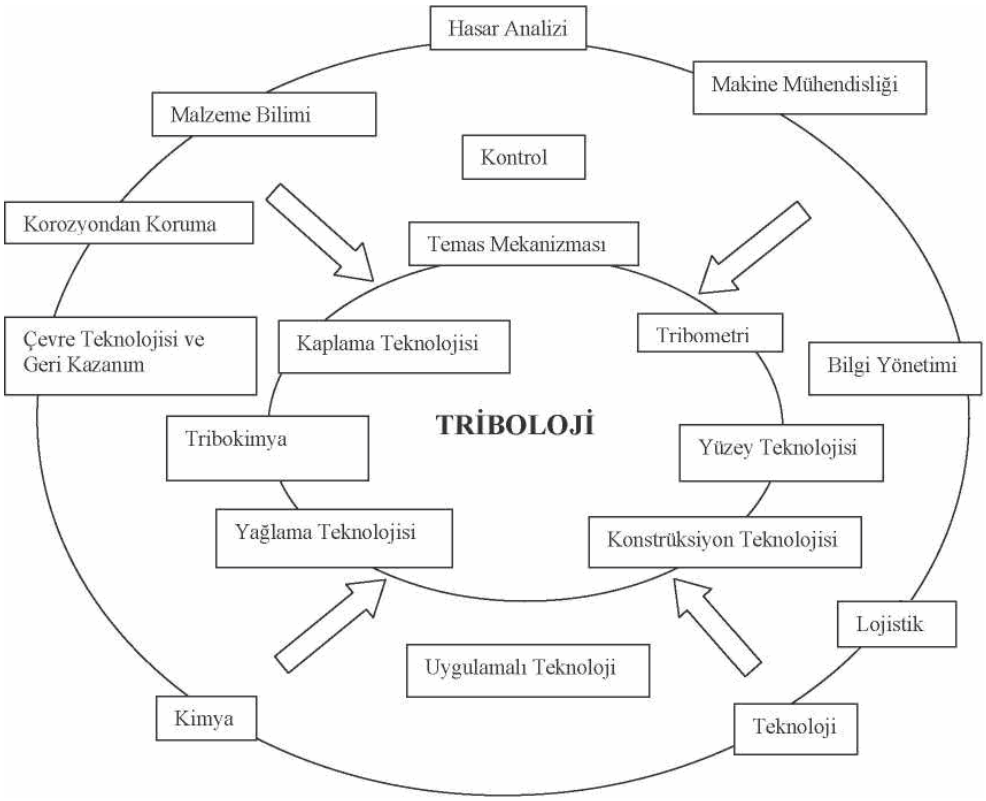
Sürtünerek çalışan bütün makine elemanlarında kaçınılmaz olan ve kompleks bir sistem özelliği gösteren aşınma, sanayide birçok tribolojik sistemlerde korozyonun ve yorulmanın yanı sıra üçüncü büyük problemdir (Odabaş, 1991; Aydın, 2009). Bu nedenden dolayı da günümüz teknik sistemlerindeki araştırmalar sürtünme ve aşınmayı azaltma ve kontrol etme çalışmaları şeklinde yoğunlaşmıştır. Sürtünmenin ve aşınmanın azaltılmasıyla malzeme kaybı önlenerek boyut hassasiyeti sağlanırken enerji israfı da önlenmiş olur (Karamış, 1988).

2.2.2. Triboloji

2.2.2.1. Tribolojinin esasları

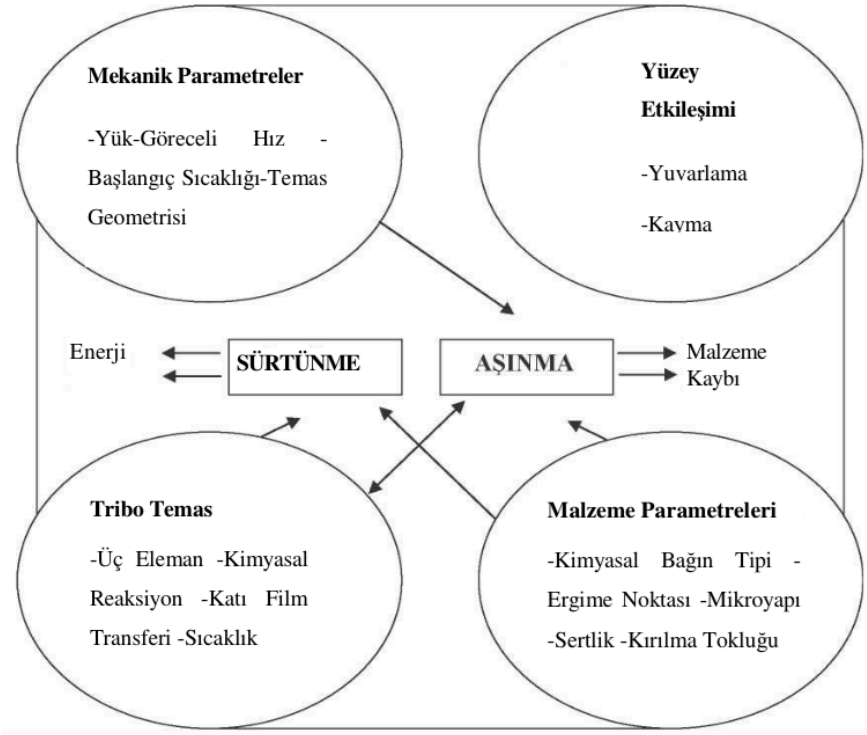
Aşınma probleminin çözümü ile uğraşan bir bilim dalı olan triboloji ilk defa 1966 yılında İngiltere hükümet komitesi tarafından ele alınmıştır. Komite, İngiltere endüstrisinde triboloji prensiplerinin esaslı bir biçimde uygulanması sonucunda elde edilecek tasarrufun araştırmasını yapmıştır. 1966'da Peter Jos araştırmalarında maliyetlerdeki artışı dikkate alarak tribolojik dizayn ile elde edilen tasarrufun yıllık £515 milyonu bulduğunu göstermiştir. Ayrıca araştırmalar Almanya ve Amerika'da da aynı durumu göstermektedir (Stachowiak ve ark., 1993). Bu araştırmalara dayanarak aşınmanın bilinmesi ve önlemesi için gerekli tedbirlerin alınması, hızla artan nüfusun ihtiyaçlarını sınırlı olan doğal kaynakların ekonomik bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır (Ghasemi, 2012). Triboloji birbirine izafi hareket yapan

ve temasta olan yüzeylerde sürtünme, aşınma ve yağlama konulan ile bunlara bağlı konuları inceleyen bilim dalıdır. Triboloji, malzemenin aşınmasında en az anlaşılan henüz tartışılmakta ve gelişmekte olan yeni bir disiplindir. Bununla birlikte malzemelerin aşınma direnci basit bir malzeme özelliği olmayıp sistem içerisindeki bileşenleri ve tüm malzemeleri kapsar. Tribolojinin diğer bilimlerle ilişkisini gösteren şema Şekil 2.7.'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Tribolojinin diğer bilimlerle olan ilişkisi (Büyükkelleci, 2008).

Aşınmanın ve tribolojinin sınıflandırılması ve etkili olan faktörlerin şematik olarak_ gösterimi Şekil 2.8.'de verilmiştir (Büyükkelleci, 2008).



Şekil 2.8. Sürtünme ve aşınmayı etkileyen faktörler (Büyükkelleci, 2008).

2.2.2.2. Tiribolojik sistemi meydana getiren temel unsurlar

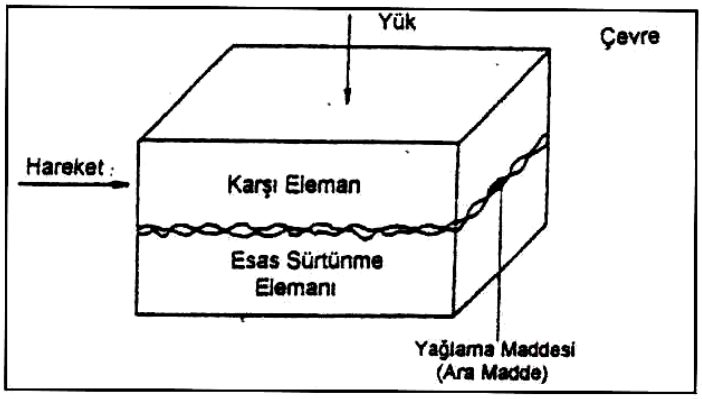
Aşınma olayının belirlenmesinde, tribolojik sistemi meydana getiren temel unsurların bilinmesi gerekir. Bir tribolojik sistemde genel olarak bulunabilecek 6 temel unsurdan hepsi veya bazıları aşınma olayını etkileyebilir. Şekil 2.9.'da şematik olarak verilen bu unsurlar şunlardır:

1. *Temel Sürtünme Elemanı:* Fiziksel ve kimyasal özellikleri ve durumu, yüzey yapısı, şekli tamamen belirli ve aşınması özel ilgi ile incelenen katı cisimdir.
2. *Karşı Sürtünme Elemanı:* Katı cisim, sıvı veya gaz olabilir. Karşı sürtünme elemanı ile temel sürtünme elemanı bir aşınma çifti oluştururlar.

3. *Ara Maddesi:* Temel sürtünme elemanı ile karşı sürtünme elemanı arasında katı, sıvı, gaz, buhar veya bunların karışımı şeklinde bir cisim bulunabilir. Örneğin; yüzey arasına girmiş kum taneleri veya aşınma esnasında yüzeylerden kopan parçacıklar da (eğer bunlar yüzey arasında kalıyorsa) ara maddesi olarak düşünülebilir.

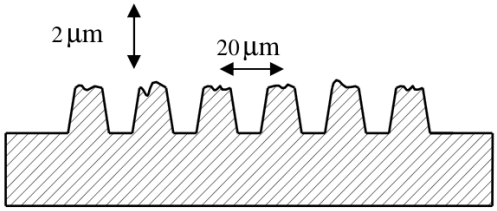
4. *Çevre:* Ortam sıcaklığı,nem miktarı, ortam basıncı gibi çevresel faktörler çevre koşullarını belirler.

5. *Yükleme:* Etki eden yükün (kuvvetin) büyüklüğü, şekli (statik, dinamik, darbeli, titreşimli vs.) doğrultusu ve zamana göre değişimi yüklemeyi meydana getirir.
6. *Hareket:* Temel sürtünme elemanının karşı sürtünme elemanına göre bağıl hareketinin cinsi (kayma, yuvarlanma, çarpma vs.) büyüklüğü, doğrultusu ile verilir. Aşınma miktarının belirlenmesinde hareket süresi önemli bir etkendir. Aşınmanın meydana gelmesinde gerekli bir unsurdur.



Şekil 2.9. Sürtünme ve aşınmayı etkileyen faktörler.

Aşınma olayının başlayabilmesi ve devamı için bir sürtünmenin olması gerekmektedir. Sürtünen iki cismin temas alanının büyüklüğünün aşınmaya büyük etkisi vardır. Malzeme yüzeyleri her ne kadar iyi işlenmiş olursa olsunlar, Şekil 2.10.'da görüldüğü gibi mutlaka yüzeyde çok sayıda girinti ve çıkıntıların, yani pürüzlülüklerin olduğu gözlenir (Yılmaz, 1997).



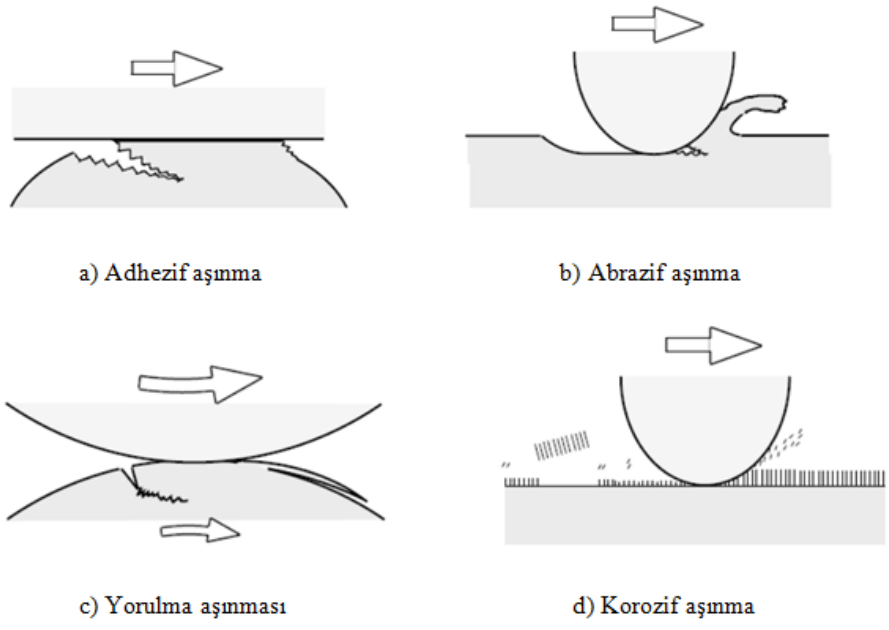
Şekil 2.10. Çok iyi torna edilmiş bir metal yüzeyinin mikroskop altındaki şematik görünüşü.

2.3. Aşınma çeşitleri

Pek çok aşınma mekanizması vardır. Bunları aşağıdaki ana başlıklar altında açıklamak mümkündür (Şekil 2.11).

a. Adhezif aşınma
b. Abrazif aşınma
c. Yorulma aşınma
d. Korozif aşınma

Aşınma olayına etki eden bir ya da birkaç etken değişik aşınma mekanizmalarını ortaya çıkarır. Bu aşınma mekanizmaları, abrasif aşınma %50, adhezif aşınma %15, erozif aşınma %8, korozyon aşınması %8, kimyasal aşınma %5, ve diğerleri %14 olmak üzere endüstride değişen oranlarda karşımıza çıkmaktadır. Bu aşınma mekanizmalarından en çok karşılaştığımız ise abrasif aşınmadır (TMMOB, 2003).



Şekil 2.11. Dört aşınma mekanizmasının şematik gösterimleri (Bhushan, 2001)

Mühendislik uygulamalarında aşınma çeşitlerini tanımlama ile ilgili terminolojide karışıklık yaşanmaması icin genellikle karşılaşılan dört ana aşınma

çeşidi araştırmacılar tarafından temel aşınma mekanizması olarak kabul görmektedir. Bunlar; adhezif aşınma, abrazif aşınma, yorulma aşınması ve korozif aşınmadır.

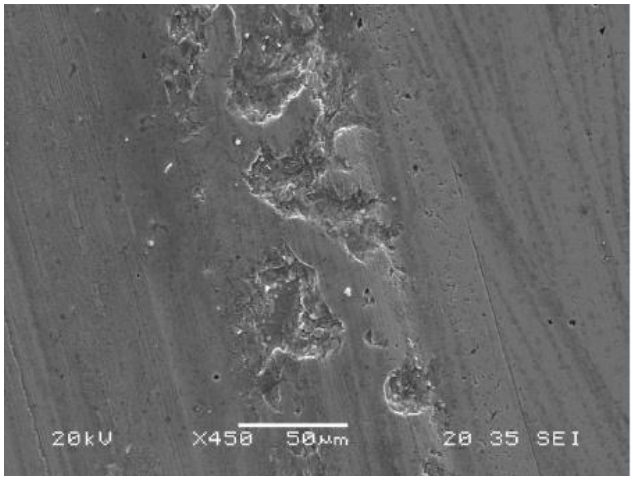
2.3.1. Adhesiv aşınma

Adhesiv aşınma türünde birbiriyle temas halinde bulunan iki metalin yüzeylerinin, yüksek basınç ve meydana gelen sıcaklığın yükselmesi ile birlikte, metallerin yüzey kısımlarında bir kaynama meydana gelir. Çalışma sırasında bu kaynaklar birbirinden ayrılırken, yüzeylerden ufak parçalar kopar. Bu şekilde meydana gelen aşınma adhesiv aşınma olarak adlandırılır.

Adhesiv aşınma, en sık rastlanan aşınma türü olmasına rağmen genellikle hasarı hızlandırıcı etkide bulunmaz. Adhesiv aşınma bir metal yüzeyinin başka bir metal yüzeyindeki bağıl hareketi sırasında birbirlerine kaynamış veya yapışmış yüzeydeki pürüzlerin kırılması sonucu ortaya çıkar.

Aşınma çiftinin yüzeyleri arasındaki tutma kuvvetleri (adhezif bağ mukavemetleri) eşit büyüklükte ise veya adhezif bağ mukavemeti büyük ise pürüz kopar ve malzeme kaybına neden olur. Eğer adhezif bağ kuvveti pürüz mukavemetinden küçük ise, pürüz kaynak noktasından kopar ve hiçbir malzeme kaybına neden olmaz. Adhezif aşınma sırasında iki sürtünme yüzeyi arasında üçüncü bir cisim meydana gelmektedir. Özellikle adhezif aşınmada kırılan parçalar ara yüzeyde serbest kalabileceği gibi metallerden birine bağlı kalarak da taşınabilirler. Parçacığın bir yüzeyden diğerine taşınmasına metal transferi denir (İpek, 1987; İpek 1992; Odabaş, 1991; Akkurt, 1990; Selçuk, 1994).

Kopma sonucu diğer cisme göre yumuşak olan malzemeden imal edilmiş cismin yüzeyinde boşluklar oluşur, diğer yüzeydeyse çıkıntılar meydana gelir ve iki yüzey arasına adhezif parçacıklar dökülür. Şekil 2.12'de Adhezif aşınmanın meydana geldiği yüzey görülmektedir.



Şekil 2.12. Adhezif aşınmanın meydana geldiği yüzey.

Adhesiv aşınmanın söz konusu olduğu durumlarda, sökülüp takılması ve tamir olması kolay olan parçaların diğerine göre yumuşak olması tercih edilir. Örnek verecek olursak, ana dişliye göre pinyon dişlinin yumuşak olması istenir. Adhesiv aşınma genellikle yataklarda, dişlilerde, kam mekanizmalarında ve demir yolarında çalışan teker-ray sistemlerinde görülür. Yüksek yükleme ve hız durumlarında yağlama aşınmasının azaltılması istenir. Yapılan çalışmalarda azotlu ortamdaki aşınmanın, karbondioksitli ortamda meydana gelen aşınmadan daha fazla olduğu ispat edilmiştir. Yüzeyler arasında bulunan oksit, CO_2, nem ve N gibi maddeler adhesiv aşınma miktarının azalmasını sağlar (Odabaş, 1987; Kılınç, 1993; Korkut, 1991).

Adhezif aşınma bağıl hıza, normal kuvvete, yüzeylerin sertliğine bağlıdır. Yüksek hız ve yüklerde görulen bu aşınma yüzeydeki oksit ve nem tabakasının etkisindedir. Temiz yüzeylerde ise kısmen düşük hızlarda meydana gelir. Yüzeylerden biri diğerine göre sert ise, kaynak bağlarının kopması yumuşak malzemede olur ve yumuşak malzeme sert malzemenin üzerine transfer edilir. Yüzeyler arasında sert malzeme parçacıkları, yani abrazif aşınmayı meydana getirecek şartların bulunması halinde adhezif aşınma meydana gelmez (İpek, 1987; İpek 1992; Selçuk, 1994).

Adhezif aşınma, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir. Adhezif aşınma olayı, yüzeylerin izafi hızına ve normal

kuvvete bağlıdır. Pratik uygulamalarda nispeten yüksek hızlarda ve yüklerde görülen bir aşınma şeklidir. Adhezif aşınma, sürtünmenin oluştuğu bütün kaynak birleşmelerinde meydana gelmemektedir. Kaynak noktalarının aşınmaya katılan kısmı k_a ile gösterilirse, aşınan malzeme hacmi Denklem 2.5 ile belirlenir (Bhushan 2000).

$$V_a=k_a.A_h.L \tag{2.5}$$

V_a : Aşınan malzemenin hacmi

k_a : Kaynak birleşim noktalarının aşınmaya katılan kısmı

A_h :Yükü taşıyan alan

L : Kayma mesafesi

Metallerin adhezif aşınmasında k_a değeri, $10^{-7}<k_a<10^{-2}$ arasında olur. Yüzeylerden birinin sertliği diğerine göre nispeten büyük ise kaynak bağlarının kopması yumuşak malzemelerde olur ve yumuşak malzeme sert malzemenin yüzeyine transfer edilir. Adhezif aşınmada yağlamanın etkisi çok büyüktür. Sınır sürtünme bölgesinde dahi yüzeylere yapışmış yağ tabakası büyük ölçüde adhezyon aşınmasını önler. Yüksek hız ve basınç altındaki yüzeyler arasına katkılı bir yağ konursa aşınma önlenebilir. Oksit veya nemden oluşan doğal tabakanın adhezif aşınma olayı üzerindeki etkisi büyüktür (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Malzeme özelliklerinin adezif aşınmaya etkisi (Ghasemi, 2012).

Malzeme Özellikleri	Adezif aşınma
Oksitli Yüzey	Az
Kübik kristal yapı	Çok
Hegzogonal Kristal yapı	Az
Yüksek deformasyon sertleşmesi	Çok
Yüksek sertlik	Çok
Yüksek elastiklik modülü	Çok
Yüksek ergime noktası	Çok
Yüksek yeniden kristalleşme sıcaklığı	Çok
Küçük atom yarıçapı	Çok

2.3.2. Abrasif aşınma

Sert ve keskin köşeli mineral tanelerinin metal yüzeyini mikroskobik bölgede çizerek talaş kaldırması ve malzeme içerisinde oldukça derinlerde değişiklik yapmasına abrasif aşınma denir. Bu aşınma farklı kristalografik yapıya sahip iki cisim arasında meydana gelir ve aşınma çifti arasında kaynaklaşma olayı oluşmaz (Gürleyik, 1986 a; Gürleyik, 1986 b). Abrasif aşınma yumuşak parça tükeninceye kadar kararlı bir şekilde devam eder.

Abrasif aşınma genelde endüstriyel alanlarda yaygın olan bir aşınma türü olup, katı malzemeler ya da hammaddelerin, taşınması, stoklanması, yüklenmesi ve boşaltılması sırasında sıkça ortaya çıkmaktadır. Aşınmayı gerçekleştiren parçacıkların ve aşınan metalin sertliği abrasif aşınma direncini önemli ölçüde etkiler. Metal sertliğinin abrasif aşındırıcı sertliğine oranı arttıkça abrasif aşınma hızı düşmektedir (TMMOB, 2003). Abrasif aşınma sert yabancı parçacıkların (metal oksit, metal parçacıkları, toz vb.) sürtünen iki yüzey arasında bulunmasından kaynaklanır. Sert ve keskin kenarlı tanelerin mikroskobik talaş kaldırması ve genellikle malzeme içinde oldukça derinlerde değişiklikler meydana getirmesidir.

Abrasif aşınma hızı, malzeme yüzeyine etki eden yük azaltılarak düşürülebilir. Böylece parçacıkların yüzeye daha az batması ve çapak kaldırılması sırasında daha az iz bırakması sağlanır.

Malzeme açısından abrasif aşınmayı azaltmak için;

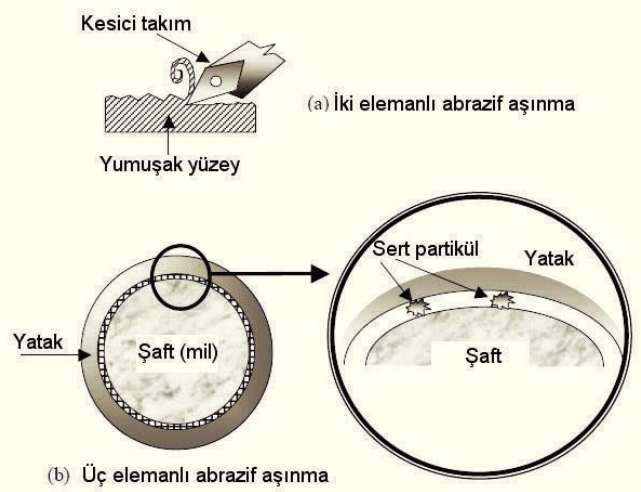
1. Daha sert alaşım kullanmak,
2. Sertlik arttırmak amacıyla ısıl işlem uygulamak,
3. Malzeme yüzeyini sert bir tabaka ile kaplamak,

tavsiye edilir. Bu önlemlerle abrasif aşınma hızını azaltmak mümkündür. Abrasif aşınma endüstriyel cihazlarda malzeme kayıplarının başlıca sebebidir. Aşındıran malzeme serbest halde iki metal arasında bulunuyorsa veya yalnız bir metali aşındıran sabit veya serbest taneler mevcut ise bu durumda;

- İki elemanlı abrasif aşınma,

• Üç elemanlı abrasif aşınma,

şeklinde gruplandırma yapmak_ mümkündür (Şekil 2.13.).



Şekil 2.13. İki elemanlı ve üç elemanlı abrasif aşınma oluşum ekileri.

Metal-metal sürtünmelerinde aşınma iki elemanlı abrasif veya adhesiv olarak başlayıp üç elemanlı abrasif olarak devam eder. Bu durumda araya giren toz, mineral taneleri, çizilme sonucu serbest hale geçen mikro talaşlar ve parçalanmış oksit parçacıkları üçüncü elemanı (ara malzemeyi) oluşturabilir. Serbest hale geçen mikro talaş parçacıkları genellikle ana malzemeden daha sert olduklarından (üç elemanlı) abrasif aşınma, aşınmayı hızlandırmaktadır. Endüstriyel makinelerdeki en önemli aşınma türü olan abrasif aşınmaya genel olarak aşağıda verilen yerlerde rastlanmaktadır.

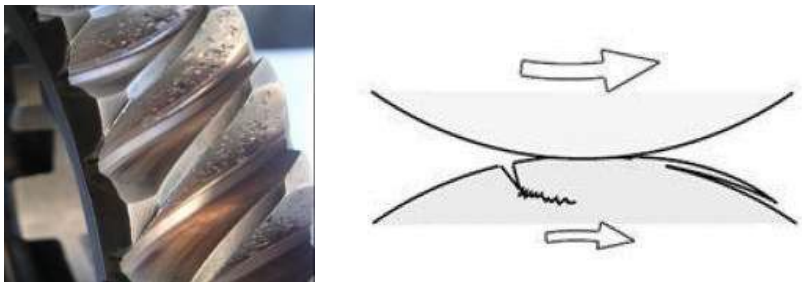
- Traktör, greyder gibi tarım ve iş makinelerinin bıçak ve tırnaklarında
- Cevher işleme ve öğütme tesislerinde
- Eleklerde
- Değirmenlerde
- Nakil makinelerinde

Bu gibi makine ve makine parçalarında yalnızca abrasif aşınmadan söz edilebileceği gibi, bunlardan başka aşınma türlerinin de birlikte görülmesi mümkündür.

2.3.3. Yorulma aşınması

Makine parçalarında tekrarlanan yüklere maruz kalmaları veya titreşimden dolayı zamanla yorulma meydana gelir. Özellikle, yüzeylerin sürekli ve değişken yüklere maruz kalmaları, yüzeyin hemen altında yorulma çatlakları oluşmasına neden olur. Bu mikro çatlaklar zamanla ilerleyerek, malzemenin yüzeyinden mikro parçaların kopmasına sebep olur. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya yorulma aşınması denir (Büyükkelleci, 2008). Temas halindeki İki yüzey, birbirleriyle sürekli yük altında periyodik olarak temas ettirildiği zaman, yüzeyler arasında sadece adezif aşınma oluşmaz, burada yorulma aşınması da oluşabilir (Bhushan, 2000).

Yorulma aşınması, değişken tekrarlı yüklemeler sonucu meydana gelir. Tribolojik zorlanmalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden, yorulma aşınması bir çok aşınma prosesinde görülür (Şekil 2.14). Neticede, malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur; bu ise, yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur (Holberg ve ark., 1994).



Şekil 2.14. Yorulma ve Delaminasyon aşınmanın temel mekanizması

Delaminasyon aşınması ise, birbiri üzerinde kayan yüzeylerde mikroskobik ölçekte ortaya çıkan bir çeşit yorulma aşınmasıdır. Temas bölgesinde oluşan basıncın sonucu yüzeyin hemen altında çatlaklar oluşur. Yükün daha fazla artması ve çatlağın deformasyonu, çatlağın yayılmasına ve diğer çatlaklarla birleşmesine neden olur. Çatlak yayılması yüzeye paraleldir. Nihayetinde plaka şeklinde yüzeyden kopmalar meydana gelir (Holberg ve ark., 1994).

Yuvarlanma teması söz konusu olduğunda ise hasarda yorulma mekanizması daha fazla önem taşır. Bilyeli bir yatakta yorulma periyodu basitçe yatağın dönme sayısı ile ilgilidir. Bir küre veya silindirde temas noktasındaki maksimum gerilme, yüzeyin biraz altında bir yerde meydana geldiğinden yorulma hasarı gerilmenin en yüksek olduğu yerde başlar. Yüzeyin altında yorulma çatlakları oluşur ve bunlar yuvarlanma temasıyla ilgili karakteristik karıncalanma (pitting) hasarı oluşturarak yüzeyden nispeten büyük metal parçacıkları ayrılmasına neden olur.

2.3.4. Korozif aşınma

Temas yüzeylerinde oluşan mekanik yıpranmaların yanısıra kimyasal ve elektrokimyasal tahribatların oluşmasına korozyon denir. Metal veya metal alaşımlarının çevreleri ile (katı, sıvı ve gaz ortamlar) kimyasal, elektrokimyasal veya metalurjik ilişkiden dolayı yüzeylerinde yapısal farklı tabakaların oluşması ve sürtünme hareketi ile bu tabakaların parçalanıp taşınması sonucu meydana gelen hasara korozif aşınma denir. Bu aşınma için gerekli şart, korozyonun ve sürtünme hareketlerinin olmasıdır (İpek, 1987; İpek, 1992; Selçuk, 1994).

Kimyasal korozyon kendi başına oluşabildiği gibi diğer aşınma türleriyle birlikte meydana gelebilir. Yüzeye sıkıca yapışan filmler oluşturan kimyasal reaksiyonlar yüzey aşınmasını önler. Fakat film kırılgan ve yüzeye gevşek ise aşınma büyük miktarda hızlanır. Çünkü sürtünme hareketi sırasında filmler çatlar ve yerinden kopar.

Korozif aşınmada oluşan reaksiyon ürünleri sürtünme ile yüzeyden kalkar. Bu durumda reaksiyon tabakalarının aşınma hızı, yüzeyde oluşan ve yüzeyden kalkan reaksiyon ürünlerinin hızı ile alakalıdır. Sıcaklık ve ortama bağlı olarak korozif aşınma sekiz farklı şekilde meydana gelebilir (Kobrick, 2010).

1. Oksitlenme
2. Karbürlenme ve metal tozlaşması
3. Nitrürlenme
4. Halojen korozyonu

5. Sülfürlenme
6. Kül (tuz) çökeleği korozyonu
7. Erimiş tuz korozyonu
8. Sıvı metal korozyonu

2.4. Seramik

Seramik genel anlamda tüm metallerin oksitlerini, nitrürlerini, karbürlerini kapsayan inorganik bileşiklerdir. İnsan hayatındaki seramiklerin kullanımı milattan öncesine dayanmasına rağmen bu malzemeler ikinci dünya savaşı öncesine kadar genel anlamda sadece günlük ihtiyaçlara hizmet eden geleneksel seramikler olarak (testi, porselen, yer karosu, cam, kiremit, tuğla vb.) kullanılmaktaydı. Ancak ulusların teknolojik alanlardaki rekabeti seramik malzemeler açısından ileri teknoloji seramikleri dönemini başlatmıştır (Öztürk, 2006).

Yeni gelişen seramikler birçok mühendislik uygulamalarında yeni olanaklar sağlamaktadır. Seramikler metaller ve polimerlere göre farklı yapılar içerirler. Bu farklılıklar seramikleri birçok mühendislik uygulamaları için kullanışlı hale getirmiştir. Seramik malzemeler kovalent, iyonik ve bu ikisinin karışımı bağlar içerdiğinden, içsel bağlar metal ve polimere göre daha kuvvetlidir. Seramikler aynı zamanda çok çeşitli çevre şartlarına örneğin yüksek sıcaklık, oksidasyon, asidik ve bazik ortamlara dayanıklıdır. Bu ortamlar metaller ve polimerler için zarar verici şartlardır. Seramikler bu istenilen özelliklere sahip olmalarına rağmen onların düşük darbe ve termal şok dirençleri ve çekme gerilmesi altındaki zayıflıkları yeni tartışmalar ortaya koymaktadır (Wiederhorn ve ark., 1985). Günümüzde seramikler en zor koşullarda kullanılan kesme uçlarından biyomühendislik uygulamalarına, katalitik dönüştürücülerden elektronik yalıtkan katmanlara kadar birçok önemli alanda kullanılmaktadır (Bengisu, 2006).

ZrO_2, dönüşüm toklaştırması mekanizması sayesinde, tokluğu arttırılmış seramiklerin elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu da ZrO_2 seramiklerinin, ileri teknoloji seramikleri içinde çok önemli bir yere sahip olmasını sağlamıştır. ZrO_2

içeren seramiklerin ileri teknoloji malzemeleri olarak kabul edilmesinde; ergime sıcaklığının yüksek olması, asidik kimyasal maddeler, cürufa ve cama karşı direncinin yüksek olması, korozyon, erozyon ve aşınmaya karşı dayanıklı olması, düşük termal genleşme katsayısına sahip olması (termal şoka dayanıklı olması), kırılma indisinin yüksek olması, yüksek sıcaklıkta iyonik iletkenliğe sahip olması gibi sebepler rol oynamaktadır (Geçkinli, 1991).

Oksit seramikler içerisinde zirkonya (ZrO_2), son zamanlarda gaz sensörleri, katalizör destekleyiciler, katı oksit yakıt hücreleri (SOFC), biyomalzemeler, seramik filtreler ve termal bariyer uygulamaları gibi önemli alanlarda kullanıldığından dikkatleri üzerine çekmektedir (Zhang ve ark., 2011 a; Zhang ve ark., 2011 b).

Son çeyrek asırda yeni seramikler geliştirilmiştir. Bu seramiklerin önemi, bir takım süper özelliklere sahip olmalarındandır. Bu seramikler, günümüzde "ince seramikler" veya "ileri teknoloji seramikleri" olarak tanımlanmaktadır (Geçkinli, 1991). İnce toz halinde hazırlanan bu başlangıç malzemesinin şekillendirilmesi için uygun katkılarla plastik hale getirilmesi aşaması gelir. Bu aşamada geleneksel killer için su kullanılırken, modern uygulamalarda yoğunlaştırma aşamasında uçucu polimer bağlayıcı katkı olarak kullanılabilmektedir. Daha sonra uygulamada istenen son şekle göre şekillendirme aşaması için alçı kalıp, enjeksiyon kalıplama, kuru presleme, soğuk izostatik presleme, sıcak izostatik presleme gibi tekniklerle malzeme en son formunda ortaya çıkartılır bu aşamadan sonra malzemenin plastikliği için katılan maddelerin bünyeden tamamen atılarak, yoğunlaştırılması için pişirilmesi veya sinterlenmesi süreci başlatılır (Yaralı ve ark., 2004).

2.4.1. Mühendislik seramikleri

Seramik malzemeler çeşitli faktörlere göre sınıflandırılabilirler. Bunlar: malzemenin doğası (organik, inorganik), bileşim (element, bileşik), şekli veya durumu (toz, fiber, film, kütle), yapısı (kristalin, amorf), üretim yöntemi ve teknolojisidir. Çizelge 2.2'de mühendislik seramiklerini fonksiyonlarına göre sınıflandırmaktadır. Seramik malzemeler genel olarak geleneksel ve ileri teknoloji

seramikler olmak üzere iki kısımda incelenmektedir (Yano, 1984).

Çizelge 2.2. Mühendislik seramiklerinin fonksiyonlarına göre sınıflandırılması.

Fonksiyonlar	Özellikler	Uygulama alanları
Biyolojik / Kimyasal	Biyolojik uygunluk, Adsorpsiyon, Katalizör korozyona dirençli	Kemik, Diş, Katalizör taşıyıcı
Mekanik	Yüksek mukavemet Aşınma, Direnci Düşük ısıl genleşme, Yağlayıcılık	Kesici uçlar, Türbin motorları, Katı yağlayıcı,
Termal	Refrakterlik yalıtım ısı, Toplama ısıl iletkenlik	Yüksek sıcaklık refrakterleri
Nükleer	Radyasyon direnci, Refrakterlik, Yüksek sıcaklık mukavemeti	Nükleer yakıt, Kontrol malzemesi, Reaktör tuğlaları
Optik	Optik odaklama floresans özellik geçirgenlik, Optik iletkenlik	Lazer diyotları, Optik fiberler
Elektrik ve Manyetik	Elektriksel yalıtkanlık, Elektriksel iletkenlik, Piezoelektrik dielektrik	Rezistanlar, Varistör Sensör, Hafıza elemanı

Mühendislik seramikleri; yüksek sıcaklık dayanımı, sertlik, aşınma dayanımı, mukavemet ve düşük ağırlık gibi özellikler taşırlar. Bu özelliklerden dolayı mühendislik seramikleri, metalurji, makine-takım, otomobil, inşaat, elektrik elektronik ve uçak-uzay sektöründe kullanım alanı bulunmaktadır. Çizelge 2.3'de bazı mühendislik malzemeleri ve sahip oldukları özellikleri verilmektedir (Lackey, ve ark., 1986).

Çizelge 2.3. Bazı mühendislik malzemelerinin özellikleri (Lackey, 1986).

Malzeme	Ergime Veya Bozunma Sıcaklığı (°C)	Spesifik Modülü (GPa)	Isıl Genleşme Katsayısı ($x10^6$ °C^{-1}) (20-1000 °C)	Isıl İletkenlik ($Wm^{-1}K^{-1}$)	K / a Oranı ($Wm^{-1}K^{-1}$ °C)	Kırılma Tokluğu ($MPam^{1/2}$)
Al_2O_3	2050	90	8,5	6,3(1000)	0,7	2,7-4,2
MgO	2800	86	13,6	7,0(1000)	0,5	-
BeO	2520	124	9,0	20,3 (1000)	2,3	-
Mullit	1850	47	4,8	4,7(800)	1	2,2
ZrO_2	2700	212	10	2(700)	0,2	8-9 (TZP) 2,8 (kübik)
BN	2700	48	0,8[a], 7,5[b]	12,1[a] 26,8[b] (1000)	3-15	-
AlN	2450(b)	103	4,9	20 (800)	4,1	3
Si_3N_4	1850(b)	117	3	36 (1000)	12	5,3 (S) 4,1-6 (HIP)
$Si_2N_2O_2$	1700(b)	109	4,3	4,3 (1000)	1	-
SiC	2830	172	4,3	70 (400)	1,3	4,8 (S) 4,8-6 (HIP)
Grafit	3500	39	1[a] , 27[b]	600 (1000)	22-600	0,5-1,8
Kristal Slika	1710	31	0,5	1,3 (20)	2,6	0,7
Çelik	1500	38	11	40 (20)	3,6	25-45

[a]c-eksenine dik b: bozunma sıcaklığı HIP: sıcak izostatik preslenmiş

[b]c-eksenine parallel S: sinterlenmiş

2.5. Zirkonya

Zirkonya (ZrO_2), doğada başlıca iki mineral formunda bulunur. Bunlardan ilki, Badeleyit (ZrO_2) olup, %1-1,5 silika ile demir oksit içerir ve doğada zirkondan daha az rastlanır. İkincisi ise, Zirkon ($ZrSiO_4$) olarak bilinmektedir (Geçkinli, 1991).

Zirkonya özellikle pegmatit ve granitler gibi volkanik kayaçlarda görülen zirkondan elde edilmektedir. Zirkondan zirkonya üretimi için kullanılan bir çok ticari yöntem mevcuttur. Zirkon, 1750°C'nin üzerinde ZrO_2 ve SiO_2 olarak ayrışır. Zirkon

kumu, yaklaşık 6000 °C'lik bir plazma içerisine gönderildiğinde sonuç, ergime ve ayrışma olur. Öncelikle zirkonya, dendritler halinde, daha sonra silika, camsı bir kaplama şeklinde zirkonya üzerinde katılaşır. Silika, kaynamış sodyum hidroksit çözeltisi ile yapıdan uzaklaştırılabilir. Geriye kalan sistem yıkanır ve ZrO_2 santrifüj ile alınır. Kullanılan temel üretim yöntemi, 2100-2300 °C arasında zirkonun elektrik ark ergitmesidir. Bu sıcaklıklarda da ayrışma sürmektedir; ama katı ZrO_2, sıvı silika ile birlikte elde ediliğinden, ZrO_2'nin saflığı %99 civarındadır. Ticari olarak daha az kullanılan diğer bir yöntem, ZrO_2 kaynağı olarak, saf olmayan monoklinik ZrO_2, yani baddeleyit mineralinin kullanılmasıdır (Carter ve Norton, 2007).

2.5.1. Zirkonyanın kulanım alanları

Zirkonyanın son yıllarda kullanımının artması ile mühendislik projelerinde, bilimsel çalışmalarda, teknolojik uygulamalarda kullanılması ile malzeme bilimcilerin dikkatini üzerine toplamıştır. Zirkonyayının bu şekilde geniş bir sahada kullanılmasını ön plana çıkaran aşağıda belirteceğimiz üstün özelliklere sahip olmasıdır. Bunlar sırasıyla;

- Zirkonya yüksek mukavemeti, yüksek tokluğu ve sertliği gibi özelliklerinden dolayı yüksek sıcaklık yapı malzemesi olarak endüstride en önemli malzemelerden biri olmuştur (Yang ve ark., 2007).
- Yüksek iyonik iletkenliğe sahiptir ve oksijen sensörlerinde ve katı-oksit yakıt hücrelerinde kullanılır.
- Zirkonya bulunduran seramiklerin ergime noktası yüksektir. Asidik kimyasal maddelere karşı dirençlidir, korozyon ve erozyon dirençleri de iyidir. Isıl şoka dayanıklıdırlar.
- Zirkonyanın en önemli koruyucu özelliği yüksek sıcaklıklardaki ısıl bariyer koruyucu özelliğidir. Zirkonyanın seramik kaplama malzemesi olarak kullanıldığından beri bu özelliği ön plana çıkmıştır.
- Ergime sıcaklığının yüksek olması,
- Asidik kimyasal maddelere ve curufa karşı direncinin yüksek olması,
- Korozyon, erozyon ve aşınmaya karşı dayanıklı olması,

- Düşük termal genleşme katsayısına sahip olması (termal şoka dayanıklı olması),
- Kırılma indisinin yüksek olması,
- Yüksek sıcaklıkta iyonik iletkenliğe sahip olmasıdır (Aktaş, 2008).

Zirkonya, yer kabuğunda ağırlıkça % 0,02-0,03 oranında olup Cu, Ni, Pb ve Zn gibi metallerden daha bol miktarda bulunur (Geçkinli, 1991). Zirkonya, oldukça küçük çaplı taneciklerden oluşan bir materyaldir (<0,5- 0,6 μm) (Tosun, 2007).

Keşfedildikten hemen sonra refrakter uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Ruff ve Ebert x-ışını difraksiyonu ile oda sıcaklığındaki zirkonya'nın monoklinik bir simetriye sahip olduğunu belirlemişler ve buna ilaveten yüksek sıcaklık XRD ile 1000℃'nin üzerinde monoklinik → tetragonal faz dönüşümü üzerinde çalışmışlardır. Aynı yıl Ruff ve arkadaşları, faz dönüşümüyle beraber metal oksitlerin ilavesiyle malzeme stabilizasyonunu ispatlamışlardır. Refrakter uygulamaları, stabilize zirkonya'nın teknik kullanımını gösterirken, Nernst 1900'den daha önceki yıllarda zirkonyayı kullanmış; Wagner stabilize zirkonyanın kristal hata yapısını açıklamış; Kiukola ve Wagner, zirkonya'nın elektrolitik doğasını belirleyerek termodinamik ölçümlerle zirkonyayı bir oksijen konsantrasyon hücresi gibi kullanmışlardır. Kingery de oksijen iyon iletimini, difüzyon ve iletkenlik ölçümleriyle tespit etmiştir.

Her ne kadar zirkonya'nın yüksek sıcaklıklardaki indirgenmesi şüphe uyandırsa da Smith ve Cline yüksek sıcaklık XRD'si ile 2370 ^{o}C'nin üzerinde zirkonya'nın beklenen kübik fazını bulmayı başarmışlardır. ZrO_2'nin tetragonal → monoklinik geçişleriyle ilgili yapılan çalışmalar, Wolten'nin bu dönüşümü martensite benzetmesine sebep olmuştur. Bu çalışmalar, uygun ısıl işlemlerle kısmen stabilize zirkonyanın dönüşüm mukavemetinin gelişmesine neden olmuştur (Subbarao, 1984).

Saf zirkonya aynı zamanda Y_2O_3, MgO, CaO gibi kararlı oksitlerle doyurulduğu zaman mükemmel özellikler gösteren inert bir seramik malzemedir.

Tetragonal kristal yapıdaki kararlı zirkonyaya yapılan ilavelerin miktarları ve tipleri, mekanik özelliklerin üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Aktaş ve ark., 2014). Yitria bileşeni, yitria-kararlı zirkonya seramiklerinde özellikleri etkileyen en belirgin değişkendir.

Zirkonya (ZrO_2) üç farklı kristal yapıya sahip, allotropik (polimorf) bir malzemedir. Bu kristal yapılar; monoklinik (m), tetragonal (t) ve kübiktir (k). 1970'lerde zirkonyanın çatlak ilerlemesine karşı direnç sağlayan dönüşüm toklaşması mekanizması özelliği gösterdiği bulunmuştur. Zirkonyanın bu özelliğini sağlayan yarı kararlı tetragonal ve kübik formların gerilmelere maruz kalınca oluşan enerjiyi absorbe ederek oda sıcaklığında kararlı monoklinik faza martensitik dönüşümün meydana geldiği dönüşüm toklaşmasıdır. Dönüşüm tokluğunun, tane boyutundan, tane boyut dağılımından ve stabilizör içeriğinden etkilendiği sonucuna varılmıştır (Yılmaz, 1992). Normal koşullar altında zirkonyum metali su ile reaksiyon vermez. Metalin yüzeyini kaplayan oksit tabakası, asitlere karşı inaktif olmasına neden olur. Normal koşullar altında alkali çözeltilerle de reaksiyona girmez. Sadece hidroflorik asit içerisinde çözünür ve floro bileşimleri oluşturur (Piconi ve ark., 1999).

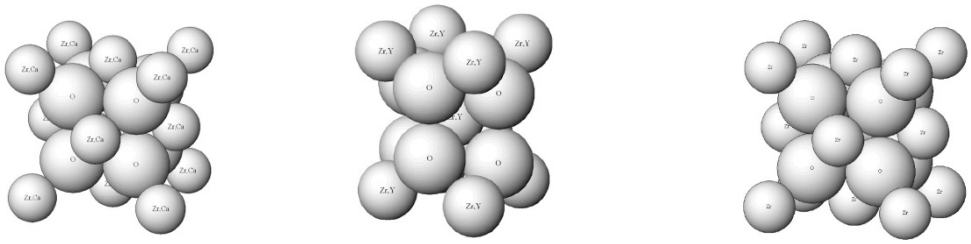
2.5.2. ZrO_2'nin kristal yapısı

Zirkonya allotropik özellik gösteren bir seramiktir yani sıcaklık değişimi sonucu kristal kafes parametreleri değişime uğrar. Çizelge 2.4'te saf zirkonya üç farklı formda bulunur. 1170 °C'ye kadar monoklinik olarak kararlıdır. 2370 °C' e kadar tetragonal olarak kararlıdır ve 2370°C'den ergime sıcaklığı olan 2680 °C' e kadar kübik fazda kalır.

Çizelge 2.4. ZrO_2 kristal formları ve dönüşüm sıcaklıkları (Yang ve ark., 2008).

Kristal Form	Yoğunluk (gr/cm^3)	Geçiş Sıcaklığı
Monoklinik	5,82	<1170
Tetragonal	6,02	1170 – 2370
Kübik	6,15	2370 - 2715

Zirkonya fazının üç saf kristal yapısı Şekil 2.15'de şematik olarak gösterilmiştir.



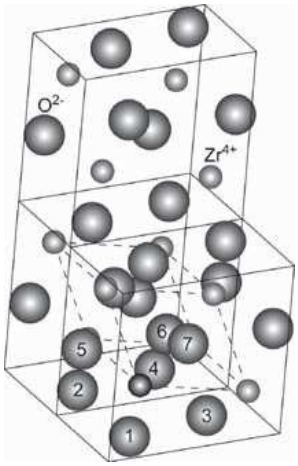
(a) (b) (c)

Şekil 2.15. ZrO_2'nin farklı kristal yapıları; a) kübik b) tetragonal c) monoklinik (Sönmez, 2009).

2.5.2.1. Monoklinik ZrO_2

Badeleyit termodinamik olarak oda sıcaklığından 1170 °C'ye kadar monoklinik fazda kararlı haldedir. Badeleyitin doğal formunda %2 oranında HfO_2 bulunur ancak kristal yapısı biribirlerininin aynısı olduğu için zirkonyanın kimyasal özellikleri bu safsızlıktan etkilenmemektedir (Stevens, 1986). Monoklinik ZrO_2'nin kristal yapısı Şekil 2.16'da Mc Cullough ve Trueblood, Smith ve Newkirk ve arkadaşları tarafından XRD yöntemi ile saptanmıştır (Lee, 1994).

Saf zirkonya oda sıcaklığında kırılgan ve daha düşük dayanıma sahip monoklinik yapıdadır. 950°C altında tetragonal faz monoklinik faza dönüşecektir. Bu yapısal değişim martenzitik dönüşüm sıcaklığı ile karakterize edilen martenzitik dönüşüme dayandırılır. Monoklinik faz, önceki taneler içinde basamaklar veya küçük tabakalar ağı olarak görünür. Saf zirkonyadaki tetragonal yapıdan monoklinik yapıya soğutma sırasında 950°C'de başlar ve ısıtma sırasında 1170°C'de tersinirdir. (Peng, 2005). Sıcaklık bölgesinin faz dönüşümü için zaman ve enerji harcadığı söylenebilir.

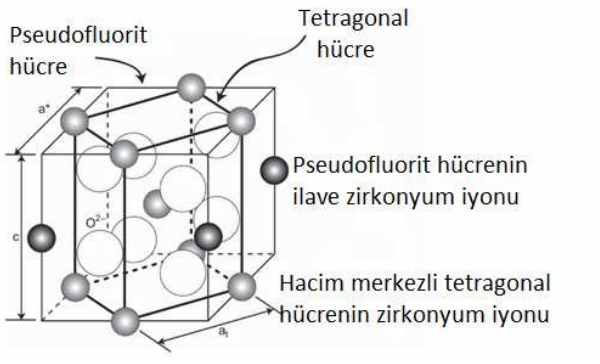


Şekil 2.16. Monoklinik zirkonyanın kristal yapısı.

2.5.2.2. Tetragonal ZrO_2

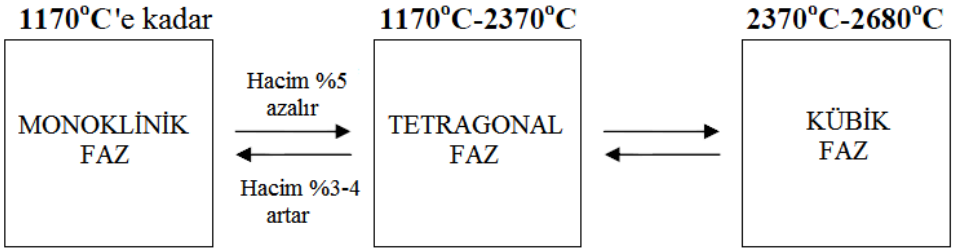
Tetragonal- kübik dönüşümü ise 2370 °C civarındadır ve Smith ve Clin tarafından belirlenmiştir. Bu dönüşüm difüzyonsuz ve martenzitik bir dönüşümdür. (Mccmeeking ve ark., 1980). Bu formun kristal yapısı CaF_2 ile eş yapısal olup diğer birçok oksitle benzerlik göstermektedir (Tekeli, 2001).

Bu faz 1170 °C ile 2370 °C arasında kararlıdır. t-ZrO_2 basit olarak, çarpılmış CaF_2 yapısı şeklinde tanımlanır (Şekil 2.17). Kafes sabitleri, yüzey merkezli tetragonal simetride tanımlanmıştır (Aktaş, 2002).



Şekil 2.17. Tetragonal zirkonya birim hücre yapısı içinde hacim merkezli tetragonal yapı.

Oda sıcaklığında stabil olabilmeleri için kalsiyum, magnezyum, alüminyum, yttrium veya serum gibi metal oksitleri ilave etmek gerekir (Malkondu ve ark., 2006). Oda ısısında hacimsel genişlemeyi kontrol etmek ve tetragonal fazda tutmak için saf zirkonyuma yttrium oksit eklenir ve Y-TZP (Yttrium ile stabilize edilmiş tetragonal polikristalin zirkonya) oluşturulur (Şekil 2.18). Y-TZP diğer kombinasyonlardan daha üstün mekanik özelliklere sahiptir. Y-TZP kısmen yüksek başlangıç esneme dayanıma sahip zirkonyumu stabilize eder ve bu şekilde kimyasal ve boyutsal stabilite, yüksek mekanik dayanım ve kırılmaya karşı dayanıklılık elde edilmiş olur. Bu güncel medikal kullanım için düşünülen zirkonyum çeşididir.

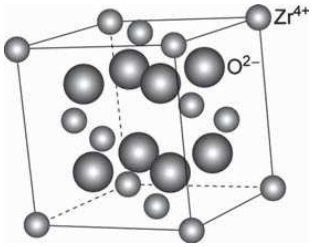


Şekil 2.18. Sıcaklıkla bağlantılı olarak zirkonyum oksitin faz değiştirmesi

Monoklinik yapıdan tetragonal yapıya geçiş %3-5 mertebesinde hacim değişikliği içerdiğinden teknolojik uygulamalarda sorun olmaktadır. Şekil 2.18'deki değerlerden de anlaşıldığı gibi hacimde artma ve azalmalar görülmektedir. Bu faz dönüşümü sonucu seramik malzemeler genellikle parçalanmaktadır. Bu durumu önlemek için yapıya CaO, MgO ve Y2O3 gibi toprak alkaliler ilave edilmektedir.

2.5.2.3. Kübik ZrO_2

2370 °C'den ergime noktası 2680 °C'ye kadar kararlı durumdadır. Ergime noktası olan 2680ºC ye kadar kübik fazdadır. Bu derecenin altına düşüldüğünde kübik fazdan çıkar ve tetragonal faza dönüşür. Bu faz 2370 ºC'ye kadar stabildir. 2370ºC nin altında tetragonal yapı değişir ve tetragonalmonoklinik faz geçişi 1170ºC nin altında olur ve yüksek internal streslerin etkisiyle %3-5 hacim değişimine neden olur (Conrad ve ark., 2007). Şekil 2.19'da kübik zirkonyanın kristal yapısı görülmektedir.



Şekil 2.19. Kübik zirkonyanın kristal yapısı.

Kübik zirkonya (c-ZrO_2) flüorür yapıya sahipken, monoklinik (m-ZrO_2) ve tetragonal (t-ZrO_2) zirkonya bozulmuş flüorür yapıya sahiptir (Hannink ve ark., 1994; Gökyer, 2010).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Örneklerin Hazırlanması

Bu çalışmada ana matriks malzemesi olarak %8 mol Y_2O_3 ile kararlı hale getirilmiş kübik zirkonya (8YSZ), (Tosoh, Japan) ve katkı elemanı olarak Co_3O_4 (US Research Nanomaterials, Inc., USA) tozları kullanılmıştır. Ortalama toz boyutları 8YSZ için 0.3 μm ve Co_3O_4 için 0.2 μm'dir. Kullanılan tozların kimyasal kompozisyonları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan tozların kimyasal bileşimleri (Aktaş ve ark., 2014).

	Ağırlıkça %										
Tozlar	ZrO_2	Y_2O_3	Co_3O_4	TiO_2	FeO_2	Na_2O_3	CaO	Al_2O_3	SiO_2	CuO	NiO
8YSZ	85.9	13.6	-	0.1	0.003	0.01	0.02	0.25	0.1	-	-
Co_3O_4	-	-	99.1	-	0.015	-	0.03	-	-	0.02	0.055

Mikroyapı ve tribolojik özellik incelemeleri için numuneler kollodial işlemle üretildi. Katkılama işlemi 8YSZ ve ağırlıkça %0-15 Co_3O_4 tozları bir plastic konteyner içerisinde zirkonya bilyalar ve ethanol kullanarak mekanik karıştırmayla yapıldı. Mekanik karıştırma işlemi 200 rpm'de 12 saat süreyle "speks" tipi bir karıştırıcıda gerçekleştirildi. Hazırlanan bulamaçlar plastik konteynerin kapağı açılarak 24 saat kurumaya bırakıldı. Kurutma işlemi sonunda oluşan orta sertlikteki topaklaşmış tozları birbirinden ayırmak ve kırmak için plastik konteyner içerisinde zirkonya bilyalar ile 10 dakika karıştırma yapıldı. Bu karıştırma neticesinde elde edilen tozlar 60 μm' lik bir elekten geçirildi. Aşınma deneyleri ve mikroyapı incelemeleri için tek eksenli presleme kalıbında 200 MPa basıçta 10 mm çapında 5 mm yüksekliğinde peletler üretildi. Her bir kuru presleme işleminden sonra çelik kalıp iç yüzeyleri dikkatlice temizlendi ve kalıp yan duvarlarına tekrar stearik asit sürüldü. Numunelerin sinterleme işlemleri kutu tipi bir fırında normal atmosfer şartlarında 1500 ^oC'de 1 saat süreyle yapıldı. Daha sonra katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numuneleri tane büyütmek için 1500 ^oC'de 1, 10 ve 50 saat süreyle tavlama işlemine tabi tutuldu.

3.2. Mikroyapı İncelemeleri ve Tane Boyutunun Belirlenmesi

Katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin tane büyütme işlemleri için optimum sinterleme sıcaklığında sinterlenen numunelerin 5 ^oC'lik bir ısıtma hızında 1500 ^oC'de 1, 10 ve 50 saat süreyle tavlanması ile gerçekleştirildi. Tane büyütme işlemleri esnasında numunelerin kirlenmesini (cross contamination) önlemek için her numune alümina plakalar üzerine konuldu. Tane büyütme işlemlerinden sonra fırın belirtilen sıcaklıklardan oda sıcaklığına yavaşça soğutuldu. Değişik sıcaklık ve bekleme sürelerinde taneleri büyütülen numunelerin tane boyutları mikroyapı resimleri üzerinden "Ortalama Doğrusal Kesme Metodu" (Mean Linear Intercept Method) ile aşağıdaki Denklem 3.1 kullanılarak hesaplandı (Aktaş, 2008).

$$\mathbf{D = \frac{L}{M.N_i}} \qquad (3.1)$$

Burada;

D: Ortalama tane boyutu

N_i: Bilinen toplam L_i uzunluğundaki doğruyu kesen tane sınırlarının sayısı

L_i: Bilinen toplam doğru uzunluğu

M: Büyütme oranı

Mikroyapı incelemeleri için Harran Üniversitesi Merkezi Laboratuvardaki Şekil 3.1'de gösterilen ZEISS marka Evo 50 modeli taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanıldı.



Şekil 3.1. ZEISS Marka Evo 50 modeli taramalı elektron mikroskobu (SEM).

Mikroyapı incelemeleri için numuneler soğuk gömme yöntemi ile kalıplandı. Numuneler 120, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gridlik SiC zımparalarla yüzeydeki çizikler giderilene kadar zımparalandı ve daha sonra numune yüzeyleri 6, 3 ve 1 μm'luk elmas pastalar kullanılarak parlatıldı. Yüzeyleri parlatılmış numuneler Şekil 3.2'deki kutu tipi bir fırında dakikada 5 °C'lik bir ısıtma ve soğutma hızlarında numunelerin sinterleme sıcaklıklarının 50 °C altında 1 saat bekletmek suretiyle termal olarak dağlandı.



Şekil 3.2. Sinterleme işlemlerinde kullanılan kutu tipi yüksek sıcaklık fırını.

Daha sonra SEM numunelerin yüzeyleri Şekil 3.3'deki EMS 550 marka kaplama cihazıyla ince bir altın palladyum tabakası ile kaplanarak mikroyapı incelemesi için hazır hale getirildi.



Şekil 3.3. EMS 550 marka kaplama cihazı.

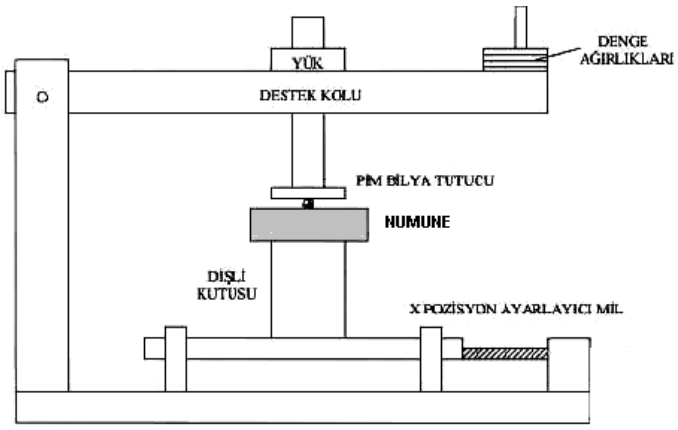
3.3. Aşınma Deneyleri

Bu çalışmada test malzemesi olarak katkısız ve ağırlıkça %1, 5, 10 ve 15 Co_3O_4 katkılı kübik zirkonya (8YSZ) pellet numuneler (10 mm çap ve yükseklik 5 mm) ile karşı sürtünme elemanı olarak da 10 mm çapında Al_2O_3 seramik bilya kullanılmıştır. Aşınma deneylerine başlamadan önce numunelerinin yüzeyleri 400 gridlik zımpara ile zımparalama yapılmıştır. Aşınma testi öncesi katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ seramik numuneler ve Al_2O_3 bilya methanol ile yıkanmıştır. Numunelerin aşınma testleri, Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde Şekil 3.4'de gösterilen TRD aşınma test cihazında 3 N yük kullanarak 0.1 m/s kayma hızında ve 1000 m kayma mesafesinde, kuru sürtünme şartlarında ve oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 3.4. TRD marka aşınma test cihazı.

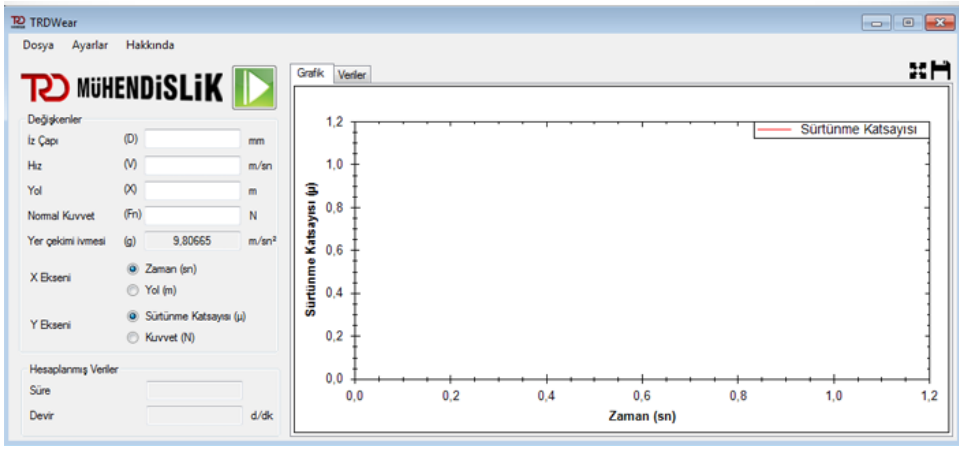
Sürtünme katsayısının hesaplanmasında ve malzemelerin aşınma davranışlarının belirlenmesinde en çok kullanılan iki yöntem pin-on-disk ve ball-on-disk yöntemleridir. Şekil 3.5'de deneysel çalışmalarda kullanılan aşınma deney cihazının şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 3.5. Aşınma deney cihazının şematik gösterimi (Sarı, 1997).

Şekil 3.5'deki aşınma cihazında, dikey konumda pin ve pinin ucuna takılabilen ball sample holder bulunmaktadır ve pin üzerine yükleme yapılabilmektedir. Yatay konumda ise disk (örnek numune) istenilen devirde dönme hareketi yapmaktadır. Sürtünme katsayısını ölçmek için pin üzerinde bir load cell bulunmaktadır. Aşınma testi esnasında sürtünme kuvveti grafik kaydedici program ile kayıt edilebilmektedir.

Aşınma deneylerinde kullanılan TRD aşınma test cihazı, bilgisayar ortamında aşağıda Şekil 3.6'da gösterilen TRD Wear programı ile otomatik başlatma ve durdurma yapılabilmektedir. Ayrıca bu yazılım ile sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti değerleri bilgisayar ortamında kayıt edilebilmektedir. Bu yazılım sayesinde deneylerden daha hassas ve doğru sonuçlar elde edilmesi mümkün olabilmektedir.



Şekil 3.6. Aşınma test cihazı bilgisayar yazılımı.

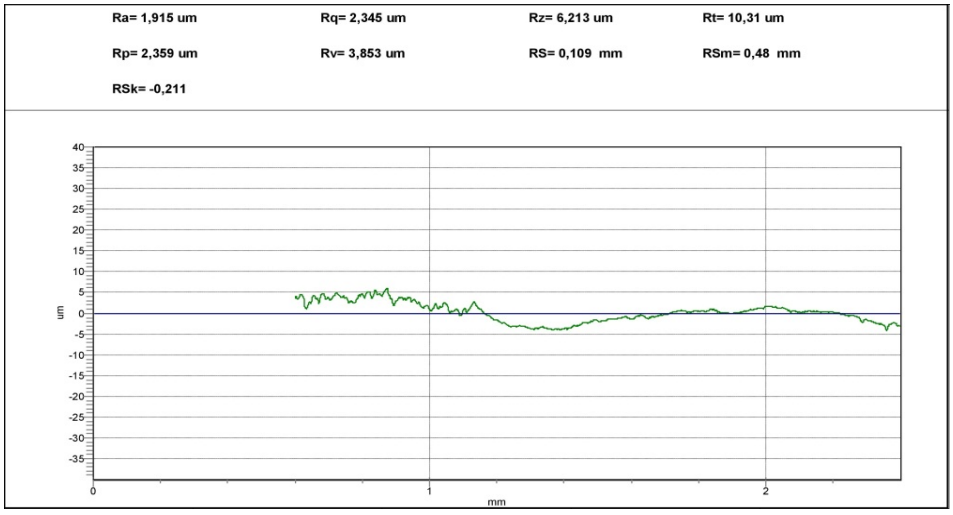
3.3.1. Malzemelerin yüzey profillerinin ölçümü

Deney numunelerinin aşınma öncesi ve aşınma sonrasında yüzey profilleri Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde Malzeme laboratuvarında bulunan Şekil 3.7'deki Time TR 200 model profilmetre cihazı ile ölçülmüştür. Ölçülen yüzey profilleri ayrıca bilgisayar programı ve yazılımı ile grafik olarak kayıt edilmiştir.



Şekil 3.7. Profilmetre cihazı.

Profilmetre cihazı ile bilgisayara aktarılıp kayıt edilen örnek yüzey profil görüntüsü aşağıda Şekil 3.8'de gösterilmektedir.

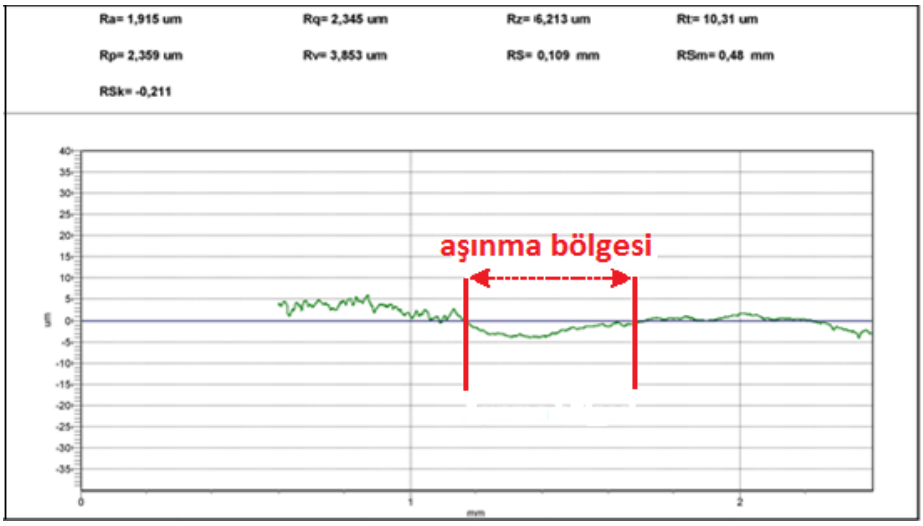


Şekil 3.8. Aşınma sonrası profilmetreden alınan yüzey profil görüntüsü.

3.3.2. Aşınma değerlerinin hesaplanması

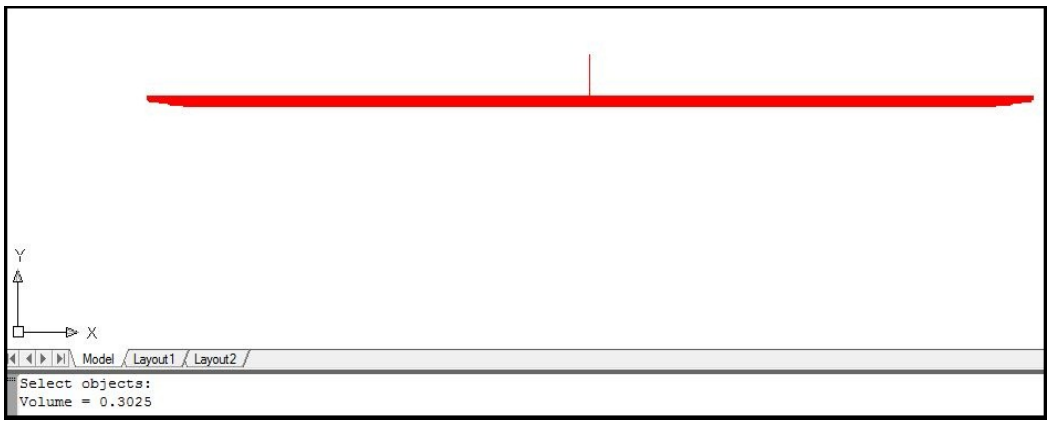
3.3.2.1. Aşınma hacimlerinin hesaplanması

Aşındırılan numunelerin profilmetre cihazı ile aşınma yüzeylerinin profil görüntüleri elde edildi. Her numune için üç farklı aşınma yüzeyinden ölçümler alındı. Aşağıda Şekil 3.9'da 1500 ^{o}C'de 1 saat sinterlenmiş ağırlıkça %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunenin örnek aşınma yüzey profili gösterilmektedir.



Şekil 3.9. 1500 ^{o}C'de 1 saat sinterlenmiş ağırlıkça %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunenin aşınma sonrası yüzey profil görüntüsü.

Şekil 3.9'da elde edilen aşınma bölgesinin yüzey profil görüntüsü Autocad programına aktarıldı ve Autocad programında numune üzerinde aşınan kısmın hacmini hesaplayabilmek için aşınma bölgesi sketch komutu (elle çizim komutu) ile kapalı alan olarak çizildi. Daha sonra sketch komutu ile çizilen aşınma alanı Autocad programında revolve komutu (döndürme komutu) kullanılarak üç boyutlu hale getirildi ve program vasıtası ile aşınma hacmi hesaplandı. Aşağıda Şekil 3.10'da Autocad programında revolve komutu ile döndürülerek üç boyutlu hale getirilmiş ve aşınma hacmi hesaplanmış örnek bir uygulama gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Autocad programında örnek hacim hesabı.

Aşınma hacimleri; üç farklı yönde elde edilen verilerin aşınma hacimlerinin ortalaması alınarak hesaplandı.

3.3.2.2. Spesifik aşınma miktarının hesaplanması

1500 ^{o}C'de 1, 10 ve 50 saat süreyle tavlanmış katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin 3 N yük, 0.1 m/s kayma hızında ve 1000 m kayma mesafesinde yapılan aşınma deney sonuçlarından spesifik aşınma miktarları Denklem 3.2 kullanılarak hesaplandı.

$$k_w = \frac{V_w}{F.S} \tag{3.2}$$

Burada ;

k_w **:** Spesifik aşınma miktarı ($mm^3N^{-1}m^{-1}$)

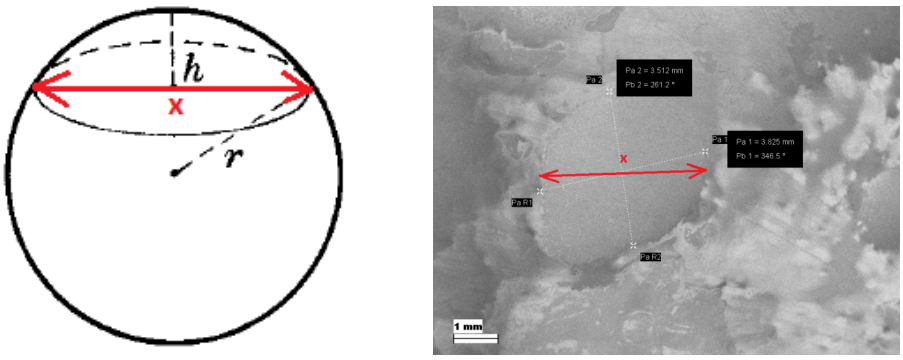
V_w **:** Aşınma hacmi (mm^3)

F **:** Uygulanan yük (N)

S **:** Kayma mesafesi (m)

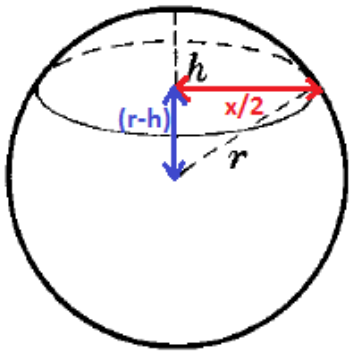
3.3.2.3. Bilyedeki aşınma miktarının hesaplanması

Bilyenin üzerinde aşınmış bölge üzerinden farklı yönlerden SEM cihazıyla üç adet çap ölçüleri alındı. Alınan bu çap değerlerin ortalaması ile yaklaşık aşınan bölgenin çap değeri elde edildi. Bu çap değeri Şekil 3.11'de gösterilen "x" uzunluğudur.



Şekil 3.11. Bilye üzerinde aşınan bölgenin ortalama aşınma uzunluğu ve SEM görüntüsü.

Aşınan bölgeden elde edilen "x" uzunluğu aşağıda Şekil 3.12'de gösterildiği gibi "h" değerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır.



Şekil 3.12. Kesik küre hacim hesabında kullanılacak uzunluklar.

$$r^2 = \left(\frac{x}{2}\right)^2 + (r-h)^2 \quad (3.3)$$

Burada;

r : Bilyenin yarı çapı (mm)

x : Bilyede aşınan bölgenin ortalama çapı (mm)

h : Aşınma bölgesinin yüksekliği (mm)

Denklem 3.3 ile bulunan "h" değeri ile aşağıdaki hacim denklemi kullanılarak bilyedeki aşınma hacmi mm^3 cinsinden hesaplandı.

$$V_B = \frac{1}{3}\pi h^2(3r-h) \quad (3.4)$$

V_B : Bilyedeki aşınma hacmi (mm^3)

r : Bilyenin yarı çapı (mm)

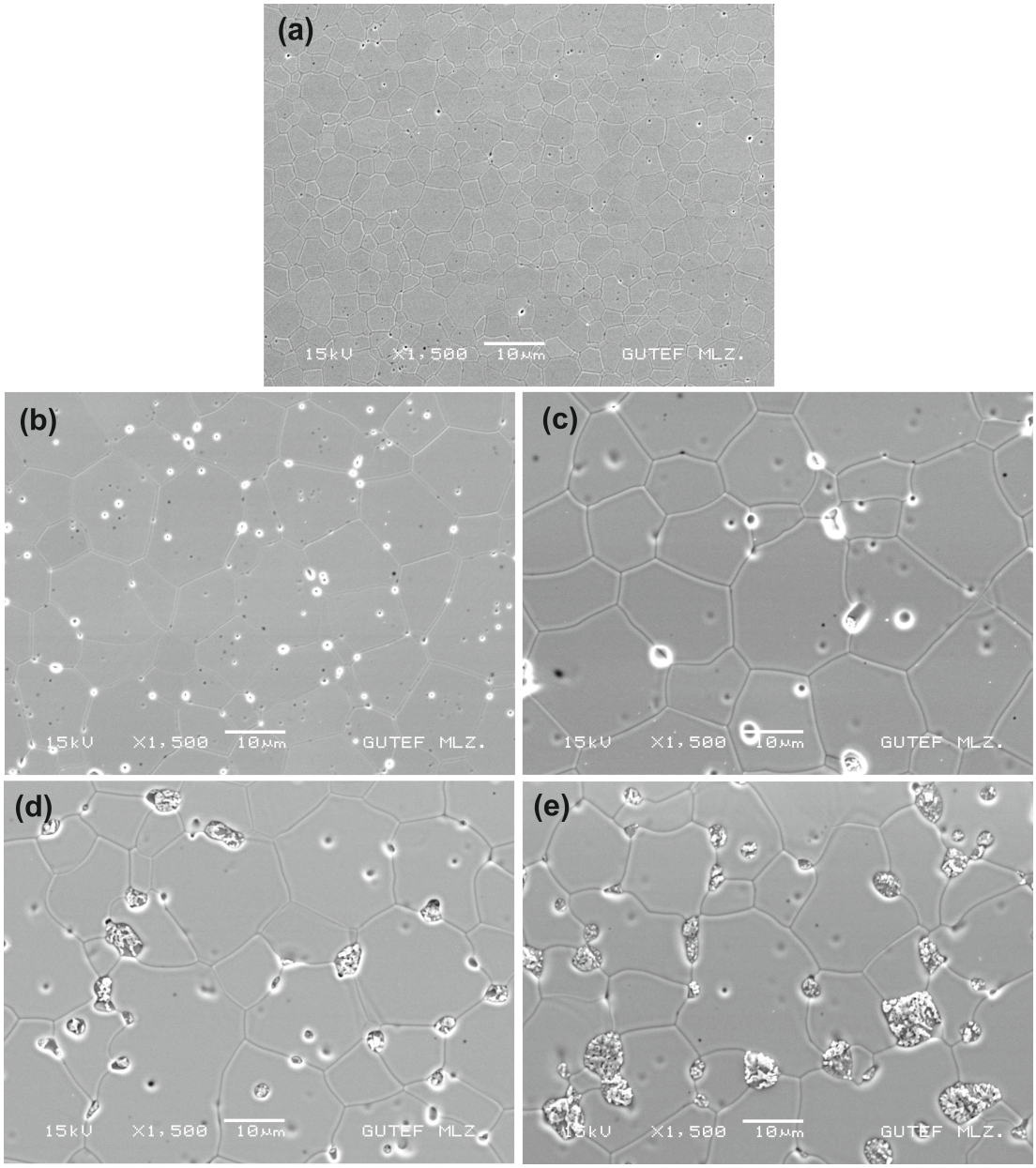
h : Aşınma bölgesinin yüksekliği (mm)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

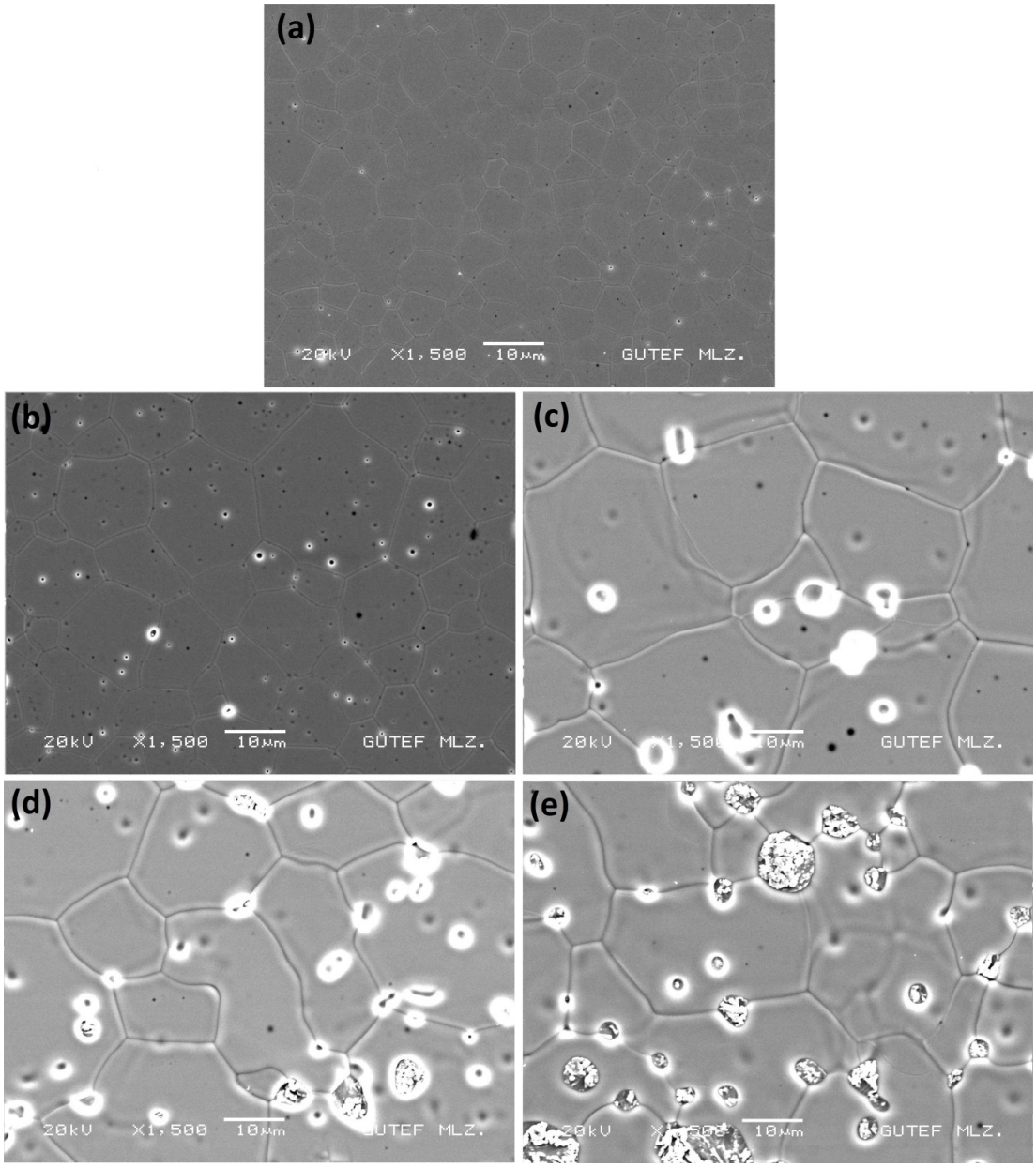
4.1. 8YSZ'nin Tane Yapısına ve Mikroyapısına Co_3O_4 Katkısının Etkisi

Şekil 4.1-4.3'de 1500 ^oC'de 1, 10 ve 50 saat süre ile tavlanmış katkısız ve değişik oranlarda Co_3O_4 katkılı 8YSZ kompozitlerin Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) mikroyapıları gösterilmektedir. Aşağıdaki mikroyapılar incelendiğinde; katkısız 8YSZ küçük ve poligonal eş eksenli tanelerden oluşmaktadır. Fakat Co_3O_4 katkılı 8YSZ kompozit örneklerin taneleri ise daha iri taneli olduğu ve Co_3O_4'in 8YSZ'nin tane sınırları etrafında ikinci bir faz olarak çökeldiği görülmektedir. Özellikle ağırlıkça %10 ve 15 Co_3O_4 ilaveli 8YSZ numunelerin mikroyapıları incelendiğinde tane sınırlarının kesişim yerlerinde Co_3O_4 ikinci faz çökeltileri görülebilmektedir (Şekil 4.1-4.3-d-e).

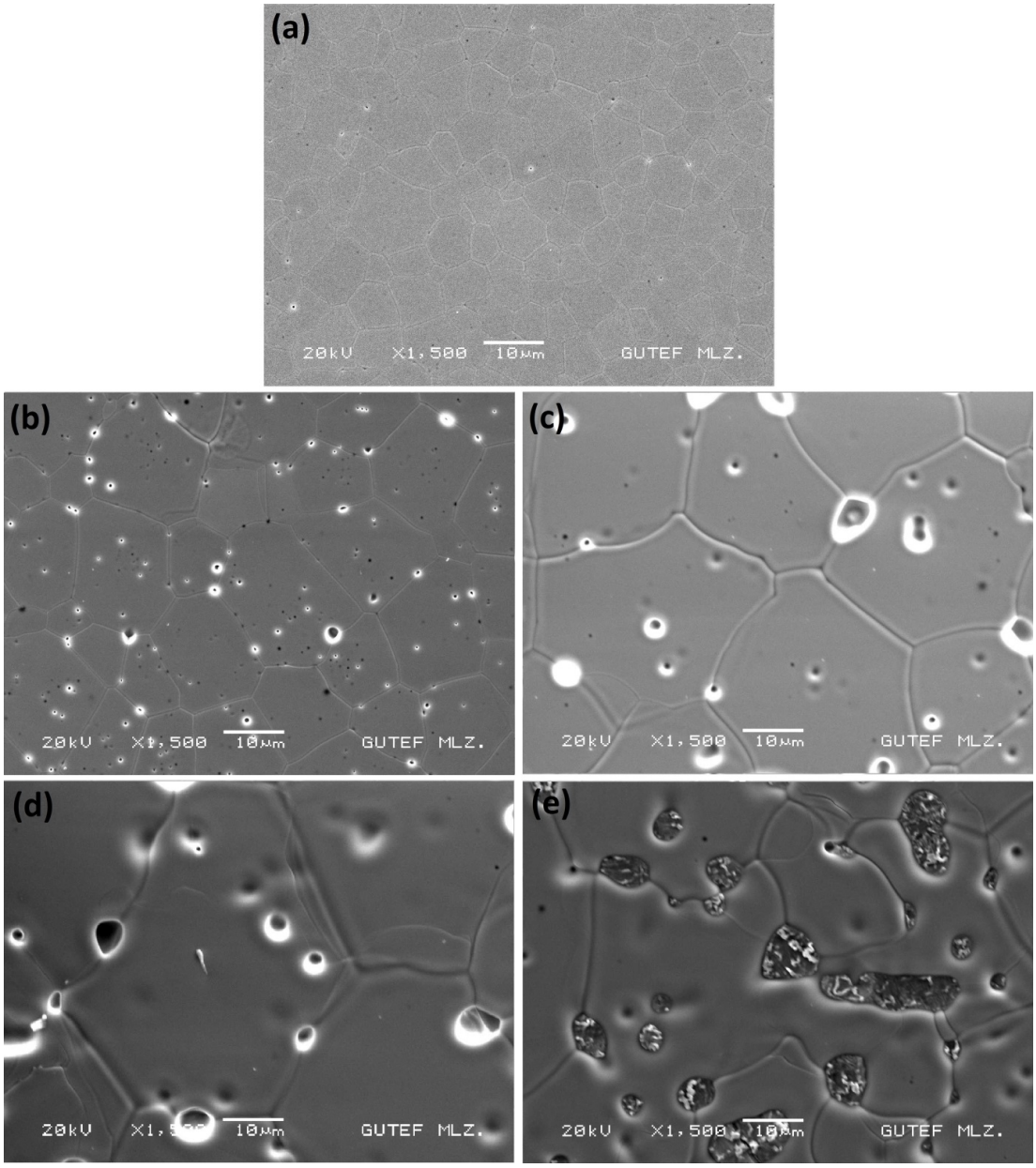
Şekil 4.4'de 1500 ^oC'de 1, 10 ve 50 saat tavlama sonrası katkısız ve değişik oranlarda Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin tane boyutları gösterilmektedir. Tane büyütme işlemleri için optimum sinterleme sıcaklığında (1500 ^oC'de 1 saat) sinterlenen numuneler dakikada 5 ^oC'lik bir ısıtma hızında ve basınçsız sinterleme ile 1500 ^oC'de 1, 10 ve 50 saat süreyle tavlama ile tane büyütme işlemi yapılmıştır.



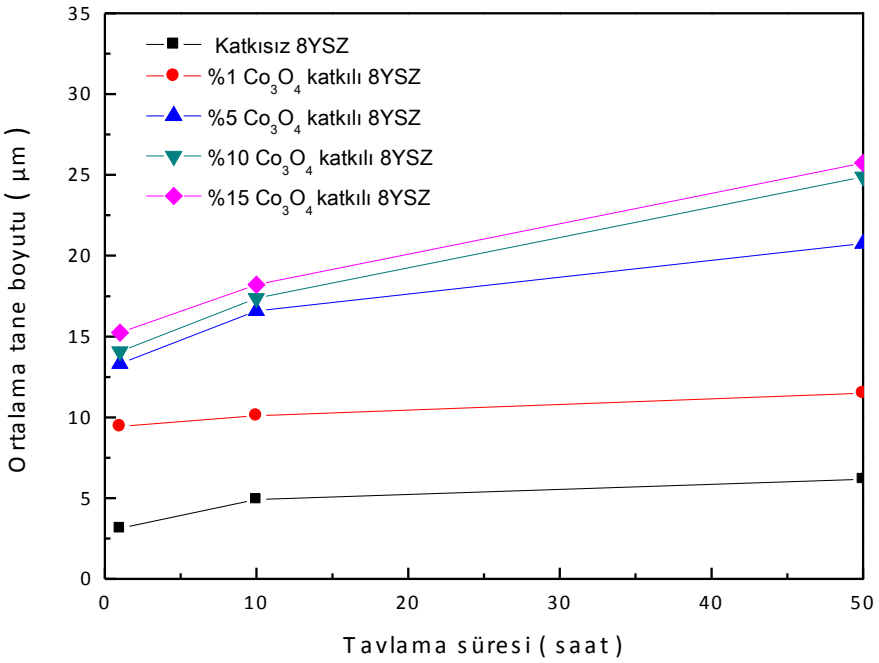
Şekil 4.1. 1500 ^{o}C'de 1 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin mikroyapıları; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ.



Şekil 4.2. 1500 ^{o}C'de 10 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin mikroyapıları; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ.



Şekil 4.3. 1500 ^{o}C'de 50 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin mikroyapıları; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ.



Şekil 4.4. Katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin 1500 ^oC'de 1, 10 ve 50 saat tavlama sonrası tane boyutları.

Şekil 4.4 incelendiğinde tavlama sonrasında katkısız 8YSZ'de ve ağırlıkça %1-15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerde tane irileşmesi meydana gelmiştir. 8YSZ'ye ağırlıkça %1-15 Co_3O_4 ilavesi aşırı tane büyümesine neden olmuştur. Co_3O_4 ilavesi 8YSZ'nin tane büyümesini hızlandırmış ve iri taneli bir mikroyapı elde edilmiştir. Ayrıca Co_3O_4 ilavesinin artışı ile orantılı olarak 8YSZ'nin tane boyutunda bir artış meydana gelmiştir. Co_3O_4 ilavesi ile tane boyutunda meydana gelen artma şu şekilde açıklanabilir; %5, 10 ve 15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin mikroyapıları incelendiği zaman 8YSZ taneleri arasında Co_3O_4'ün ikincil bir faz olarak çökeldiği görülmektedir. Bu durum yüksek miktarlarda Co_3O_4 ilavesinin 8YSZ içinde tam olarak çözünmediğini göstermektedir. 8YSZ tane sınırları ve etrafında çökelen Co_3O_4 ikincil fazlarının hızlı tane sınırı hareketliliğine sahip olması, tane büyümesinde bir artışa neden olduğu düşünülmektedir.

4.2. 8YSZ'nin Aşınma Davranışına ve Özelliklerine Co_3O_4 İlavesinin Etkileri

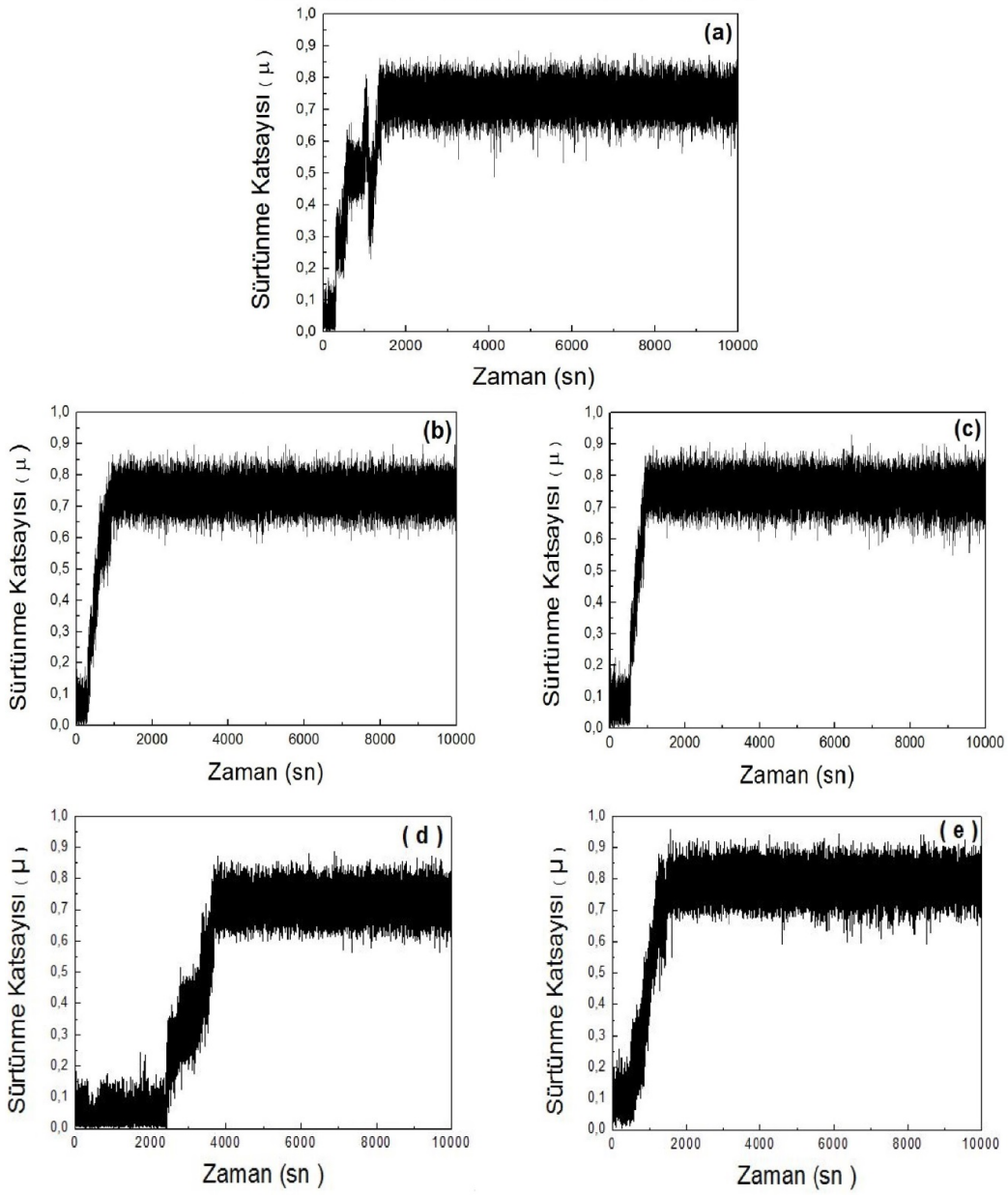
Katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin aşınma testi için ball-on-disc yöntemi kullanılmıştır. Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelere karşı 10 mm çapında Al_2O_3

aşındırıcı olarak bilye kullanılmıştır. Aşınma deneyleri; 3 N yük kullanarak 0.1 m/s kayma hızında, 1000 m kayma mesafesinde, oda sıcaklığında ve kuru sürtünme şartlarında yapılmıştır.

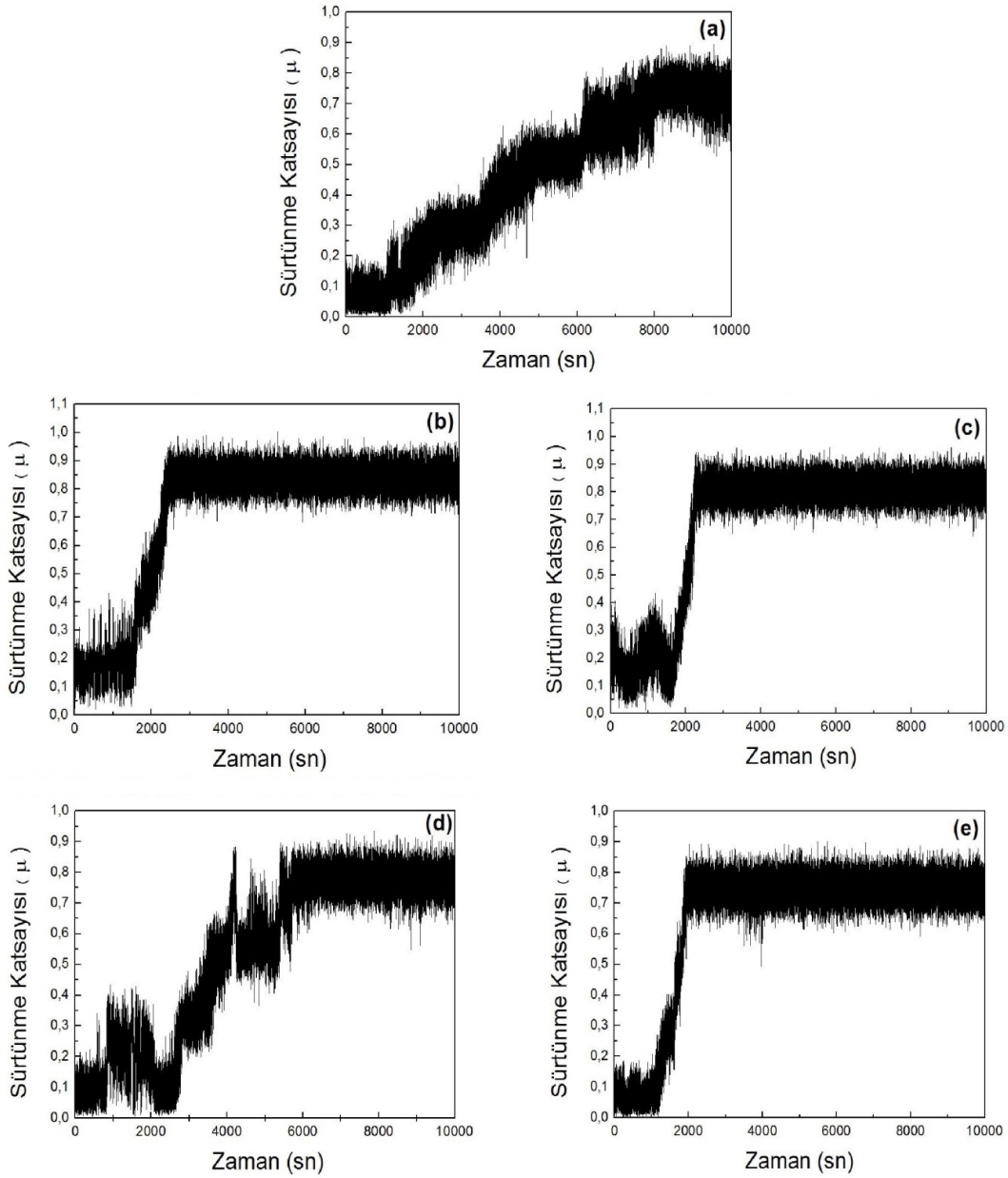
4.2.1. 8YSZ'nin sürtünme katsayısına Co_3O_4 ilavesinin etkileri

Şekil 4.5-4.7'de katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin sürtünme katsayılarındaki değişimi gösteren grafikler verilmektedir. Sürtünme katsayısı grafikleri incelendiğinde; sürtünmenin başlangıcında sürtünme katsayılarında düşük değerler gözlenirken belli bir kayma mesafesinden sonra sürtünme katsayısında ani bir artış şeklinde bir geçiş bölgesi gözlenmiş ve daha uzun kayma mesafesinde ise sürtünme katsayılarında sabit değerlerin gözlendiği değişken olmayan bölgeler gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısındaki bu değişim kayma şartlarında meydana gelen değişim yüzündendir. Sürtünmenin başlangıcında numunede yüzey pürüzlülüğün daha az olması, sürtünme katsayısında düşük değerler elde edilmesine neden olur. Daha sonra kayma mesafesi arttıkça numune yüzey pürüzlülüğünde bir artış meydana gelmesi ile birlikte numuneden kopan aşınma partikülleri sürtünme katsayısında bir artışa neden olur.

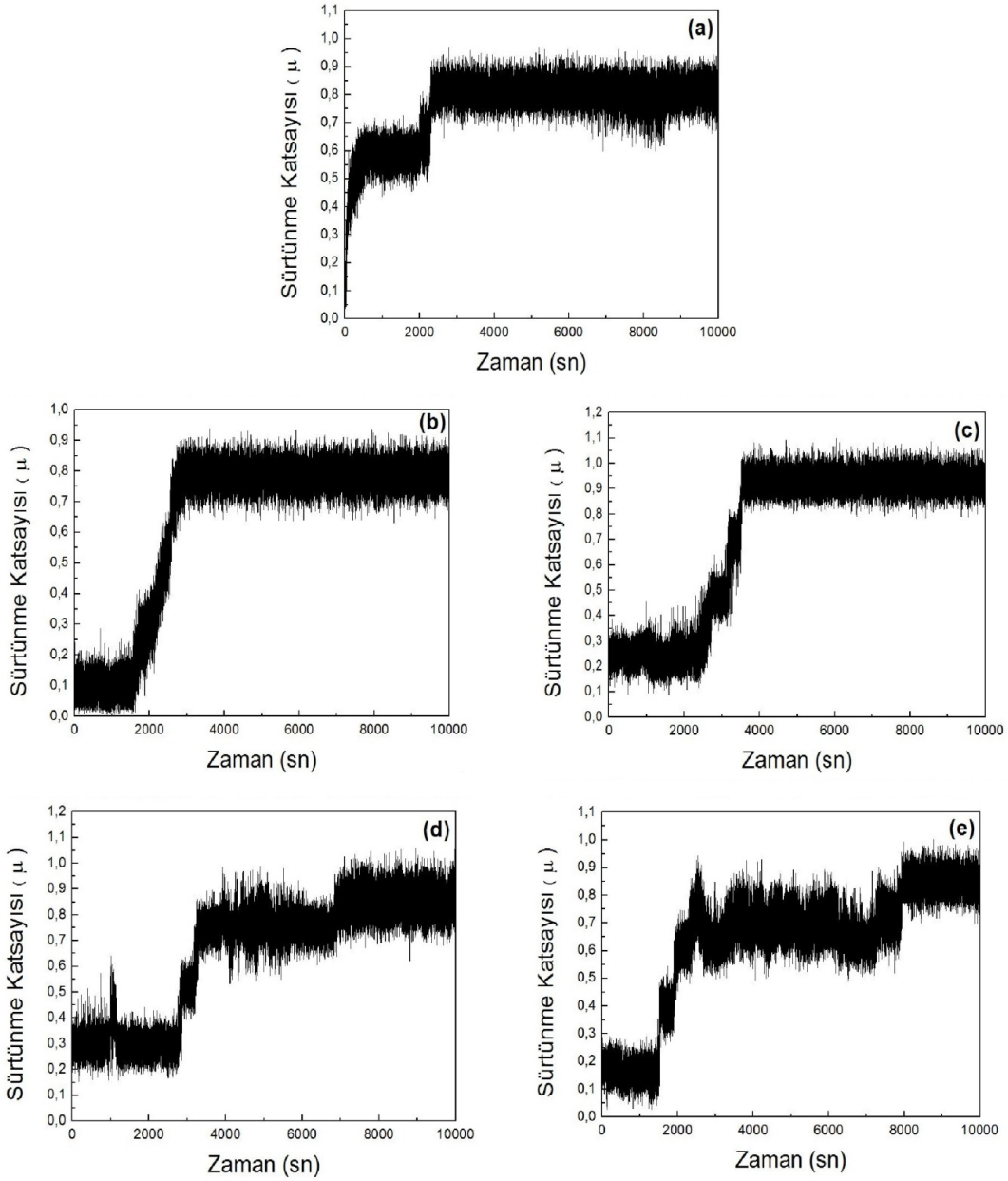
Sürtünme yalnız başına bir malzeme özelliği değildir, tribolojik bir sistem özelliğidir. Bunun anlamı şudur; sürtünme sadece birbirine temas eden malzeme temeli ile öngörülemez fakat sürtünme sık sık tek tabakalı ince sınır filmleri oluşturan herhangi bir kimyasal reaksiyon ve çevre şartlarının yanısıra sürtünen malzeme çiftine, temastaki çalışma şartlarına, sistemin, temas eden elemanların ve yüzey şartlarının rijitliğine (pürüzlülük, topografya vb.) bağlıdır.



Şekil 4.5. 1500 ^{o}C'de 1 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin sürtünme katsayısı sonuçlarını gösteren grafikler; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ.



Şekil 4.6. 1500 ^{o}C'de 10 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin sürtünme katsayısı sonuçlarını gösteren grafikler; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ.



Şekil 4.7. 1500 ^{o}C'de 50 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin sürtünme katsayısı sonuçlarını gösteren grafikler; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ.

Şekil 4.5-4.7'de katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin sürtünme katsayıları 0.2 ile 0.9 aralığında değiştiği görülmektedir. Numunelerin tavlama süreleri arttıkça tane boyutunda meydana gelen büyüme, sürtünme katsayısında bir artışa neden olmuştur. Basu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada tetragonal zirkonyadaki tane boyutundaki artışın sürtünme katsayısında bir artışa neden olduğunu bildirmişlerdir (Basu ve ark., 2004). Çizelge 4.1'de katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin farklı tavlama sürelerindeki sürtünme katsayılarının karşılaştırması verilmektedir.

Çizelge 4.1. Ortalama sürtünme katsayısının tavlama süresine göre değişimi.

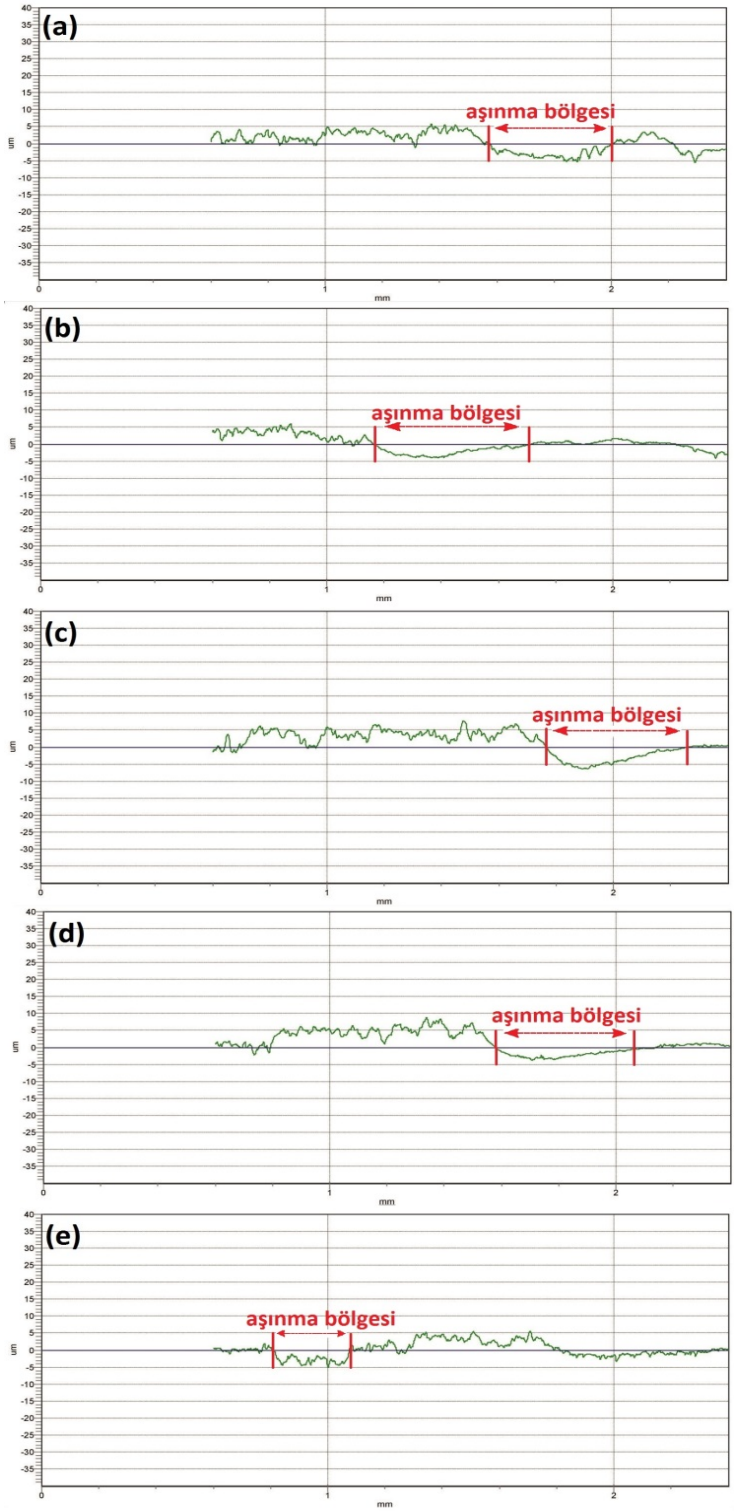
Numuneler	Ortalama Sürtünme Katsayıları		
	1 h	10 h	50 h
Katkısız 8YSZ	0,76	0,77	0,81
%1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ	0,74	0,78	0,79
%5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ	0,75	0,81	0,93
%10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ	0,74	0,77	0,80
%15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ	0,75	0,75	0,82

h: tavlama saati

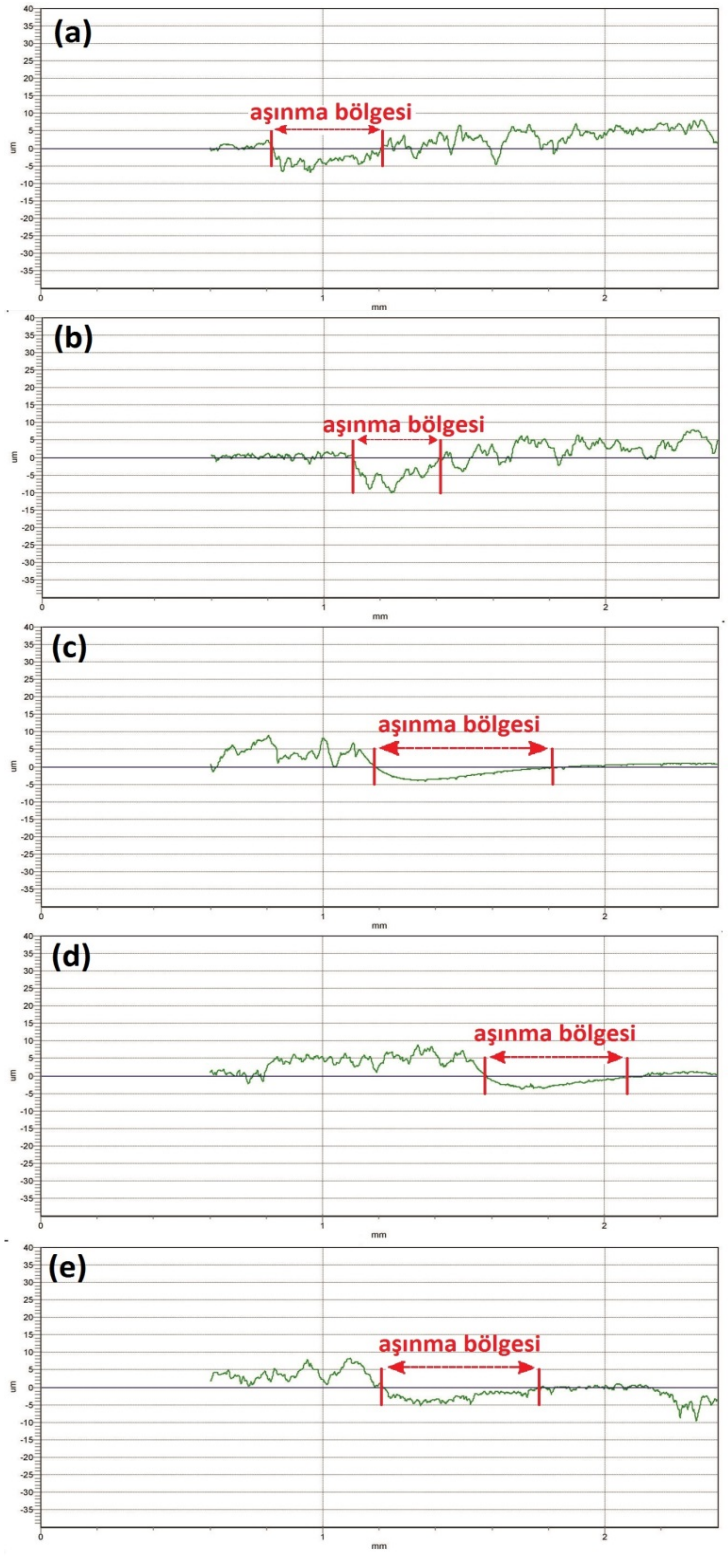
Tavlama süresindeki artışla birlikte sürtünme katsayılarında bir miktar artış meydana geldiği Çizelge 4.1'den görülebilmektedir. Tavlama süresindeki artış ile numunelerde tane büyümesinin meydana gelmesi sonucunda aşındırıcı karşı eleman ile daha büyük tanelerin sürtünmesi ile kontak alanının artmış olabileceği düşünülmektedir. Bu durum sürtünme katsayısında bir artışa neden olmuş olabilir.

4.2.2. Deney numunelerinin aşınma sonrası yüzey profilleri

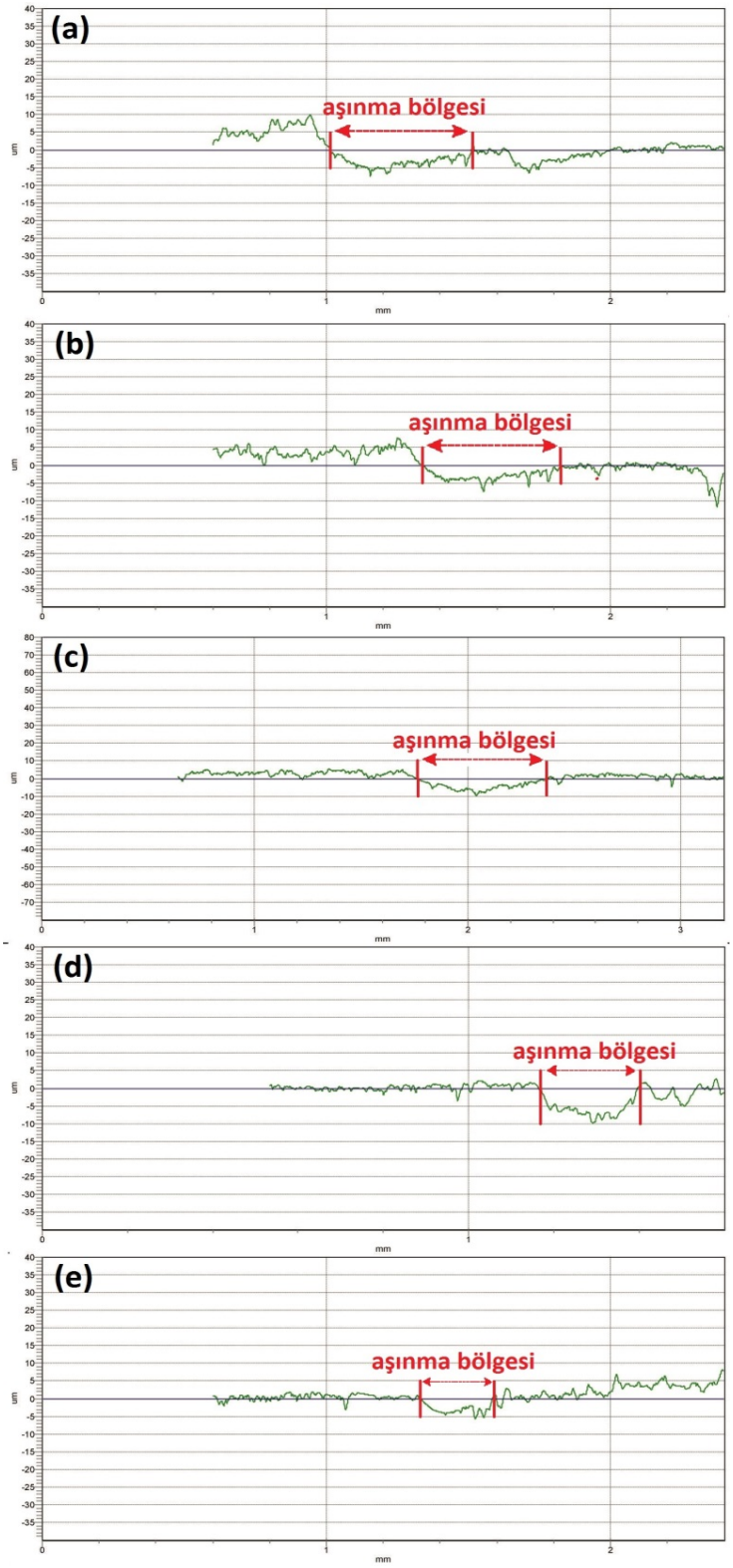
Şekil 4.8-4.10'da katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin aşınan bölgelerinden alınan yüzey profil görüntüleri verilmektedir. Yüzey profilleri incelendiğinde 8YSZ'ye değişik oranlarda Co_3O_4 ilavesi ile aşınan bölgede bir küçülme olduğu gözlenmiştir. Aşınma yüzey profil resimleri, Co_3O_4 miktarındaki artışla birlikte yüzey profilindeki aşınma bölgesinin alanındaki azalmada da bir artış olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.8. 1500 ^{o}C'de 1 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin aşınma bölgelerinin yüzey profilleri; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ.



Şekil 4.9. 1500 ^{o}C'de 10 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin aşınma bölgelerinin yüzey profilleri; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ.

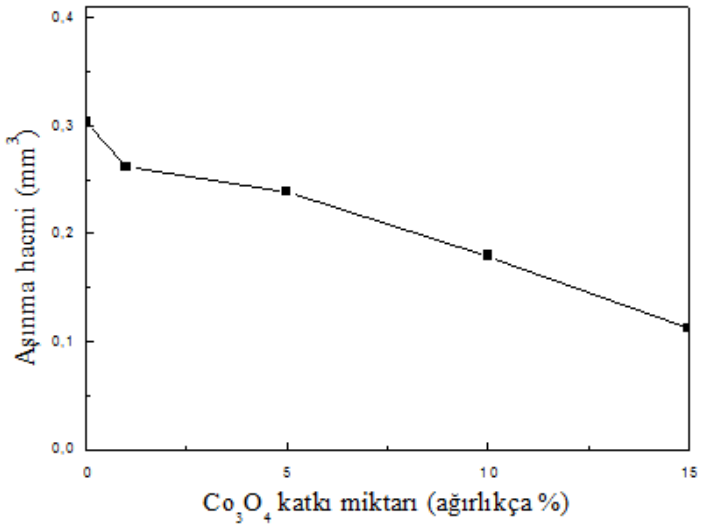


Şekil 4.10. 1500 ^{o}C'de 50 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin aşınma bölgelerinin yüzey profilleri; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ.

Şekil 4.8-4.10'daki yüzey profilleri incelendiğinde katkısız 8YSZ örneklerde aşınma izleri daha şiddetli iken Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerde ise aşınma izleri daha hafif olduğu görülebilmektedir. Yani Co_3O_4 ilaveli 8YSZ numunelerde aşınma, katkısız 8YSZ'ye göre daha az şiddette gerçekleşmiştir.

4.2.3. 8YSZ'nin aşınma miktarına Co_3O_4 ilavesinin etkisi

1500 ^oC'de 1 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin aşınma hacimlerindeki değişim Şekil 4.11'de verilmektedir. Co_3O_4 ilavesiyle ve katkı miktarındaki artışla beraber 8YSZ'nin aşınma hacminde bir azalma meydana gelmiştir. 8YSZ'ye farklı oranlarda ilave edilen Co_3O_4 muhtemelen yağlayıcı bir madde gibi davranmış olabileceği düşünülmektedir. Bu Co_3O_4'in kendi kendine yağlayıcılık özelliğinden dolayı aşınma hacimlerinde bir azalma meydana getirmiş olabilir.



Şekil 4.11. Co_3O_4 katkı miktarı ile 8YSZ'nin aşınma hacmindeki değişim.

Kuru sürtünme ve oda sıcaklığı şartlarında 0.1 m/s sabit kayma hızında ve 3 N yük altında yapılan bu çalışmada Co_3O_4 katkılı 8YSZ seramiklerin uygulanan yüke göre aşınma hacmi sonuçları Çizelge 4.2.'de gösterilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi 1, 10 ve 50 saatlik tavlama sürelerine göre yapılan deneylerde tüm tavlama süreleri içerisinde en büyük aşınma miktarı 0.4044 mm^3 olarak 50 saatlik tavlama süresinde

katkısız 8YSZ numunelerinde görülmüştür. Benzer olarak 1 saat sinterlenmiş %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ'de en düşük aşınma miktarı 0.1123 mm^3 aşınma hacmi değerine sahipken, katkısız 8YSZ'de numunesinin aşınma hacmi ise 0.3025 mm^3 bulunmuştur (Çizelge 4.2). Co_3O_4 ilavesi ile aşınma hacmindeki azalma; Co_3O_4'in kendi kendine yağlayıcılık etkisi yüzünden olduğu düşünülmektedir. Kendi kendine yağlayıcılık özelliğe sahip seramiklerin aşınma davranışları ve sürtünmesi üzerine çok sayıda çalışma yapıldı. Bu çalışmaların çoğu aşınan yüzeyler üzerinde ince bir tabaka, tribofilm olduğunu açığa çıkardı (Akhadejdamrong ve ark., 2003; Aizawa ve ark., 2004; Jianxin ve ark., 2005; Jianxin ve ark., 2006).

Çizelge 4.2. Katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin tavlama süresine göre aşınma hacimleri.

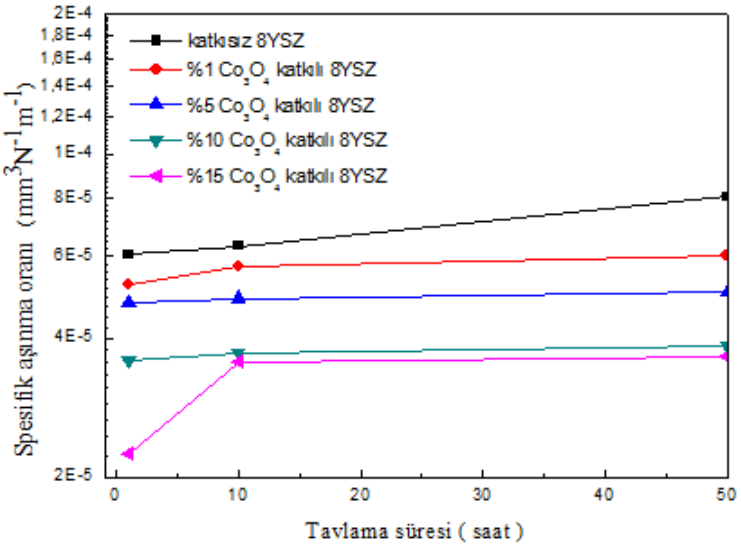
Numuneler	Aşınma hacimleri (mm^3)		
	1 h	10 h	50 h
Katkısız 8YSZ	0.30	0.32	0.40
8YSZ + %1 katkılı Co_3O_4	0.26	0.29	0.30
8YSZ + %5 katkılı Co_3O_4	0.24	0.24	0.25
8YSZ + %10 katkılı Co_3O_4	0.18	0.18	0.19
8YSZ + %15 katkılı Co_3O_4	0.11	0.18	0.18

1500 ^oC'de 1, 10 ve 50 saatlik tavlama sürelerine göre aşınma hacimleri incelendiğinde tavlama süresi arttıkça tane boyutundaki artış yüzünden aşınma haminin arttığı Çizelge 4.2'de görülmektedir. Bununla beraber ayrıca Co_3O_4 katkı miktarı arttıkça 8YSZ'nin aşınma haciminde de lineer bir azalma meydana geldiğini gösterdi (Şekil 4.11).

4.2.4. 8YSZ'nin Spesifik aşınma miktarına Co_3O_4 ilavesinin etkisi

Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin değişik tavlama sürelerinde spesifik aşınma miktarları Şekil 4.12'de verilmektedir. 3 N yük ve 0.1 m/s sabit kayma hızında ve 1000 m kayma mesafesinde, katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelere karşı Al_2O_3 bilya kullanarak numunelerin spesifik aşınma oranları hesaplanmıştır. Şekil 4.12'de 8YSZ'nin spesifik aşınma miktarlarında, Co_3O_4 ilavesi ile birlikte bir azalma meydana geldiği görülmektedir. 1500 ^oC'de 1 saat sinterlenmiş katkısız 8YSZ'nin spesifik aşınma miktarı $6{,}05.10^{-5}$ $mm^3N^{-1}m^{-1}$ iken ağırlıkça %15 Co_3O_4 ilavesi ile $2{,}246.10^{-5}$ $mm^3N^{-1}m^{-1}$ değerine düşmüştür. Spesifik aşınma sonuçlarına göre

8YSZ'ye farklı oranlarda Co_3O_4 ilavesi spesifik aşınmada bir azalmaya neden olmuştur. Co_3O_4 ilaveli 8YSZ numunelerdeki daha düşük spesifik aşınma oranı; Co_3O_4'in yağlayıcılık özelliğinden ve 8YSZ'nin tane sınırlarında ve etrafında oluşturduğu ikinci faz çökeltileri neden olmuş olabilir.



Şekil 4.12. Katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin spesifik aşınma miktarları.

Aşağıda Çizelge 4.3'de katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin tavlama sürelerine göre spesifik aşınma miktarlarındaki değişim verilmektedir. Çizelge 4.3 incelendiğinde tavlama süresi arttıkça numunelerin spesik aşınma miktarında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Tavlama süresinin artışı ile birlikte numunelerde meydana gelen tane büyümesi spesifik aşınma miktarında bir artışa neden olmuştur.

Çizelge 4.3. Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin farklı tavlama sürelerine göre spesifik aşınma miktarları.

Numuneler	**Spesifik aşınma miktarları ($mm^3N^{-1}m^{-1}$)**		
	1 h	10 h	50 h
Katkısız 8YSZ	$6{,}05.10^{-5}$	$6{,}326.10^{-5}$	$8{,}088.10^{-5}$
8YSZ + %1 katkılı Co_3O_4	$5{,}224.10^{-5}$	$5{,}704.10^{-5}$	$6{,}024.10^{-5}$
8YSZ + %5 katkılı Co_3O_4	$4{,}778.10^{-5}$	$4{,}872.10^{-5}$	$5{,}032.10^{-5}$
8YSZ + %10 katkılı Co_3O_4	$3{,}586.10^{-5}$	$3{,}696.10^{-5}$	$3{,}832.10^{-5}$
8YSZ + %15 katkılı Co_3O_4	$2{,}246.10^{-5}$	$3{,}55.10^{-5}$	$3{,}652.10^{-5}$

Katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin aşınma özelliklerinin tane boyutu ve sertlikle olan ilişkisi Çizelge 4.4'de verilmiştir. Seramiklerin aşınma direnci; tane

boyutu, porozite ve tane sınırı davranışı gibi mikroyapısal parametrelerden etkilenir (Ajayi ve ark., 1988). Tetragonal zirkonyadaki kayma aşınmasının tane boyutuna bağlılığı ile ilgili yapılan bir çalışmada da zirkonyanın tane boyundaki küçülme ile aşınma direncinin arttığından bahsedilmektedir (He ve ark., 1996).

Çizelge 4.4. Katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin tribolojik ve mekanik özellikleri.

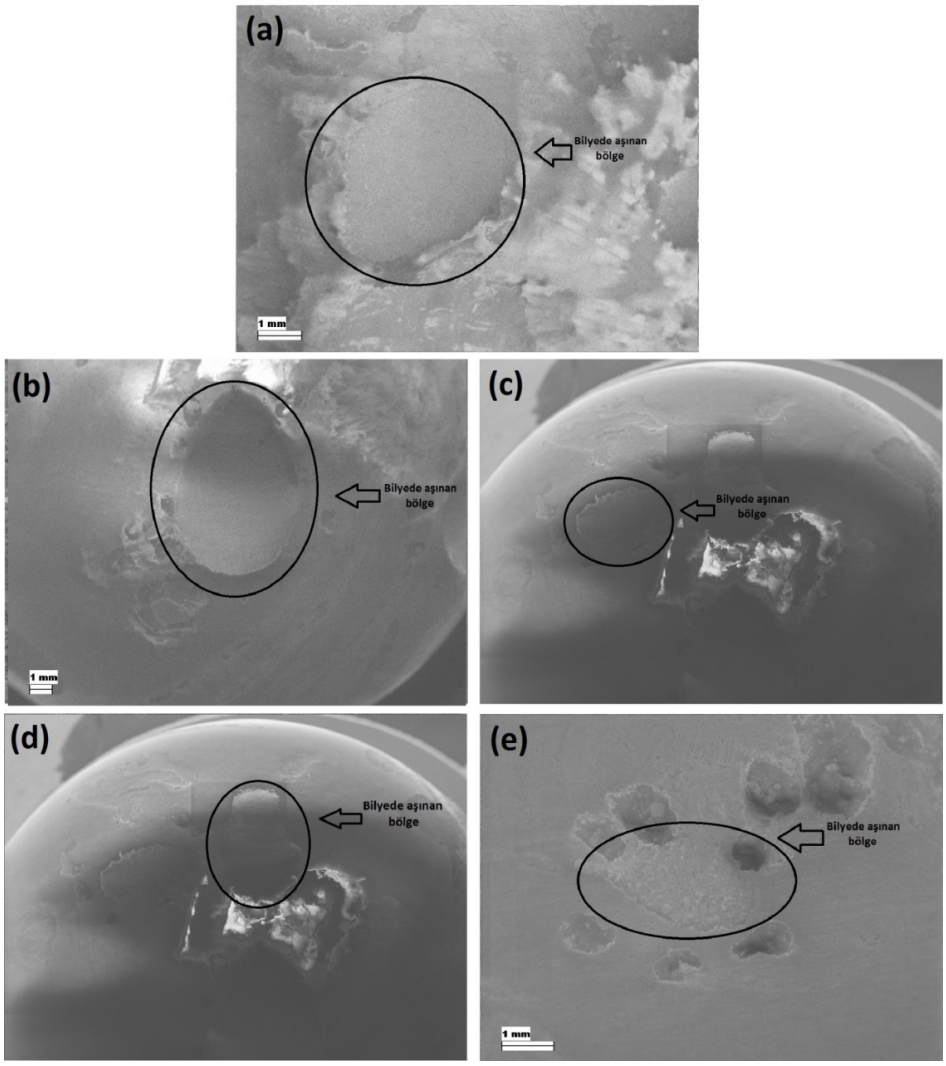
Numuneler	Tane Boyutu (µm)	Sertlik (kg/mm^2)	Sürtünme Katsayısı (µ)	Spesifik Aşınma Miktarı ($mm^3N^{-1}m^{-1}$)
Katkısız 8YSZ	3,14	1423	0,76	$6,05.10^{-5}$
%1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ	9,45	1404	0,74	$5,224.10^{-5}$
%5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ	13,32	1461	0,75	$4,778.10^{-5}$
%10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ	14,08	1593	0,74	$3,586.10^{-5}$
%15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ	15,23	1465	0,75	$2,246.10^{-5}$

Çizelge 4.4 incelendiğinde, Co_3O_4 katkısı ile 8YSZ'nin tane boyutunda bir artış meydana geldiği daha önce bölüm 4.1'de bahsedilmişti. 8YSZ'ye Co_3O_4 ilavesi ile tane boyutundaki artış, 8YSZ'nin sürtünme katsayısında bariz bir değişime neden olmamıştır. Co_3O_4 iyi bir katı yağlayıcı maddesi olarak bilinmektedir. Bu yüzden Co_3O_4 birçok seramik malzemelere yağlayıcı madde olarak da ilave edilmektedir (Bhushan, 2002). Farklı oranlarda Co_3O_4 ilavesi ile 8YSZ'nin spesifik aşınma miktarlarında bir azalma meydana geldiği Çizelge 4.3 ve 4.4'den görülmektedir. Bu çalışmada Spesifik aşınma miktarlarındaki azalmanın tane boyutu ile ilişkili olmadığı numunelerin sertlik ölçüm sonuçlarından anlaşılmaktadır.

Spesifik aşınma miktarındaki azalmanın asıl nedeni, 8YSZ'ye farklı oranlarda katkı yapılan Co_3O_4 aşınma yüzeyinde ince bir film oluşturması ve bu film tabakasının katı bir yağlayıcı etki yaptığı düşünülmektedir.

4.2.5. Aşındırıcı bilyedeki aşınma miktarları

Co_3O_4 katkılı 8YSZ numuneler 3N yük altında, 1000 metre mesafede ve 0.1 kayma hızında Al_2O_3 bilyeye karşı aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınma deneylerinde 1650 kg/mm^2 sertliğe sahip seramik Al_2O_3 bilye kullanılmıştır. Katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelere karşı yapılan aşınma deneylerde aşındırıcı Al_2O_3 bilyedeki aşınma miktarları hesaplandı.



Şekil 4.13. Aşınma deneylerinde kullanılan karşı aşındırıcı bilye malzemedeki aşınan bölgelerin SEM görüntüleri; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ.

Aşınma deneyleri sonucunda Al_2O_3 bilye üzerindeki aşınan bölgenin SEM ile analiz incelemeleri yapılmıştır. Aşınma deneyleri sonucunda aşındırıcı bilyenin SEM görüntüleri Şekil 4.13'de gösterilmektedir.

Yapılan aşınma deneyleri sonucunda Co_3O_4 katkılı 8YSZ numuneler karşısında Al_2O_3 bilyedeki aşınma hacimlerinin katkısız 8YSZ'ye oranla %15 katkılı Co_3O_4'e göre azaldığı görülmektedir. Yani Al_2O_3 bilyedeki aşınma Co_3O_4 katkı oranıyla genel olarak ters orantılı olarak azalmaktadır.

Çizelge 4.5'de Co_3O_4 katkılı 8YSZ numuneler karşısında Al_2O_3 bilyedeki aşınma hacimlerindeki değişimler verilmektedir. Yapılan aşınma deneyleri sonucunda Co_3O_4 katkılı 8YSZ numuneleri karşısında Al_2O_3 bilyedeki aşınma hızının Co_3O_4 katkı oranı arttıkça aşınma oranının azaldığı görülmektedir.

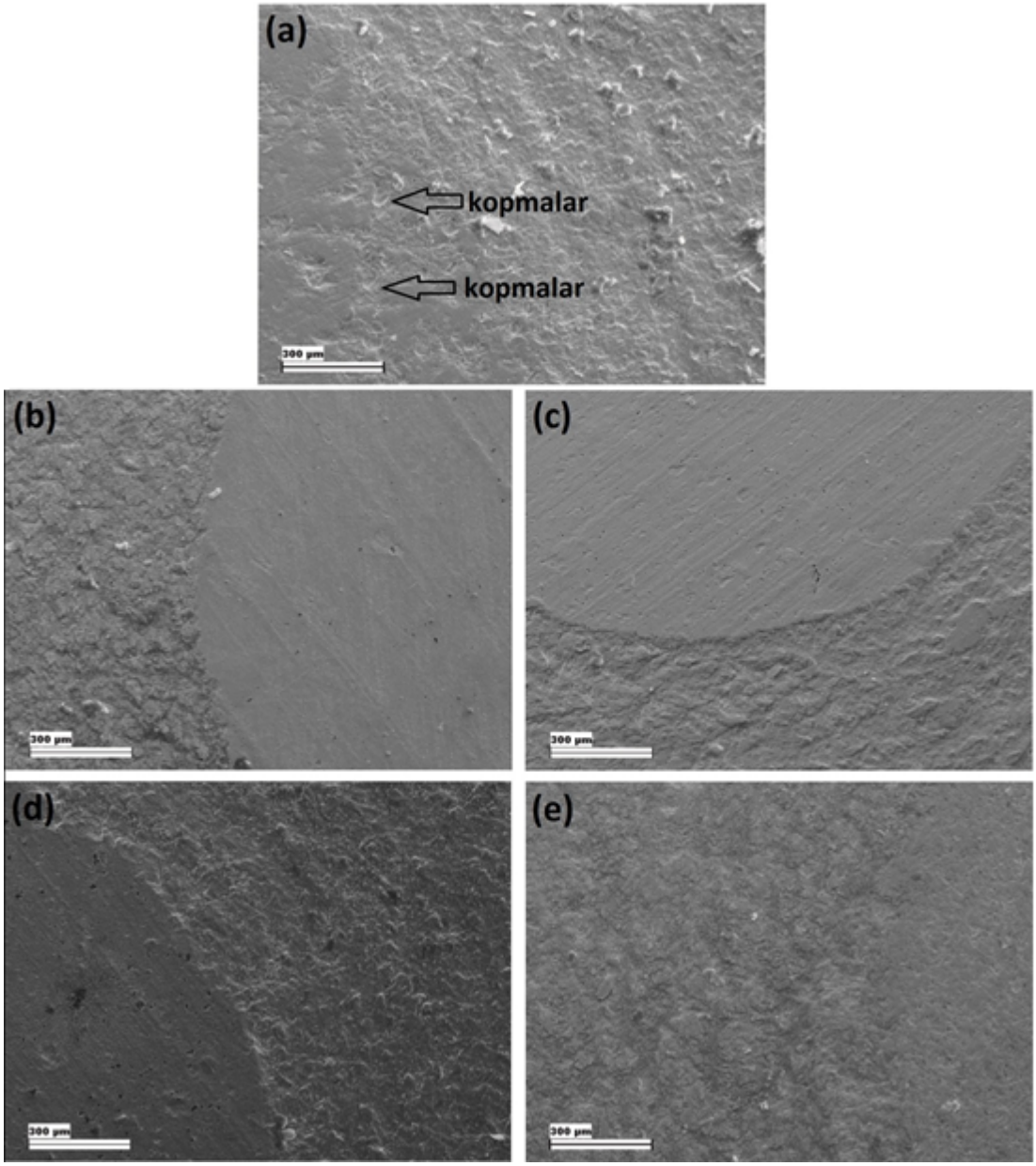
Çizelge 4.5. Bilyedeki aşınma miktarları.

Numuneler	Bilyedeki Aşınma Hacimleri (mm^3)
Katkısız 8YSZ	0.0331
8YSZ + %1 katkılı Co_3O_4	0.3050
8YSZ + %5 katkılı Co_3O_4	0.0152
8YSZ + %10 katkılı Co_3O_4	0.0306
8YSZ + %15 katkılı Co_3O_4	0.0047

Yapılan deneylerde aşınma izi çapı ölçülerek aşınmanın büyüklüğü tespit edilmiştir. Co_3O_4 ilavesiyle beraber aşınmada düşüş görülmüş; en düşük aşınma ise ağırlıkça %15 katkılı Co_3O_4 içeren numunede 0,0047 mm^3 olarak hesaplanmıştır.

4.2.6. Co_3O_4 katkılı 8YSZ seramiklerin aşınma izlerinin karakterizasyonu

1500 ^oC'de 1, 10 ve 50 saat süre ile tavlanmış katkısız ve değişik oranlarda Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin aşınma sonrası aşınma yüzeyleri Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ile 250 büyütmede mikroyapı resimleri çekilmiştir. Şekil 4.14'de 1500 ^oC'de 1 saat sinterlenmiş Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin aşınma izlerinin mikroyapıları verilmektedir.



Şekil 4.14. 1500 ^{o}C'de 1 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin aşınma izleri; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ.

Şekil 4.14'de görülen SEM verilerindeki kopmaları şu şekilde açıklayabiliriz; sürtünme enerjisinin ısıya dönüşmesi ile gerçek temas alanının sıcaklığı artar. Artan sıcaklığın etkisi ile sürtünen yüzeylerde bölgesel ergimeler olur ve yüzeylerden küçük parçacıklar koparak aşınmayı hızlandırır. Sürtünme ve aşınma sonucu meydana gelen yapı dönüşümleri de ısıl çatlamalara ve sürtünme esnasında parçacıkların koparak aşınmasının artmasına sebep olur. Bu nedenle katı cisimlerin

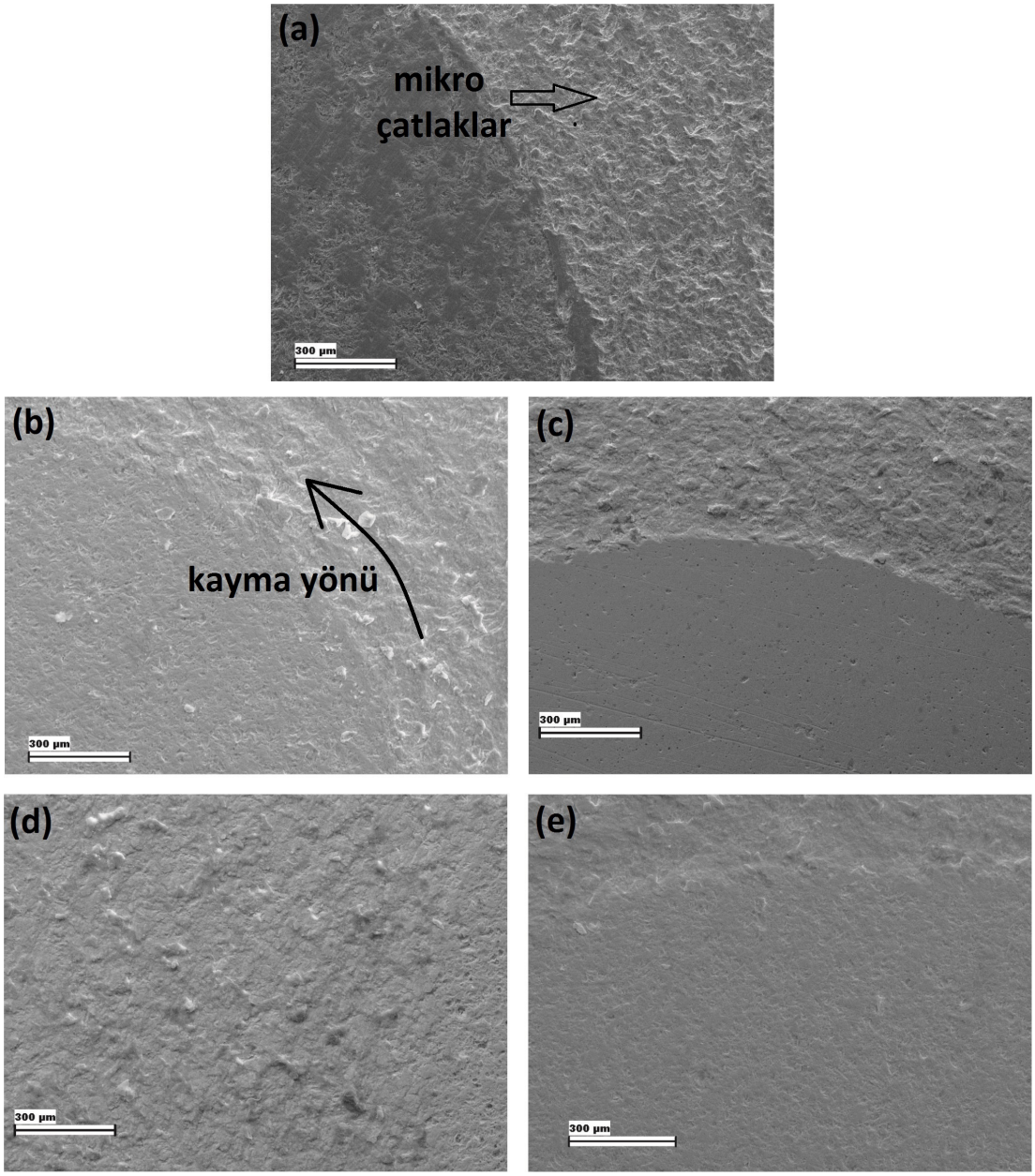
aşınmasında sürtünen yüzeylerin sıcaklığı çok önemlidir (Karamış ve ark., 1988; Odabaş, 1991; Gürleyik, 1992; Tekin, 1986).

Şekil 4.14'de derin oyuklar haricinde görülen çukurcukların aşınma esnasında gömülen aşındırıcı parçacığın yine başka bir aşındırıcı parçacığının etkisiyle buradan sökülerek meydana gelebileceği ya da yerinden kopmuş sert fazların oluşturduğu boşluklar olabileceği tahmin edilmektedir.

250x büyütme ile çekilmiş görüntüde nispeten yumuşak matris fazına gömülmüş açık renkte parçacıklar göze çarpmaktadır (Şekil 4.15). Şekil 4.15-b-e gösterilen aşınma izi resimlerinde görülen beyaz noktaların Co_3O_4 olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.14'de görülen SEM verilerine göre katkı oranı arttıkça aşınmanında azaldığı görülmüştür. Şekil 4.14-a grafiğinde görülen katkısız 8YSZ grafiğindeki aşınma miktarının diğerlerinden daha fazla olduğu görülmektedir. Co_3O_4 miktarı arttışı aşınmayı azalttığını görebilmekteyiz (Şekil 4.14-b-e).

Kuru sürtünme, hiçbir şekilde yağlanmamış iki katı cisim birbiri üzerinde kayma hareketi yaptığında karşılaşılan sürtünme halidir. En hassas işlemede bile yüzey pürüzleri mevcut olacağından, cisimlerin birbirlerine gerçekten temas ettikleri alan küçüktür ve bu noktalardaki yüzey basıncı hesaplanan ortalama basıncın çok üstündedir, bu yüksek basınç plastik deformasyona, temas eden tepeciklerin birbirleriyle kaynak bağlantısı oluşturmasına sebep olur. Hareket sürecinde bu kaynak noktacıkları kesilir, kopar; sürtünmeyi oluşturan başlıca etken de bu kesme kuvvetleridir.



Şekil 4.15. 1500 ^{o}C'de 10 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin aşınma izleri; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ.

Şekil 4.15-a'daki aşınma, kimyasal bozulma veya iletişim ara yüzeyinde erime suretiyle mikro çatlama sebebiyle, fiziksel ayrılma olarak, malzemenin kaldırılması sonucuyla vuku bulmaktadır.

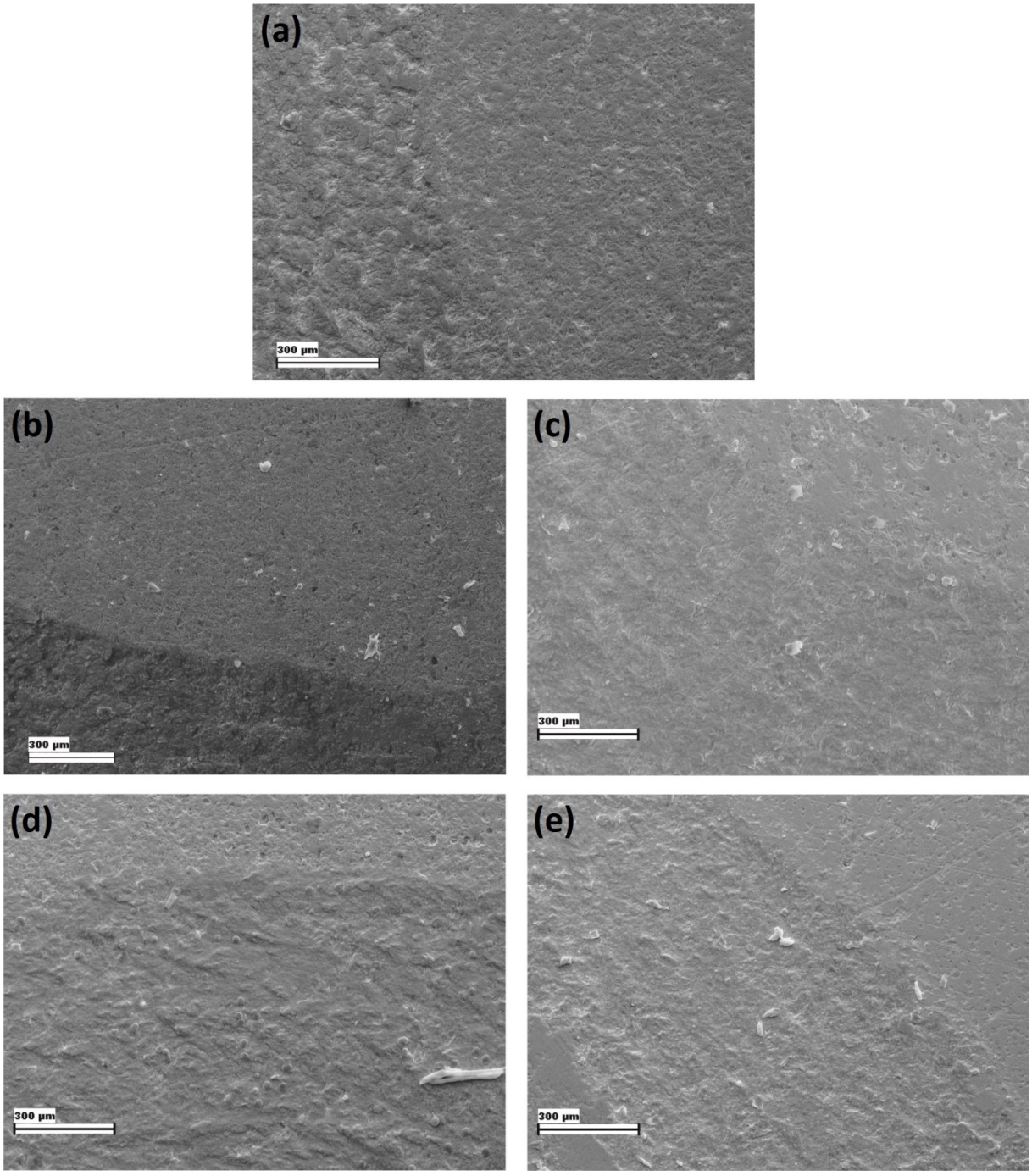
Katkısız ve Co_3O_4 katkılı numuneler üzerindeki aşınma morfolojisi Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Karşıt gövde ve numune yüzeyleri üzerinde kayma yönü

doğrultusunda abrasif aşınma görülmüştür. Numune yüzeylerinde dikkate alınmayacak çok küçük mikro çatlaklar gözlenmiştir. Numunelerdeki mikro çatlaklar incelendiğinde kayma yönüne dik olduğu görülmüştür. Numuneler incelendiğinde aşınma izinin ortalarda oluştuğu, mikroçatlaklarında daha çok köşe noktalarda meydana geldiği görülür.

Şekil 4.15'te numunelerde mikro çatlakların meydana geldiği gürüldüğü gibi yüzey topoğrafyasında da nispeten çukurda olan kısımdan Co_3O_4 kopmuş olabileceği ya da daha fazla aşınmış olan matris yapı olabileceği düşünülmektedir.

Şekil 4.15'de görüldüğü gibi numunenin 250x büyütme ile alınmış aşınma yüzeyi SEM görüntüsünde yoğun aşınma izleri ve yer yer koyu renkte derin boşluklar mevcuttur. Aşınma izlerinin bazıları derin olduğu gibi kimisi daha sığdır. Ayrıca izlerin genelinde bir süreksizlik mevcuttur. Bu durumun, 8YSZ numunelerin içerdiği Co_3O_4 katkısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yaptığımız bu deneysel çalışmalarında, Co_3O_4 katkısının aşındırıcı parçacıkların hasarına direnç gösterdiğini ve aşınma izlerinde süreksizlik ve izlerin derinliğinde azalma meydana getirdiği görülmüştür.

Şekil 4.14-4.16'daki aşınma yüzeyinden alınmış SEM görüntüsünde yer yer derin ve yer yer sığ, sürekli aşınma izleri görülmektedir. Numunelerin aşınma yüzeyinde irili ufaklı çok sayıda boşluk tespit edilmiştir. Bölüm 4.1'deki Şekil 4.1-4.3'de gösterilen mikroyapı incelemelerinde Co_3O_4 ilavesinin 8YSZ'nin tane sınırları arasında çökeldiği görülmektedir. Numunelerin aşınma yüzeyinde oluşan bu boşlukların çökelen Co_3O_4'den kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.16. 1500 ^{o}C'de 50 saat sinterlenmiş katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin aşınma izleri; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, c) %5 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, d) %10 Co_3O_4 katkılı 8YSZ, e) %15 Co_3O_4 katkılı 8YSZ.

Şekil 4.16'e bakıldığında boşluklu ve gözenekli yapılar görülmektedir. Bu yapılar aşınma direncini etkilemektedir. Şekil 4.14-4.15'e göre boşluklu ve gözenekli yapılar azaldığından aşınma direncinin azalmasına sebep olmuştur. Bu durumda aşınma hacimlerine yansımıştır.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Deneysel çalışmalar kapsamında %1, 5, 10 ve 15 Co_3O_4 ilaveli 8YSZ seramik kompozit numuneler üretilmiştir. Farklı oranlarda Co_3O_4 ilavesi ve miktarının 8YSZ seramiklerin tane yapısına, mikroyapısına ve tribolojik özelliklerine etkileri incelenmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- 8YSZ'ye ağırlıkça %1-15 Co_3O_4'in ilavesi, ortalama tane boyutunda bir artış meydana getirmiştir. SEM mikroyapıları; Co_3O_4'in 8YSZ içerisinde çözünmediğini, çözünürlüğün sınırlı olduğunu ve çözünmeyen Co_3O_4'in ise 8YSZ'nin tane sınırlarında ve etrafında çökeldiğini gösterdi.

- Aşınma deney sonuçları; Co_3O_4 ilavesi ile 8YSZ'nin sürtünme katsayında bariz bir değişim meydana getirmediğini gösterdi. Fakat numunelerin tavlama sürelerindeki artışla birlikte numunelerde meydana gelen tane büyümesi nedeniyle sürtünme katsayılarında bir miktar artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Sürtünme katsayısının numunelerin tane boyutu ile de kısmen ilişkili olduğu bulunmuştur.

- Aşınma deneylerinden, 8YSZ içerisindeki Co_3O_4 katkı oranı arttıkça aşınma değerlerinde bir azalma olduğu tespit edildi. Numunelerin tavlama süreleri arttıkça aşınma miktarının arttığı bulundu. Bunu oluşturan sebebin tane boyutlarının 1.5-2 kat büyümesinin aşınma direncini azalttığı düşünülmektedir.

- Aşınan yüzeylerin profilmetre ölçümlerinden elde edilen grafikler incelendiğinde, katkısız 8YSZ'ye göre %15 katkılı Co_3O_4 numunelerin

aşınma alanının daha küçük olduğu tespit edildi. Bu durumun aşınma hacimiyle doğru orantılı olduğunu söyleyebiliriz.

- Mikroyapı görüntülerindeki tane boyutlarının aşınma değerlerini etkilediği tespit edilmiştir. Tane boyutlarının artması aşınmayı artırdığı deneysel sonuçlarla belirtilmiştir. Mikroyapılardaki tane boyutlarındaki diğer bir etkeninde ikincil faz oluşturan Co_3O_4 olmuştur. Tane sınırları arasında çökelen Co_3O_4 aşınmayı azalttığı deney sonuçlarıyla tespit edilmiştir.

- Aşınma izlerinin karekterizasyon sonuçları; katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerde abrasiv aşınma mekanizması ile aşınmanın meydana geldiğini gösterdi. Ayrıca katkısız 8YSZ örneklerin aşınma izlerinde mikroçatlak ve kopmaların olduğu tespit edildi.

5.2. Öneriler

- Yapılan bu çalışmada değişken olarak numunelerin tavlama süreleri ve Co_3O_4 katkı oranları olmuştur. Diğer değişkenler olan hız, yük ve kayma mesafesi sabit değer olarak tutulmuştur. Bu sabit değerleri değiştirerek katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin farklı hız, yük ve kayma mesafesinde aşınmaya nasıl etkisi olduğu araştırılmalıdır.

- Katkısız ve Co_3O_4 katkılı 8YSZ numunelerin farklı sıcaklık ve farklı nem ortam şartlarında aşınma deneyleri yapılarak aşınmaya etkileri araştılmalıdır.

- Yapılan bu çalışmada, zirkonya seramiklerine Co_3O_4 katkısının aşınma özelliklerine etkisi incelendi. Farklı seramik malzemelerdede Co_3O_4'ün aşınmaya ve yüzey özelliklerine etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

AİZAWA T., AKHADEJDAMRONG T., and MİTSUO A., 2004. Self-lubrication of Nitride Ceramic Coating by the Chlorine İon İmplantation. Surf. Coat.Tech. 177–178: 573–581.

AJAYİ, O.O., and LUDEMA K.C., 1988. Surface Damage of Structural Ceramics:İmplication for Wear Modelling. Wear, 124: 237-57.

AKHADEJDAMRONG, T., AİZAWA T., YOSHİTAKE M., MİTSUO A., YAMAMOTO T., and IKUHARA Y., 2003. Self-lubrication Mechanism of Chlorine İmplanted TiN Coatings. Wear 254 (7–8): 668-679.

AKKURT, S., 1990. Poliasetalin Kuru ve Su İle Yağlama Koşullarında Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Bakımından İncelenmesi. 4. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara, 585-594.

AKTAŞ, B., 2002. %8mol Yitriya ile Stabilize Edilmiş Kübik Zİrkonyanın Sinterlenebilirliğine ve Tane Büyümesine Çeşitli Metal Oksitlerin Etkisinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 112s.

AKTAŞ, B., 2008. Baryum Oksit ve Lantanyum Oksit Katkılı Kübik Zirkonya Seramikte Mikroyapı, Mekanik Özellikler ve İyonik İletkenliğin İncelenmesi. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 266.

AKTAŞ, B., ve TEKELİ S., 2014. Influence of Co_3O_4 Addition on the Ionic Conductivity and Microstructural Properties of 8YSZ. International Journal of Materials Research, Vol. 105, No. 6: 577-583.

AKTAŞ, B., ve TEKELİ, S., 2015. Effect of Co_3O_4 on the Fracture Toughness and Microstructure of Yttria-Stabilized Cubic Zirconia (8YSZ). Acta Physica Polonica A, 127, 4: 1384-1387.

ARIN, M., 2007. Zirkonya Seramiklerinin ve ZrO_2-Tin Kompozitlerinin Üretimi Ve Karakterizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

AYDIN, G.Ç., 2009. Plazma Nitrürlenmiş H11 Sıcak İş Takım Çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek lisans tezi, Kayseri, 118s.

BABALIK, F.C., 2006. Makine Elemanları ve Konstruksiyon Örnekleri. Nobel Yayın Dağıtım, 892 s.

BASU, B., VLEUGELS J., and BIEST, O.V., 2002. Development of ZrO_2-ZrB_2 Composites. Journal of Alloys and Compounds, 334: 200-204.

BASU, B., VLEUGELS, J., and BIEST, O.V., 2004. Development of ZrO_2-TiB_2 Composites: Role of Residual Stress and Starting Powders, Journal of Alloys and Compounds, 365: 266-270.

BASU, B., VLEUGELS, J., and BIEST, O.V., 2004. Microstructure-Toughness-Wear Relationship of Tetragonal Zirconia Ceramics, J. Eur. Cer. Soc., 24: 2031-2040.

BATTEZ, A.H., GONZALEZ, R., VİESCA, J.L., FERNANDEZ, J.E., FERNANDEZ, J.M.D., MACHADO, A., CHOU, R. and RİBA, J., 2008. CuO, ZrO_2 and ZnO Nanoparticles as Antiwear Additive in Oil Lubricants. Wear, 265: 422-428.

BAYVAS, Ş., 1978. Genel mekanik. Türk Tarih Kurumu Basımevi, Ankara.

BENGİSU, M., 2006. Seramik Bilimi ve Mühendisliği. Nobel Yayınları.
BHUSHAN, B., 2000. Modern Tribology Handbook, CRC Yayınevi.
BHUSHAN B., 2002. Introduction to Tribology. John Wiley & Sons, New york, 254-258.
BOWDEN, F.P., and TABOR, D., 1950. The friction and lubrication of solids, At the Clarendon Press, Oxford.
BÜYÜKKELLECİ, Ü., 2008. Yeni Bir Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve Bazı Metallerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması. Fırat Üniversitesi, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisan Tezi, Elazığ.
CARTER, B.C., and NORTON, M.G., 2007. Ceramics Materials: Science and Engineering. Springer.
CONRAD HJ., SEONG WJ., and PESUN IJ., 2007. Current Ceramic Materials and Systems With Clinical Recommendations. A systematic review, J Prosthet Dent, 98: 389-404.
DEMİRCİ, A. H., 1982. Ötektoidaltı Alaşımsız Çeliklerin Isıl İşlemlere Bağlı Olarak Aşınma Davranışlarının Belirlenmesi ve Optimizasyonu. E.Ü., Makina Fakültesi, Doçentlik Tezi, Kayseri, 8-44.
GEÇKİNLİ, E., 1991. İleri Teknoloji Malzemeleri. İ.T.Ü. Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji Müh. Bölümü, Yüksek Lisan Tezi, İstanbul.
GHASEMİ OWSALOU, R., 2012. Aşınmaya Maruz Parçaların Aşınma Dayanımlarının Artırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisan Tezi, İzmir.
GÜNEŞ, D., 2006. Plazma Nitrürleme İle Çelikler Üzerinde Kompleks Kaplamaların Oluşturulması. Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, Afyon.
GÜR A.K., 2006. Aşınma Mekanizmaları. Fırat Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Doktora Semineri, Elazığ.
GÜRLEYİK, M.Y., 1975. Metallerin ve Metal Olmayan Sert Malzemelerin Taneli Maddeler Tarafından Sürtünerek Aşındırılması. Mühendis ve Makine, 19: 217, Ankara.
GÜRLEYİK, M.Y., 1986 a. Soğuk Deformasyonla, Aşınma Direnci Arttırılabilir. 2. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara, 5: 01-510.
GÜRLEYİK, M.Y., 1986 b. Makine Mühendisliğinde Aşınma Olayları. Mühendis ve Makine Cilt 27, 323: 3-14.
GÜRLEYİK, M.Y., 1992. Katı Cisimlerin Maksimum Aşınma Mukavemeti İçin Yapılan Araştırmalar. Von Jan Sadowski'den çeviri, Mühendis ve Makine Cilt 33, 384: 23-28.
GÖKYER, Z., 2010. Zayıf Topraklanmış ZrO_2 – SiO_2 Kompozitlerin Sentezi ve Karakterizasyonu. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Seramik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kütahya.
HALLING, J., 1981. The Role Of Surface films İn The Frictional Behavior Of Lubricated And Dry Contacts A Unifying İnfluence İn Tribological Theory. ASLE Trans. 24: 528-536.
HANNINK, R.H.J., and SWAIN, M.V., 1994. Progress in Transformation Toughening of Ceramics, Annu. Rev. Mater. Sc., 24: 359-408.
HE, Y., 1995. Tribological And Mechanical Properties Of fine Grained Zirconia And Zirconia Alumina Ceramics. Ph.D. thesis, University of Twente, The Netherlands.

HE Y., WİNNUBST L., BURGGRAAF A.J., and VERWEİJ H., 1996. Grain-size Dependence of Sliding Wear in Tetragonal Zirconia Polycrystals. Journal of American Ceramic Society, 79, 12: 3090-3096.

HOLBERG, K., and MATTHEWS, A., 1994. Coating Tribology. Elsevier Science B.V. 45-74.

HURRİCKS, P.L., 1972. Review Paper: Some Aspects of the Metallurgy and Wear Resistance of Surface Coatings. Wear, 22: 291-320.

HURİCKS, P.Y., 1973. Some Metalurgical Factor Controlling the Adhesive and Abresive Wear Resistance of Steels a Review. Wear, 26: 285-304.

İPEK, R., 1987. Tren Fren Papuçlarının Aşınmasının Deneysel İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, Kayseri.

İPEK, R., 1992. AISI 1020 Çeliğinin, Yüzey Sertleştirme İşlemleri Uygulanarak AISI 5115 Çeliğinin Yerine Kullanılabilirliğinin Deneysel Araştırılması. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, Kayseri.

JİANXİN D., TONGKUN C., and LİLİ L., 2005. Self-lubricating Behaviors of Al2O3/TiB2 Ceramic Tools in Dry High-speed Machining of Hardened Steel. J. Eur. Ceram. Soc. 25, 7: 1073–1079.

JİANXİN D., LİU L., XUEFENG Y., JİANHUA L., JUNLONG S., and JİNLONG Z., 2006. Selflubrication of Al2O3/TiC/CaF2 Ceramic Composites in Sliding Wear Tests and in Machining Processes, Mater. Des.

KALUÇ, E., ve SARI, N., 2000. Isıl Püskürtme Yöntemleri İle Oluşturulan Kaplama Tabakalarının Karakterizasyonu. Makine Metal Malzeme Dünyası, İstanbul, 50-60.

KARAMIŞ, M.B., 1985. Toprak İşleme Aletlerinde İş Organının Aşınmasının Etudu. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, Kayseri, 120 s.

KARAMIŞ, M.B., 1988. Ötektoid Altı Çeliklerin Kayma Sürtünmesinde Adhesiv Aşınma Katsayısının Araştırılması. 3. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara, 155-163.

KARAMIŞ, M.B., ODABAŞ, D. ve İPEK, R., 1988. Tren Fren Pabuçlarında Aşınma Davranışının Etüdü. 3. Ulusal Makine İmalat ve Tasarım Kongresi, ODTÜ, Ankara, 175-183.

KAYALI, E.S., 1993. Sürtünme ve Aşınma. Workshop on antiwear coatings, Tübitak, Gebze.

KERKWIJK, B., 1999. Wear And Friction Of Nanostructured Zirconia And Alumina Ceramics And Composites. Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands.

KILINÇ, Y., 1993. Yağlı Sürtünme Şartlarında Çelik İnce Zırh Yataklarında Üretim Tekniklerinin Aşınma Etkisinin Araştırılması. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 1-25.

KOBRİCK, R.L., 2010. Characterization and Measurement Standardization of Lunar Dust Abrasion for Spacecraft Design and Operations. A thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Colorado in partial, Doktora tezi, Uzay bilimler departmanı.

KORKUT, M.H., 1991. Sürtünmeye Maruz Metalik Disklerin Aşınma Bölgelerinde Dolgu Kaynak İşleminden Sonra Aşınma Özelliklerinin Değişiminin Deneysel Araştırılması. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 1-25.

KÜÇÜKOĞLU, D., 2008. Zirkonya Blokların Aşındırmayla Oluşan Kırılma

Dayanımları, Yeditepe Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

LACKEY, W.J., SOMIYA, S., KANAİ, E., and ANDA, K., 1986. Proceeding of the 1st International Symposium on Ceramic Component for Engine. Ed., 770.

LEE, W.E. and RAINFORTH, W. M., 1994. Ceramic Microstructure and Processing, Chapman and Hall, London, 338.

LUTHARDT, R.G., HOLZHÜTER, M., SANDKUHL, O., HEROLD, V., SCHNAPP, J.D., KUHLISCH, E., and WALTER. M., 2002. Reliability and Properties of Ground Y-TZP- Zirconia Ceramics. J Dent Res 81, 7: 487-491.

MALKONDU Ö., ÖZKURT Z., ve KAZAZOĞLU E., 2006. Zirconia in dentistry. İmplanttr Dergisi, 3: 18-28.

MCCMEEKİNG, R. M., and EVANS, A.G., 1980. Mechanics of Trasformation Toughening in Brittle Materials. Journal of American Ceram. Soc, 63, 5: 242-246.

MERT Z., 2007. Tek Silindirli Bir Motorda Sürtünmeye Etki Eden Faktörlerin Belirlenmesi ve Sürtünme Gücünün Azaltılması. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilimdalı, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak.

MOORE, M.A., 1974. A Review of Twe Body Abrasive Wear. Wear, 27: 1-17.

NAİR, F., KARAMIŞ, M.B., ve TAŞDEMİRCİ, A., 2000. Endüstriyel Uygulamalarda Borlanmış Çeliklerin Aşınma Davranışının İncelenmesi. 8. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 334-343.

ODABAŞ, D., 1987. Otektoid altı çeliklerin kayma sürtünme aşınmasında adhesiv aşınma katsayılarının araştırılması. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 50-65.

ODABAŞ, D., 1991. Kuru Sürtünme Şartlarında Termomekanik Faktörlerin AISI 3315 Çeliğinin Aşınma Davranışına Olan Etkilerinin Teorik ve Deneysel Araştırılması. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, Kayseri.

ÖZTÜRK, C., 2006. Yönlendirilmiş Mullit/Zirkonya Seramiklerinin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisan Tezi, Malzeme Bilimi ve Mühendislik Anabilim Dali, Gebze.

PENG, X., 2005. Zirconia Ceramics with Mixed Na_2O_3-Y_2O_3 Stabilizers. Master Thesis, Katholieke Universiteit, Leuven, Belgium.

PETERSON, M.B., 1976. Wear Testing Objectives And Approaches, Selection And Use Of Wear Tests For Metals. American Society for Testing and Materials STP 615, R.G. Bayer Edit., 3-11.

PICONI, C., and MACCAURO G., 1999. Zirconia as a Ceramic Biomaterial: Review. Biomaterials 20: 1-25

RAMASW, A. P ., 1999. Evaluation of CaO–CeO_2–Partially Stabilized Zirconia Thermal Barrier Coatings. Ceramics International, 25, 317-324.

SAN, N.Y., ve KALUÇ, E., 1996. Endüstride aşınma problemleri, Makine ve Metal Teknolojisi, 50, 2: 64-68.

SAN, N.Y., ŞİRİN Ş.Y., KALUÇ E., ve TÜLBENTÇİ K., 1997. Makine Parçalarının Aşınmasına Karşı Modem Yüzey İşlemleri. Makine Magazin, 14, 2: 48-51.

SARI, N.Y., 1997. Makina Parçalarının Aşınmasına Karşı Modern Yüzey İşlemleri. Makina Magazin, Haziran.

SELÇUK, B., 1994. Borlanmış AISI 1020 Ve 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Anabilim Dalı, Doktora tezi, Kayseri, 156.

SÖNMEZ, T., 2009. Yüksek Enerjili Öğütme Sistemleri İle Üretilen Y_2O_3 İle Kısmen Stabilize Zirkonyanın Karakterizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

STEVENS, R., 1986. Zirconia and Zirconia Ceramics. Magnesium Electron Ltd., Manchester 113.

STACHOWİAK, G.W., and STACHOWİAK, G.B., 1993. Environmental Effects On Wear And Friction Of Toughened Zirconia Ceramics. Wear 160: 153–162.

SUBBARAO, E.C., 1984. Advanced in Ceramics. The American Ceramic Society Inc., 12: 1-24.

TARHUNİ, M., 1996. Bazı Kültivatör Uç Demirlerinde Aşınmanın Azaltılabilmesini Sağlayan Yöntemler Üzerinde Araştırmalar. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir, 88-100.

TEKİN, E., 1986. Madencilikte Kullanılan Aşınma Dayanıklı Demir Alaşımları. 2. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTU, Ankara, 401-409.

TEKELİ S., 2001. Effect of Y_2O_3 Content on Sinterebility and Grain Growth in Zirconia-Based Ceramics., Metal Powder reports, Vol. 56, Issue 2: p.40

TMMOB., 2003. II. Ulusal Demir-Çelik Sempozyumu ve Sergisi: Bildiriler Kitabı, Yay. No: E/2003/336, Ankara.

TOSUN T., 2007. Kuron ve Köprü Protezlerinde Zirkonyum. Dentalife, 22:18-26.

ULUSOY, E., 1977. Bazı toprak işleme alet ve makinelerinde iş organlarının aşınması üzerine araştırmalar. Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Doktora Tezi, İzmir, 8-68.

WANG, Y., WORZALA, F.J., and LEFKOW, A.R., 1993. Friction And Wear Properties Of Partially Stabilized Zirconia With Solid Lubricant. Wear 167: 23–31.

WIEDERHORN, S.M., and FULLER, E.R., 1985. Structural Reliability of Ceramıc Materials. Materials, Material Sci&Eng, 71: pp 1169-1186.

WOYDT, M., KADOORİ, J., HABİG, K.H., and HAUSNER, H., 1991. Unlubricated Sliding Behavior Of Various Zirconia-Based Ceramics. J. Eur. Ceram. Soc. 7: 135–145.

YANG, X., DUAN, G., LU, A., HUANG, G., LU, L., WANG, X., 2007. Comparison Study on the High-temperature Phase Stability of CaO-doped Zirconia Made Using Different Precipitants. Materials Characterization, 58: 78–81.

YANG, H., OUYANG, J., ZHANG, X., WANG, N., and CHUNFANG, D., 2008. Synthesis and Optical Properties of Yttria-doped ZrO_2 nanopowders. Journal of Alloys and Compounds, 458: 474-478.

YANO, 1984. Resarch Institute Ltd. Fine Ceramic Edition.

YARALI, Y., YILMAZ, Ş., 2004. Seramik Kompozit Malzemeler, Metal Makina, 150: 468–473.

YILDIZ, T., 2006. Fırat Ünivrsitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, 23119, ELAZIĞ.

YILDIZLI, K., 2002. Borlamanın Çeliklerde Eroziv Aşınma Davranışına Olan Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri

Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek lisans tezi, Kayseri, 8-154.

YILMAZ, S., 1992. Alümina İçeren Seramik Kompozitlerin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

YILMAZ, F., 1997. 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi. 229-25.

ZHANG, B., XU, Y., GAO, F., SHİ, P., XU, B. and WU, Y., 2011 a. Sliding Friction and Wear Behaviors of Surface-Coated Natural Serpentine Mineral Powders as Lubricant Additive. Applied Surface Science, 257: 2540-2549.

ZHANG, B., XU, B., XU, Y., GAO, F., SHİ, P. and WU, Y., 2011 b. Cu Nanoparticles Effect on the Tribological Properties of Hydrosilicate Powders as Lubricant Additive for Steel-Steel Contacts. Tribology International, 44: 878-886.

ZUM GAHR K.H., 1996. Modeling And Microstructural Modification Of Alumina Ceramic For İmproved Tribological Properties. Wear 200: 215–224.

ZUM GAHR K.-H., 1996. Effect of grain size on friction and sliding wear of oxide ceramics, Wear 162–164: 269–279.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:** Hakan TEKİN
Uyruğu	**:** T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:** Selçuklu/19.07.1988
Telefon	**:** 05069910771
Faks	**:**
e-mail	**:** hakantekin42@gmail.com

EĞİTİM

Derece	**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	**:**Mehmet Akif Ersoy Lisesi	2005
Üniversite	**:**Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü	2011
Yüksek Lisans	**:** Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı	2015

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2011	**:** Şanlı isot	Makina tasarım Mühendisliği
2011	**:** Elmaslar soğutma	Proje Mühendisliği
2014	**:** Güvenilir yapı denetim	Kontrol Mühendisliği

UZMANLIK ALANI

Makine Mühendisliği, Makine malzemesi ve imalat

YABANCI DİLLER

İngilizce, Arapça