

**T.C.**  
**HARRAN ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DEĞİŞİK METAL OKSİT KATKILI ZİRKONYA SERAMİKLERİN  
SÜRTÜNME ve AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Rahime ŞERBETÇİ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ŞANLIURFA**

**2019**



**T.C.  
HARRAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DEĞİŞİK METAL OKSİT KATKILI ZİRKONYA SERAMİKLERİN  
SÜRTÜNME ve AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNÇLENMESİ**

**Rahime ŞERBETÇİ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ŞANLIURFA**

**2019**

Doç. Dr. Bülent AKTAŞ 'ın danışmanlığında Rahime ŞERBETÇİ'nin hazırladığı **“Değişik Metal Oksit Katkılı Zirkonya Seramiklerin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”** konulu bu çalışma 28/06/2019 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 : Doç. Dr. Mehmet Emin DENİZ.....

Üye : Doç. Dr. Şerife YALÇIN .....

**Bu Tezin Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.**

**Doç. Dr. İsmail HİLALİ**

**Enstitü Müdürü**

**Bu Çalışma HÜBAK Tarafından Desteklenmiştir.**

**Proje No: 17230**

**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 VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
1. GİRİŞ .....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	5
2.1. Zirkonyum Nedir? .....	5
2.1.1. Zirkonyum oksitin üretimi .....	6
2.1.2. Zirkonyum oksit ve kullanım alanları .....	6
2.1.3. Zirkonya materyalleri .....	9
2.1.3.1 Kararlı zirkonya .....	9
2.1.3.2. Kısmen kararlı zirkonya (Mg-PSZ) .....	9
2.1.3.3. Zirkonya ile sertleştirilmiş alumina .....	10
2.1.4. Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı zirkonyanın mekanik özelliklerine etki eden etmenler .....	10
2.1.4.1. Kararlı edici Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> miktarı .....	10
2.1.4.2. Zirkonyanın boyutu ve şekli .....	11
2.1.4.3. Aşındırma yüzey ve uygulamaları .....	11
2.1.4.4. Sıcaklık .....	11
2.1.4.5. Nem .....	11
2.1.4.6. Zaman .....	11
2.1.4.7. Makro ve mikro çatlakların dağılımı .....	12
2.2. Erbiyum (Er) .....	12
2.2.1. Erbiyum elementinin kullanım alanları .....	12
2.2.2. Erbiyum oksit (Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	13
2.3. Seryum (Ce) ve Seryum Oksit (CeO <sub>2</sub> ) .....	14
2.3.1. Kullanım alanları .....	14
2.4. Sürtünme .....	15
2.4.1. Sürtünmenin sınıflandırılması .....	18
2.4.1.1. Yüzeysel şartlara göre .....	19
2.4.1.2. Dinamik şartlara göre .....	22
2.5. Aşınma .....	23
2.5.1. Aşınmayı oluşturan temel unsurlar .....	25
2.5.1.1. Ana malzeme .....	25
2.5.1.2. Karşı malzeme .....	25
2.5.1.3. Ara madde .....	25
2.5.1.4. Çevre .....	26
2.5.1.5. Yükleme .....	26
2.5.1.6. Hareket .....	26
2.5.2. Aşınmayı etkileyen faktörler .....	27
2.5.2.1. Malzeme seçimi .....	27
2.5.2.2. Sürtünme .....	27
2.5.2.3. Yüzeğe uygulanan yük .....	27
2.5.2.4. Sürtünme mesafesi .....	27
2.5.2.5. Yüzeğe sertliği .....	27
2.5.2.6. Yüzeğe pürüzlülüğü .....	28

2.5.2.7. Yağlama .....	28
2.5.3. Aşınma mekanizmaları .....	28
2.5.3.1. Oluşum mekanizmalarına göre aşınma mekanizmaları .....	28
2.5.3.2. Hasarın fiziksel görünüşüne göre aşınma mekanizmaları .....	33
2.5.3.3. Aldıkları özel adlara göre aşınma mekanizmaları .....	35
3. MATERYAL ve YÖNTEM .....	37
3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Örneklerin Hazırlanması .....	37
3.2. Tane Büyütme İşlemi ve Mikro Yapı İncelemeleri .....	38
3.3. Aşınma Deneyleri .....	41
3.4. Aşınma İzinden Yüzey Profillerinin Alınması .....	43
3.5. Aşınma Hacimlerinin Hesaplanması .....	43
3.6. Spesifik Aşınma Miktarının Hesaplanması .....	44
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....	45
4.1. Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Katkılı 8YSZ Örnekler .....	45
4.1.1. Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ilavesinin 8YSZ'nin tane boyutuna ve mikroyapısına etkisi .....	45
4.1.2. Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkı 8YSZ'nin sürtünme ve aşınma davranışları .....	47
4.1.2.1. Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkı 8YSZ'nin sürtünme katsayıları .....	48
4.1.2.2. Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkı 8YSZ'nin aşınma davranışları .....	53
4.2. CeO <sub>2</sub> Katkılı 8YSZ Örnekler .....	63
4.2.1. CeO <sub>2</sub> ilavesinin 8YSZ'nin tane boyutuna ve mikroyapısına etkisi .....	63
4.2.2. CeO <sub>2</sub> katkı 8YSZ'nin sürtünme ve aşınma davranışları .....	65
4.2.2.1. Sürtünme katsayıları .....	66
4.2.2.2. CeO <sub>2</sub> katkı 8YSZ'nin aşınma davranışları .....	70
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....	80
5.1. Sonuçlar .....	80
5.2. Öneriler .....	80
KAYNAKLAR .....	82
ÖZGEÇMİŞ .....	87

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

## DEĞİŞİK METAL OKSİT KATKILI ZİRKONYA SERAMİKLERİN SÜRTÜNME VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Rahime ŞERBETÇİ

Harran Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Bülent AKTAŞ  
Yıl: 2019, Sayfa:87

Bu çalışmada,  $Er_2O_3$  ve  $CeO_2$  (Ağ.%1–15) ilavesiyle %8 mol yitriya ile kararlı hale getirilmiş zirkonyanın (8YSZ) sürtünme ve aşınma davranışı üzerine tane büyüklüğü ve mikroyapının etkisi; pin-on-disk tipi aşınma cihazı, yüzey profilmetre cihazı ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Örnekler  $1400\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 10, 50 ve 100 saat süreyle tavlandı. Tavlama süresi arttıkça tüm örneklerde tane boyutunun arttığı gözlemlendi.  $Er_2O_3$  ve  $CeO_2$  ilave edilmiş 8YSZ örneklerin aşınma testleri, 8YSZ disk üzerinde ticari olarak temin edilen WC seramik bilye karşısında kuru kayma sürtünme koşulları altında, oda sıcaklığında, 5 ve 6 N yüklerde gerçekleştirildi. Sürtünme ve aşınma testi sonuçları,  $Er_2O_3$  ve  $CeO_2$ 'in önemli bir sürtünme azalmasına neden olduğunu ve ayrıca  $Er_2O_3$  ve  $CeO_2$  ile katkılı 8YSZ örneklerin WC bilyeye karşı kaydığı zaman spesifik aşınma oranının azaldığını göstermiştir. WC bilye karşısında kayan  $Er_2O_3$  katkılı 8YSZ örneklerin sürtünme katsayısı 0.51'den 0.23'e düşmüş ve aynı zamanda spesifik aşınma oranında  $1.34 \times 10^{-4} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$ 'den  $8.24 \times 10^{-5} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$  değerine azalmıştır. Ağırlıkça %15  $CeO_2$  ilavesiyle 8YSZ'nin aşınma hacmi 5 N yükte 0.336'dan 0.161  $\text{mm}^3$  değerine azalmış ve sürtünme katsayısı ise 0.51'den 0.21 değerine düşmüştür. Sürtünme sonuçları, sürtünme katsayısının sadece tane boyutuna zayıf bir şekilde bağlı olduğunu göstermiştir, çünkü en büyük tane büyüklüklerine sahip örnekler biraz daha yüksek sürtünme katsayısı ve kısmende daha düşük sürtünme katsayısı sergilemiştir.  $Er_2O_3$  katkılı 8YSZ diskin WC bilyeye karşı aşınma davranışı, düzgün aşınmış bir yüzeyle sonuçlanan hafif aşınmanın ve buna eşlik eden tanenin çekilerek oyuklanmaların, bazı tribofilminlerin ve delaminasyon aşınmasının meydana geldiğini göstermiştir. Ayrıca,  $CeO_2$  katkılı örneklerin aşınma mekanizmaları çoğunlukla abrasiv aşınma, tane çekme oyuklanması ve kısmen delaminasyondur. Sonuç olarak,  $Er_2O_3$  ve  $CeO_2$ 'in 8YSZ'ye ilavesinin aşınma direncini ve yüzey özelliklerini iyileştirdiği bulunmuştur.

**ANAHTAR KELİMELER:** %8 mol yitriya ile kararlı hale getirilmiş zirkonya (8YSZ),  $Er_2O_3$ ,  $CeO_2$ , sürtünme, kuru kayma aşınması

# ABSTRACT

MSc Thesis

## INVESTIGATION OF FRICTION AND WEARING BEHAVIORS OF DIFFERENT METAL OXIDE ADDITIVES OF ZIRCONIA CERAMICS

Rahime ŞERBETÇİ

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Bülent AKTAŞ  
Year:2019, Page:87

Effect of grain size and microstructure on the friction and wear behaviour of 8 mol% yttria-stabilized cubic zirconia (8YSZ) with addition of  $\text{Er}_2\text{O}_3$  and  $\text{CeO}_2$  (1–15 wt%) were investigated using a pin-on-disc tribotester, surface profilometer, and a scanning electron microscopy (SEM) system. Samples were annealed at 1400 °C for 10, 50, and 100 h. It was observed that the grain size in all samples increased as the annealing time increased. The wear tests of the  $\text{Er}_2\text{O}_3$  and  $\text{CeO}_2$  added 8YSZ samples were conducted on the 8YSZ disk against commercially available WC ceramic pin under dry-sliding friction conditions at room temperature at loads of 5 and 6 N. The friction and wear test results showed that  $\text{Er}_2\text{O}_3$  and  $\text{CeO}_2$  caused significantly a reduction of friction, and also decreased in the specific wear rate when the 8YSZ samples doped with  $\text{Er}_2\text{O}_3$  and  $\text{CeO}_2$  were sliding against WC pin. The friction coefficient of  $\text{Er}_2\text{O}_3$  doped in 8YSZ sliding against WC pin reduced from 0.51 to 0.23, and also specific wear rate decreased from  $1.34 \times 10^{-4}$  to  $8.24 \times 10^{-5} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$ . The wear volume of 8YSZ with the addition of 15 wt%  $\text{CeO}_2$  decreased from 0.336 to 0.161  $\text{mm}^3$  at a load of 5 N, and its friction coefficient reduced from 0.51 to 0.21. The friction results showed that the friction coefficient was only weakly dependent on the grain size, because Samples with the largest grain sizes exhibited slightly higher friction coefficients and partly lower friction coefficients. Wear behavior of  $\text{Er}_2\text{O}_3$ -doped 8YSZ disk against WC pin indicated mild abrasion that resulted in a smooth worn surface, and accompanying grain pull out formation and delamination of tribofilm. Furthermore, the wear mechanisms of  $\text{CeO}_2$ -doped samples were mostly abrasive wear, grain pull out, and partly delamination. In conclusion, it was found that the addition of  $\text{Er}_2\text{O}_3$  and  $\text{CeO}_2$  to 8YSZ improved its wear resistance and surface properties.

**KEYWORDS:** 8 mol% yttria-stabilized cubic zirconia (8YSZ),  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ , friction, dry sliding wear

## TEŞEKKÜR

“Değişik Metal Oksit Katkılı Zirkonya Seramiklerin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı tez çalışma konusunun tespitinde, literatür araştırmasında, örneklerin hazırlanmasında, deneylerin gerçekleştirilmesi aşamasında ve testlerin laboratuvar ortamında yapılması işlemlerinde tarafıma her türlü yol göstererek tez çalışmamın tamamlanması noktasında destek ve yardımlarından dolayı değerli danışmanım Doç. Dr. Bülent AKTAŞ’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam boyunca bilgisayar programları konusunda yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Öğr. Gör. Vehbi BALAK’ a teşekkür ederim.

Bu çalışmada; numunelerin yüzey sertliğinin ve mikroyapılarının incelenmesi aşamasında laboratuvar çalışmalarında sağlamış oldukları tüm imkânlar için Harran Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma Merkezi’ne (HÜBTAM) teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca bana manevi desteklerinden dolayı değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 2.1. Zirkonyanın kristallografik yapıları: (a) kübik yapı $a=b=c$ , (b) tetragonal yapı $a=b \neq c$ , (c) monoklinik yapı $a \neq b \neq c$ .....	7
Şekil 2.2. Yüke bağlı yüzey temasları; (a)Yüksüz halde pürüzlü yüzeylerin teması, (b)Yüklü halde yüzeylerin teması .....	16
Şekil 2.3. Bağlı hareket eden yüzeyler arasındaki teorik kuru sürtünmenin gösterimi .....	16
Şekil 2.4. Statik ve dinamik sürtünme esnasında cisme etki eden kuvvetler .....	17
Şekil 2.5. Statik ve dinamik sürtünme katsayıları.....	18
Şekil 2.6. Sürtünme çeşitleri; (a) Kuru, (b) Sınır, (c) Sıvı .....	19
Şekil 2.7. Kuru sürtünme durumunda yüzeylerin durumu; 1.pislik tabakası, 2.absorpsiyon tabakası, 3.oksit tabakası, 4.soğuk şekillendirilmiş tabaka, 5.metal içi .....	20
Şekil 2.8. Sınır sürtünme mekanizması.....	21
Şekil 2.9. Sıvı sürtünme.....	21
Şekil 2.10. Aşınmayı oluşturan unsurlar.....	25
Şekil 2.11. DIN 50320 normuna göre tribolojik sistem .....	26
Şekil 2.12. Adhesiv aşınmanın oluşumu; (a) İki çıkıntının buluşması ve bağ oluşumu, (b) Bağın kopması diğer yüzeye malzeme transferi ve (c) İki yüzeydeki çıkıntılarının etkileşimi sonucu yüzeyde kırıntı oluşumu .....	29
Şekil 2.13. Adhesiv aşınmanın görüldüğü tribolojik sistemler.....	30
Şekil 2.14. Abrasiv aşınma mekanizması .....	30
Şekil 2.15. Abrasiv aşınma mekanizmaları mikro kesilme, kırılma, yorulma ve tane ayrılması .....	31
Şekil 2.16. Abrasiv aşınmanın görüldüğü tribolojik sistemler.....	31
Şekil 2.17. Kayan ve yuvarlanan hareket altında meydana gelen yorulmaya bağlı çatlak.....	32
Şekil 2.18. Korozif aşınma mekanizması .....	34
Şekil 2.19. Akışkanın içindeki partiküllerin, yüksek hızla katı yüzeye çarpması sonucu oluşan erozyon aşınması .....	35
Şekil 2.20. Kazımalı aşınma mekanizması .....	36
Şekil 3.1. Kutu tipi yüksek sıcaklık sinterleme fırını.....	38
Şekil 3.2. SEM incelemesi için örneklerin yerleştirildiği numune tutucusu .....	39
Şekil 3.3. EMS 550 marka kaplama cihazı .....	40
Şekil 3.4. ZEISS marka Evo 50 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) .....	40
Şekil 3.5. Zımparalama ve parlatma makinesi.....	41
Şekil 3.6. TRD marka pin-on-disk aşınma test cihazı.....	42
Şekil 3.7. Dijital kumpas .....	42
Şekil 3.8. Time TR 200 model profilmetre cihazı .....	43
Şekil 3.9. Aşınma bölgesinin Autocad programındaki üç boyutlu görüntüsü.....	44
Şekil 4.1. 1400 °C'de 50 saat tavllanmış örneklerin SEM mikroyapıları; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ .....	46
Şekil 4.2. 1400 °C' de 10, 50 ve 100 saat süre ile tavllanmış Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin tane boyutlarındaki değişim .....	47
Şekil 4.3. Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 N yükte sürtünme katsayılarının değişimi; (a) 10, (b) 50 ve (c) 100 saat tavllanmış .....	50
Şekil 4.4. Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 6 N yükte sürtünme katsayılarının değişimi; (a)10, (b) 50 ve (c) 100 saat süre ile tavllanmış .....	51
Şekil 4.5. 1400 °C'de 50 saat tavllanmış örneklerin 5 N yükte aşınma izi profilleri; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ .....	54
Şekil 4.6. 1400 °C'de 50 saat tavllanmış örneklerin 6 N yükte aşınma izi profilleri; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ .....	55
Şekil 4.7. Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin aşınma hacimlerinin tavlama sürelerine göre değişimi; (a) 5 N, (b) 6 N .....	57
Şekil 4.8. Şekil 4.8. Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin spesifik aşınma miktarlarının tavlama sürelerine göre değişimleri; (a) 5 N, (b) 6 N.....	59

Şekil 4.9. 1400 °C' de 50 saat süre ile tavllanmış örneklerin aşınma izlerinin makro resimleri; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ .....	61
Şekil 4.10.1400 °C' de 50 saat süre ile tavllanmış örneklerin aşınma izlerinin SEM Mikrofotoğrafları; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ .....	62
Şekil 4.11. 1400 °C'de 50 saat tavllanmış örneklerin SEM mikroyapıları; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ .....	64
Şekil 4.12. 1400 °C' de 10, 50 ve 100 saat süre ile tavllanmış CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin tane boyutlarındaki değişim .....	65
Şekil 4.13. CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 N yükte sürtünme katsayılarının değişimi; (a) 10, (b) 50 ve (c) 100 saat süre ile tavllanmış .....	67
Şekil 4.14. CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 6 N yükte sürtünme katsayılarının değişimi; (a) 10, (b) 50 ve (c) 100 saat süre ile tavllanmış .....	68
Şekil 4.15. 1400 °C'de 50 saat tavllanmış örneklerin 5 N yükte aşınma izi profilleri; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ .....	71
Şekil 4.16. 1400 °C'de 50 saat tavllanmış örneklerin 6 N yükte aşınma izi profilleri; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ .....	72
Şekil 4.17. CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin aşınma hacimlerinin tavlama sürelerine göre değişimi; (a) 5 N, (b) 6 N .....	73
Şekil 4.18. CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin spesifik aşınma miktarlarının tavlama sürelerine göre değişimleri; (a) 5 N, (b) 6 N .....	76
Şekil 4.19. 1400 °C' de 50 saat süre ile tavllanmış örneklerin aşınma izlerinin makro resimleri; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ .....	78
Şekil 4.20. 1400 °C' de 50 saat süre ile tavllanmış örneklerin aşınma izlerinin SEM mikroyapıları; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ .....	79

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Ticari kalitedeki zirkon konsantresinin kimyasal bileşimi .....	8
Çizelge 2.2. Diş hekimliğinde kullanılan zirkonyanın fiziksel özellikleri .....	10
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan tozlarının kimyasal kompozisyonları .....	37
Çizelge 4.1. Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 N yükte ortalama sürtünme katsayılarının tavlama sürelerine göre değişimi .....	52
Çizelge 4.2. Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 6 N yükte ortalama sürtünme katsayılarının tavlama sürelerine göre değişimi .....	52
Çizelge 4.3. Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 N yükte aşınma hacimlerinin tavlama sürelerine göre değişimi .....	58
Çizelge 4.4. Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 6 N yükte aşınma hacimlerinin tavlama sürelerine göre değişimi .....	58
Çizelge 4.5. Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 N yükte spesifik aşınma miktarının tavlama sürelerine göre değişimi .....	60
Çizelge 4.6. Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 6 N yükte spesifik aşınma miktarının tavlama sürelerine göre değişimi .....	60
Çizelge 4.7. CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 N yükte ortalama sürtünme katsayılarının tavlama sürelerine göre değişimi .....	69
Çizelge 4.8. CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 6 N yükte ortalama sürtünme katsayılarının tavlama sürelerine göre değişimi .....	69
Çizelge 4.9. CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 N yükte aşınma hacimlerinin tavlama sürelerine göre değişimi .....	74
Çizelge 4.10. CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 6 N yükte aşınma hacimlerinin tavlama sürelerine göre değişimi .....	74
Çizelge 4.11. CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 N yükte spesifik aşınma hacimlerinin tavlama sürelerine göre değişimi .....	77
Çizelge 4.12. CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 6 N yükte spesifik aşınma hacimlerinin tavlama sürelerine göre değişimi .....	77

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

8YSZ	%8 mol yitriya ile kararlı hale getirilmiş kübik zirkonya
k-ZrO <sub>2</sub>	Kübik zirkonya
t-ZrO <sub>2</sub>	Tetragonal zirkonya
m-ZrO <sub>2</sub>	Monoklinik zirkonya
TSZ	Tamamen kararlı zirkonya
KSZ	Kısmen kararlı zirkonya
TZP	Tetragonal zirkonya polikristali
YSZ	Yitriya ile kararlı hale getirilmiş zirkonya
YMK	Yüzey merkezli kübik
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Erbiyum oksit
CeO <sub>2</sub>	Seryum oksit
ZrO <sub>2</sub>	Zirkonyum oksit
WC	Tungsten karbür

## 1.GİRİŞ

Mühendislik; bilgiyi, tecrübeyi ve ortak fikirleri bir arada kullanarak insanlara faydalı ürünler sunmaktır. Mühendislik sisteminde belirli olan bir görevi yerine getirmek için yapılmış sistemlerde, sistemi meydana getiren parçalardan bazıları zamanla görevini yerine getiremez. Bu sistemi tekrar oluşturmak için malzeme, iş gücü, zaman ve maliyet gereklidir. Bu sonuç ise insanlığa birçok yönden kayıp yaşatan ana problemlerdendir. Makinelerde ortaya çıkan arızaların ve konstrüksiyon elemanlarının kullanım dışı kalmalarının en önemli sebeplerinden biri aşınmadır. Aşınma çoğu zaman makine veya sistemin teknik ömrünü tayin eder. Sürtünme nasıl bir enerji kaybı ise aşınma da geri dönüşü olmayan bir madde kaybı nedenidir. Bundan dolayı, dünyada her yıl önemli oranlarda ekonomik kayıplar meydana gelmekte, buna paralel olarak, kayıpların önlenmesi için çeşitli önlemler geliştirilmeye çalışılmaktadır (Güneş, 2006; Aydın, 2009).

Son zamanlarda 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 önlemler aşınmayı tamamen ortadan kaldırmayıp, aşınmanın türüne ve tribolojik faktörlere bağlı olarak aşınma hızını yavaşlatmak suretiyle malzemelerin çalışma ömrünü arttırır (Nair ve ark., 2000; Yıldızlı, 2002).

Son zamanlarda, diş implant ve protez malzemesi olarak yaygın şekilde zirkonya seramikler kullanılmaktadır. Bu malzemeler çalıştıkları zaman sürtünmeden ötürü aşınmaya maruz kalmaktadırlar. Bu nedenle zirkonya esaslı seramiklerin aşınma özelliklerinin incelenmesi ve aşınmaya karşı artırıcı önlemler alınması önemlidir. Zirkonya, sıcaklık ve dengeleyici katkı oranlarına bağlı olarak monoklinik, tetragonal ve kübik kristal yapılarda bulunur (Aktaş, 2008). Zirkonya esaslı seramiklerin tercih edilme oranı son yıllarda giderek artmaktadır. Zirkonya

esaslı seramikler, yüksek sıcaklıklarda dayanıklılığa sahip olması ve estetik olmasından dolayı endüstride son zamanlarda tercih edilmektedir.

Zirkonya esaslı seramik malzemelerin sürtünme ve aşınması ile ilgili yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir:

Gou ve ark., (2017) tarafından yapılan çalışmada; nano  $\text{Si}_3\text{N}_4$  katkı maddelerinin ve plazma işleminin  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -8YSZ seramik kaplamaların aşınma davranışına etkisi araştırılmıştır.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -8YSZ kaplamalarına  $\text{Si}_3\text{N}_4$  katkısının kuru kayma aşınma davranışları üzerine etkisi incelenmiştir. Nano  $\text{Si}_3\text{N}_4$  katkı maddeleri ve plazma işlemi, mikro çatlakların başlamasını engelleyerek ve erimeyen parçacıkları azaltarak kaplamaların morfolojilerini iyileştirebileceğini göstermiştir. Aşınma testi sonuçları; nano  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ilavesinin ve plazma kaplama ile  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -8YSZ kaplamanın aşınma direncini artırabileceği bildirilmiştir.

Yapılan bu çalışmada, CuO ilaveli yüksek sıcaklıkta kendinden yağlamalı  $\text{ZrO}_2$  kompozit, sıcak presleme yöntemi ile hazırlanmıştır. Kompozitlerin aşınma ve sürtünme davranışı 700 °C ile 1000 °C arasında incelenmiştir.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  seramik bilyaya karşı CuO ilaveli  $\text{ZrO}_2$  kompozitler, yüksek sıcaklıklarda mükemmel kendinden yağlama sayesinde yüksek aşınma direnci özellikleri sergilemiştir (Kong ve ark., 2014).

Zirkonya ( $\text{ZrO}_2$ ) üstün özellikleri olan bir seramik malzemedir. Düşük ısı iletkenliği, iyi korozyon direnci ve dönüşüm toklaştırıcı etkisiyle yüksek kırılma tokluğu sayesinde özellikle yüksek sıcaklığa maruz kalınan ortamlarda koruyucu olarak (termal bariyer) ve aşınmaya dirençli malzeme olarak kullanılmaktadır (Yılmaz, 1992; Ramasw, 1999).

Wodydt ve arkadaşları (1991) bazı zirkonya esaslı seramikler geliştirdiler. Bu malzemeler üzerine uygulanmış kayma testleri sonuçları, sürtünme katsayılarının 0.5-1 arasında değiştiğini gösterdi (Wodydt ve ark., 1991). Zirkonyanın sürtünme

katsayısı üzerine çevrenin etkileri Stochawiak ve arkadaşları tarafından yoğun bir şekilde çalışıldı. Onlar havada zirkonyanın sürtünme katsayısının 0.5 ve 0.64 aralığında normal yükün (2-5 N) bir fonksiyonu olarak değiştiğini gösterdiler (Stochawiak ve ark., 1993). 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).

Farklı ağırlık yüzdelerine (% 0.5, 1 ve 5) sahip CuO ile katkılanmış alumina ve zirkonya seramiklerdeki sürtünme ve aşınma durumları incelenmiştir. CuO katkılı alumina ve zirkonya seramikler; ticari  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ , SiC ve  $Si_3N_4$  seramik bilyelerine karşı bir pin-on-disk tribotest cihazı kullanılarak kuru kayma şartlarında aşınma testleri yapılmıştır. Aşınma sonuçları, CuO katkılı alumina ve zirkonya seramiklerin  $Al_2O_3$  bilyeleri ile kayması durumunda, sürtünmede önemli bir azalma meydana geldiğini gösterdi.  $Al_2O_3$  bilyeye ile sürtünen CuO katkılı alumina seramiğin sürtünme katsayısı 0.7' den 0.4' e düştüğü ve CuO katkılı zirkonyum seramiğin ise sürtünme katsayısının ( $Al_2O_3$  bilyeye karşı kayarken) 0.8' den 0.2-0.3 değerine azaltıldığı bildirilmiştir (Pasaribu ve ark., 2003).

Yitriya ile kararlı tetragonal zirkonya (Y-TZP) seramiklerinin tribolojik davranışları üzerindeki mikroyapısal değişkenlerin (tane boyutu, toplam yitriya içeriği ve dağılımı) ve tokluğun etkisini araştırılmıştır. Y-TZP seramikleri üzerinde farklı sıcaklık ve nem koşullarında ticari sert metal (WC-Co) aşındırıcı bilyeye karşı kuru sürtünme testleri gerçekleştirilmiştir. Y-TZP seramiklerin aşınmış yüzeylerin mikroyapısal incelemesi yapılarak ve aşınma mekanizmaları araştırılmıştır. Ölçülen tribolojik verilere dayanarak, sürtünme katsayısı, aşınma, tokluk ve mikroyapısal değişkenler arasındaki ilişki ortaya konulmuştur. Aşınma izlerinden düşük tokluğa sahip Y-TZP için aşınma mekanizmasının hafif bir abrazyon iken yüksek tokluğa sahip Y-TZP için ise mikro kırılma destekli parçalanma olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, Y-TZP / WC-Co aşınma çiftlerinin sabit durum sürtünme katsayısı, zirkonya

malzemelerinin tane büyüklüğüne ve tokluğuna güçlü bir şekilde bağlıdır. Sürtünme katsayısının artan tetragonal tane büyüklüğü ve birlikte çökeltilmiş toz ve toz karışım bazlı seramiklerin tokluğu ile birlikte arttığı bulundu (Basu ve ark., 2004).

Yukarıdaki belirtilen literatür sonuçlarına göre, sürtünme ve aşınmaya dair bazı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan bazılarının yöntem ve sonuçlarına değinilmiştir. Ancak yukarıda verilen literatür taramasında;  $Er_2O_3$  ve  $CeO_2$  katkılı 8YSZ numunelerin sürtünme ve aşınma davranışı ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle, değişik metal oksit katkılı zirkonya seramiklerin sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi başlıklı çalışma bu açıdan özgün bir çalışma olarak kabul edilebilir.

Seramikler; yüksek sertlik, düşük yoğunluk, korozyon direnci ve yüksek sıcaklıklara dayanabilme gibi benzersiz özellikleri nedeniyle aşınma direnci istenen bir çok uygulamalarda yaygın kullanım alanlarına sahiptir. Özellikle, yitria ile kararlı hale getirilmiş kübik zirkonya (8YSZ) seramiklerin uzay, havacılık, otomobil, sağlık vb. bir çok kullanım alanı vardır. Son yıllarda zirkonya seramiklerin, diş implant malzemesi ve protez malzemesi olarak geniş bir kullanım alanına sahip olduğu görülmektedir. Zirkonya esaslı diş implantları ve bazı vücut protezleri çalışırken sürtünmeden kaynaklanan aşınmaya maruz kalmaktadır. Bu nedenle zirkonya esaslı seramiklerin aşınma özelliklerinin incelenmesi ve aşınmanın azaltılması veya önlenmesi için tribolojik çalışmaların yapılması önemlidir. Bu nedenle, bu çalışmada; %8 mol yitriya ile kararlı hale getirilmiş kübik zirkonyanın (8YSZ) mikroyapısına, tane boyutuna, aşınma ve yüzey özelliklerine  $Er_2O_3$  ve  $CeO_2$  ilavesinin etkileri; pin-on-disk tipi aşınma cihazı, profilmetre ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

### 2.1. Zirkonyum Nedir?

Son yıllarda endüstride yaygın olarak kullanılan zirkonyum (Zr) elementi periyodik cetvelin 4. grubunda olup, atom numarası 40, atom ağırlığı 91.22' dir. Yoğunluğu 6.5 gr/cm<sup>3</sup>, valans elektron sayısı 2 ve 4, ergime sıcaklığı 2430 °C, kaynama sıcaklığı >2900 °C'dir (Yılmaz ve ark., 1995).

Hiçbir zaman doğada serbest metal olarak tek başına bulunmayan zirkonyum hegzagonal kristal formundadır. Sıcaklığa, aşınmaya ve korozyona karşı çok dirençli olup birçok değişik bileşik halinde bulunabilir. Bilinen bileşikleri zirkonyum silikat (Zirkon, ZrSiO<sub>4</sub>) ve zirkonyum oksittir (ZrO<sub>2</sub>).

Zirkonyumun reaksiyonları:

- Hava ile reaksiyonu: Zirkonyum metalinin yüzeyini kaplayan oksit tabaka havaya karşı inaktif olmasına neden olur. Buna rağmen havada yakılması ile zirkonyum oksit bileşiğini oluşturur.



- Su ile reaksiyonu: Zirkonyum metali normal koşullar altında su ile reaksiyon vermez.
- Asit ile reaksiyonu: Zirkonyum metalinin yüzeyini kaplayan oksit tabaka asitlere karşı inaktif olmasına neden olur. Sadece hidroflorik asit içerisinde çözünerek floro kompleksleri oluşturur.
- Baz ile reaksiyonu: Zirkonyum metali normal koşullar altında alkali çözeltilerle reaksiyona girmez (Tosun, 2007).

Zirkonun ısı iletme katsayısı  $4.5 \cdot 10^{-6}$  kcal/m<sup>3</sup>h°C, sertliği 7.5 (Mohs), yoğunluğu 4.7 gr/cm<sup>3</sup>, ışığı kırma indisi 1.9-2.0, ergime noktası 2430 °C ve rengi kahverengi, sarı, kırmızımsı, şeffaf ve diğer renklerde olabilir.

### **2.1.1. Zirkonyum oksitin üretimi**

Yüksek kaliteli seramiklerin üretimi için mutlaka saf ürünler kullanılmalı ve yüksek saflıkta zirkonya için gelişmiş sentez yöntemleri geliştirilmelidir. Üretim yöntemleri arasında gaz fazında reaksiyonlar, erimiş toz banyoları, hidrotermal toz sentezi ve sol-jel yöntemleri bulunur.

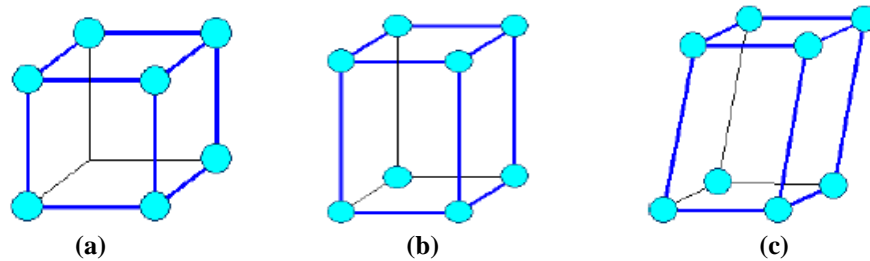
0.01 ile 0.10 µm parçacık boyutlarındaki zirkonyum tozu gaz fazı imalatı ile elde oluşturulabilir. Bu yöntemle elde edilen toz, katkı maddeleri ile karıştırılır ve daha sonra yeşil gövdeler şerit döküm, kuru presleme ve kayma dökümü ile imal edilir. Ondan sonra sinterleme katkıları seramikte kalır, ancak uçucu organik bileşikler olan yardımcı maddeler sinterleme işleminden önce kalıptan çıkarılır. Yeşil gövde sinterleme yöntemi ile ham bir ürüne dönüştürülür ve daha sonra cilalanır ve uygulama başına topraklanır. Kalıplar sinterleme sürecinde gerçek özellikleriyle doldurulur. Seramik tozu belirli şekillerine indirgeyerek kasılmaktadır. Bu sıcaklığa bağlı difüzyon prosesi ile elde edilir. Sinterleme katkılarının uygun seçimi ile katı gövde difüzyon hızı artırılabilir. Katı cisim difüzyonu çok yavaş gerçekleşirse, sinterleme sıvı faz veya belirli basınç altında yapılmalıdır.

Yüksek sıcaklık ve basınç altında yapılan sinterleme işlemi seramik bileşenlerin maliyetini arttırır.

### **2.1.2. Zirkonyum oksit ve kullanım alanları**

ZrO<sub>2</sub> diğer oksitler gibi iyonik bağlı, saydam, ısı ve elektrik iletimine direnç gösteren, diamanyetizma, kimyasal kararlılık ve yüksek sıcaklıklarda iyonik iletkenlik gibi üstün özelliklerde olup yüksek elastik modül ve sertlik, gevreklik,

refrakterlik, düşük termal genleşme katsayısı, korozyona direnç ve yüksek sıcaklıklarda düşük buhar basıncına sahip olması gibi avantajlara da sahiptir (Toplan, 2001). Saf  $ZrO_2$  farklı sıcaklıklarda 3 farklı kristal yapıda bulunur. Şekil 2.1’de zirkonyanın üç farklı kristal yapıları gösterilmektedir. Bunlar: Monoklinik faz, tetragonal faz ve kübik fazdır. Monoklinik faz  $1170\text{ }^\circ\text{C}$ ’ye kadar kararlıdır ve bu sıcaklıktan sonra tetragonal faza dönüşür. Tetragonal faz  $2370\text{ }^\circ\text{C}$ ’ye kadar kararlıdır ve bu sıcaklığın üzerinde kübik faza dönüşür. Ergime noktası  $2680\text{ }^\circ\text{C}$ ’dir ve bu sıcaklığa kadar kübik fazda bulunur (Piconi and ark., 1999; Kelly and ark., 2008).  $ZrO_2$  fırınlama ısısında tetragonal fazda, oda sıcaklığında monoklinik fazdadır (Kelly, 2004). Fırınlamanın ardından soğuma aşamasında  $t \rightarrow m$  faz dönüşümü gerçekleşir. Bu sırada % 3-5’lik hacim artışı meydana gelir ve bu dönüşüm ile ortaya çıkan kompresif stresler sonucu dayanıklılık artsa da,  $t \rightarrow m$  faz dönüşümü kontrol altına alınmalıdır ki hacim artışı ileri derecede kırıklara sebep olmasın. Bu nedenle zirkonyanın oda sıcaklığında tetragonal fazda olması gerekmektedir. Tetragonal tanecikler yüksek sıcaklıklarda kararlıdır. Bununla birlikte kalsiyum (Piconi and ark., 1999; Kelly, 2004), alüminyum, magnezyum, seryum veya yttrium gibi metal oksitler ilave edilerek de oda sıcaklığında kararlı olmaları sağlanır (Piconi and ark., 1999). Saf zirkonyadaki yttrium oksit oda sıcaklığında zirkonyayı tetragonal fazda kararlı eder ve kısmen kararlı edilmiş zirkonya materyalini oluşturur (Piconi and ark., 1999; Luthardt and ark. 1999; Meyenberg and ark., 1995). Materyalin içinde, tetragonal fazı tekrar monoklinik faza dönüştürebilecek bir enerjinin varlığı söz konusudur. Bu faz dönüşümü tersinir bir dönüşümdür (Kelly, 2004; Meyenberg and ark., 1995).



Şekil 2.1. Zirkonyanın kristallografik yapıları: (a) kübik yapı  $a=b=c$ , (b) tetragonal yapı  $a=b \neq c$ , (c) monoklinik yapı  $a \neq b \neq c$

Zirkonyanın elastik modülü yaklaşık 200 MPa'dır (Guazzato ve ark., 2004). Vickers sertliği ise dental alaşımların 4-5 katıdır (1000-1300 Vickers) (Luthy ve ark., 2006). Yapılan in-vitro çalışmalarda zirkonyanın bükülme direnci ortalama 900-1200 Mpa (Kosmac ve ark., 1999; Christel ve ark., 1999), kırılma dayanımı ise 9-10 Mpa  $m^{1/2}$  (Piconi ve ark., 1999; Lin ve ark., 2002; Guazzato ve ark., 2004) olarak bulunmuştur.

Satılabilir kalitedeki zirkon konsantresinin kimyasal bileşimi Çizelge 2.1.'deki gibi olmalıdır (DPT, 2001).

Çizelge 2.1. Ticari kalitedeki zirkon konsantresinin kimyasal bileşimi

Bileşen	ZrO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
%	66.75	32.65	0.04	0.19	0.04	0.02

Zirkon ve zirkonyum türevleri demir-çelik, refrakter malzeme, seramik, boya, kâğıt, tekstil, gübre, nükleer santraller, makine, uçak, elektrik-elektronik, makyaj malzemesi, kimya ve deri endüstrilerinde gittikçe artan miktarda kullanılmaktadır (Kırıkoğlu, 1990).

- Zirkonyum metali korozyona dayanıklılığı ve nötron absorplama özelliğinin az olmasından nükleer reaktörlerin yapı malzemesi olarak,
- Yanıcı özelliğiyle askeriyede,
- ZrO<sub>2</sub>, erime noktasının yüksek olması nedeniyle ateşe dayanıklı malzemelerde, cam ve seramik endüstrisinde,
- Düşük sıcaklıklarda süper iletken özelliğiyle zirkonyum-niobyum alaşımları süper iletken mıknatısların yapımında,
- Korozyona dayanıklılığıyla birçok aletin yapımında,
- Rengiyle estetik diş hekimi uygulamalarında altyapı malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Zirkonya ilk kez ortopedik kalça eklemi protezlerinde kullanılmıştır (Chevalier, 2006).

### 2.1.3. Zirkonya materyalleri

Birçok tipte zirkonya içeren seramik sistemi bulunmaktadır. Bunlardan sadece 3'ü diş hekimliğinde kullanılmaktadır. Bunlar: Yitrium katyonlu zirkonya polikristali (3Y-TZP), magnezyum katyonlu zirkonya polikristali (Mg-PSZ) ve zirkonya ile sertleştirilmiş alümina (ZTA)'dır (Denry and ark., 2008).

#### 2.1.3.1 Kararlı zirkonya

Saf zirkonyaya CaO, MgO, CeO<sub>2</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi kararlı edici oksitler ilave edilerek elde edilir (Piconi and ark., 1999; Christel and ark., 1989). Tam ve kısmen kararlı zirkonya olmak üzere ikiye ayrılır. Zirkonyaya %16 mol CaO, %16 mol MgO ve %8 mol Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesi ile elde edilir.

Tam kararlı zirkonya kübik form içerir. Sertliği ve termal şok direnci yüksektir. Bu sebeple seramik endüstrisinde aşındırıcı bir araç olarak ve de ateşe dayanıklı bir ürün olarak da kullanılabilir. Kısmen kararlı zirkonya materyali ise daha kullanışlı mekanik özelliklere sahiptir (Piconi and ark., 1999).

#### 2.1.3.2. Kısmen kararlı zirkonya (Mg-PSZ)

Mg-PSZ polikristali ile ilgili olarak çok fazla çalışma yapılmasına rağmen, porozite varlığı ve gren boyutunun büyük olması (30-60 µm) sebebiyle aşınmaya neden olduğu için başarı sağlayamamıştır. Ticari olarak Mg-PSZ bileşimi içerisinde %8-10 mol MgO bulunmaktadır (Denry and ark., 2008).

### 2.1.3.3. Zirkonya ile sertleştirilmiş alumina

In-cream zirkonya bu malzemeye bir örnektir. Düşük mekanik özelliğe sahiptir (Guazzato and ark., 2004).

Çizelge 2.2. Diş hekimliğinde kullanılan zirkonyanın fiziksel özellikleri

	Alümina	Mg-PSZ	TZP
Bükülme direnci (MPa)	>500	450-700	900-1200
Elastik modülü (GPa)	380	200	210
Kırılma tokluğu (M <sub>pam</sub> <sup>-1</sup> )	4	7-15	7-10

### 2.1.4. Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı zirkonyanın mekanik özelliklerine etki eden etmenler

- Kararlı edici Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı
- Zirkonyanın boyutu ve şekli
- Aşındırma ve yüzey uygulamaları
- Sıcaklık
- Nem
- Zaman
- Makro ve mikro çatlakların dağılımı ve miktarı (Kelly and ark., 2008; Sundh and ark., 2005).

#### 2.1.4.1. Kararlı edici Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı

Oksit miktarları düşük olmalıdır ve ZrO<sub>2</sub> içerisinde homojen olarak dağılması sağlanmalıdır. Bazı çalışmalarda %2 oranında kararlayıcıların katılmasıyla mekanik özelliklerinin iyi olduğu gözlemlenmiştir (Piconi and ark., 1999; Sato ve ark., 1985; Chevalier and ark., 2004).

**2.1.4.2. Zirkonyanın boyutu ve şekli**

Kırılma dayanımının iyi olması için tane boyutunun 0,3 µm olması gerekmektedir. Tanelerin fazla olması sinterlenmiş zirkonyanın mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkilere sebep olduğu belirtilmiştir (Sundh and ark., 2005; Chevalier and ark., 2004).

**2.1.4.3. Aşındırma yüzey ve uygulamaları**

Restorasyonların hazırlanmasında; ilk olarak CAD-CAM ile aşındırılır, daha sonra el aletleri ile ikinci aşındırma yapılır ve son işlemde ise iç yüzey bağlantısını arttırmak için kumlama işlemi yapılır (Piconi and ark., 1999; Sato and ark., 1985; Luthardt, 1991).

**2.1.4.4. Sıcaklık**

Sıcaklıktaki artış Y-TZP'yi olumsuz etkilemektedir. Sebebi ise tetragonal fazdan monoklinik faza geçerken faz dönüşümü sebebiyle malzemenin yarı-kararlı özelliğini kaybetmesidir (Piconi and ark., 1999; Sato and ark., 1985; Luthardt, 1991; Swabb and ark., 1991).

**2.1.4.5. Nem**

Yüksek sıcaklığa maruz kalındığında faz değişim hızında artmanın meydana geldiği görülmüştür (Piconi and ark., 1999; Sato and ark., 1985; Luthardt, 1991).

**2.1.4.6. Zaman**

Burada yaşlanma olayı meydana gelmektedir. Yaşlanma ile birlikte yoğunluk, sertlik ve dayanıklılıkta azalma meydana gelmektedir (Piconi and ark., 1999; Sato and ark., 1985; Swabb and ark., 1991).

### 2.1.4.7. Makro ve mikro çatlakların dağılımı

Makro ve mikro çatlakların artmasıyla mekanik dayanımın azaldığı bildirilmiştir (Kelly and ark., 2008; Sundh and ark., 2005).

## 2.2. Erbiyum (Er)

Erbiyum metalinin atom numarası 68 ve atom ağırlığı 167,259 g/mol'dür. Oda koşullarında (25 °C, 298 K) gümüşümsü beyaz bir renktedir. Yoğunluğu 9,066 g/mL, erime noktası 1522 °C (1795 K), kaynama noktası 2863 °C (3136 K), ısı iletkenliği (300 K) 0.143 W cm<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>'dir. Erbiyum metali f-bloğu elementlerindedir (Url 1). Maddenin katı halidir ve kristal yapısı altıgendir. 'Er' sembolü ile ifade edilir. Normalde katı halde bulunan erbiyum metali, nadir toprak elementlerindedir (Url 2).

1843 yılında ilk kez Ytterby İsveç kasabasında Carl Masonder tarafından bulunmuştur. Erbiyum, hegzagonal kristal yapıya sahip bir tozudur. Altı izotopun karışımı ile meydana gelmiştir. Bunlar: Er-162, Er-164, Er-166, Er-167, Er-168 ve Er-170'dir. Erbiyum elementi kimyasal yönden lantan ile benzerlik göstermektedir. +3 değerliğinde tek yükseltme basamağına sahiptir ve gül pembesi renge tozlar meydana getirir (Url 1).

### 2.2.1. Erbiyum elementinin kullanım alanları

- Nükleer teknoloji alanında nötron yutucu kontrol çubukları olarak, fiber-optik laser yükselticilerin saflıklarını bozmak için kullanılırlar (Url 2).
- Vanadyuma karışım olarak eklendiği zaman erbiyum metali sertliğini kaybeder ve işlenebilirliği artar.
- Erbiyum katı halde, yumuşak ve esnek bir yapıya sahiptir, hava ile yeterince kararlı durumdadır ve diğer nadir toprak metalleri gibi bazı hızlarda oksitlenme olmaz.

- Erbiyum iyonları optik uygulamalar ve görüntüleme için yeterince faydalı olan parlak pembe renge sahiptir (Url 1).

Erbium, oksijen ve suyun etkisine sahipken yavaş bir şekilde oksitlenme gerçekleşir. Erbiyum elementi düşük sıcaklığa sahipken ferromanyetiklik ile zıt bir özellik gösterir; çok düşük sıcaklığa sahip olduğunda ise ferromanyetik etki kazanır ve üstün iletken duruma geçer. Saf erbiyum elementi altı stabil izotopun karışımıdır. Erbiyum elementi tek elektron bulundurduğunda ise oldukça paramanyetiktir (Url 3).

### 2.2.2. Erbiyum oksit ( $Er_2O_3$ )

Molar kütlesi 382.56 g/mol, pembe kristal görünümündedir, yoğunluğu 8.64 g/cm<sup>3</sup>, erime noktası 2.344 °C, kaynama noktası 3290 °C ve suda çözünmezler (Url 4).

Erbium (III) oksit, erbiyum elementinin en önemli bileşiğidir. Pembe kristal görünümündedir ve kübik zirkon, cam, emaye ve porselenlerde renklendirici diye kullanılabilirler (Url 5).

Erbium oksitin tuhaf olan bir özelliği de enerjiyi dönüştürebilme becerisidir. Enerji yükseltgenmesi görünür radyasyon veya kızılötesi iken gerçekleşir (Saleh and ark., 1991). Erbiyum oksit fotoluminesans özelliğine sahip olan nanopartiküldür. Erbiyum oksit nanopartiküller oluşturabilmek için çok katlı nanotüpler ile yüksek ses (20 kHz) uygulanabilir.

Erbium carbonxioxide, altıgen yapı ve küresel geometriye sahip erbiyum oksitler başarılı yüksek ses ile yapılan erbiyum oksit nanopartikülleridir. Hegzagonal kristal yapıya sahip olan erbiyum oksit fotoluminansı uzun ömürlüdür ve (4S3/2-4I15/2) yüksek enerji geçişlerine izin vermektedir. Enerjinin soğurulması veya çoklu transfer yolu ile düşük enerjiye sahip olan ışık, yüksek enerjiye sahip olan ultraviyole veya morötesi ışınımına dönüştürülmektedir (Judd, 1982).

### 2.3. Seryum (Ce) ve Seryum Oksit (CeO<sub>2</sub>)

Seryumun kimyasal sembolü 'Ce' dir. Atom numarası 58, atom ağırlığı 140.11, yoğunluğu 6.77' dir. Erime noktası 799 derece, kaynama noktası 3443 derecedir. Geleneksel olarak nadir toprak elementlerinden kabul edilir. Kristal yapısı, 726 derecenin altında YMK (yüzey merkezli kübik) şeklinde iken 726 derecenin üzerinde vücut merkezli bir kübik yapıya sahiptir. Gümüş parlaklığında, gümüşü beyaz renkte, yumuşak, sünek bir metaldir. Bileşiklerin bazıları sarı ve kırmızı renklidir. Saf seryum bıçak ile kesilebilir, kolayca işlenebilir. Elektropozitifliği yüksektir.

Seryum, havadan etkilenir, donuklaşır, demirin paslanması gibi yüzeyinde yıpranan bir oksit tabakası oluşturur. Yüzeyi bir yıl içinde tamamen korozyona uğrar. Suyla reaksiyona girer. Soğuk suda yavaş olan reaksiyon sıcaklık arttıkça azalır. Bu reaksiyondan seryum hidroksit ve hidrojen gazı üretir. Seryum oksiti oluşturmak için 150 derecede kolayca yanar. Seryum okside 'seria' adı da verilir. Florit yapısına sahiptir; beyaza yakın soluk sarı renktedir, sülfat asidinde çözünür. Öğütülürken ve çizildiğinde ortaya çıkan talaşlar kendiliğinden yanar. Doğada nadir değildir, saf olarak bulunmaz.

#### 2.3.1. Kullanım alanları

Seryum ticari kullanımı yaygın olan elementtir. Özellikle seryum oksit (CeO<sub>2</sub>), ticari anlamda yaygın olarak kullanılan bir bileşiktir. Seryum oksit, yüksek kaliteli optik yüzeylerde kullanılan diğer metal oksitlerin yerini almıştır. Alaşımlar başta olmak üzere aydınlatma sistemlerinde aranan bileşiklerden biridir. Demir alaşımlarında önemli bir maddedir.

Televizyon ekranlarında ve floresan lambalarda kullanılan fosforlar için önemli bir bileşen olan seryum, güneş ışığına maruz kalmış pigmentlerde polimer oluşumunu önler. Seryum oksidin nanopartikülleri, dizel yakıtı için daha fazla yanmaya ve egzoz emisyonlarını azaltmaya yardımcı olması için ideal bir katkı

maddesidir. Seryum oksit katkısı motordaki kurumları yok ederek motorun performansını artırır. Seryum oksit ayrıca cam yüzeyleri cilalamak için kullanılır.

Seryum, bileşikleri ve alaşımlarının kullanıldığı bazı alanlar ve ürünler; cam cila, katalitik konvertörler, pigmentler, televizyon cam plakaları, jet motorları alaşımları, karbon ark lambaları, porselen kaplamalar, enerji tasarruflu ampuller, projektörler, mıknatıslar, paslanmaz çelik, akkor lambalar, krom kaplamalar, gözlükler, kendi kendini temizleyen fırınların yüzeyleri vb. (Url 6).

#### **2.4. Sürtünme**

Temas halinde ve birbirine karşı bağlı hareket eden elemanların harekete karşı gösterdiği dirence sürtünme adı verilir (Kobrick, 2010).

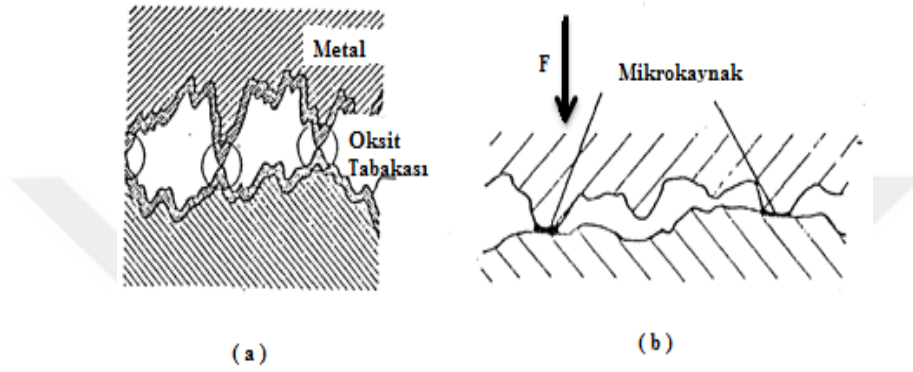
Bu konu hakkındaki ilk çalışma Leonardo da Vinci tarafından 1452-1519 yılları arasında yapılmıştır. Da vinci'ye göre sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranı sürtünme katsayısını verir (Stachowiak and ark., 1993).

Sürtünme kuvveti çeşidi, cinsi ve dağılımını bilmek sürtünmede önemli bir rol oynar.

Sürtünmeyi açıklayan birçok teori vardır. Ancak gerçeğe en yakın olanlar Bowden ve Tabor'un kaynak bağları teorisidir. Bu teorilerde sürtünme kuvveti 3 kısımda incelenir:

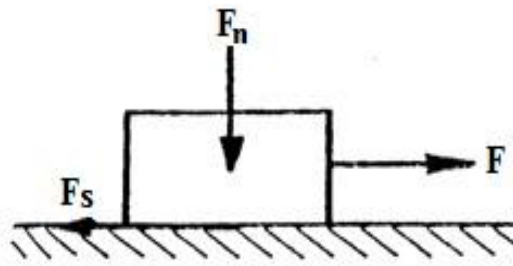
1. Sürtünme kuvveti belli temas ortamına bağlı değildir.
2. Sürtünme kuvveti, normal yükü orantılıdır.
3. Kinetik sürtünme kuvveti hıza bağlı değil ve statik sürtünme kuvvetinden azdır (Bhushan, 2000).

Şekil 2.2’de yüke bağlı olarak malzeme yüzeyinde mikroskobik seviyede temas noktaları gösterilmektedir. Yüksüz durumlarda yüzeyler belirgin bir şekilde pürüzlülük noktalarına temas ederken bu noktalarda bağlar meydana gelir. Bu bağlı kopması için bağlı bir hareket olmalıdır. Hareketin meydana gelmesiyle kuvvetin etkisi altında bağlar kopar. Yani bağların kopması için gereken kuvvet sürtünme kuvvetidir (Kobrick, 2010).



Şekil 2.2. Yüke bağlı yüzey temasları; (a)Yüksüz halde pürüzlü yüzeylerin teması, (b)Yüklü halde yüzeylerin teması

İki malzeme birbirine temas ederek, malzemelerden birini diğerinin üzerinde kaydırmak için gerekli olan kuvvete sürtünme kuvveti direnç göstermektedir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Bağlı hareket eden yüzeyler arasındaki teorik kuru sürtünmenin gösterimi

Sürtünme kuvveti aşağıdaki Denklem 2.2 ile hesaplanmaktadır.

$$F_s = \mu_s \cdot F_n \quad (2.2)$$

Burada;

$F_s$ : kaymayı başlatan sürtünme kuvveti

$\mu_s$ : sürtünme katsayısı

$F_n$ : temas yüzeyine etki eden normal kuvvet

Kayma gerçekleştikten sonra, sürtünme kuvvetinde azalma meydana gelir ve sürtünme kuvveti Denklem 2.3 yazılır.

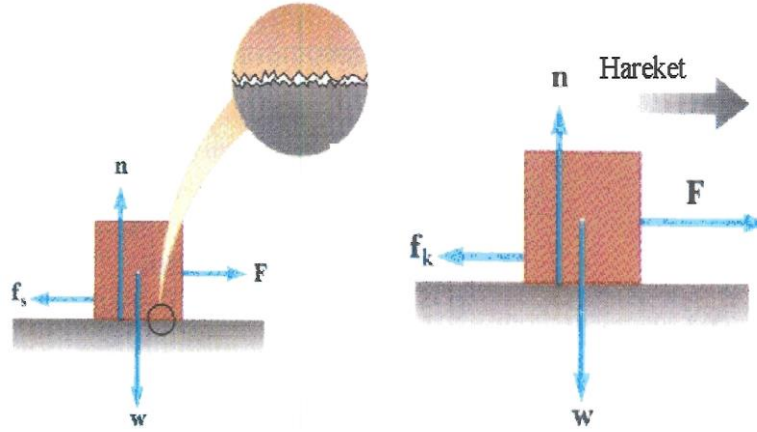
$$F_k = \mu_k \cdot F_n \quad (2.3)$$

Burada;

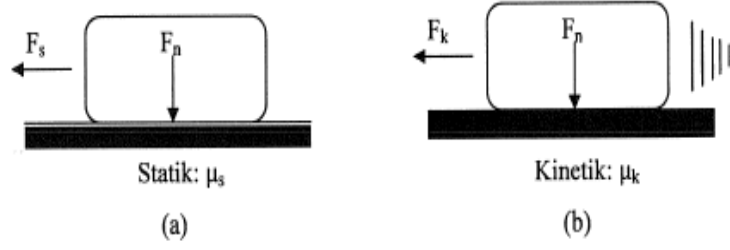
$F_k$ : kinetik sürtünme kuvveti

$\mu_k$ : kinetik sürtünme katsayısı

Burada her zaman  $\mu_k < \mu_s$ ' dir (Özsaraç, 1999). Aşağıda Şekil 2.4 ve 2.5'de statik ve dinamik sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayıları şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Statik ve dinamik sürtünme esnasında cisme etki eden kuvvetler



Şekil 2.5. Statik ve dinamik sürtünme katsayıları

Kinetik sürtünme katsayısının, statik sürtünme katsayısından küçük olmasının nedeni; dinamik yüzeylerdeki küçük çıkıntılar statik yüzeylerdeki gibi yapışmak için zaman bulamazlar. Bu yüzden de temas alanı azalır (Yılmaz, 1997).

#### 2.4.1. Sürtünmenin sınıflandırılması

Yüzeysel (yağlama durumuna göre) ve dinamik (bağıl harekete göre) şartlara göre 2 aşamada sınıflandırılmaktadır.

##### Yüzeysel şartlara göre

- Katı cisim sürtünmesi
- Sıvı cisim sürtünmesi
- Katı yağlı sürtünme
- Gaz sürtünmesi
- Sınır sürtünmesi
- Tüm şartların birlikte görüldüğü sürtünme

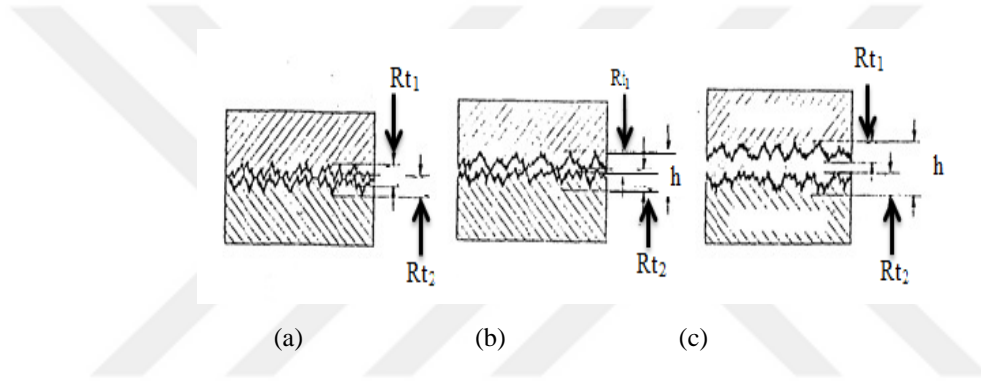
##### Dinamik şartlara göre

- Kaymalı sürtünme
- Yuvarlanmalı sürtünme
- Kaymalı-yuvarlanmalı sürtünme

- Dönmeli sürtünme
- Çarpmalı sürtünme

#### 2.4.1.1. Yüzeysel şartlara göre

Şekil 2.6'da iki malzeme arasında yüzey durumuna göre meydana gelen sürtünme çeşitlerinin şematik resmi verilmiştir. Bağlı hareket yapan yüzeyler arasında yağlayıcı madde konulup ya da konulmamasına bakılarak sürtünme kuru, sınır ve sıvı olarak 3 kısımda incelenir (Burhan, 1994).



Şekil 2.6. Sürtünme çeşitleri; (a) Kuru, (b) Sınır, (c) Sıvı

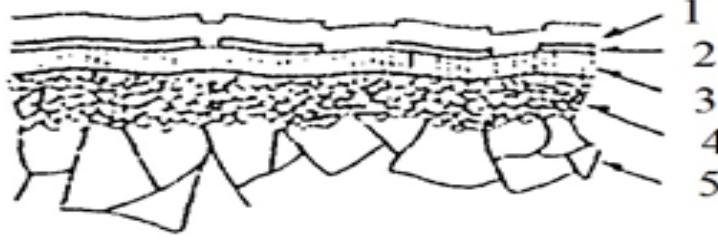
- **Kuru sürtünme**

Kuru sürtünme yabancı maddelerde arındırılmış yüzeyin atmosfer koşullarındaki sürtünmesi olarak adlandırılır (Yıldız ve ark., 2006).

Temas halinde olan yüzeyler arasında bazı koşullardan dolayı oksit, su buharı, pislik, yağ vb. yüzey tabakaları mevcuttur. Bu oluşan tabakalar metal yüzeylerine kuvvetlice bağlanır ve sadece kimyasal ya da fiziksel yollarla temizlenir.

Sürtünme sırasındaki birleşme noktaları ya hareketi engeller ya da yüzeyden parça kopararak yırtılmasına sebep olur. Bu durumda parça aşınır ve kullanılmaz

hale gelir (Burhan, 1994). Şekil 2.7’de kuru sürtünme durumunda yüzeylerin durumu gösterilmektedir.



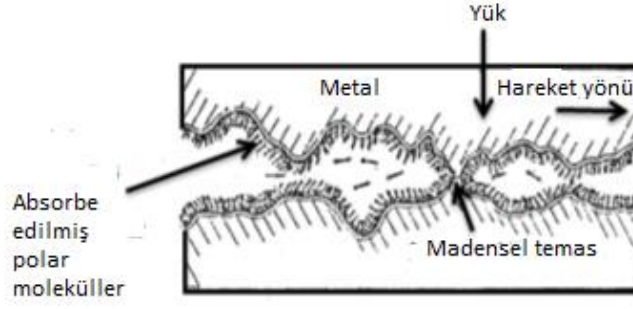
Şekil 2.7. Kuru sürtünme durumunda yüzeylerin durumu; 1.pislik tabakası, 2.absorpsiyon tabakası, 3.oksit tabakası, 4.soğuk şekillendirilmiş tabaka, 5.metal içi

- **Sınır (Yarı Sıvı) sürtünme**

Sürtünen yüzeylerin arasında yağlayıcı maddelerin bulunması durumunda yüzeylerdeki kuruluk ortadan kalkacaktır. Artık sürtünme yağlayıcı madde bulunan yüzeylerde meydana gelecektir. Sınır sürtünmesi ve film sürtünmesindeki sürtünme mekanizmalarının oluşumu yağlanmış yüzeylerde gerçekleşmektedir. Yani film sürtünmesi ile kuru sürtünme arasındaki sürtünmeye sınır (yarı sıvı) sürtünme denilmektedir (Yıldız ve ark., 2006).

Pratikte sınır sürtünme katsayısı 0.02 ile 0.1 arasındadır.

Şekil 2.8’de sınır sürtünme mekanizması şematik olarak verilmiştir. İki yüzey arasındaki yağlayıcı maddenin molekülleri, metal yüzeye düzgün ve homojen bir şekilde yapışır. Bu durumda yüzey üzerinde birkaç molekül katmanı kalınlığında absorpsiyon katmanları oluşur.

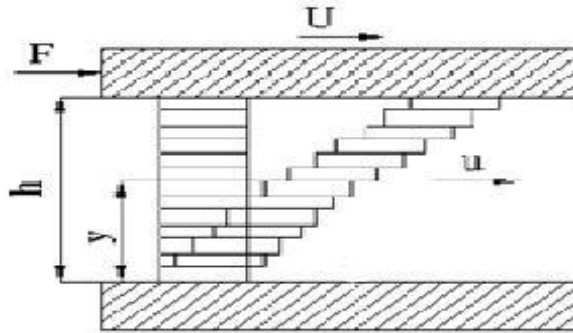


Şekil 2.8. Sınır sürtünme mekanizması

Yüzeydeki absorpsiyon katmanlarının oluştuğu özelliğe yapışma kabiliyeti denir. Bu özellikler ise yağ ve metal yüzeylerdeki karşılıklı etkileşimlere bağlıdır. Oluşan tabaka, metalik yüzeyde direk teması engeller. Yağ tabakası ise özelliğini yüzeyler arasında bulunan yağ maddesinden alarak sürtünen yüzeyleri yağlar (Özsaraç, 1999).

- **Sıvı sürtünme**

Şekil 2.9'da sıvı sürtünmesi gösterilmektedir. Yüzeylerin arasında yağlayıcı madde bulunduğu zaman sürtünme azalır. İç sürtünmenin çok az olduğu aralıksız bir ara tabakanın oluşumu ile en uygun tribolojik sistem meydana gelmektedir. Bu sebeple bağlı hareketteki yüzeylerde oluşan adhesiv ve deformasyon dirençleri yok olur. İdeal bir yağlayıcı ile sürtünme ve aşınma kontrol edilebilir.



Şekil 2.9. Sıvı sürtünme

### 2.4.1.2. Dinamik şartlara göre

Hareketin cinsine göre sürtünme; kaymalı, yuvarlanmalı, kaymalı-yuvarlanmalı, dönmeli ve çarpmalı sürtünmedir.

- **Kaymalı sürtünme**

Temas eden yüzeyler ya da birbiri üzerinde kayan yüzeyler çok hassas olsalar bile gerçek temas ettiği alan görünür temas ettiği alanın 0.01 ile 0.1' i kadardır. Gerçek temas edilen alan yalnızca küçük pürüzlü tepeciklerden oluşur.

Temas noktalarındaki birleşmenin kaymaya başlaması kayma esnasındaki teğetsel kuvvetin artması ile gerçekleşir. Birleşmelerdeki malzemelerin gerilmesi ile orantılı olarak değişebilmesi tüm birleşim noktalarının kesilmesi için gereken sürtünme kuvveti ile olur ve Denklem 2.4 ile hesaplanır.

$$F_s = A_r \cdot S \quad (2.4)$$

Burada;

$F_s$ : kesme için gereken sürtünme kuvveti

$A_r$ : gerçek temas edilen alan

$S$ : malzemenin kesme gerilmesi

- **Yuvarlanmalı sürtünme**

Yüklü bir küre ya da silindirin, düz kütle yüzeyi üzerinde yuvarlanmasıyla yuvarlanmalı sürtünme meydana gelir. Yüklü silindirin yuvarlanması sırasında sürtünme direnci, silindirin merkezine uygulanmaktadır. Yuvarlanmalı sürtünme, yük ile doğru orantılı iken yuvarlanma elemanının çapı ile ters orantılıdır. Burada yuvarlanmalı sürtünme Denklem 2.5 kullanılarak hesap edilebilir.

$$F_r = k (W^n / D^n) \quad (2.5)$$

Burada;

$F_r$ : yuvarlanmalı sürtünme direnci

$k$ : malzeme ve yüzey şartlarındaki sabit

$w$ : yük

$D$ : silindir ya da kürenin çapı

$n$  : deneysel sabitler

Kaymalı sürtünmede olduğu gibi yuvarlanmalı sürtünme katsayısı ( $\mu_T$ ) da aynı yöntemle Denklem 2.6 kullanılarak bulunabilir.

$$\mu_T = F_r / W \quad (2.6)$$

Yuvarlanmalı sürtünme katsayısı sürtünme katsayısına göre daha az iken statik ve kinetik sürtünme katsayılarında hemen hemen aynıdır (Yılmaz, 1997).

## 2.5. Aşınma

Aşınma; malzemenin yüzeyine etki eden faktörlerin etkisiyle zamana bağlı olarak meydana gelen malzemenin kaybıdır. Malzeme yüzeyine etki eden faktörlerin bazıları ise şunlardır: kayma, düşük veya yüksek sıcaklıkta korozif ortam, darbe, yorulma, yuvarlanma, patlamalar vb.' dir (Sarıkaya, 2007).

Aşınma ile yüzeyler düzgün yüzeylerini kaybederek girinti-çıkıntılar oluşur ve parçaların arasındaki boşluklar artar. Malzeme yüzeyine taşlama, parlatma yapılması, talaş kaldırma gibi işlemlerin yapılması aşınma olayı olarak sayılmazlar, çünkü bu işlemler parçanın yüzeyini düzeltmek için ve kontrollü bir şekilde yapılırlar.

Mühendislik malzemelerinde yıpranmadan kaynaklanan olayların aşınma olarak kabul edilebilmesi için bazı şartların olması gerekir. Bu şartlar:

1. Mekanik bir etken olmalıdır.
2. Sürtünme olayının olması gerekmektedir (bağıl hareket gereklidir).
3. Hareketin sürekli olması gerekir.
4. Malzemenin yüzeyinde değişiklikler oluşmalıdır (Akkurt, 1986).

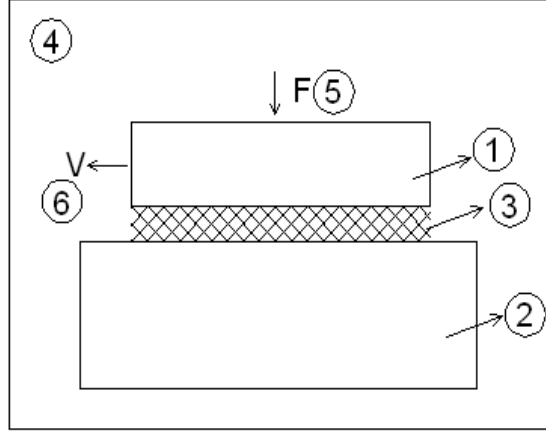
Aşınma bir malzeme özelliği değildir. Aşınma, çevresel, dinamik ve malzeme parametrelerindeki sürtünme sistemindeki çok küçük değişikliklerle, büyük oranda yüzeyde değişiklikler meydana getirir (Yıldız ve ark., 2006).

Metalik ya da metalik olmayan malzemelerde aşınma olayı görülebilir (Stachowiak and ark., 2005). Pompalarda, öğütücülerde, bilyeli rulmanlarda, dişlilerde, mühürlerde, frenlerde, ayakkabılarda, bıçaklarda, insanların eklemlerinde, dirseklerinde, dizlerinde, mobilyalarda, segmanlarda ve daha birçok yerde aşınma görülebilir (Karl-Heinz and ark., 1987).

Servis şartlarında uyum sağlayan malzeme, sertlik ve mikro yapı optimizasyonunu sağlamak aşınmayı en etkin biçimde engelleme yöntemlerindedir (Ay, 2004).

### 2.5.1. Aşınmayı oluşturan temel unsurlar

Aşınmanın temel unsurları şunlardır (Şekil 2.10):



Şekil 2.10. Aşınmayı oluşturan unsurlar

#### 2.5.1.1. Ana malzeme

Yüzeyin yapısı, şekli ve fiziksel, kimyasal özelliklerinin tümünün belli olduğu ve aşındırılan yer hakkında bilgi edindiğimiz parçadır.

#### 2.5.1.2. Karşı malzeme

Bu malzeme ana malzemeyi aşındırmak için kullanılan katı, sıvı ve gaz olabilen malzemedir.

#### 2.5.1.3. Ara madde

Ana malzeme ile karşı malzeme arasında bulunan katı, sıvı, gaz ya da bunların karışımlarından oluşan bir madde bulunabilir.

#### 2.5.1.4. Çevre

Ortamın kimyasal ve fiziksel özelliklerini ifade eder.

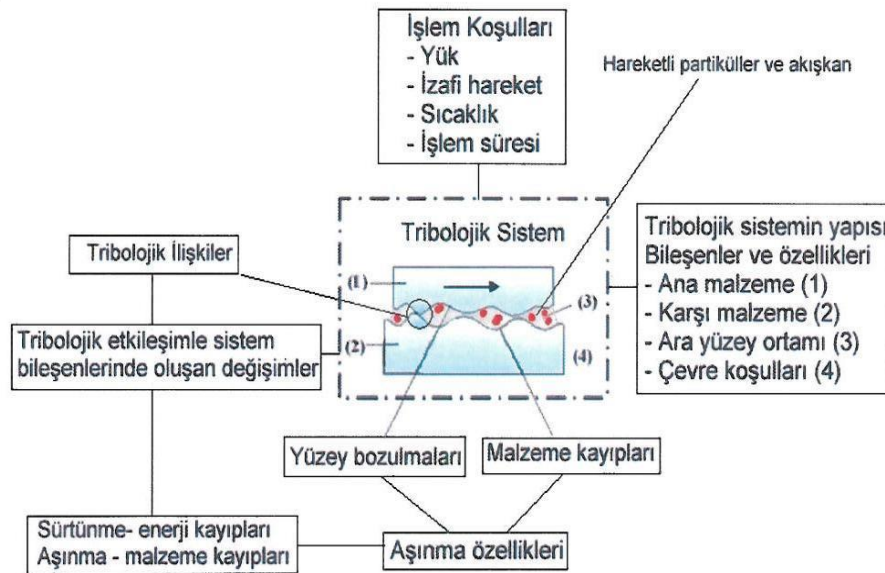
#### 2.5.1.5. Yükleme

Temas eden kuvvetin büyüklüğü, titreşimi, darbesi, doğrultusu ve zamana göre değişimi yükleme durumunu oluşturur.

#### 2.5.1.6. Hareket

Ana malzemenin karşı malzemeye göre hareket cinsi, süresi, doğrultusu ve büyüklüğü ile ilgilidir (Kılıç, 2007).

Tüm bu elemanların oluşturduğu sisteme tribolojik sistem denir (Ay, 2004). Aşağıda Şekil 2.11’de DIN 50320 normuna göre tribolojik sistem gösterilmektedir.



Şekil 2.11. DIN 50320 normuna göre tribolojik sistem

**2.5.2. Aşınmayı etkileyen faktörler**

Aşınmayı etkileyen faktörlerden bazıları şunlardır:

**2.5.2.1. Malzeme seçimi**

Malzeme seçimi doğru yapılmazsa istenilen özellikler oluşmaz ve bu durum maddi kayıplara neden olabilir.

**2.5.2.2. Sürtünme**

Sürtünme ile bazı metaller düşük sürtünme katsayısına sahipken büyük ölçüde aşındırma oluşturabilir ya da tam tersi durum da oluşturabilir.

**2.5.2.3. Yüzeğe uygulanan yük**

Bu faktör ile aşınmanın, genelde doğru orantılı olarak arttığı deneyler sonucunda belirlenmiştir.

**2.5.2.4. Sürtünme mesafesi**

Bu faktörün artması ile aşınma miktarında da zamana bağlı olarak artış gerçekleşir.

**2.5.2.5. Yüzeğin sertliği**

En önemli parametrelerden biridir. Yüzeğin sertliğini arttırsak aşınma azalabilir.

### 2.5.2.6. Yüzey pürüzlülüğü

Bu faktörün 10 ile 70 µm arasında olması gerekmektedir. Eğer yüzey kaba ise aşınmanın artmasına neden olur.

### 2.5.2.7. Yağlama

Aşınmayı önleyen bir faktördür. Sürtünmenin gerçekleştiği yüzeylerdeki yağlama, metal-metal temasını önler (Jarrel and ark., 1999).

## 2.5.3. Aşınma mekanizmaları

Aşınma mekanizmalarını şu başlıklar altında toplayabiliriz:

- Oluşum mekanizmalarına göre; adhesiv, abrasiv, tabaka ve titreşim (yorulma) aşınmalarıdır.
- Hasarın fiziksel görünüşüne göre; kayma, korozif, erozif ve yuvarlanma aşınmalarıdır.
- Aldıkları özel adlara göre; öğütmeli, oymalı, kazımalı aşınmalardır (Topbaş, 1993).

### 2.5.3.1. Oluşum mekanizmalarına göre aşınma mekanizmaları

#### Adhesiv aşınma mekanizması:

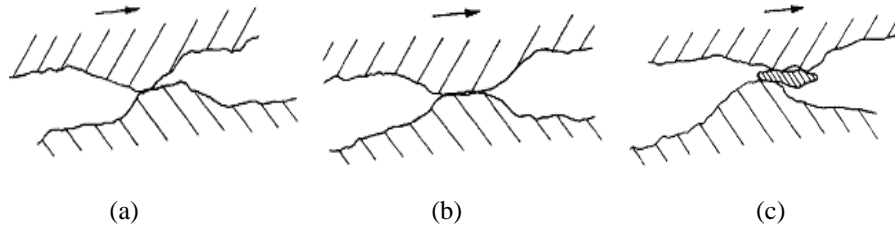
Aşınmaya kayma aşınması ya da yapışma aşınması da denir. İki tane düzgün olan katı cismin yağlamalı ya da yağlamasız olarak kayma etkileşimi sonucu oluşur (Lipson, 1967). Ara yüzeylerde, yüzeylerdeki pürüzlülüklerin teması ile yapışma (adhezyon) meydana gelir ve bu temas kayma ile biter. Bir yüzeyden kopan parçalar diğer yüzeye yapışabilir. Kaymanın devam etmesi halinde ise diğer yüzeye giden

parçalar tekrar kendi parçasına gidebilir ya da aşınma partikülleri oluşturabilir (Bhushan, 1999).

Temas eden yüzeylerde aşırı yüklenme, uygun bir yağ filminin bulunmaması ya da bulunan yağ filmin özelliğini yerine getirememesi sonucunda adhesiv aşınma ortaya çıkar. Yapışma (adhesiv) aşınmanın birkaç çeşidi vardır. Bunlar; oksidasyon, kazımalı, sürünmeli ve parça kaldırmalıdır.

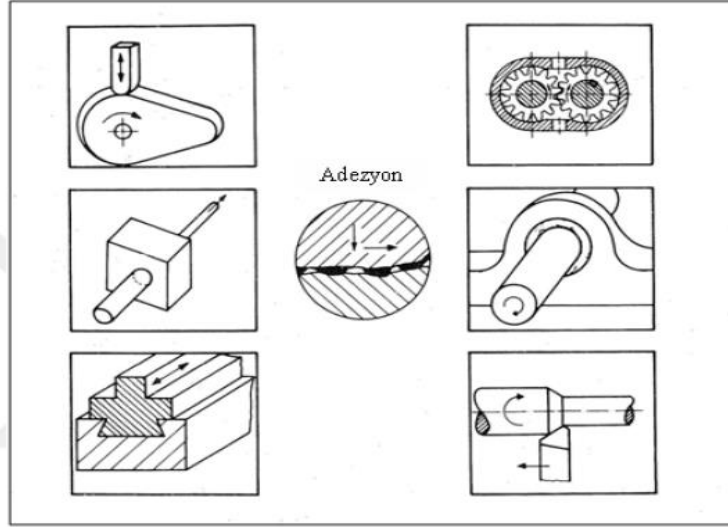
Temas eden yüzeylerde aşırı yüklenme, uygun bir yağ filminin bulunmaması ya da bulunan yağ filmin özelliğini yerine getirememesi sonucunda adhesiv aşınma ortaya çıkar. Yapışma (adhesiv) aşınmanın birkaç çeşidi vardır. Bunlar; oksidasyon, kazımalı, sürünmeli ve parça kaldırmalıdır (Sarıkaya, 2007).

Eğer her iki metal malzemede aynı sertliğe sahip ise burada aşınma her iki malzemenin yüzeyinde olur. Burada aşırı yüklenme olmazsa, yağlama mükemmel yapılırsa ve malzemenin sertliği artırılırsa adhesiv aşınma azaltılır. Sonuç olarak yüzeye etki eden normal yük, kayma yolu ve ana malzemenin yüzey sertliği ile adhesiv aşınma doğru orantılı olarak değişir (Dowson, 1973). Şekil 2.12’de adhesiv aşınma mekanizmasının oluşumu gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Adhesiv aşınmanın oluşumu; (a) İki çıkıntının buluşması ve bağ oluşumu, (b) Bağın kopması diğer yüzeye malzeme transferi ve (c) İki yüzeydeki çıkıntıların etkileşimi sonucu yüzeyde kırıntı oluşumu

Adhesiv aşınma dişlilerde, kam mekanizmalarında, kuru ve sınırlı yağlanmış kaymalı yataklarda, pistonlarda, kesme takımlarında, tel çekmede, kalıplarda görülmektedir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Adhesiv aşınmanın görüldüğü tribolojik sistemler

### Abrasiv aşınma mekanizması:

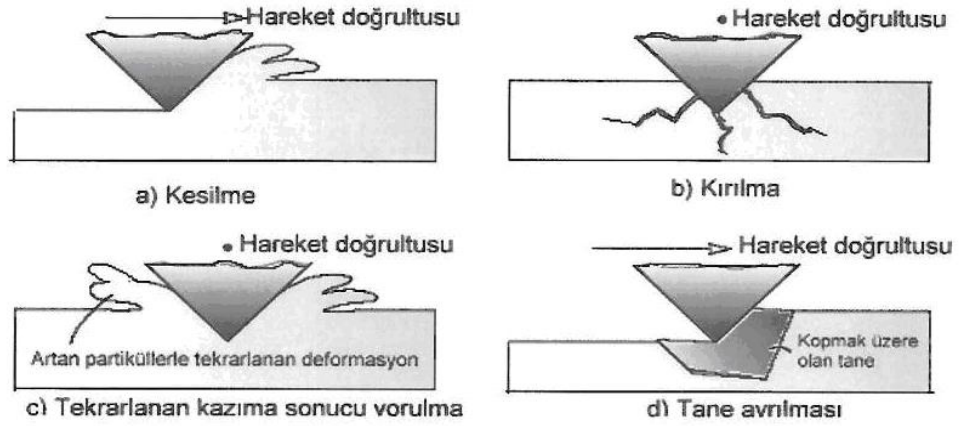
Abrasiv aşınmaya yırtılma ya da çizilme aşınması da denilmektedir (Yıldız ve ark., 2006). Sert çıkıntılarının ya da partiküllerin katı yüzeyine zıt yönde hareket etmesi ile abrasiv aşınma oluşur (ASM International, 1992). Burada bulunan abrasiv taneciği diğer malzemenin yüzeyinden serttir. Sert olan malzemenin yüzey pürüzleri, diğer yumuşak olan malzemenin yüzeyinden talaş kaldırarak aşınma meydana getirecektir (Efeoğlu, 2006). Şekil 2.14’de abrasiv aşınma mekanizmasının oluşumu gösterilmektedir.



Şekil 2.14. Abrasiv aşınma mekanizması

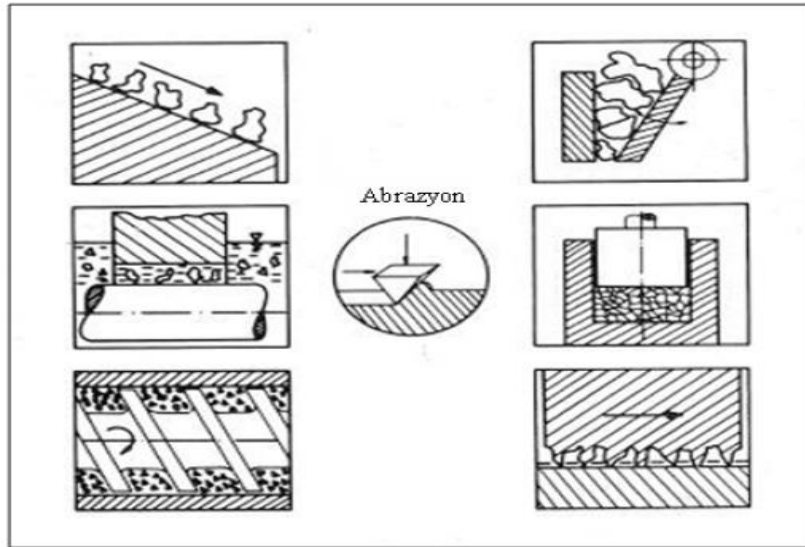
Abrasiv aşınmadaki miktar partiküllerin şekil ve boyutunun dışında malzemenin çeşitli fazlarındaki abrasyon özelliklerine de bağlıdır. Numunedeki

sertlik, aşındırıcı malzemeninkinden büyük ise aşınma miktarında büyük ölçüde bir azalma görülür (Bhushan, 2000; Bhushan and ark., 1991). Aşağıda Şekil 2.15’de mikro kesilme, kırılma, yorulma ve tane ayrılması ile meydana gelen abrasiv aşınmayı gösteren örnekler gösterilmektedir.



Şekil 2.15. Abrasiv aşınma mekanizmaları mikro kesilme, kırılma, yorulma ve tane ayrılması

Abrasiv aşınmaya kirli hidrolik sistemler, toz metalürjisindeki kalıplar, kaydırma olukları, ekstrüderler ve pürüzlü yüzeyle eş çalışan yüzeyler örnek olarak verilebilir (Karl-Heinz and ark., 1987). Aşağıda Şekil 2.16’da abrasiv aşınmanın görüldüğü tribolojik sistemler gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Abrasiv aşınmanın görüldüğü tribolojik sistemler

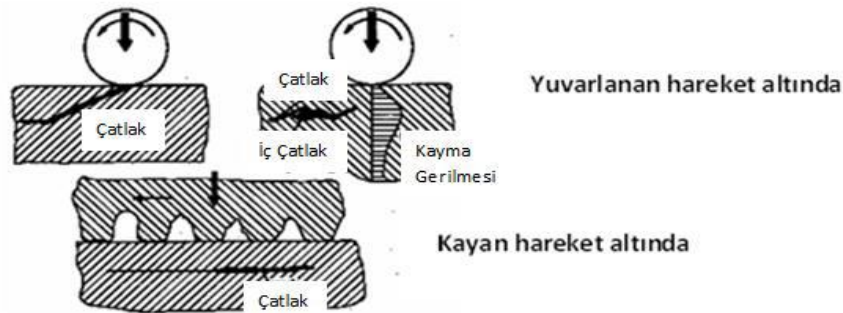
**Tabaka aşınma mekanizması:**

Burada malzemenin etkinliği ikinci planda iken en önemli özelliği aşınma yüzeylerinde oluşan tabakadır. Tabaka aşınması malzemelerin sürtünme yüzeyine etki eder (Bhushan, 2000; İzciler ve ark., 2001).

**Titreşim (Yorulma) aşınma mekanizması:**

Pürüzlerin arasındaki temas sonucunda; kayma ve yuvarlanma esnasında birçok kez tekrarlanan, yüksek bölgesel gerilmelerle yorulma çatlakları aşınmayı meydana getirir ve buna da yorulma aşınması denir. Yorulma aşınması; çatlak başlangıcı, çatlak ilerlemesi ve kırılma sonucu oluşur (Stachowiak and ark., 2005). Yüksek sertlik ve tokluk yorulma aşınmasında uygulanan en uygun metalürjik çözümlerendir (ASM International, 1992).

Şekil 2.17’de yorulma aşınması gösterilmektedir. Yorulma aşınması yaygın olarak dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan mekanizmaların yüzeyinde görülür (Demirel, 2005).



Şekil 2.17. Kayan ve yuvarlanan hareket altında meydana gelen yorulmaya bağlı çatlak

### 2.5.3.2. Hasarın fiziksel görünüşüne göre aşınma mekanizmaları

#### **Kayma aşınma mekanizması:**

Taneli minerallerin oluşturduğu kayma aşınması, mineral sertliğine bakılarak belirlenir. Aşınma sırasında malzemedeki sertlik, aşınma direncinin büyüklüğünü etkileyen önemli bir etkidir.

Metal-metal sürtünmedeki hidrodinamik sürtünmede hiç aşınma gerçekleşmez ve malzeme çiftinin önemi yoktur. Çünkü burada malzemeler birbirine temas etmemektedir.

#### **Korozif aşınma mekanizması:**

Sıvı ve gaz ortamda oluşan temaslarda, malzemenin yüzeyinde elektrokimyasal ve kimyasal etkiler ile reaksiyon ürünleri meydana gelir. Oluşan reaksiyon ürünleri yüzeye iyice yapışır ve ana malzeme gibi davranırsa, aşınmada ana malzemeninki gibi olabilir. Reaksiyon ürünleri bazı durumlarda ise farklı aşınma mekanizmalarına neden olur (Bhushan, 2000). Daha sonra oluşan reaksiyon ürünlerinin ana metal ile bağlantıları zayıflar ve reaksiyon ürünleri ana malzemedan koparlar (Karadeniz, 2005). Şekil 2.18’de korozif aşınma mekanizması gösterilmektedir.

Bu aşınma mekanizmasında, aşınma 2 kısımda gerçekleşir:

- Temas halinde olan yüzeyler ortamla reaksiyona girer ve reaksiyon ürünleri yüzeyde tabaka meydana getirir.
- Sonra ise, temas noktasında çatlak oluşumu ya da abrasiv etkilerden reaksiyon ürününün oluşturduğu tabaka hasara uğrar (Burhan, 1994).



Şekil 2.18. Koroziif aşınma mekanizması

Koroziif aşınma, sıcaklık ve ortamın etkisiyle farklı şekillerde oluşabilir:

- Oksitlenme,
- Karbürlenme ve metal tozlaşması,
- Nitrürlenme,
- Halojen korozyonu,
- Sülfürlenme,
- Kül (tuz) çökeleği korozyonu,
- Erimiş tuz korozyonu,
- Sıvı metal korozyonu (Kobrick, 2010).

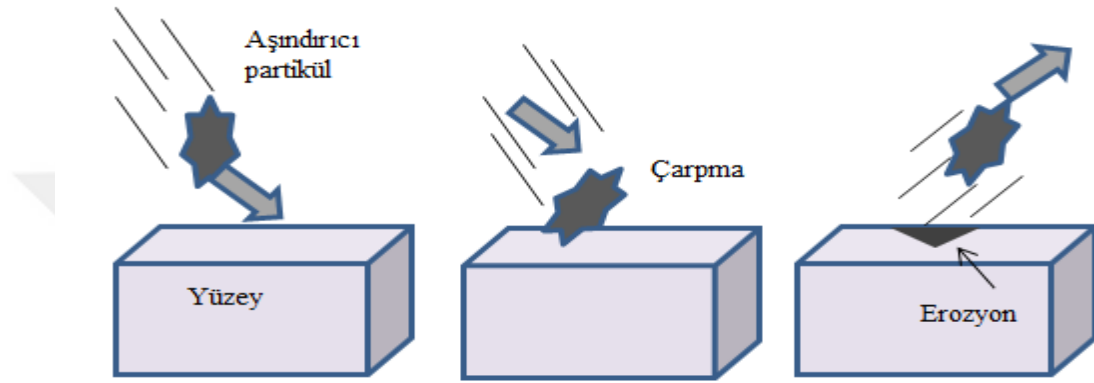
#### **Eroziif aşınma mekanizması:**

Bir akışkanla bağıl hareket eden ve temas eden akışkanın içerisinde katı parçacık bulunan katı yüzeyden malzeme kaybının olmasına eroziif aşınma denir (Yılmaz, 1997). Aşağıda Şekil 2.19'da eroziif aşınma mekanizmasının oluşumu gösterilmektedir.

Erozyon aşınma mekanizması farklı şekillerde oluşabilir:

- Akışkanın içindeki partiküllerin, yüksek bir hızla katı yüzeye çarpması sonucu oluşabilir.

- Hareketli sıvı damlaların, yüksek bir hızla katı yüzeye çarpmasıyla şok dalgasıyla yüzeyi tahrip etmesi sonucu oluşabilir.
- Yüksek hızdaki harekette olan katının, kendi hızından daha yavaş su damlalarına sürekli çarpması sonucu oluşabilir.
- Yüksek basınçla gaz kabarcıklarının malzemenin yüzeyine çarpması sonucu oluşabilir (Sarıkaya, 2007).



Şekil 2.19. Akışkanın içindeki partiküllerin, yüksek hızla katı yüzeye çarpması sonucu oluşan erozyon aşınması

### **Yuvarlanma aşınma mekanizması:**

Malzemeleri birbiri üzerinde yuvarlanmasıyla meydana gelen aşınma mekanizmasıdır. Bu aşınma mekanizması tek bir malzemede ya da her iki malzemede oluşabilir. Yuvarlanma aşınma mekanizmasında yüzeyin yağlanıp, yağlanmaması önemli etkilere sahiptir.

### **2.5.3.3. Aldıkları özel adlara göre aşınma mekanizmaları**

#### **Öğütmeli aşınma mekanizması:**

Bu aşınma mekanizmasında yüksek basınçlardaki partiküllerin metal yüzeyleriyle düşük hızlarda karşılaşmalarıyla, metalin yüzeyinden parçacık kesilmesi

ya da küçük çizgilerin oluşup kopması ile oluşur. Genellikle ağır iş makinelerinin çalışma şartlarında görülür.

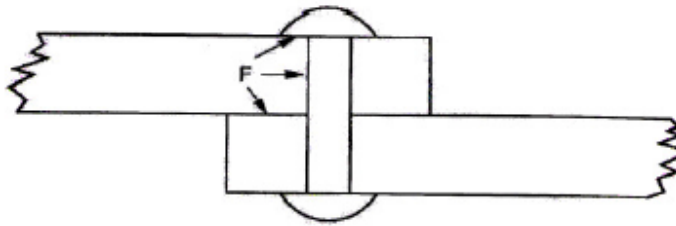
### **Oymalı aşınma mekanizması:**

Bu aşınma mekanizmasında, malzeme yüzeyinin yüksek gerilme sonucu çarpma durumlarında, yüzeydeki bir parçanın kesilmesi ya da kopmasıyla oluşur. Daha çok hafriyat, madencilik, petrol kuyularında delme işlemi yapan malzemelerin kesme ve delme görevi olan bölümlerinde rastlanılır.

Bu aşınma mekanizması, diğer aşınma mekanizmalarından daha hızlı geliştiğinden, oymalı aşınmaya uğrayan parçanın yenisiyle değiştirilmesi daha ekonomik olmaktadır.

### **Kazımalı aşınma mekanizması:**

Bu aşınma mekanizması, birbirlerine göre hareket etmeyen yüzeylerde oluşmaktadır. Adhesiv aşınma ile az da olsa benzerlik göstermektedir. Ancak adhesiv aşınma mekanizması birbirleri üzerinde kayan yüzeylerde oluşmaktadır. Şekil 2.20'de kazımalı aşınma mekanizmasının oluşumu gösterilmektedir. Genellikle titreşimli ortamlarda çalışan somun, perçin vb. bağlantı elemanlarıyla birleştirilmiş sistemlerde, otomobil şaftlarındaki birleşim kısımlarında ve yataklarda bulunur. Bu aşınmayı azaltmak için; titreşim azaltılmalı ya da giderilmeli, ara yüzeyde oluşan kaymayı azaltılmalı ya da gidermeli, bağlantı noktalarının yağlanması ve kırılmayı engellemek gibi tedbirler alınabilir (Turhan, 1994).



Şekil 2.20. Kazımalı aşınma mekanizması

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında, %8 mol yitriya ile kararlı hale getirilmiş kübik zirkonyanın (8YSZ) mikroyapısına, tane boyutuna, aşınma ve yüzey özelliklerine  $\text{Er}_2\text{O}_3$  ve  $\text{CeO}_2$  ilavesinin etkileri; pin-on-disk tipi aşınma cihazı, profilmetre ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir.

#### 3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Örneklerin Hazırlanması

Yapılan bu çalışmada; ana malzeme olarak %8 mol  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ile stabilize edilmiş kübik zirkonya (8YSZ) ve katkı elemanı olarak  $\text{Er}_2\text{O}_3$  ve  $\text{CeO}_2$  tozları kullanıldı. 8YSZ,  $\text{Er}_2\text{O}_3$  ve  $\text{CeO}_2$  tozlarının partikül boyutları ise sırasıyla, 0,25; 0,3 ve 0,2  $\mu\text{m}$  dur. Çalışmada kullanılan tozların kimyasal bileşenleri Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan tozlarının kimyasal kompozisyonları

Tozlar	%Ağırlıkça										
	ZrO <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Re <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CeO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	FeO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
8YSZ	85.9	13.6	-	-	-	0.1	0.003	0.01	0.02	0.25	0.1
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	≤0.1	99.9	-	-	0.001	-	0.05	0.01	0.005
CeO <sub>2</sub>	-	-	-	-	99.7	-	0.01	-	0.01	-	0.01

Örneklerin alaşımlama işlemi, plastik kap içerisinde 8YSZ tozları ile birlikte ağırlıkça %1, 5, 10 ve 15  $\text{Er}_2\text{O}_3$  ve  $\text{CeO}_2$  tozları koloidal işlemle gerçekleştirildi. Koloidal işlem için ilk önce karışım tozlar bir plastik şişe içerisinde zirkonya bilyalar ve ethanol çözeltisi içerisinde speks tipi bir karıştırıcıda 200 rpm’de 12 saat süre ile karıştırma yapıldı. Daha sonra, plastik şişenin kapağı açılarak hazırlanan bulamaç halindeki karışım 24 saat boyunca açık havada kurumaya bırakıldı. Kurutma işlemi bittikten sonra plastik şişe içinde zirkonya bilyeler ve orta sertlikte oluşan topaklaşmış tozları birbirinden ayırmak ve kırmak için 10 dakika süre ile tekrar öğütme işlemi (pin-milling) gerçekleştirildi. Karıştırma sonucunda elde edilen tozlar 60  $\mu\text{m}$ ’ lik bir elekten geçirildi. Hazırlanan karışım tozlar, aşınma deneyleri ve mikroyapı incelemeleri için tek eksenli bir presleme kalıbında 200 MPa basınçta presleme ile 10 mm çapında 5 mm yüksekliğinde peletler üretildi.

### 3.2. Tane Büyütme İşlemi ve Mikro Yapı İncelemeleri

Mikroyapı incelemeleri ve aşınma deneyleri için ilk önce üretilen örnekler Şekil 3.1’de gösterilen kutu tipi bir fırında dakikada 5 °C’lik bir ısıtma hızında 1400 °C’ de 1 saat süre ile sinterlendi. Daha sonra, tane büyütme işlemleri için katkısız, Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklere 1400 °C’ de 10, 50 ve 100 saat süre ile tavlama işlemi gerçekleştirildi ve tavlama işlemi bittikten sonra 1400 °C’ den oda sıcaklığına dakikada 5 °C’lik soğutma hızıyla oda sıcaklığına soğutma işlemi yapıldı. Yüksek sıcaklıklarda ve bekleme sürelerinde taneleri büyütülen örneklerin mikroyapı resimlerinden ortalama doğrusal kesme metodu ile Denklem 3.1 kullanılarak ortalama tane boyutları hesaplandı (Aktaş, 2008).

$$D = L / (M \cdot N_i) \quad (3.1)$$

Burada;

D: Ortalama tane boyutu

L: Bilinen toplam doğru uzunluğu

M: Büyütme oranı

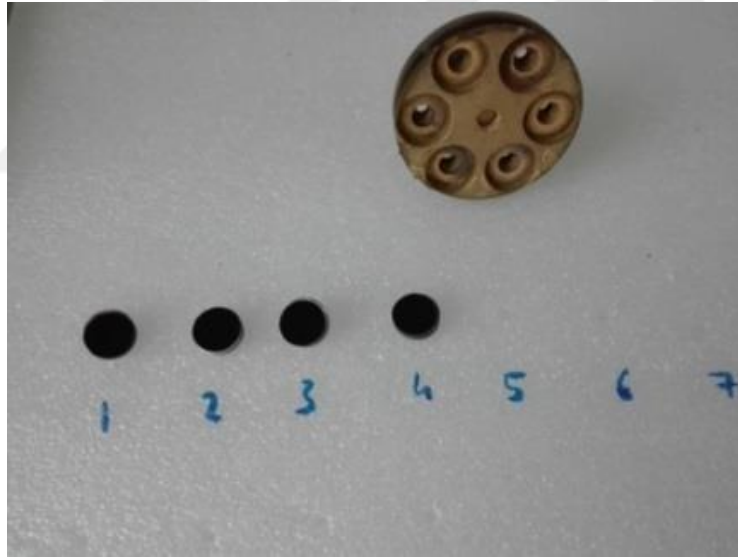
N<sub>i</sub>: Bilinen toplam L uzunluğundaki doğruyu kesen tane sınırlarının sayısı



Şekil 3.1. Kutu tipi yüksek sıcaklık sinterleme fırını

Mikroyapı incelemeleri için örnekler soğuk gömme yöntemi ile kalıplandı. Örnekler 120, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gridlik SiC zımparalarla yüzeydeki çizikler giderilene kadar zımparalandı ve daha sonra örnek yüzeyleri 6, 3 ve 1  $\mu\text{m}$ 'luk elmas pastalar kullanılarak parlatma işlemi yapıldı. Yüzeyleri parlatılmış örnekler daha sonra Şekil 3.1'deki kutu tipi bir fırında 1350 °C'de 1 saat bekletmek suretiyle termal dağlama yapıldı.

Mikroyapı incelemeleri için aşınma işlemi tamamlanmış örnekler ilk önce Şekil 3.2'de gösterilen numune tutucusuna yerleştirildi ve daha sonra Şekil 3.3'de gösterilen EMS 550 marka kaplama cihazıyla ince bir gümüş palladyum tabaka ile kaplama yapıldı. Örneklerin mikroyapı incelemeleri ise Şekil 3.4'de gösterilen ZEISS marka Evo 50 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirildi.



Şekil 3.2. SEM incelemesi için örneklerin yerleştirildiği numune tutucusu



Şekil 3.3. EMS 550 marka kaplama cihazı



Şekil 3.4. ZEISS marka Evo 50 model taramalı elektron mikroskobu (SEM)

### 3.3.Aşınma Deneyleri

Bu çalışmada; aşınma deneylerinde 1400 °C' de 10, 50 ve 100 saat sürede tavllanmış katkısız, ağırlıkça %1, 5, 10, 15 oranlarında Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ (10 mm çapında ve 5 mm yüksekliğinde) pellet örnekler ile karşı sürtünme elemanı olarak da 10 mm çapında tungsten karbür (WC) bilye kullanıldı. Aşınma deneyleri yapılmadan önce örneklerin yüzeyinde bulunan kaplamayı kaldırmak ve yüzeyi iyileştirmek için Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Bilimi Laboratuvarındaki Şekil 3.5'de gösterilen zımparalama ve parlatma makinesinde 320 ve 800 gridlik zımparalar kullanılarak zımparalama işlemi yapıldı.



Şekil 3.5. Zımparalama ve parlatma makinesi

Zımparalama işlemi bittikten sonra örnekler aşınma testine alındı. Numunelerin aşınma testleri Şekil 3.6'da gösterilen TRD marka aşınma test cihazı kullanılarak 5 ve 6 N yüklerde, 0.1 m/sn kayma hızında ve 500 m kayma mesafesinde, kuru sürtünme ve oda şartlarında her bir yük ve katkı elemanı için üç deney tekrarı yapılarak gerçekleştirildi.



Şekil 3.6. TRD marka pin-on-disk aşınma test cihazı

Aşınma cihazında dikey konumda pin ve pin ucuna bağlı karşı eleman olarak 10 mm çapında tungsten karbür (WC) bilye ve ana malzeme ( $\text{Er}_2\text{O}_3$  ve  $\text{CeO}_2$  katkılı 8YSZ örnekler) numune tutucusuna bağlı bulunmaktadır. Bu pin üzerine yükleme yapılabilmektedir. Yatay konumda ise load cell (yük hücresi) yardımı ile sürtünme katsayısı verileri bilgisayarda bulunan TRD wear programına aktarılır. TRD wear programı otomatik başlatılıp durdurulabilmekte ve aşınma numunelerinin sürtünme katsayısını ve grafiklerini kaydetmektedir.

Aşınma testine başlamadan önce TRD wear programına değerler girilip kısa bir süre program başlatılıp durduruldu ve oluşan izin çapı Şekil 3.7’de gösterilen dijital kumpas yardımıyla ölçüldü. Daha sonra yukarıda belirtilen parametrelerde aşınma deneyleri gerçekleştirildi.



Şekil 3.7. Dijital kumpas

### 3.4. Aşınma İzinden Yüzey Profillerinin Alınması

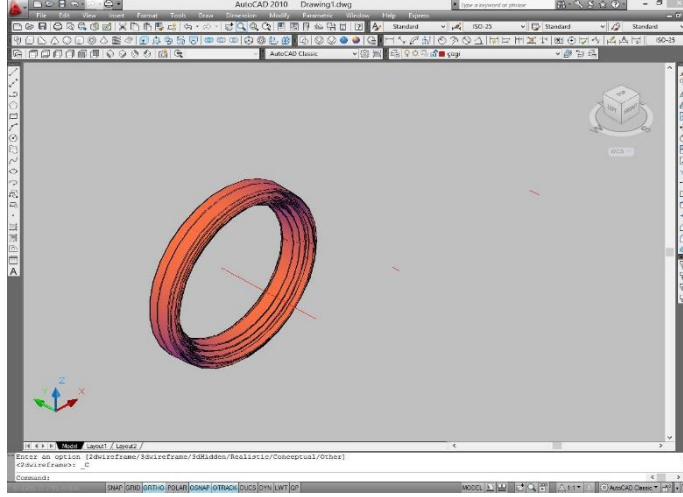
Örneklerin aşınma testleri bittikten sonra programa aktarılan sürtünme katsayısı değerleri kaydedilerek aşınma cihazına bağlanan örnek çıkarıldı. Çıkarılan örneklerin yüzeyinde bulunan aşınan toz parçacıkları seyreltilmiş alkol ile temizlendi. Daha sonra, bulunan Şekil 3.8’de gösterilen Time TR 200 model profilmetre ile örneklerin aşınma bölgesinden yüzey profil görüntüleri alındı.



Şekil 3.8. Time TR 200 model profilmetre cihazı

### 3.5. Aşınma Hacimlerinin Hesaplanması

Profilmetre cihazı ile aşınma yüzeylerinin 2 boyutlu profil görüntüleri elde edildi. Profil görüntüleri her numune için 3 farklı aşınma yüzeyinden alındı. Farklı aşınma yüzeylerinden alınan aşınma bölgesinin 2 boyutlu yüzey profili görüntüsü Autocad programına aktarıldı ve burada aşınma bölgesindeki hacmi hesaplayabilmek için aşınma bölgesi Polyline komutu ile kapalı olarak çizildi. Polyline komutu ile kapatılan aşınma bölgesi yine Autocad programında revolve komutu ile 3 boyutlu hale getirildi ve aşınma hacmi Autocad programı yardımıyla hesaplandı. Şekil 3.9’da aşınma bölgesinin Autocad programındaki 3 boyutlu görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Aşınma bölgesinin Autocad programındaki üç boyutlu görüntüsü

### 3.6. Spesifik Aşınma Miktarının Hesaplanması

1400 °C' de 10, 50 ve 100 saat süre ile tavllanmış katkısız, Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 N ve 6 N yüklerde, 0.1 m/sn kayma hızında ve 500 m kayma mesafesindeki aşınma deney sonuçlarına göre spesifik aşınma miktarları Denklem 3.2 kullanılarak hesaplandı.

$$K_w = V_w / (F.S) \quad (3.2)$$

Burada;

$K_w$  : spesifik aşınma miktarı ( $\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$ )

$V_w$  : aşınma hacmi ( $\text{mm}^3$ )

F : uygulanan yük (N)

S : kayma mesafesi (m)

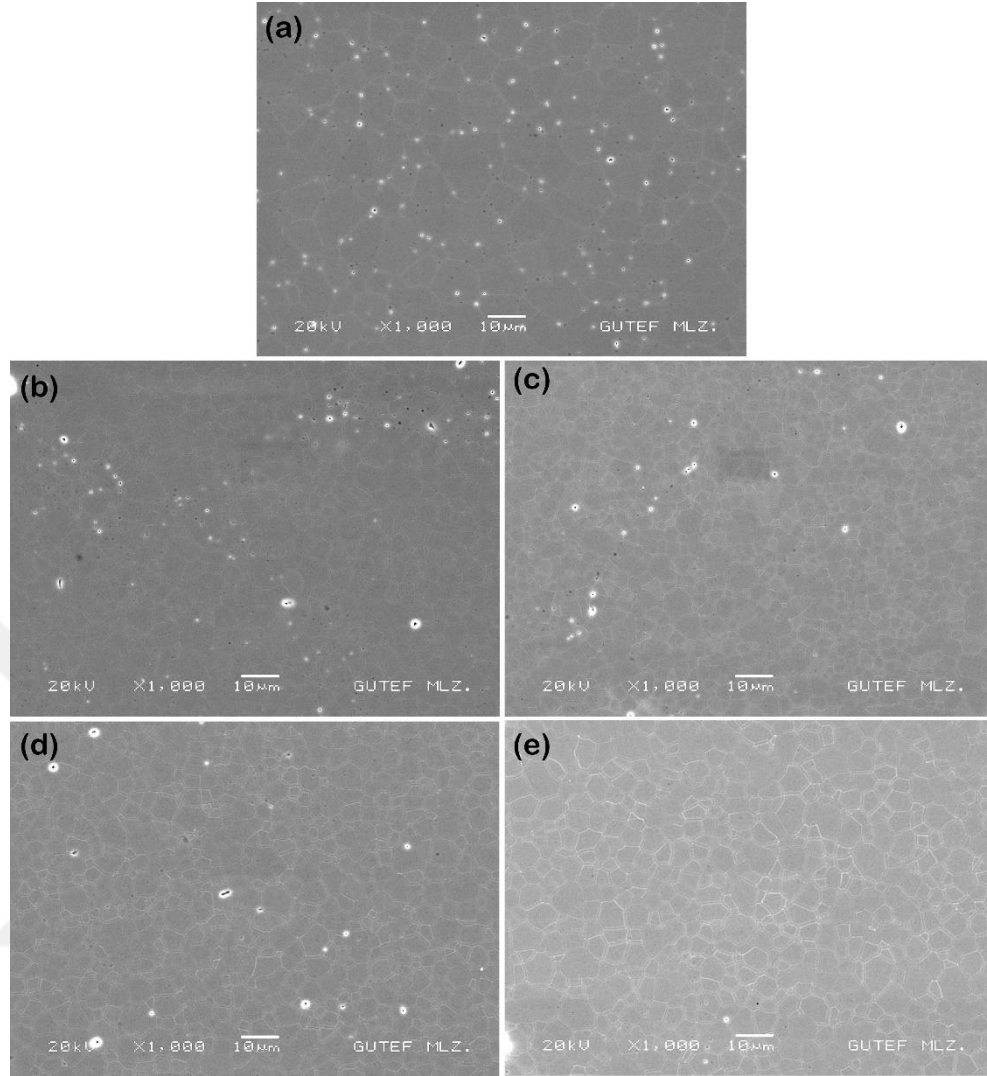
## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

### 4.1. Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Katkılı 8YSZ Örnekler

#### 4.1.1. Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesinin 8YSZ'nin tane boyutuna ve mikroyapısına etkisi

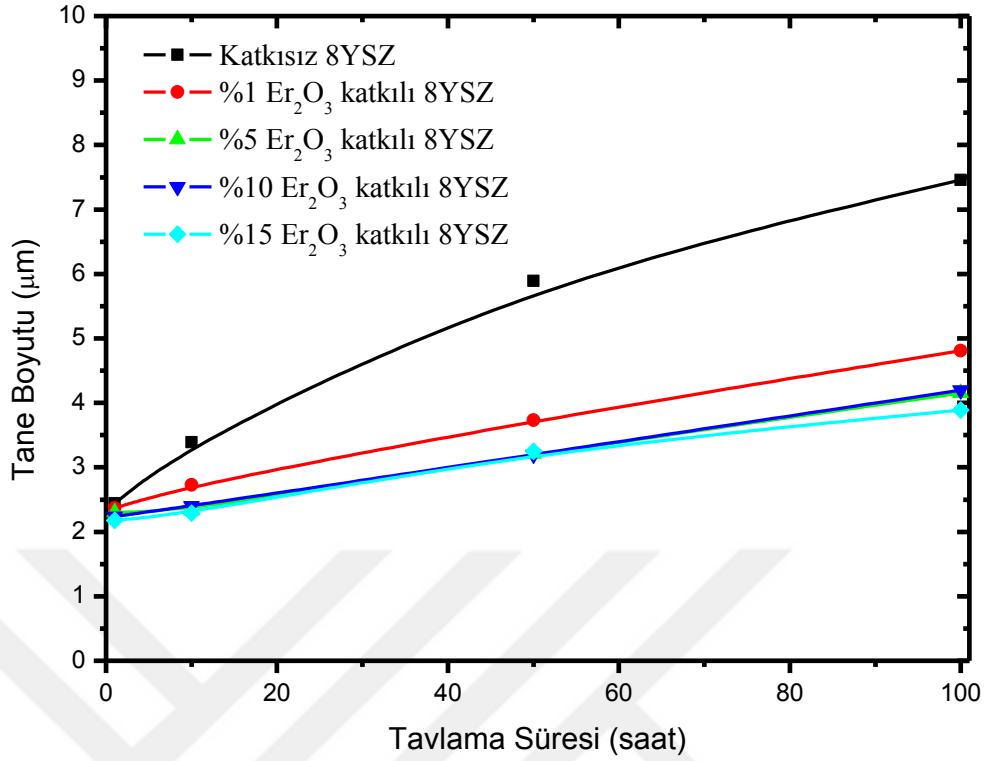
Katkısız ve Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örnekler 1400 °C'de 10, 50 ve 100 saat süre ile tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonucunda, belirli sıcaklık ve bekleme süresinde tane büyütme işlemi yapılmıştır.

Şekil 4.1'de 1400 °C' de 50 saat süre ile tavllanmış katkısız, %1, 5, 10 ve 15 oranlarında Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin SEM mikroyapıları verilmektedir. Bu mikroyapılar incelendiğinde; katkısız 8YSZ poligonal eş eksenli iri tanelere sahipken, Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin mikroyapısı ise daha küçük poligonal eş eksenli tanelerden oluştuğu görülmektedir. Sonuç olarak, Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesi 8YSZ'nin tane boyutunda bir azalma meydana getirmiştir. Tekeli ve ark., (2012) yaptıkları bir çalışmada, Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'in 8YSZ matrisinde ağırlıkça %10 oranına kadar çözünebildiği ve %10 oranından sonra ise 8YSZ'nin tane sınırlarına tercihli olarak ince bir film şeklinde çökeldiğini göstermişlerdir. Ayrıca, Aktaş ve ark., (2014) tane sınırında çökelen Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ikinci fazının tane boyutunda bir azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.1. 1400 °C’de 50 saat tavllanmış örneklerin SEM mikroyapıları; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ

Şekil 4.2’de 1400 °C’ de 10, 50 ve 100 saat süre ile tavllanmış %1, 5, 10 ve 15 oranlarında Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin tane boyutlarındaki değişimler verilmektedir. Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin mikroyapılarına bakıldığında, tavlama süresi arttıkça tane boyutunda da bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca, Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkı miktarındaki artış ile birlikte orantılı olarak 8YSZ’nin tane boyutunda bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>’in 8YSZ’den daha düşük difüzyon katsayısına sahip olması nedeniyle 8YSZ’nin matrisinde çözünen ve tane sınırlarına çökelen Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 8YSZ’nin tane büyüme hızını yavaşlattığı ve tane boyutunda bir azalmaya neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.2. 1400 °C’de 10, 50 ve 100 saat süre ile tavllanmış Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkıli 8YSZ örneklerin tane boyutlarındaki değişim

#### 4.1.2. Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkıli 8YSZ’nin sürtünme ve aşınma davranışları

Katkısız ve Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkıli 8YSZ örnekler aşınma testlerine başladığında aşınma cihazında bulunan load cell yardımıyla bilgisayardaki programa sürtünme katsayısı verileri aktarılmaya başlanmıştır.

1400 °C’de 10, 50 ve 100 saat süreyle tavllanmış %1, 5, 10 ve 15 katkı oranlarında Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren 8YSZ örneklerin aşınma deneyleri pin-on-disk yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkıli 8YSZ örnekleri aşındırmak için karşı eleman olarak tungsten karbür (WC) bilye kullanılmıştır. Katkısız ve Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkıli 8YSZ örneklere 5 ve 6 N olmak üzere iki farklı yük kullanılarak 0.1 m/sn kayma hızında, 500 m kayma mesafesinde, kuru sürtünme ve oda koşullarında her bir numune için üç tekrar yapılarak aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına

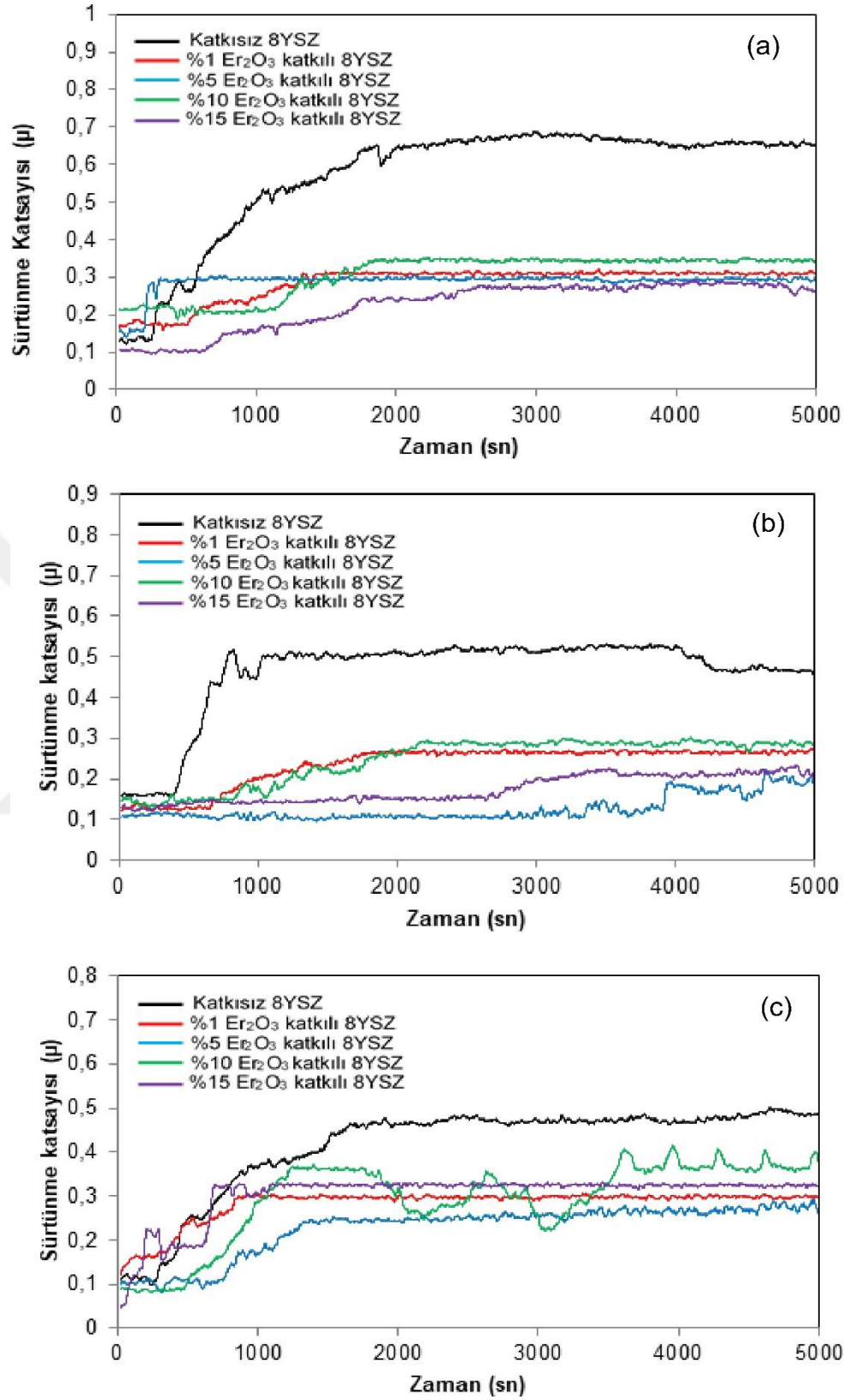
göre katkısız 8YSZ örneklere  $Er_2O_3$  ilavesinin sürtünme katsayısına ve aşınma davranışlarına etkileri incelenmiştir.

#### 4.1.2.1. $Er_2O_3$ katkılı 8YSZ'nin sürtünme katsayıları

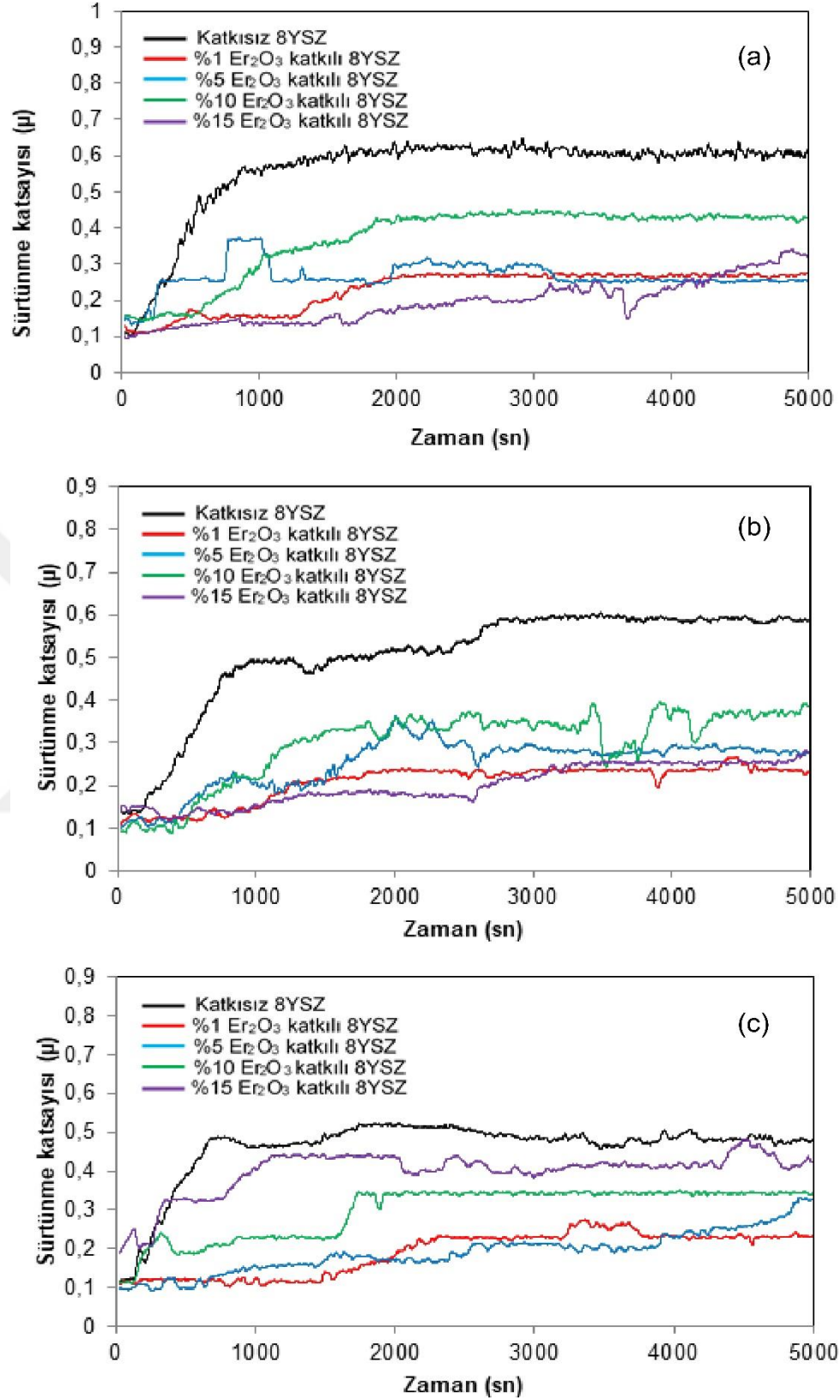
Şekil 4.3 ve 4.4'de 1400 °C'de 10, 50 ve 100 saat süre ile tavlama katkısız ve  $Er_2O_3$  katkılı 8YSZ örneklerin sırasıyla 5 ve 6 N yüklerde sürtünme katsayısının zamana bağlı değişim grafikleri verilmektedir. Şekil 4.3 ve 4.4'e bakıldığında, başlangıçta düşük sürtünme katsayısı değerleri görülürken belirli bir kayma mesafesinden sonra sürtünme katsayısındaki değerler hızla artış göstermektedir. Daha sonra, belirli bir artış sonrası sürtünme katsayısı değerleri sabit olarak devam ettiği görülmektedir. Sürtünme katsayısının başlangıçta düşük değerler ile başlayıp belirli bir kayma mesafesinden sonra artış göstermesinin sebebi, başlangıçta yüzey pürüzlülüğü az olan örneklerin karşı eleman tungsten karbür (WC) bilye ile sürtünmesi sonucunda örneklerin yüzeyinden aşınarak kopan parçacıklar, yüzey pürüzlülüğünde bir artışa neden olmaktadır ve bu durum ise sürtünme katsayısında bir artışa neden olmaktadır.

Şekil 4.3'de farklı tavlama sürelerindeki katkısız ve  $Er_2O_3$  katkılı 8YSZ örneklerin 5 N yükte sürtünme katsayısının zamana göre değişimini gösteren grafikler incelendiğinde; katkısız ve  $Er_2O_3$  katkılı 8YSZ örneklerde tavlama sürelerinin artması ile birlikte sürtünme katsayılarının bir miktar arttığı görülmektedir. Tavlama süresinin artmasıyla birlikte meydana gelen tane büyümesi, sürtünme katsayısında biraz artışa neden olduğu sonucu çıkarılabilir (Şekil 4.3-a-c ve Çizelge 4.1). Ayrıca, buradan elde edilen sonuca göre sürtünme katsayısına malzemenin tane boyutunun etkisinin çok az olduğu veya sürtünme katsayısının tane boyutundan bağımsız olduğu sonucu çıkarılabilir. Yapılan bazı çalışmalarda; tetragonal zirkonya ve kübik zirkonya seramiklerde tane boyutundaki artışın sürtünme katsayılarında bir artışa neden olduğu bildirilmektedir (Basu ve ark., 2004; Aktas ve ark., 2019; Tekin, 2015). Fakat yapılan bazı çalışmalarda, genelde sürtünme

katsayısının malzemenin tane boyutuna bağımlı olmadığı bildirilmektedir (He ve ark., 1996; Krell ve ark., 1996). Bundan başka, 8YSZ'e farklı oranlarda  $Er_2O_3$ 'in eklenmesinin sürtünme katsayılarında ciddi bir azalmaya neden olduğu Şekil 4.3 ve 4.4'den görülmektedir. Literatürde bazı çalışmalarda,  $Er_2O_3$ 'in düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahip olduğu bildirilmektedir. Archer Technicoat Ltd. firmasının yaptığı bir çalışmada; zirkonyum oksit ( $ZrO_2$ ) ve erbiyum oksit ( $Er_2O_3$ ) sürtünme katsayılarının sırasıyla 0.6-0.7 ve 0.05-0.11 aralığında değişim gösterdiği bildirilmiştir (Archer Technicoat Ltd., 2019). Ayrıca yine başka bir çalışmada, DLC (elmas gibi karbon) malzemeye  $Er_2O_3$ 'in katkı yapılması ile DLC malzemenin sürtünme katsayısına yakın düşük sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir (Foong ve ark., 2010). Diğer bir çalışmada ise  $Si_3N_4$  seramiklere  $Er_2O_3$  gibi nadir toprak metal oksitlerinin ilavesinin sürtünme katsayısında bir azalmaya neden olduğu bildirilmiştir (Joshi ve ark., 2011). 8YSZ içerisine farklı oranlarda ilave edilen  $Er_2O_3$ 'in katı yağlayıcılık özelliği göstermesi ve düşük sürtünme katsayısına sahip olması nedeniyle 8YSZ'nin sürtünme katsayısında ciddi bir azalmaya neden olmuştur. Literatürdeki sonuçlarla bizim yaptığımız çalışmanın sonuçları büyük uyumluluk göstermektedir.



Şekil 4.3. Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 N yükte sürtünme katsayılarının değişimi; (a) 10, (b) 50 ve (c) 100 saat tavllanmış



Şekil 4.4.  $\text{Er}_2\text{O}_3$  katkılı 8YSZ örneklerin 6 N yükte sürtünme katsayılarının değişimi; (a)10, (b) 50 ve (c) 100 saat süre ile tavlannmış

Şekil 4.3 ve 4.4’de katkısız ve Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ numunelerin 5 ve 6 N yüklerde farklı tavlama sürelerine göre sürtünme katsayılarının zamana göre değişimini gösteren grafikler; test yükü arttıkça örneklerin sürtünme katsayılarında bir miktar artış olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Çizelge 4.1 ve 4.2’de katkısız ve Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin farklı tavlama sürelerinde ortalama sürtünme katsayısı değerleri verilmektedir. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’deki ortalama sürtünme katsayısı değerleri her örnek için yapılan üç deney tekrarının ortalamasıdır.

Çizelge 4.1. Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 N yükte ortalama sürtünme katsayılarının tavlama sürelerine göre değişimi

Kullanılan numuneler	Ortalama sürtünme katsayıları		
	10 h	50 h	100 h
Katkısız 8YSZ	0.51±0.11	0.40±0.06	0.42±0.03
% 1 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ	0.31±0.02	0.24±0.10	0.26±0.10
% 5 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ	0.23±0.06	0.23±0.10	0.26±0.03
% 10 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ	0.31±0.05	0.22±0.03	0.23±0.05
% 15 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ	0.23±0.04	0.23±0.08	0.32±0.03

Çizelge 4.2. Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 6 N yükte ortalama sürtünme katsayılarının tavlama sürelerine göre değişimi

Kullanılan numuneler	Ortalama sürtünme katsayıları		
	10 h	50 h	100 h
Katkısız 8YSZ	0.55±0.04	0.41±0.09	0.43±0.06
% 1 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ	0.26±0.06	0.24±0.03	0.26±0.06
% 5 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ	0.24±0.04	0.30±0.05	0.23±0.04
% 10 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ	0.34±0.07	0.26±0.08	0.27±0.03
% 15 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ	0.26±0.08	0.23±0.04	0.34±0.10

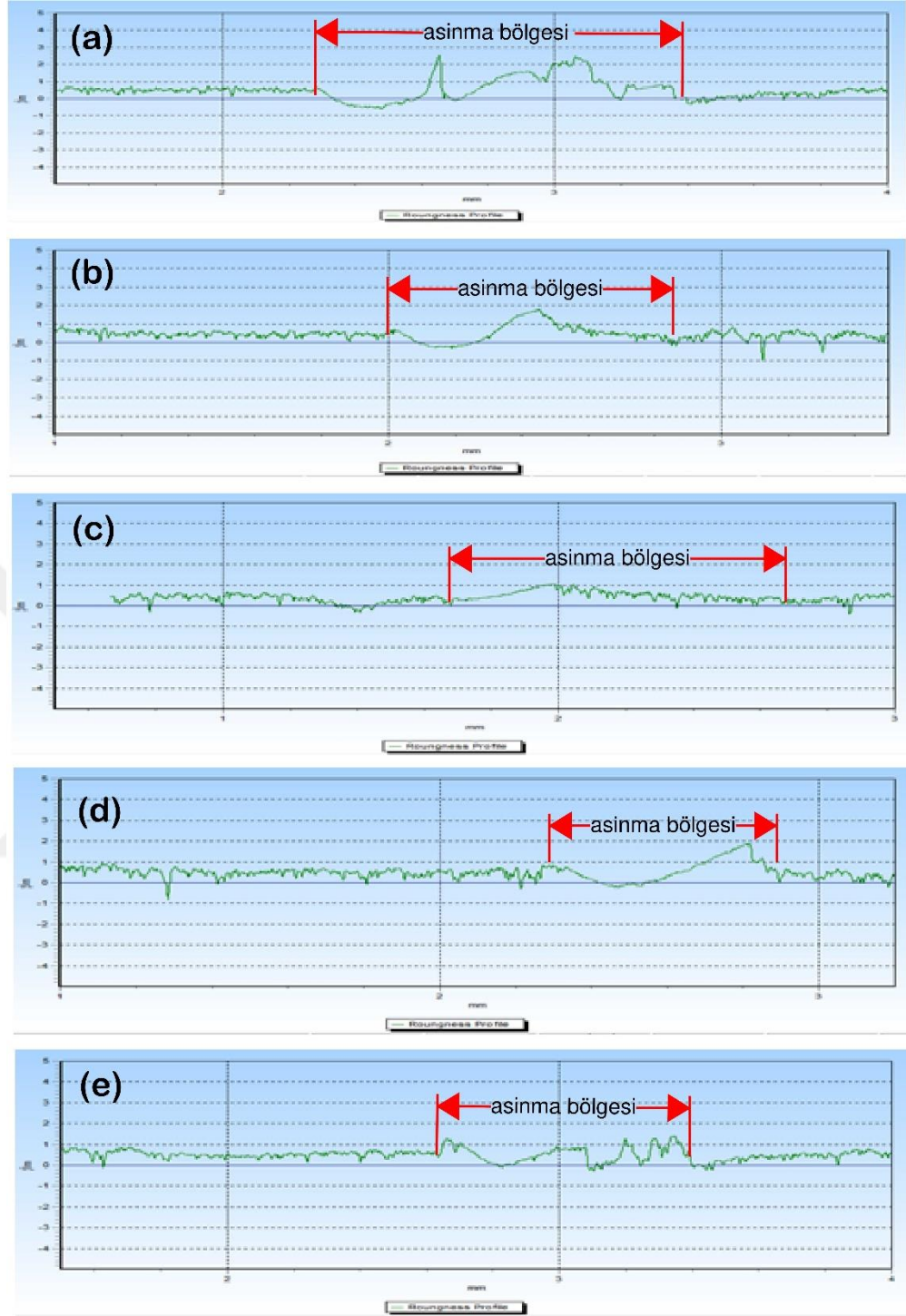
Çizelge 4.1 ve 4.2’de tavlama süreleri arttıkça genel olarak sürtünme katsayısında bir miktar artış olduğu gözlemlenmektedir. Tavlama süresindeki artış ile beraber numunelerde de tane büyümesinin gerçekleşmesi sonucu aşındırıcı karşı eleman (WC bilye) ile daha büyük tanelerin (8YSZ) birbiri ile sürtünmesi sonucunda temas alanının artmış olabileceği düşünülmektedir. Bu da sürtünme katsayısındaki artışın nedeni olabilir. Ayrıca, Çizelge 4.1 ve 4.2 karşılaştırıldığında, Çizelge 4.2’deki sürtünme katsayısı değerlerinin Çizelge 4.1’deki değerlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi şu şekilde açıklanabilir; uygulanan yük arttıkça

doğal olarak sürtünmede de bir artış meydana gelir ve bunun sonucunda da sürtünme katsayısıları artmaktadır.

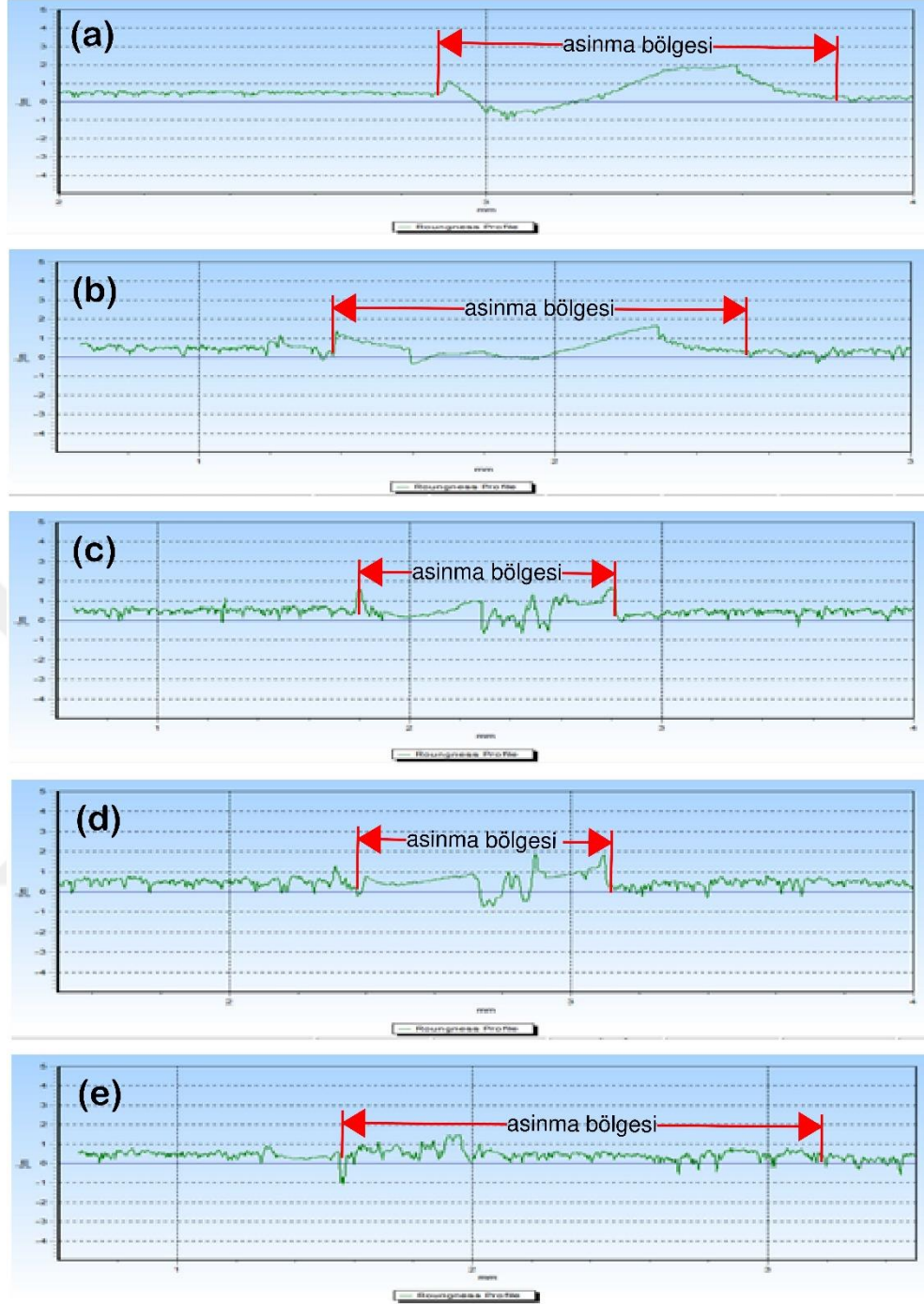
#### 4.1.2.2. Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ'nin aşınma davranışları

##### Aşınma sonrası yüzey profilleri:

şekil 4.5 ve 4.6'da 1400 °C'de 50 saat tavlannış katkısız ve Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin sırasıyla 5 ve 6 N yükler sonucundaki aşınma izi bölgesinden alınan yüzey profil görüntüleri verilmektedir. Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerde aşınma izi bölgesinin katkısız 8YSZ'ye göre daha dar olduğunu göstermektedir. şekil 4.5 ve 4.6'da Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkı miktarı arttıka aşınma iz bölgesinde bir daralma ve iz derinliğinde de bir miktar azalma olduğu görülmektedir. Ayrıca, katkısız 8YSZ örneklerde şiddetli aşınma gözlenirken, Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerde ise şiddetli aşınmadan orta derecedeki bir aşınmaya geçiş olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak; 8YSZ'ye ağırlıkça %1–15 oranlarında Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'in eklenmesi, aşınma direncinde bir artış meydana getirmiştir.



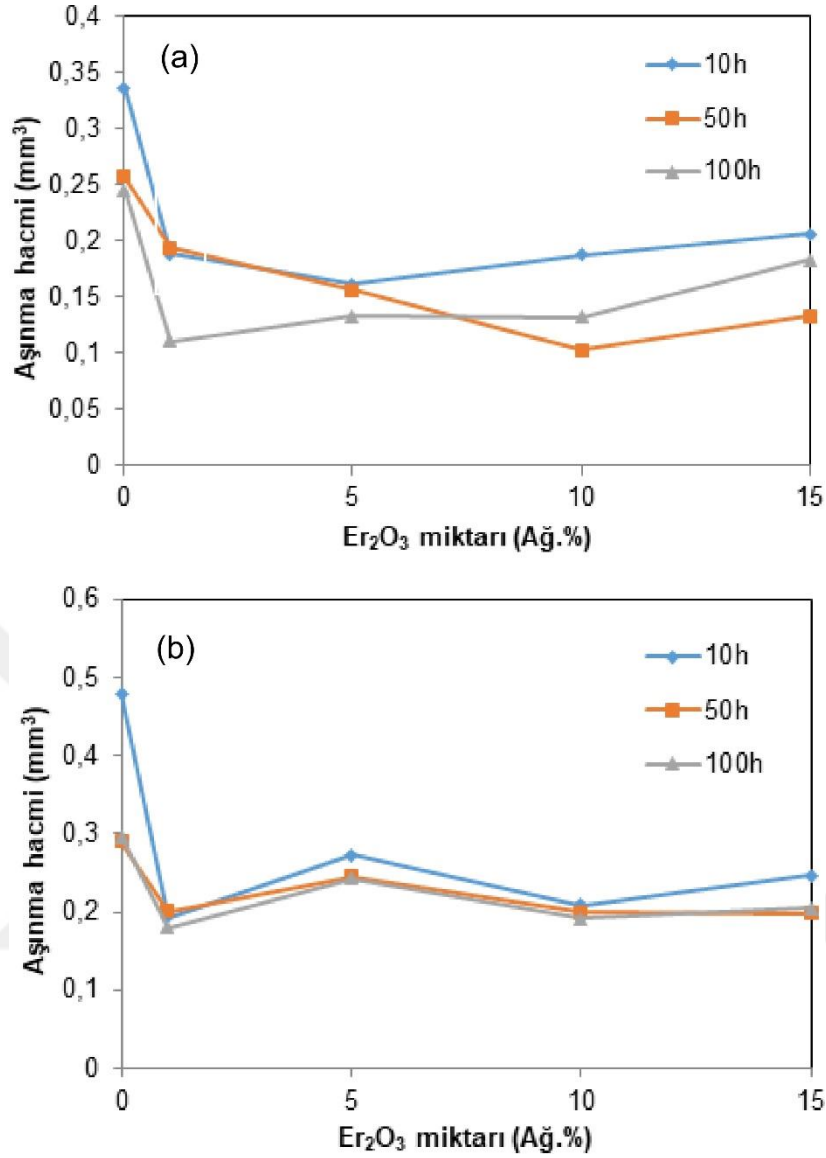
Şekil 4.5. 1400 °C'de 50 saat tavllanmış örneklerin 5 N yükte aşınma izi profilleri; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ



Şekil 4.6. 1400 °C'de 50 saat tavlanmış örneklerin 6 N yükte aşınma izi profilleri; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ

**Aşınma hacimleri:**

Şekil 4.7’de 1400 °C’de 10, 50 ve 100 saat süreyle tavllanmış katkısız ve Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 ve 6 N yüklerde tavlama sürelerine göre aşınma hacimlerindeki değişimler verilmektedir. Şekil 4.7 incelendiğinde; tavlama süresinin artması ile birlikte örneklerin aşınma hacminde çok fazla bir değişimin olmadığı görülebilmektedir. Bunun yanı sıra; aşınma hacim sonuçları, test yükünün artmasıyla aşınma hacminde bir artış olduğunu göstermektedir (Şekil 4.7-(a)-(b)). Ayrıca, ağırlıkça %1 Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin aşınma hacminde ciddi bir azalma meydana geldiğini ve ağırlıkça %1 katkı oranından sonra ise örneklerin aşınma hacimlerindeki azalmanın Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkı miktarı ile orantılı olarak değişmediğini göstermiştir. Aşınma hacmindeki azalmaya; 8YSZ’ye ilave edilen Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>’in 8YSZ’nin tane boyutunda meydana getirdiği azalma ile birlikte Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>’in düşük sürtünme katsayısına sahip olmasının neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.7. Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin aşınma hacimlerinin tavlama sürelerine göre değişimi; (a) 5 N, (b) 6 N

Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin tavlama sürelerine göre 5 ve 6 N yüklerdeki aşınma hacimlerindeki değişimler Çizelge 4.3 ve 4.4'de verilmektedir. Çizelge 4.3 ve 4.4'de Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin aşınma hacim sonuçları incelendiğinde, katkısız 8YSZ numunelerde aşınma hacmi yüksek iken Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerde aşınma hacminin daha az olduğunu göstermiştir. Deney sonuçları, 8YSZ'ye farklı oranlarda Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkısının aşınma hacminde bir miktar azalma meydana getirdiğini göstermiştir.

Çizelge 4.3. Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 N yükte aşınma hacimlerinin tavlama sürelerine göre değişimi

Örnekler	Aşınma hacimleri (mm <sup>3</sup> )		
	10 h	50 h	100 h
Katkısız 8YSZ	0.336±0.133	0.257±0.039	0.245±0.037
% 1 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ	0.188±0.098	0.194±0.051	0.111±0.015
% 5 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ	0.162±0.100	0.156±0.053	0.133±0.046
% 10 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ	0.187±0.104	0.103±0.020	0.132±0.049
% 15 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ	0.206±0.066	0.133±0.048	0.183±0.094

Çizelge 4.4. Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 6 N yükte aşınma hacimlerinin tavlama sürelerine göre değişimi

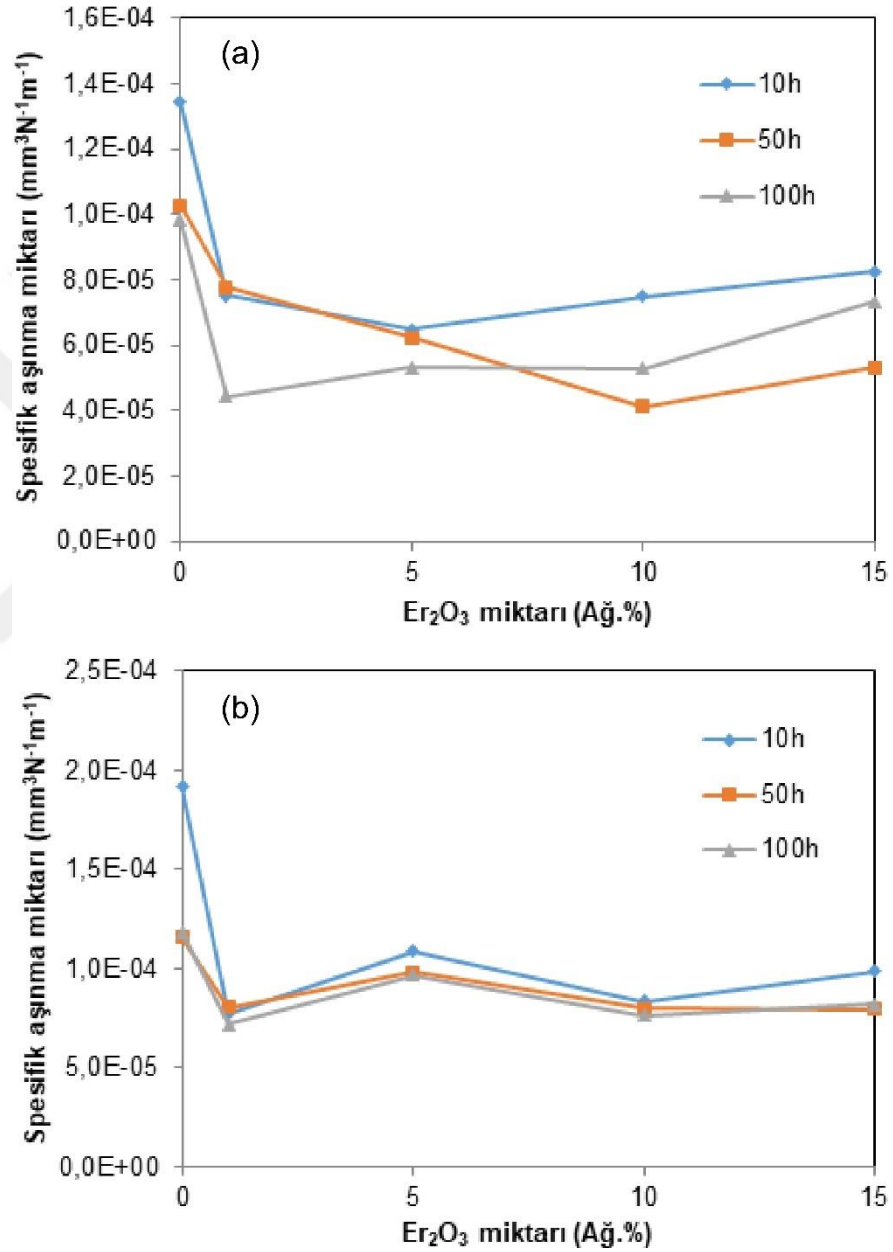
Örnekler	Aşınma hacimleri (mm <sup>3</sup> )		
	10 h	50 h	100 h
Katkısız 8YSZ	0.479±0.215	0.290±0.087	0.296±0.053
% 1 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ	0.193±0.005	0.201±0.009	0.180±0.104
% 5 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ	0.272±0.139	0.245±0.100	0.242±0.105
% 10 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ	0.209±0.153	0.200±0.138	0.191±0.008
% 15 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı 8YSZ	0.246±0.104	0.198±0.004	0.205±0.121

Çizelge 4.3. ve 4.4'e bakıldığında tavlama sürelerine göre aşınma hacimlerinde değişkenlikler görülmektedir. Bu değişkenlikler sürtünmeye bağlı olarak meydana gelmektedir. Çizelge 4.3 ve 4.4'deki değerler karşılaştırıldığında, Çizelge 4.3'teki aşınma hacmi değerlerinin Çizelge 4.4'dekinden daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedenini şu şekilde açıklayabiliriz: uygulanan yük arttıkça karşı elemana uygulanan yük artacaktır ve bunun sonucunda daha fazla aşınan parçacıklar yüzeyden kopacaktır. Böylece sürtünmedeki artışa bağlı olarak aşınma hacminde de bir artış meydana gelmektedir.

#### Spesifik aşınma miktarları:

Şekil 4.8'de 1400 °C'de 10, 50 ve 100 saat süreyle tavllanmış katkısız ve Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 ve 6 N yüklerde spesifik aşınma miktarlarındaki değişimler verilmektedir. Katkısız ve Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin spesifik aşınma miktarları; 5 ve 6 N yüklerde, 0.1 m/sn kayma hızında ve 500 m kayma mesafesinde aşınma test sonuçlarından hesaplanmıştır. Katkısız 8YSZ'nin spesifik aşınma miktarı, Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesi ile bir miktar azalmıştır. Tavlama süresinin ise spesifik aşınma

miktarına pek fazla bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Test yükünün artması ile birlikte örneklerin spesifik aşınma miktarlarında bir artış olmuştur (Şekil 4.8-(a)-(b)). Deney sonuçları, test yükünün spesifik aşınma miktarına etkisinin olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.8. Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin spesifik aşınma miktarlarının tavlama sürelerine göre değişimleri; (a) 5 N, (b) 6 N

Çizelge 4.5 ve 4.6'da  $Er_2O_3$  katkılı 8YSZ örneklerin tavlama sürelerine göre 5 ve 6 N yüklerdeki spesifik aşınma miktarları verilmektedir. Çizelge 4.5 ve 4.6 incelendiğinde, katkısız 8YSZ'de spesifik aşınma miktarı  $Er_2O_3$  katkılı 8YSZ'ye göre daha yüksektir. 8YSZ'ye  $Er_2O_3$  katkısının spesifik aşınma miktarını düşürdüğü görülmektedir.  $Er_2O_3$  katkısı ile 8YSZ'nin spesifik aşınma miktarında azalmaya,  $Er_2O_3$ 'in katı bir yağlayıcı gibi davranması ve tane boyutunda meydana getirdiği küçülmenin bir sonucu olarak oluştuğu düşünülmektedir. Sonuç olarak,  $Er_2O_3$  katkısı ile 8YSZ'nin aşınma direncinde bir artış olduğu bulunmuştur.

Çizelge 4.5.  $Er_2O_3$  katkılı 8YSZ örneklerin 5 N yükte spesifik aşınma miktarının tavlama sürelerine göre değişimi

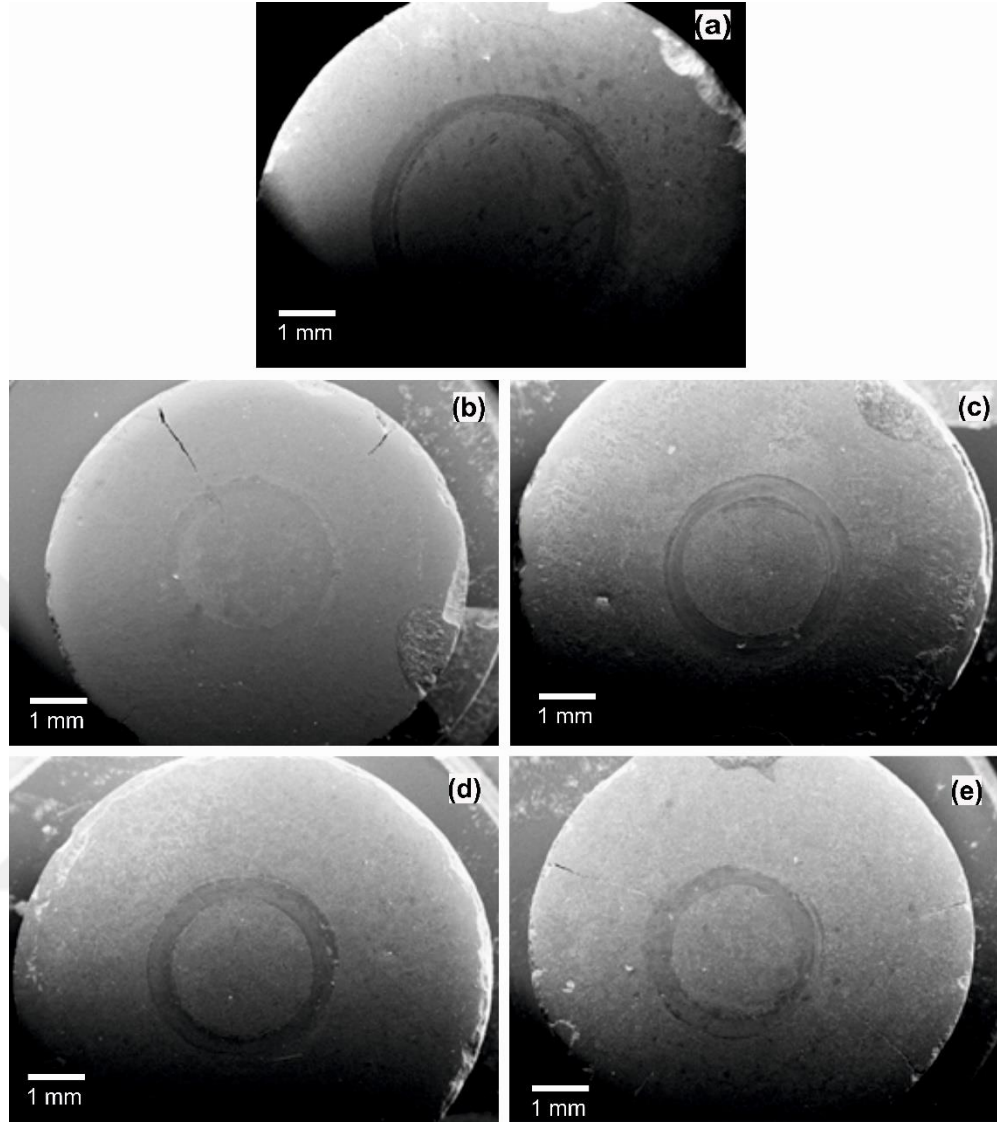
Örnekler	Spesifik aşınma miktarı ( $mm^3N^{-1}m^{-1}$ )		
	10 h	50 h	100 h
Katkısız 8YSZ	$1.34 \times 10^{-4}$	$1.03 \times 10^{-4}$	$9.8 \times 10^{-5}$
% 1 $Er_2O_3$ katkılı 8YSZ	$7.52 \times 10^{-5}$	$7.76 \times 10^{-5}$	$4.44 \times 10^{-5}$
% 5 $Er_2O_3$ katkılı 8YSZ	$6.48 \times 10^{-5}$	$6.24 \times 10^{-5}$	$5.32 \times 10^{-5}$
% 10 $Er_2O_3$ katkılı 8YSZ	$7.48 \times 10^{-5}$	$4.12 \times 10^{-5}$	$5.28 \times 10^{-5}$
% 15 $Er_2O_3$ katkılı 8YSZ	$8.24 \times 10^{-5}$	$5.32 \times 10^{-5}$	$7.32 \times 10^{-5}$

Çizelge 4.6.  $Er_2O_3$  katkılı 8YSZ örneklerin 6 N yükte spesifik aşınma miktarının tavlama sürelerine göre değişimi

Örnekler	Spesifik aşınma miktarı ( $mm^3N^{-1}m^{-1}$ )		
	10 h	50 h	100 h
Katkısız 8YSZ	$1.92 \times 10^{-4}$	$1.16 \times 10^{-4}$	$1.18 \times 10^{-4}$
% 1 $Er_2O_3$ katkılı 8YSZ	$7.72 \times 10^{-5}$	$8.04 \times 10^{-5}$	$7.2 \times 10^{-5}$
% 5 $Er_2O_3$ katkılı 8YSZ	$1.09 \times 10^{-4}$	$9.8 \times 10^{-5}$	$9.68 \times 10^{-5}$
% 10 $Er_2O_3$ katkılı 8YSZ	$8.36 \times 10^{-5}$	$8.0 \times 10^{-5}$	$7.64 \times 10^{-5}$
% 15 $Er_2O_3$ katkılı 8YSZ	$9.84 \times 10^{-5}$	$7.92 \times 10^{-5}$	$8.2 \times 10^{-5}$

#### Aşınma mekanizması:

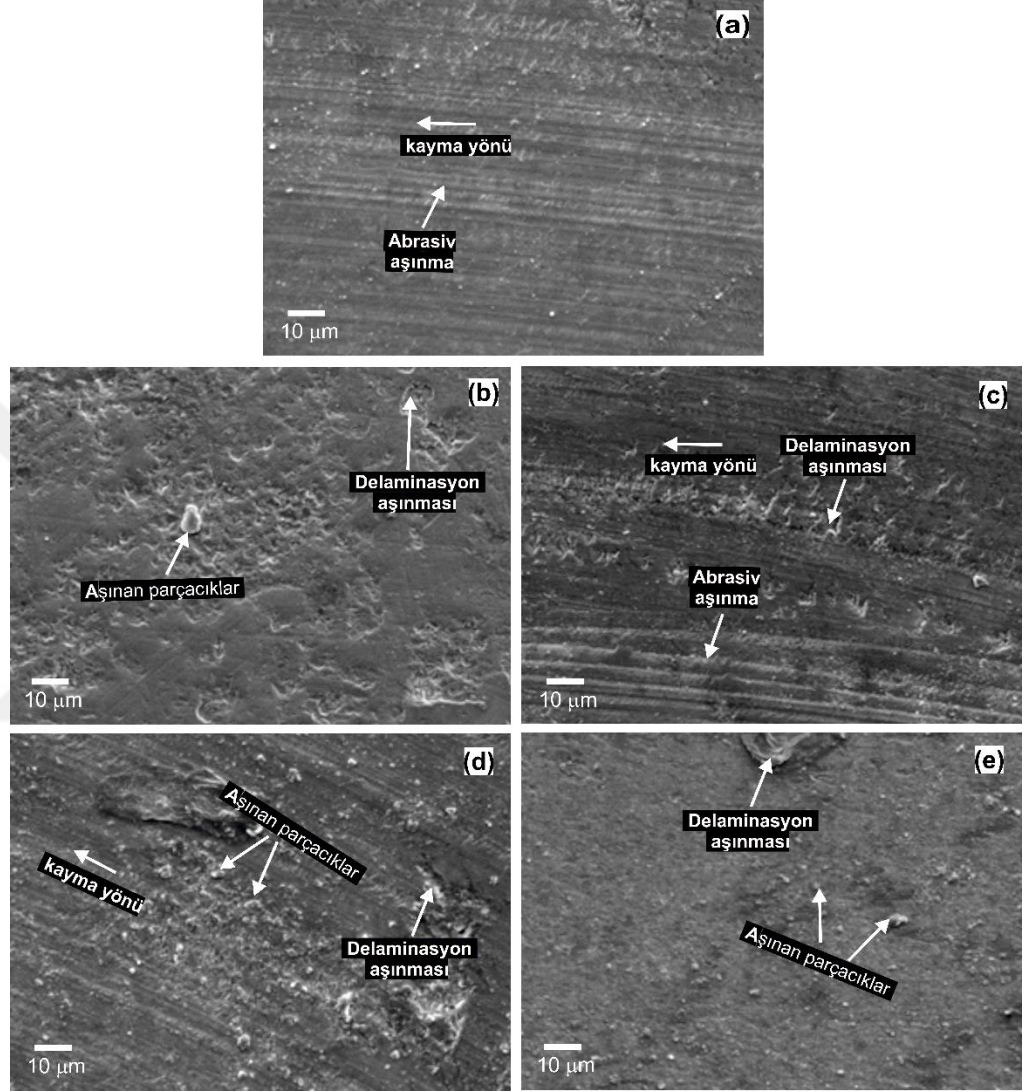
Aşınma testleri tamamlanan örneklerin aşınma izlerinden SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 4.9'da katkısız ve  $Er_2O_3$  katkılı 8YSZ örneklerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri verilmektedir. Aşınma izlerinin SEM görüntüleri; katkısız 8YSZ'nin aşınma izinin  $Er_2O_3$  katkılı 8YSZ örneklerine göre daha derin bir iz olduğunu göstermektedir (Şekil 4.9-(a)–(e)). Özellikle %1  $Er_2O_3$  katkılı 8YSZ'de iz derinliğinin diğer örneklere göre daha az olduğu görülebilmektedir (Şekil 4.9-(b)).



Şekil 4.9. 1400 °C’ de 50 saat süre ile tavllanmış örneklerin aşınma izlerinin makro resimleri; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ

Şekil 4.10’da 1400 °C’ de 50 saat süre ile sinterlenmiş katkısız ve Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ örneklerin aşınma izlerinin SEM mikrofotografaları verilmektedir. Katkısız 8YSZ örnekte çoğunlukla abrasiv aşınma gözlenirken, Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı örneklerde ise kısmen abrasiv aşınma ve çoğunluklarda delaminasyon aşınması meydana geldiği görülebilmektedir. Delaminasyon aşınması, seramik örneklere temas eden karşı elaman bilya örneğe temas ettiğinde temas noktasında oluşan yüksek basınç seramik örneğin yüzeyinin altında çatlak oluşmasına neden olur. Daha sonra bu çatlak

büyüyerek seramik örneğin yüzeyinden tabakalar şeklinde kırılmalara neden olur. Bu şekilde tabakalar şeklinde kırılma ile meydana gelen aşınmaya delaminasyon aşınması adı verilir.

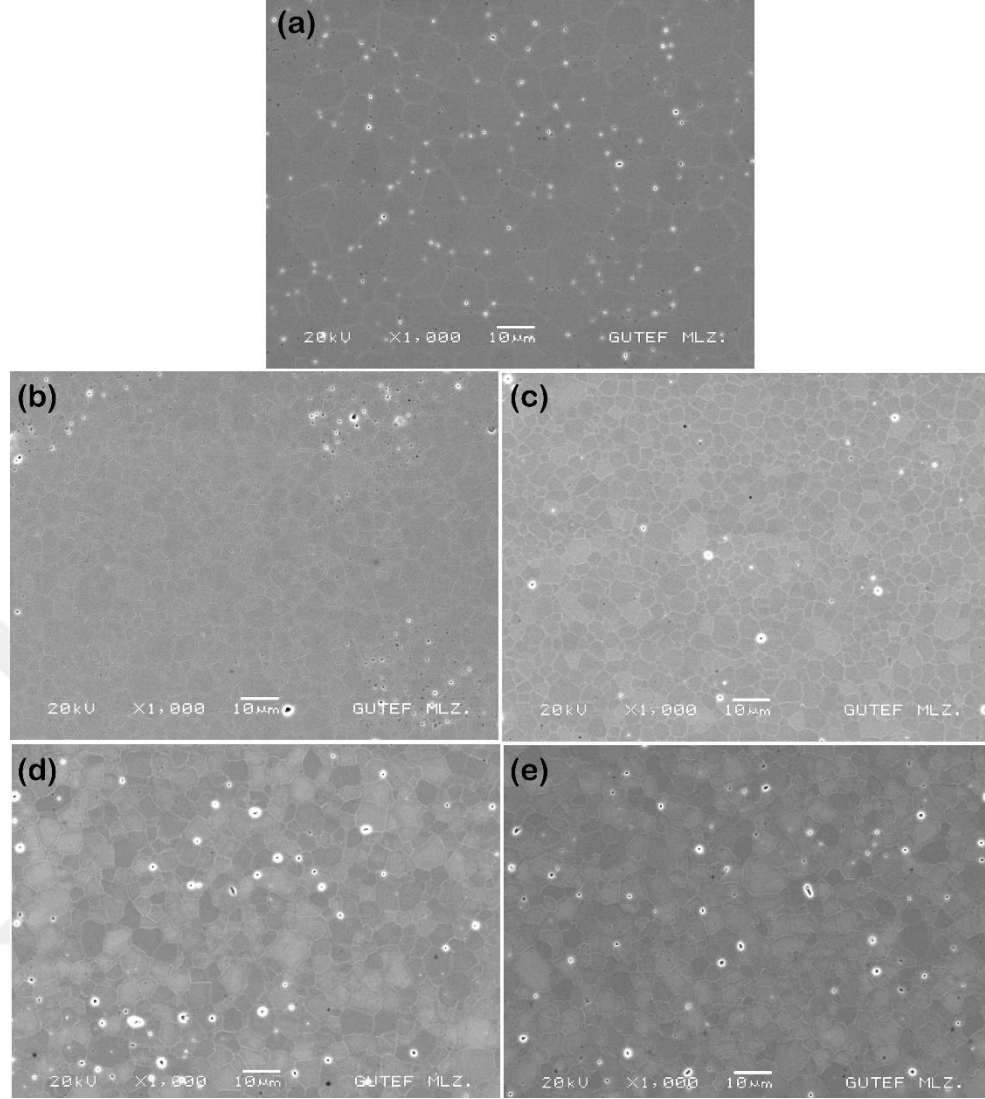


Şekil 4.10. 1400 °C' de 50 saat süre ile tavllanmış örneklerin aşınma izlerinin SEM Mikrofotografı; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı 8YSZ

## 4.2. CeO<sub>2</sub> Katkılı 8YSZ Örnekler

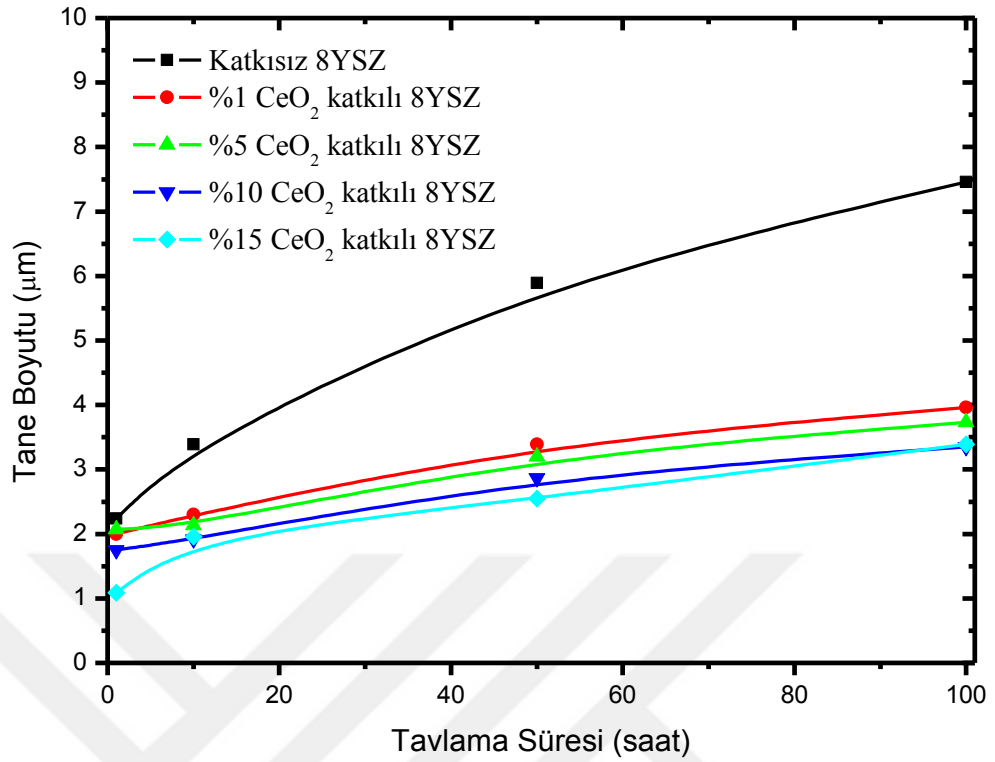
### 4.2.1. CeO<sub>2</sub> ilavesinin 8YSZ'nin tane boyutuna ve mikroyapısına etkisi

Şekil 4.11'de 1400 °C' de 50 saat süre ile tavllanmış katkısız, %1, 5, 10 ve 15 oranlarında CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ seramik örneklerin SEM mikroyapıları verilmektedir. Mikroyapılardan, katkısız 8YSZ iri taneli ve poligonal eş eksenli tanelere sahipken CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örnekler ise daha ince taneli olduğu görülmektedir. Ayrıca, ağırlıkça %1 CeO<sub>2</sub> ilavesinden sonra 8YSZ'nin tane sınırlarında bir ikinci faz tabakası meydana geldiği görülmektedir. Bu durum ise CeO<sub>2</sub>'in %1 oranından sonra 8YSZ matrisinde çözünmediğini göstermektedir. Tane sınırlarında çökelen bu ikinci faz tabakasının kalınlığı ise CeO<sub>2</sub> katkı miktarı ile artmıştır.



Şekil 4.11. 1400 °C’de 50 saat tavllanmış örneklerin SEM mikroyapıları; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ

Şekil 4.12’de 1400 °C’de 10, 50 ve 100 saat süre ile tavllanmış %1, 5, 10 ve 15 oranlarında CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin tane boyutlarındaki değişimler gösterilmektedir. Şekil 4.12 incelendiğinde, tavlama süresi arttıkça tane boyutunda da bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Bundan başka, CeO<sub>2</sub> ilavesi ile 8YSZ’nin tane boyutunda bir azalma meydana geldiği ve ayrıca CeO<sub>2</sub> miktarındaki artışla birlikte tane boyutundaki azalmanın ise orantılı olduğu görülmektedir. CeO<sub>2</sub> ilavesi ile tane boyutundaki bu azalmaya ise tane sınırlarına çökelmiş olan düşük difüzyon katsayılı CeO<sub>2</sub>’in neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.12. 1400 °C' de 10, 50 ve 100 saat süre ile tavllanmış CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin tane boyutlarındaki değişim

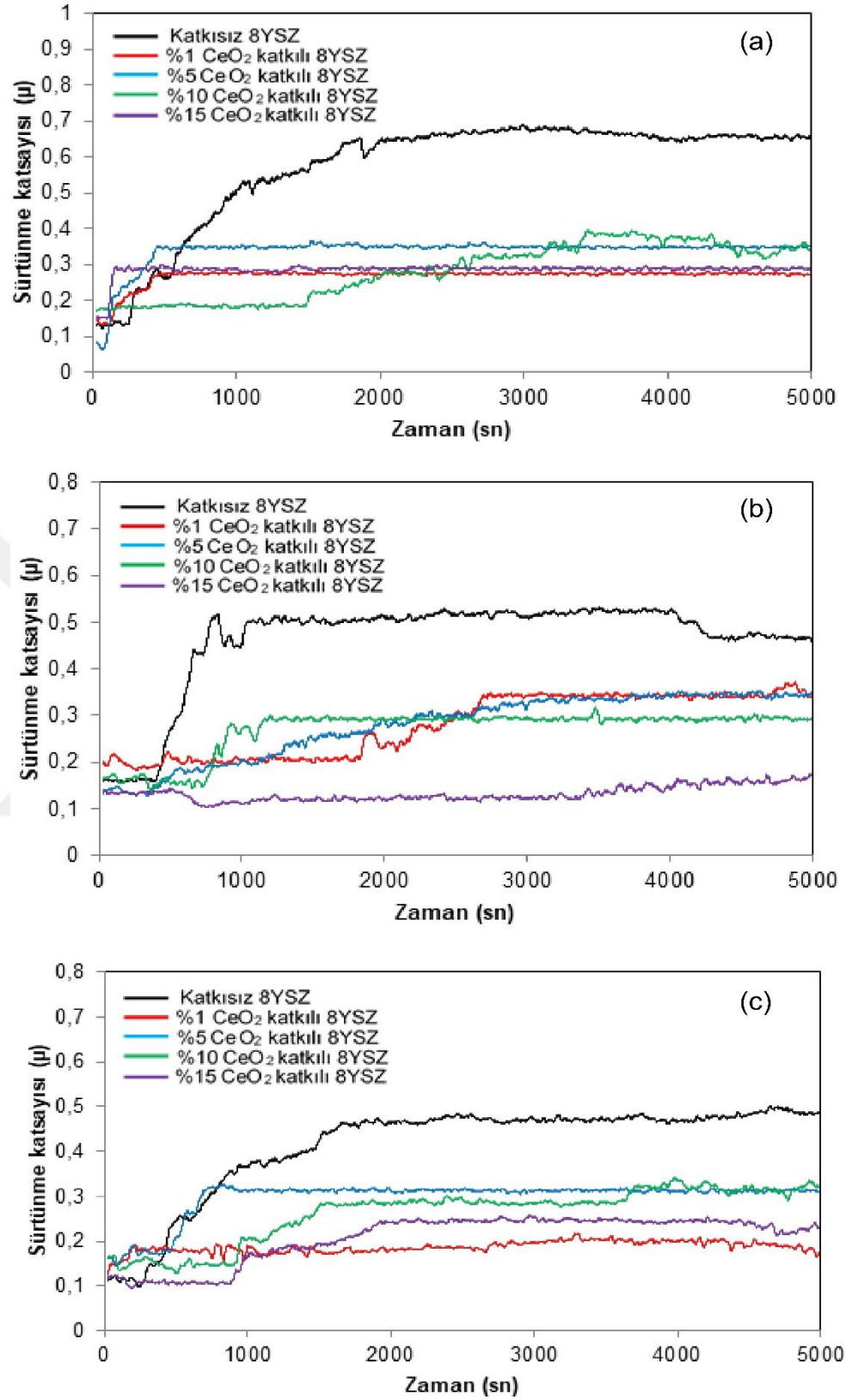
#### 4.2.2. CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ'nin sürtünme ve aşınma davranışları

1400 °C'de 10, 50 ve 100 saat süreyle tavllanmış %1, 5, 10 ve 15 katkı oranlarında CeO<sub>2</sub> içeren 8YSZ örneklerin aşınma deneyleri pin-on-disk yöntemi kullanılarak yapılmıştır. CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örnekleri aşındırmak için karşı eleman olarak tungsten karbür (WC) bilye kullanılmıştır. Katkısız ve CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklere 5 ve 6 N olmak üzere iki farklı yük kullanılarak 0.1 m/sn kayma hızında, 500 m kayma mesafesinde, kuru sürtünme ve oda koşullarında her bir numune için üç tekrar yapılarak aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre 8YSZ'ye CeO<sub>2</sub> ilavesinin sürtünme katsayısına ve aşınma davranışlarına etkileri incelenmiştir.

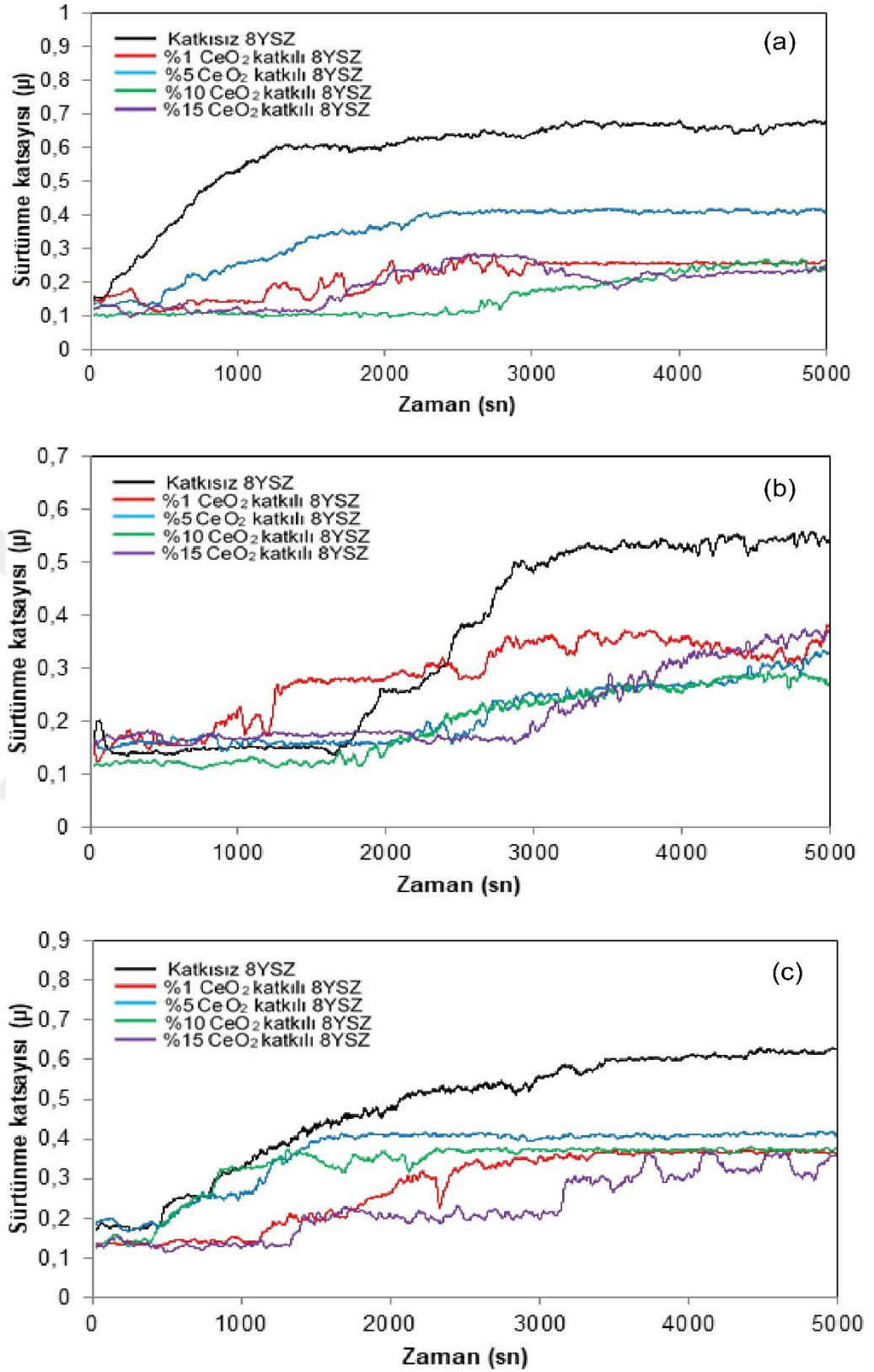
#### 4.2.2.1. Sürtünme katsayıları

Şekil 4.13 ve 4.14'de 1400 °C'de 10, 50 ve 100 saat süre ile tavlama katkısız ve farklı oranlarda CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin sırasıyla, 5 ve 6 N yüklerde sürtünme katsayılarının zamana bağlı değişimleri gösterilmektedir. Şekil 4.13 incelendiğinde; 5 N yükte katkısız 8YSZ nin sürtünme katsayısı 0.45 ile 0.65 arasında iken, CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin sürtünme katsayıları ise 0.15 ile 0.35 aralığında değişmektedir. Şekil 4.14'de 6 N yükte katkısız 8YSZ için sürtünme katsayıları 0.55 ile 0.65 aralığında iken, CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin sürtünme katsayıları ise 0.15 ile 0.35 aralığında değiştiği görülmektedir. Bu durumda; Şekil 4.13 ve 4.14'den, yük arttıkça sürtünme katsayılarında bir miktar artış olduğu sonucu çıkarılabilir. Bunun sebebini şöyle açıklayabiliriz; uygulanan yükün artması ile sürtünme artmaktadır ve dolayısıyla sürtünme katsayısı değerleri de buna bağlı olarak artar.

Şekil 4.13-4.14 ve Çizelge 4.7-4.8'de, tavlama sürelerindeki artışla birlikte örneklerin sürtünme katsayılarında bir artış meydana geldiğini göstermektedir. Tavlama süresinin artışı ile birlikte örneklerde meydana gelen tane büyümesi, sürtünme katsayısında bir miktar artışa neden olmaktadır. Ayrıca, CeO<sub>2</sub> katkısı ve miktarındaki artışla birlikte 8YSZ'nin sürtünme katsayılarında ciddi bir azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Literatürde CeO<sub>2</sub> ilavesinin malzemelerin sürtünme katsayısında bir azalmaya neden olduğunu gösteren bir çok çalışma bulunmaktadır. Paras ve ark., (2018) CeO<sub>2</sub> nanopartiküllerin aşırı basınç altında iyi bir sürtünme azaltıcı özelliklere sahip olduğu bildirilmiştir. Yine başka bir çalışmada, Fe-Ni-Cr içerisine düşük miktarlarda CeO<sub>2</sub>'in ilavesi sürtünme katsayısında bir azalmaya neden olmuştur (Zhang ve ark., 2006). Purkayastha ve Dwivedi, (2012) CeO<sub>2</sub> ile modifiye edilen Ni/WC kaplamaların sürtünme katsayılarında bir azalmaya neden olduğu bildirilmiştir. Literatürdeki sonuçlar, bizim yaptığımız çalışmanın sonuçlarıyla örtüşmektedir.



Şekil 4.13.  $\text{CeO}_2$  katkılı 8YSZ örneklerin 5 N yükte sürtünme katsayılarının değişimi; (a) 10, (b) 50 ve (c) 100 saat süre ile tavllanmış



Şekil 4.14. CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 6 N yükte sürtünme katsayılarının değişimi; (a) 10, (b) 50 ve (c) 100 saat süre ile tavlama

Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8’de katkısız ve CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin farklı tavlama sürelerindeki ortalama sürtünme katsayısı değerleri verilmektedir. Çizelge 4.7 ve 4.8’deki ortalama sürtünme katsayısı değerleri her bir örnek için yapılan üç deney tekrarının ortalamasıdır.

Çizelge 4.7. CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 N yükte ortalama sürtünme katsayılarının tavlama sürelerine göre değişimi

Kullanılan numuneler	Ortalama sürtünme katsayıları		
	10 h	50 h	100 h
Katkısız 8YSZ	0.51±0.11	0.40±0.06	0.42±0.03
% 1 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	0.26±0.06	0.23±0.06	0.23±0.03
%5 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	0.25±0.10	0.25±0.06	0.26±0.04
% 10 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	0.26±0.04	0.32±0.06	0.26±0.01
% 15 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	0.21±0.08	0.18±0.05	0.21±0.01

Çizelge 4.8. CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 6 N yükte ortalama sürtünme katsayılarının tavlama sürelerine göre değişimi

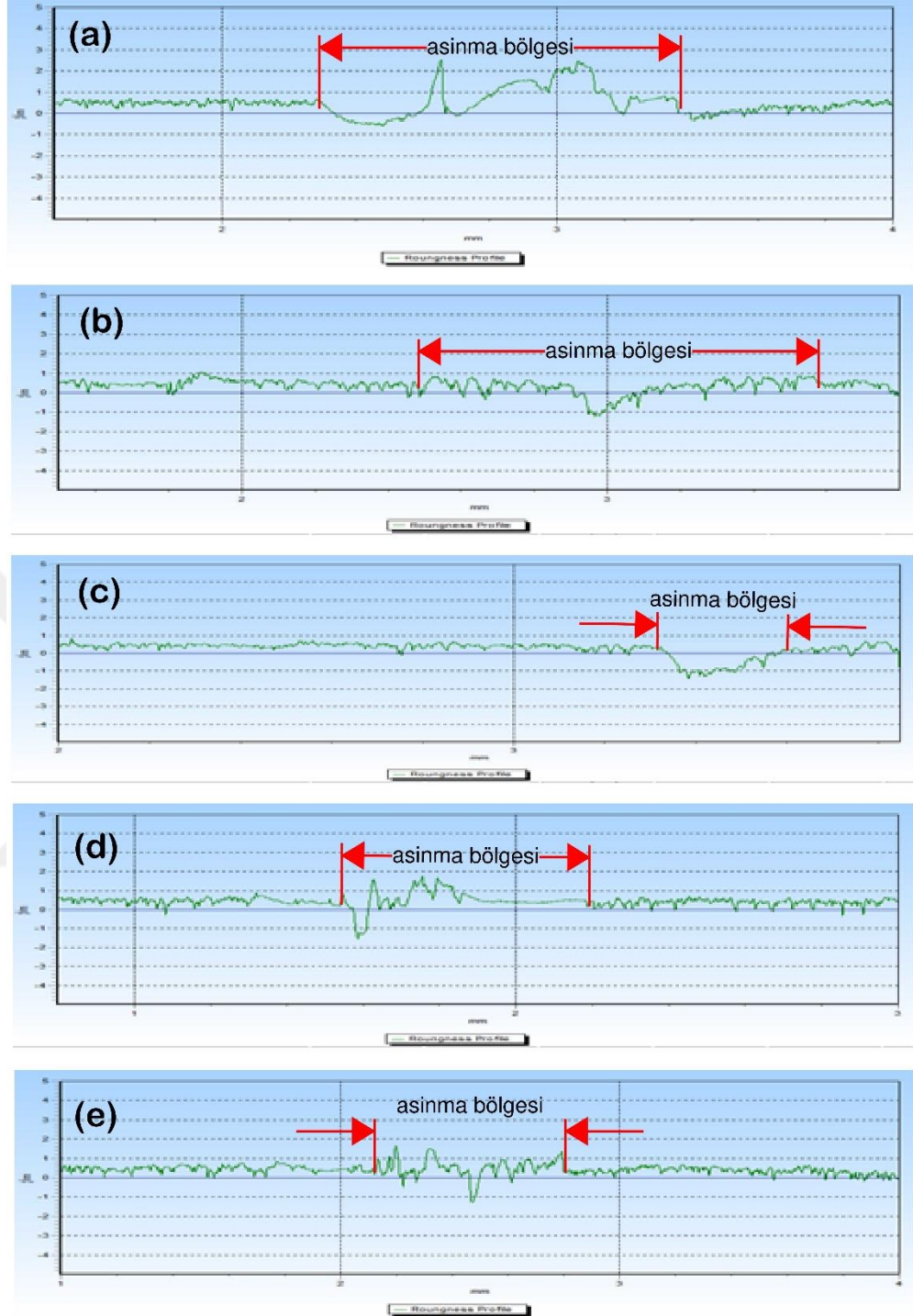
Kullanılan numuneler	Ortalama sürtünme katsayıları		
	10 h	50 h	100 h
Katkısız 8YSZ	0.55±0.04	0.41±0.09	0.43±0.06
% 1 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	0.26±0.10	0.25±0.04	0.29±0.08
%5 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	0.29±0.11	0.26±0.08	0.29±0.09
% 10 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	0.24±0.11	0.22±0.04	0.30±0.05
% 15 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	0.25±0.08	0.25±0.07	0.26±0.05

Çizelge 4.7 ve 4.8 incelendiğinde, tavlama süreleri arttıkça genel olarak sürtünme katsayısında da bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Tavlama süresindeki artış ile beraber numunelerde de tane büyümesinin gerçekleşmesi sonucu aşındırıcı karşı eleman ile daha büyük tanelerin birbiri ile sürtünmesi sonucunda etki alanının artmış olabileceği düşünülmektedir. Bu da sürtünme katsayısındaki artışın nedeni olabilir. Çizelge 4.7 ve 4.8 karşılaştırıldığında, Çizelge 4.7’deki değerlerin Çizelge 4.8’deki değerlerden daha düşük olduğu görülmektedir. Sürtünme ve aşınma testi esnasında genel olarak uygulanan yük arttıkça sürtünmede de doğal olarak bir artış meydana gelecektir ve bunun sonucunda da sürtünme katsayısı değerleri de artacaktır.

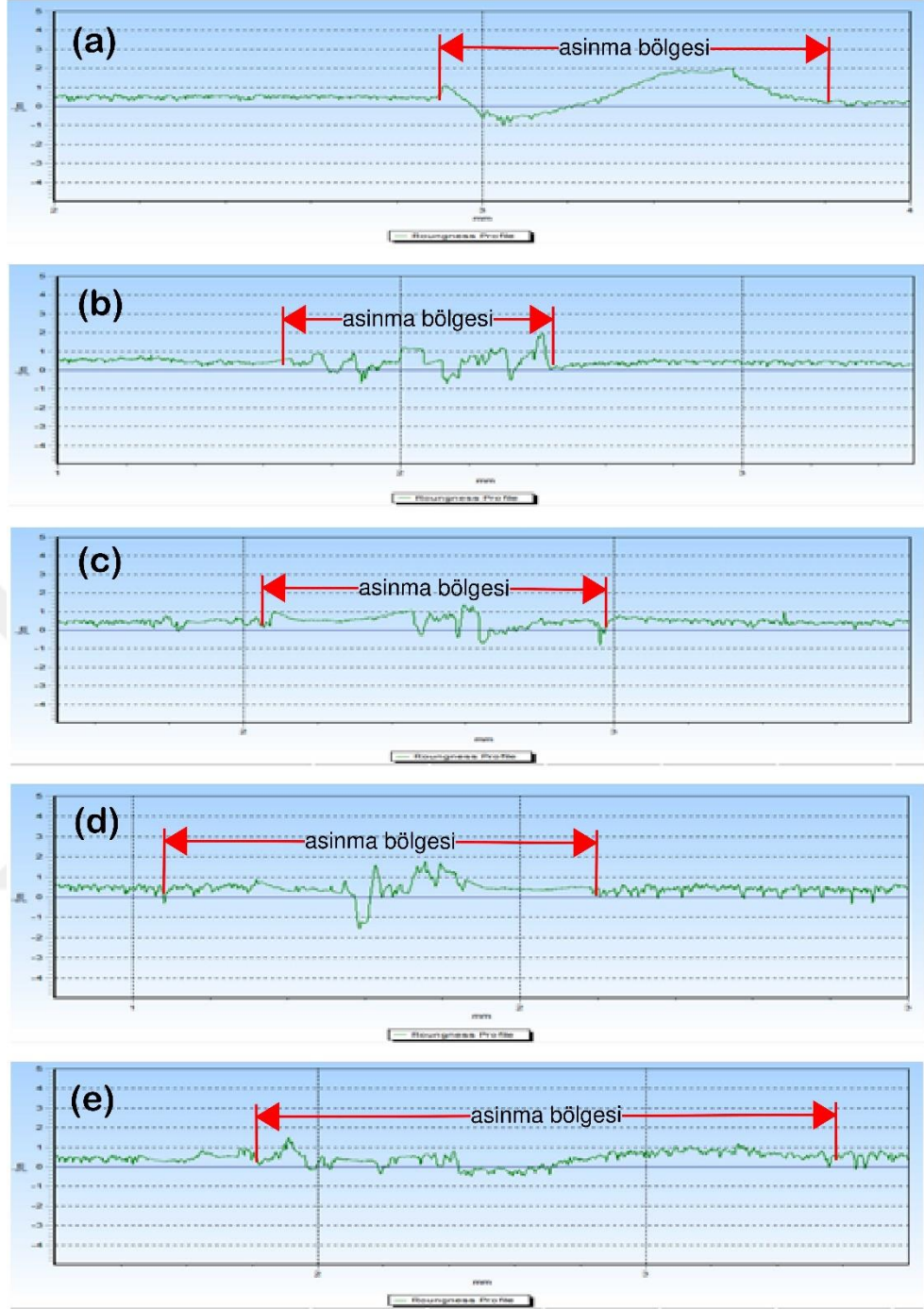
#### 4.2.2.2. CeO<sub>2</sub> katkıli 8YSZ'nin aşınma davranışları

##### Aşınma sonrası yüzey profilleri:

Şekil 4.15 ve 4.16'da 1400 °C'de 50 saat tavllanmış katkısız ve CeO<sub>2</sub> katkıli 8YSZ örneklerin sırasıyla 5 ve 6 N yüklerde aşınma izi bölgesinden alınan yüzey profil görüntüleri verilmektedir. CeO<sub>2</sub> katkıli 8YSZ örneklerde aşınma izi bölgesinin katkısız 8YSZ'ye göre daha dar olduğu görülmektedir. Ayrıca CeO<sub>2</sub> miktarının artması ile birlikte aşınma bölgesinde ve iz derinliğinde bir azalma meydana gelmiştir. Katkısız 8YSZ'de şiddetli bir aşınma meydana gelirken, CeO<sub>2</sub> katkıli 8YSZ örneklerde ise katkı miktarı arttıkça orta şiddetteki bir aşınmadan daha düşük şiddetteki bir aşınmaya doğru geçiş meydana gelmektedir. Profilmetre sonuçları, CeO<sub>2</sub> katkısı ile 8YSZ'nin aşınma direncinde bir artış olduğunu göstermektedir.



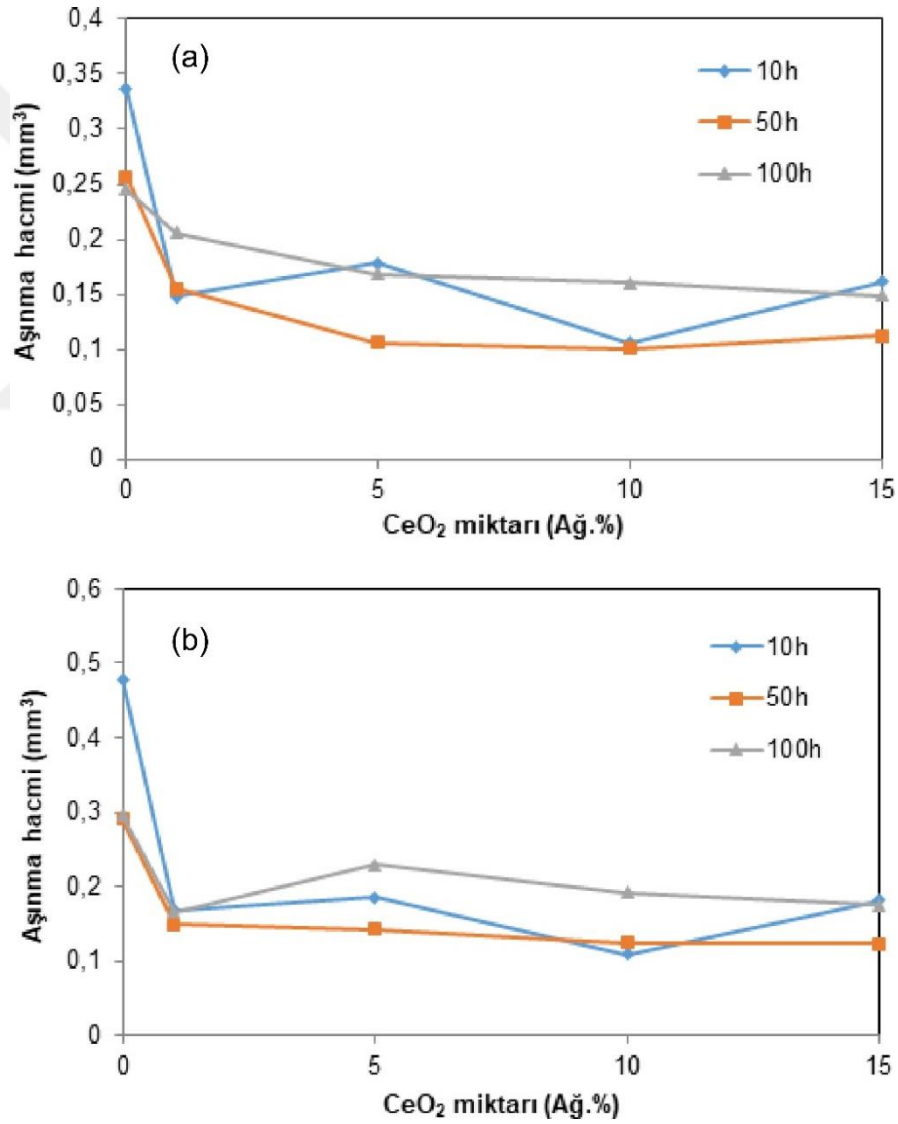
Şekil 4.15. 1400 °C’de 50 saat tavllanmış örneklerin 5 N yükte aşınma izi profilleri; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ



Şekil 4.16. 1400 °C'de 50 saat tavllanmış örneklerin 6 N yükte aşınma izi profilleri; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ

**Aşınma hacimleri:**

Şekil 4.17’de  $\text{CeO}_2$  katkılı 8YSZ örneklerin tavlama sürelerine göre 5 ve 6 N yüklerde aşınma hacimlerindeki değişimler verilmektedir. Aşınma deney sonuçları,  $\text{CeO}_2$  katkı miktarı arttıkça örneklerin aşınma hacimlerinde bir azalma meydana geldiğini göstermektedir. Ayrıca, test yükü arttıkça örneklerdeki aşınma hacimleri de artmaktadır. Bundan başka, tavlama süreleri arttıkça örneklerin hacimlerinde bir miktar artış olmuştur, fakat bu artış ise anlamlı bir artış değildir. Buradan tavlama süresi ile aşınma hacmindeki değişimin orantılı olmadığı sonucu çıkarılabilir.



Şekil 4.17.  $\text{CeO}_2$  katkılı 8YSZ örneklerin aşınma hacimlerinin tavlama sürelerine göre değişimi; (a) 5 N, (b) 6 N

Çizelge 4.9 ve 4.10'da CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 ve 6 N yüklerde tavlama sürelerine göre aşınma hacimlerindeki değişimler verilmektedir. CeO<sub>2</sub> katkısı ve katkı miktarı arttıkça 8YSZ'nin aşınma hacminde bir azalma meydana gelmiştir. CeO<sub>2</sub> ilavesi ile 8YSZ'de meydana gelen tane boyutundaki azalmanın aşınma hacmindeki azalmanın sebebi olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, CeO<sub>2</sub>'in katı bir yağlayıcı özelliği göstermesi nedeniyle 8YSZ'nin aşınma hacminde bir azalmaya neden olmuştur.

Çizelge 4.9. CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 N yükte aşınma hacimlerinin tavlama sürelerine göre değişimi

Örnekler	Aşınma hacimleri (mm <sup>3</sup> )		
	10 h	50 h	100 h
Katkısız 8YSZ	0.336±0.133	0.257±0.039	0.245±0.037
% 1 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	0.148±0.111	0.155±0.034	0.206±0.128
% 5 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	0.178±0.073	0.106±0.014	0.168±0.087
% 10 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	0.106±0.031	0.101±0.023	0.160±0.087
% 15 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	0.161±0.085	0.112±0.056	0.149±0.031

Çizelge 4.10. CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 6 N yükte aşınma hacimlerinin tavlama sürelerine göre değişimi

Örnekler	Aşınma hacimleri (mm <sup>3</sup> )		
	10 h	50 h	100 h
Katkısız 8YSZ	0.479±0.215	0.290±0.087	0.296±0.053
% 1 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	0.168±0.115	0.149±0.020	0.166±0.011
% 5 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	0.186±0.036	0.143±0.042	0.230±0.043
% 10 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	0.109±0.005	0.124±0.027	0.172±0.017
% 15 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	0.182±0.052	0.123±0.008	0.175±0.017

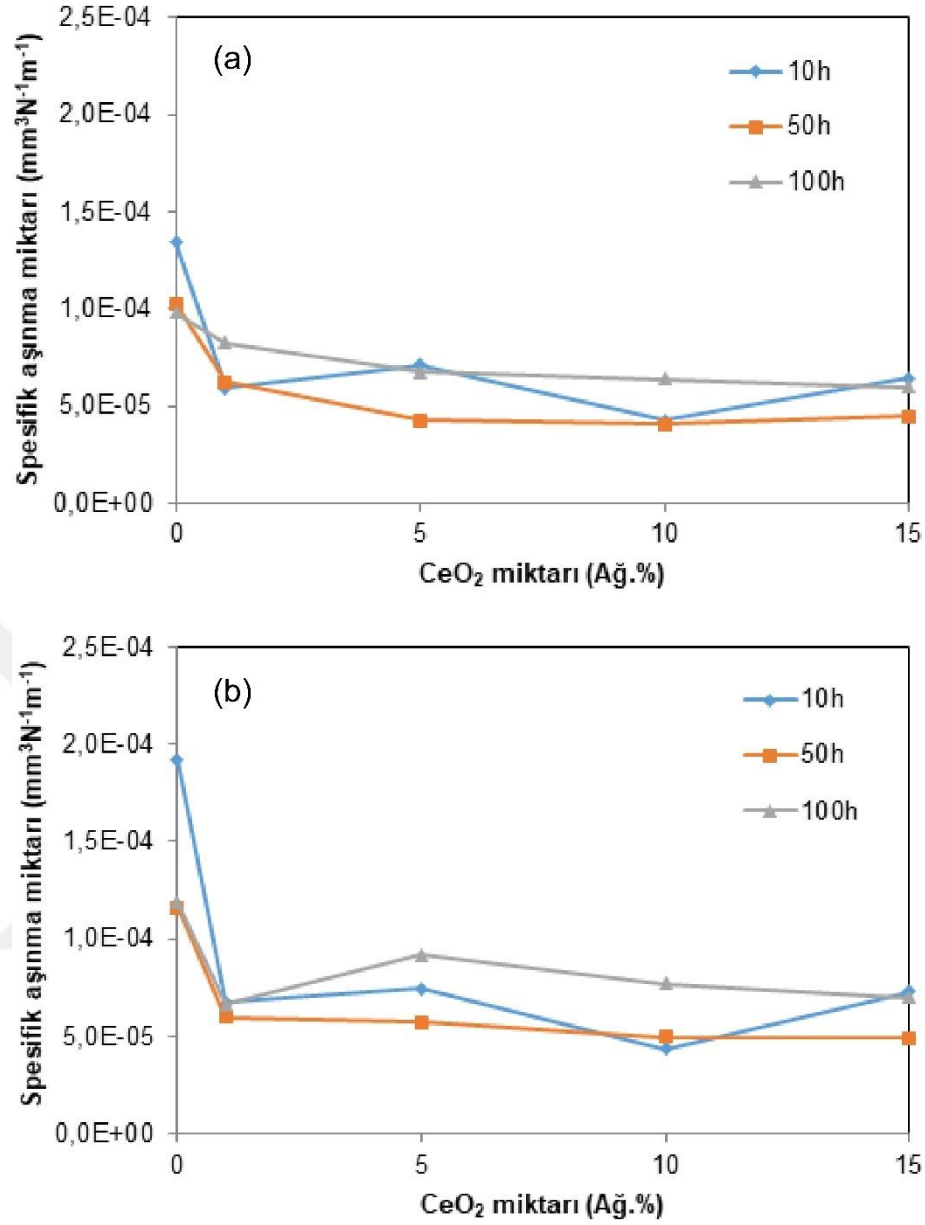
Çizelge 4.10'da CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 6 N yükteki aşınma hacimleri incelendiğinde, katkısız 8YSZ numunelerde aşınma hacmi fazla iken CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerde aşınma hacmi daha aza indirgenmiştir. 8YSZ'ye CeO<sub>2</sub> katkının aşınma hacmini azalttığı gözlemlenmiştir. Aşınma hacmindeki azalmaya, CeO<sub>2</sub>'in 8YSZ matrisinde katı yağlayıcı gibi davranmasının neden olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.9 ve 4.10'a bakıldığında tavlama sürelerine göre aşınma hacimlerinde değişkenlikler görülmektedir. Bu değişkenlikler sürtünmeye bağlı olarak meydana gelmektedir. Çizelge 4.9 ve 4.10 değerleri karşılaştırıldığında Çizelge

4.9'daki aşınma hacmi değerlerinin Çizelge 4.10'dakinden daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedenini şu şekilde açıklayabiliriz; uygulanan yük arttıkça karşı elemana uygulanan yük artacaktır ve bunun sonucunda daha fazla aşınan partiküller yüzeyden kopacaktır. Böylece sürtünmedeki artmaya bağlı olarak aşınma hacminde de bir artış gözlemlenmiştir.

#### **Spesifik aşınma miktarı:**

Şekil 4.18'de 1400 °C'de 10, 50 ve 100 saat süre ile tavllanmış katkısız ve CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 ve 6 N yüklerde spesifik aşınma miktarlarının değişimleri verilmektedir. 5 ve 6 N yüklerde, 500 m kayma mesafesinde 8YSZ örneklerin spesifik aşınma miktarları CeO<sub>2</sub> ilavesiyle birlikte azalmıştır. Ayrıca, tavlama süresi arttıkça örneklerde meydana gelen tane boyutundaki artış ile birlikte spesifik aşınma miktarlarında bir artış meydana gelmiştir. Spesik aşınma miktarı ile örneklerin tane boyutu arasında bir ilişki olduğu söylenebilir. CeO<sub>2</sub> katkısı ile 8YSZ'nin spesifik aşınma miktarında meydana gelen azalmaya, CeO<sub>2</sub> ilavesiyle 8YSZ'nin tane boyutunda meydana getirdiği azalma ve bunun yanısıra CeO<sub>2</sub>'in katı yağlayıcı etkisi yapması ile açıklanabilir.



Şekil 4.18. CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin spesifik aşınma miktarlarının tavlama sürelerine göre değişimleri; (a) 5 N, (b) 6 N

Çizelge 4.11 ve 4.12’de 5 ve 6 N yüklerde CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin tavlama sürelerine göre spesifik aşınma miktarları verilmektedir. Çizelge 4.11 incelendiğinde katkısız 8YSZ’de spesifik aşınma miktarı CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ’ ye göre daha yüksektir. 8YSZ’ye CeO<sub>2</sub> ilavesinin spesifik aşınma miktarını düşürdüğü görülmektedir.

Çizelge 4.11. CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 5 N yükte spesifik aşınma miktarının tavlama sürelerine göre değişimi

Örnekler	Spesifik aşınma miktarı (mm <sup>3</sup> N <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> )		
	10 h	50 h	100 h
Katkısız 8YSZ	1.34x10 <sup>-4</sup>	1.03x10 <sup>-4</sup>	9.8x10 <sup>-5</sup>
% 1 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	5.92x10 <sup>-5</sup>	6.2x10 <sup>-5</sup>	8.24x10 <sup>-5</sup>
% 5 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	7.12x10 <sup>-5</sup>	4.24x10 <sup>-5</sup>	6.72x10 <sup>-5</sup>
% 10 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	4.24x10 <sup>-5</sup>	4.04x10 <sup>-5</sup>	6.4x10 <sup>-5</sup>
% 15 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	6.44x10 <sup>-5</sup>	4.48x10 <sup>-5</sup>	5.96x10 <sup>-5</sup>

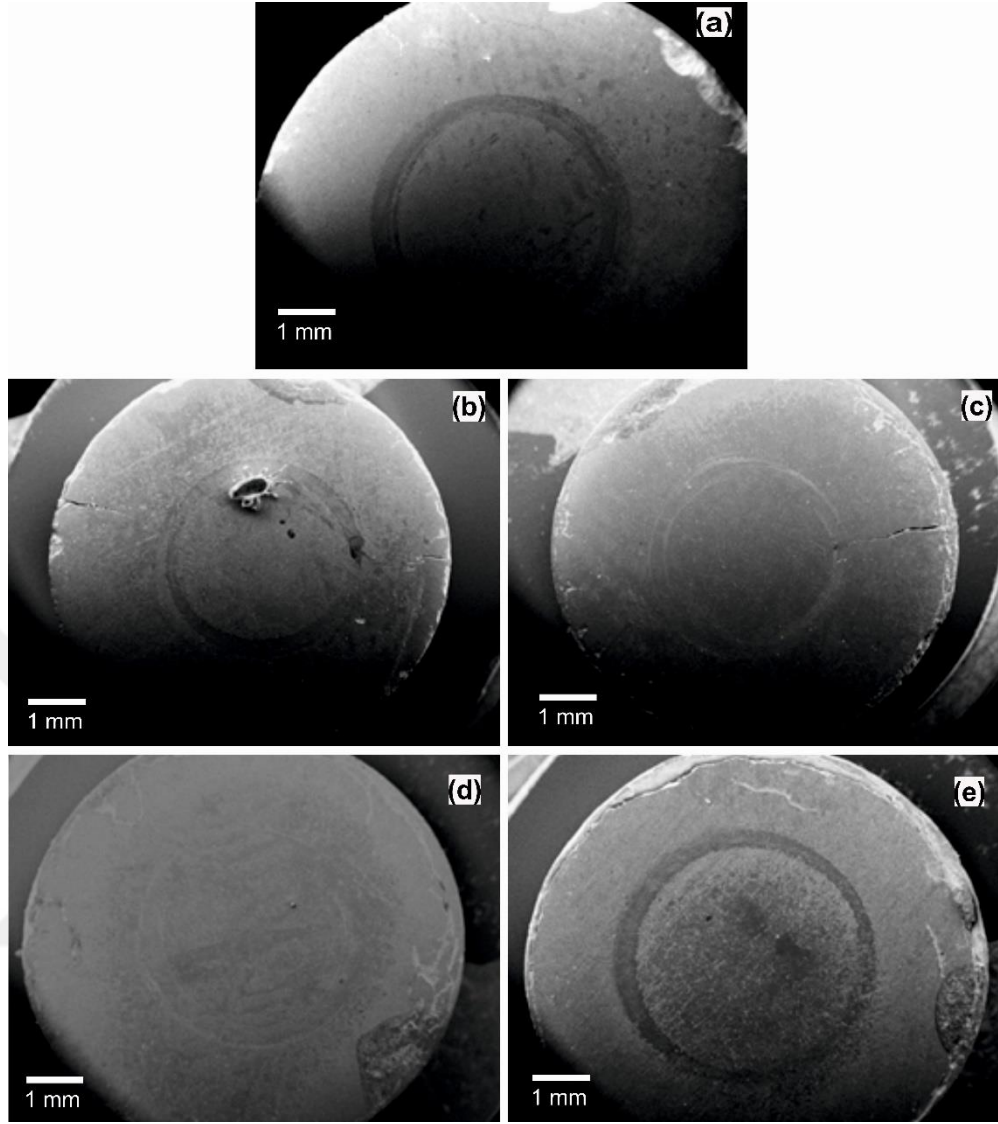
Çizelge 4.12’de CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 6 N yük altında spesifik aşınma miktarları verilmektedir. Çizelge 4.12 incelendiğinde katkısız 8YSZ’de spesifik aşınma miktarı CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ’ ye göre daha yüksektir. 8YSZ’ye CeO<sub>2</sub> katkısının spesifik aşınma miktarını düşürdüğü görülmektedir.

Çizelge 4.12. CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin 6 N yükte spesifik aşınma miktarının tavlama sürelerine göre değişimi

Örnekler	Spesifik aşınma miktarı (mm <sup>3</sup> N <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> )		
	10 h	50 h	100 h
Katkısız 8YSZ	1.92x10 <sup>-4</sup>	1.16x10 <sup>-4</sup>	1.18x10 <sup>-4</sup>
% 1 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	6.72x10 <sup>-5</sup>	5.96x10 <sup>-5</sup>	6.64x10 <sup>-5</sup>
% 5 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	7.44x10 <sup>-5</sup>	5.72x10 <sup>-5</sup>	9.2x10 <sup>-5</sup>
% 10 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	4.36x10 <sup>-5</sup>	4.96x10 <sup>-5</sup>	7.68x10 <sup>-5</sup>
% 15 CeO <sub>2</sub> katkılı 8YSZ	7.28x10 <sup>-5</sup>	4.92x10 <sup>-5</sup>	7.0x10 <sup>-5</sup>

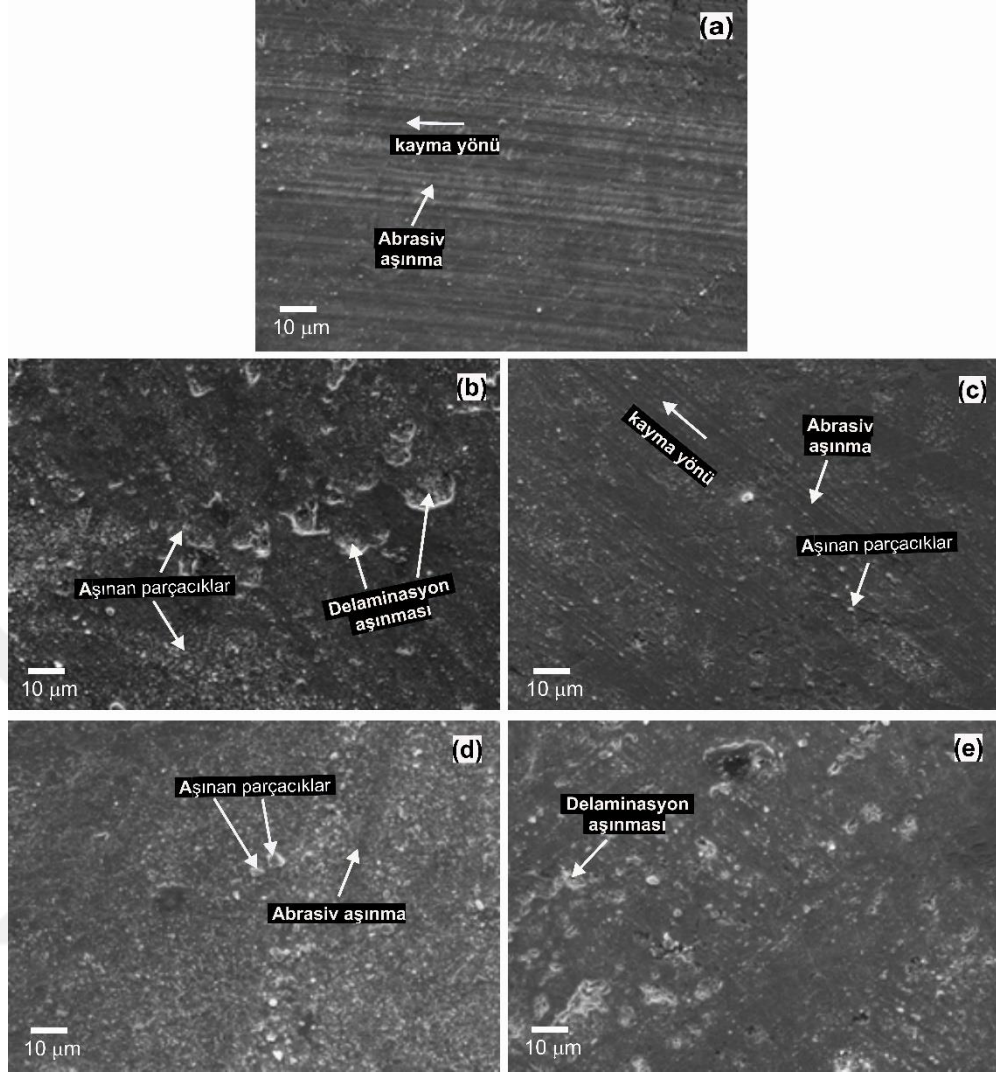
#### Aşınma mekanizması:

Aşınma testleri tamamlanan 1400 °C’ de 50 h süreyle tavllanmış katkısız ve CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin aşınma izlerinden SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 4.19’da katkısız ve farklı oranlarda CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri verilmektedir. Örneklerin makro görüntüleri; katkısız 8YSZ’nin aşınma izinin CeO<sub>2</sub> katkılı örneklere göre daha derin bir iz oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 4.19. 1400 °C' de 50 saat süre ile tavllanmış örneklerin aşınma izlerinin makro resimleri; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ

Şekil 4.20'de katkısız ve CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerin aşınma iz bölgesinin SEM mikrofotografı verilmektedir. Katkısız 8YSZ'de çoğunlukla abrasiv aşınma ve kısmen de delaminasyon aşınması meydana gelmiştir. CeO<sub>2</sub> katkılı 8YSZ örneklerde ise kısmen abarativ aşınma ve bunun yanısıra çoğunlukla delaminasyon aşınmasının meydana geldiğini göstermiştir.



Şekil 4.20. 1400 °C' de 50 saat süre ile tavlanmış örneklerin aşınma izlerinin SEM mikroyapıları; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 CeO<sub>2</sub> katkıli 8YSZ

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

- ▶  $Er_2O_3$  ve  $CeO_2$  ilavesinin 8YSZ'nin sürtünme katsayısında bariz bir değişim meydana getirmediği görülmüştür. Sürtünme katsayısının örneklerin tane boyutu ile de kısmen ilişkili olduğu bulunmuştur.
- ▶ Katkısız,  $Er_2O_3$  ve  $CeO_2$  katkılı 8YSZ örneklerine uygulanan test yükü arttıkça sürtünme değerlerinde bir artış olduğu tespit edilmiştir.
- ▶ Katkısız 8YSZ'ye farklı oranlarda  $Er_2O_3$  ve  $CeO_2$  ilavesinin sürtünme katsayısı değerlerini azalttığı gözlemlenmiştir.
- ▶  $Er_2O_3$  ve  $CeO_2$ 'in farklı oranlarda 8YSZ'ye ilavesi aşınma hacminde ve spesifik aşınma miktarında bir azalmaya neden olmuştur.
- ▶  $Er_2O_3$  ve  $CeO_2$ 'in farklı oranlarda 8YSZ'ye ilavesinin sürtünmeyi azalttığı ve aşınma direncinde bir artışa neden olduğu bulunmuştur.
- ▶ Katkısız 8YSZ'de kısmen delaminasyon aşınması ve çoğunlukla ise abrasiv aşınma meydana gelmiştir.  $Er_2O_3$  ve  $CeO_2$  katkılı 8YSZ örneklerde ise kısmen abrasiv aşınma ve çoğunlukla delaminasyon aşınma mekanizmasıyla aşınmanın meydana geldiğini göstermiştir.

### 5.2. Öneriler

- ▶ Yapılan bu çalışmada değişken olarak numunelerin tavlama süreleri,  $Er_2O_3$  ve  $CeO_2$  katkılı oranları olmuştur. Diğer değişkenler ise hız, yük ve kayma mesafesi sabit değerler olarak tutulmuştur. Bu sabit değerleri değiştirerek katkısız,  $Er_2O_3$  ve  $CeO_2$  katkılı 8YSZ numunelerin farklı hız, yük ve kayma mesafesinde aşınmaya nasıl etkisinin olduğu araştırılmalıdır.
- ▶ Katkısız,  $Er_2O_3$  ve  $CeO_2$  katkılı 8YSZ numunelerin farklı sıcaklık ve farklı nem ortam şartlarında aşınma deneyleri yapılarak aşınmaya etkileri araştırılmalıdır.

- Yapılan bu çalışmada zirkonya seramiklerine  $Er_2O_3$  ve  $CeO_2$  katkısının aşınma özelliklerine etkisi incelenmiştir. Farklı seramik malzemelerde de  $Er_2O_3$  ve  $CeO_2$ 'nin aşınmaya ve yüzey özelliklerine etkisi araştırılabilir.



## KAYNAKLAR

- AKKURT, M., 1986. Makine elemanları ve konstrüksiyonu kürsüsü. Birsen Yayınevi, Cilt 2, İstanbul.
- 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., TEKİN, H., 2009. Effect of  $\text{Co}_3\text{O}_4$  addition on friction and dry-sliding wear behavior of 8YSZ. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(1), 549-556.
- AKTAŞ, B., TEKELİ, S., KÜÇÜKTÜVEK, M., 2014. Grain growth and sinterability in  $\text{Er}_2\text{O}_3$ -doped cubic zirconia c- $\text{ZrO}_2$ . *International Journal of Materials Research*, 105(2), 208-214.
- ARCHER TECHNICOAT LTD., 2019. Technical Specification of CVD Coatings – Oxides and Mixed Erbium Oxide ( $\text{Er}_2\text{O}_3$ ), Zirconium Oxide ( $\text{ZrO}_2$ ), Yttrium Oxide ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), Yttrium stabilized Zirconium (YSZ), Silicon Oxynitride ( $\text{SiO}_x\text{N}_y$ ), and Silicon Oxide ( $\text{SiO}_2$ ), UK.
- ASM International Handbook Commitee, 1992. *ASM Handbook Friction, Lubrication and Wear Tecnology*, 18.
- AY, İ., 2004. Hasar Analizi Yüksek Lisans-Doktora Ders Notları, 16s, Balıkesir.
- BASU, B., VLEUGELS, J., and BIEST, O.V., 2004. Microstructure-Toughness-Wear Relationship of Tetragonal Zirconia Ceramics. *J. Eur. Cer. Soc.*, 24, 2031-2040.
- BHUSHAN, B., GUPTA, B.K., 1991. *Handbook of Tribology*. McGraw-Hill, Newyork.
- BHUSHAN, B., 1999. *Principle and Application of Tribology*. John Wiley and Sons Inc. Newyork, USA.
- BHUSHAN, B., 2000. *Modern Tribology Handbook*. CRC Yayınevi.
- CHEVALIER, J., DEVILLE, S., MUNCH, E., JULLIAN, R., LAIN, F., 2004. Critical Effect of Cubic Phase an Aging in 3 Mol Yttria-Stabilized Zirconia Ceramics for Hip Replacement Prosthesis. *Biomaterials*, 25; 5539-45.
- CHEVALIER, J., 2006. What Fracture for Zirconia as a Biomaterial?. *Biomaterials*, 27; 535-543.
- CHRISTEL, P., MEUNIER, A., HELLER, M., TORRE, J.P., PEILLE, C.N., 1989. Mechanical Properties and Short-Term İnvivo Evulation of Yttrium-Oxide Partially-Stabilized Zirconia. *J Biomed Mater Res.*, 23; 45-61.
- ÇELİK, Y.H., KILIÇKAP, E., 2016. Cam ve Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Çubukların Aşınma Davranışlarının Araştırılması. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt 13, No:3, 69-75.
- DAWSON, D., 1973. *Tribology Before Columbus*. Mechanical Engineering.
- DE AZA, A.H. CHEVALIER J, FANTOZZI G, SCHEHL M, TORRECILLAS R., 2002. Crack Growth Resistance of Alumina, Zirconia and Zirconia Toughned Alumina Ceramics for Joint Prostheses. *Biomaterials*, 23; 937-945.
- DEMİREL, H., 2005. Plastik Esaslı Model Malzemelerin Aşınma Özelliklerinin Geliştirilmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 75s.

- DENRY, I., KELLY, J.R., 2008. State of the Art of Zirconia for Dental Applications. Dent Mater, 24; 299-307.
- DPT, 2001. Madencilik Özel İhtisas Komisyonu, Metal Madenler Alt Yapı Komisyonu İleri Teknoloji Hammaddeleri Çalışma Grubu Raporu. Yayın No: 2622.
- EFEÖĞLU, İ., 2006. Sürtünme ve Aşınma Ders Notları. Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 62s, Erzurum.
- FOONG, Y.M., HSIEH, J., CHUA, H.C., 2010. Comparitive study between erbium and erbium oxide-doped diomdlike carbon filmis deposited by pulsed laser deposition technique. J. Vac. Sci. Technol. A, 28(3), 449-455.
- GAHR, K.H.Z., 1987. Microstructure and Wear of Materials, Tribology Series, 10.
- GÜR, A.K., 2016. Aşınma Mekanizmaları. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Semineri, 86-90s, Elazığ.
- GOU, J. ZHANG, J., ZHANG, Q., WANG, Y., WANG, C., 2017. Effect of Nano-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Additives and Plasma Treatment on the Dry Sliding Wear Behavior of Plasma Sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-8YSZ Ceramic Coatings. J Therm Spray Tech, 26; 764-777.
- GUAZZATO, M., ALBAKRY, M., QUACH, L., SWAIN, M.V., 2004. Influence of Grinding, Sandblasting, Polishing and Head Treatment on the Flexural Strength of a Glass-Infiltrated Alumina-Reinforced Dental Ceramic. Biomaterials, 25; 2153-2160.
- HE Y., WINNUBST L., BURGGRAAF A.J., VERWEIJ H., VAN DER VARST P.G.T, DE WITH B., 1996, Grain- Size Dependence of Sliding Wear in Tetragonal Zirconia Polycrystals, Journal of the American Ceramic Society 79(12):3090-3096
- İnternet erişimi '<http://www.americanelements.com/ceax.html>' Url 1 (Erişim tarihi: 15.05.2018).
- İnternet erişimi '<http://en.wikipedia.org/wiki/Erbium>' Url 2 (Erişim tarihi: 21.02.2017)
- İnternet erişimi '<http://www.nkfu.com/erbiyum-nedir-erbiyum-elementinin-ozellikleri/>' Url 3 (Erişim tarihi: 21.02.2017)
- İnternet erişimi '[http://en.wikipedia.org/wiki/Erbium\(III\)\\_oxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Erbium(III)_oxide)'. Url 4 (Erişim tarihi: 21.02.2017)
- İnternet erişimi '<http://www.google.com.tr/?sa=t&rct=j&q=&esrc=sf&source=web&cd=s&c=1.yildiz.edu.tr%20web%20Fuser%20Announcements%20Files%20dosya%2045%20b424a1>'. Url5 (Erişim tarihi: 03.09.2018)
- İnternet erişimi '<http://www.makaleler.com/seryum-nedir> Url 6 (Erişim tarihi: 25.04.2019).
- İNAN, H., 2015. Polimer Matrisli, Seramik Takviyeli Kompozit Malzemelerin Kuru Sürtünme Şartlarında Tribolojik Davranışlarının İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
- İZCİLER, M., BİLGİÇ, E., 2001. Aşınma Tipleri, Kullanılan Test Cihazları, Ölçüm Yöntemleri. I. Demir Çelik Sempozyumu ve Sergisi, 819-20.
- JOSHI B., FU, ZHENGYI, NIIHARA, K., LEE, S.W., 2011. Optical, mechanical and tribological properties of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped polycrystalline silicon nitride ceramics. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 18, 1-4.

- JUDD, B.R., 1982. Optical Absorption Intensities of Rare-Earth: Ons. Physical Review, 127; 750-61.
- JARREL, D.J., BEJBL, F., 1999. Understanding Wear and Friction in Medical-Grade Stainless Steels, Medical Device and Diagnostic Industry Magazine MDDI Article Index.
- KARADENİZ, S., 2005. Tamir Bakım Kaynağında Dolgu Maddesi Seçimi. II. Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi.
- KELLY, J.R., 2004. Dental Ceamics; Current thinking and Trends. Dent Clin North Am, 48; 513-530.
- KELLY, J.R., 2008. Stabilized Zirconia as a Structural Ceramic; an Overview. Dent Mater, 24; 289-298.
- KERKWIJK, B., 1999. Wear and Friction of Nanostructured Zirconia and Alumina Ceramics and Composites. Ph. D. Thesis, University of Twente, the Netherlands.
- KILIÇ, E.F., 2007. Alüminyum Alaşımli Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmesi ve Aşınma Davranışının İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 1-111, Ankara.
- KIRIKOĞLU, S., 1990. Endüstriyel Hammaddeler. İTÜ Yayınları, No: 1418.
- KOBRICK, R.L., 2010. Characterization and Measurement Standardization of Lunar Dust Abrasion for Space-Craft Design and Operations. A Thesis Submitted to the Faculty of the Graduate School of Univercity Colorada in Partial, Doktora Tezi, Uzay Bilimleri Departmanı.
- KONG, L. BI, Q., ZHU, S., QIAO, Z., YANG, J., LIU, W., 2014. Effect of CuO on Self-Lubricating Properties of  $ZrO_2(Y_2O_3)$ -Mo Composites at High Temperatures. Journal of the European Ceramic Society, 34; 1289-1296.
- KOSMAC, T., OBLAK, C., JEVNIKAR, P., FUNDUK, N., MARION, L., 1999. The Effect of Surface Grinding and Sandblasting on Flexural Strength and Reliability of Y-TZP zirconia Ceramic. Dent Mater, 15; 426-433.
- KRELL A., and KLAFFKE D., 1996. Effects of Grain Size and Humidity on Fretting Wear in Fine-Grained Alumina,  $Al_2O_3/TiC$ , and Zirconia, Journal of the American Ceramic Society 79(5):1139-1146
- LUTHARDT, R.G., HOLZHUTER, M., SANDKUHL, O., HEROLD, V., SCHNAPP, J.D., KUHLSCH, E., WALTER, M., 1991. Reliability and Properties of Ground Y-TZP materials. J Mater Science, 26; 6706-17.
- LUTHARDT, R.G., SANDKUHL, O., REITZ, B., 1999. Zirconia-TZP and Alumina-Advanced Tecnologies for the Manufacturing of Single Crowns. Eur J Prosthodont Restor Dent, 7; 113-119.
- LUTHY, H., LOEFFEL, O., HAMMERLE, CH., 2006. Effect of Thermocycling on Bond Strength of Luting Cements to Zirconia Ceramic. Dent Mater, 22; 195-200.
- LIN, JD., DUH, JG., 2002. Fracture Toughness and Hardness of Ceria and Ytria Doped Tetragonal Zirconia Ceramics. Mater Chem Phys, 78; 253-261.
- MEYENBERG, KH., LUTHY, H., SCHARER, P., 1995. Zirconia Pastes, a New All-Ceramic Concept for Nonvital Abutment Teeth. J Esthet Dent, 7; 73-80.
- MIRJAVADI, SS., ALIPOUR, M., HAMOUDA, A.M.S., MATIN, A., KORD, S. AFSHARI, B.M., KOPPAD, P.G., 2017. Effect of Multi-Pass Friction Stir Processing on the Microstructure, Mechanical and Wear Properties of

- AA5083/ZrO<sub>2</sub> Nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*, 726; 1262-1273.
- ÖZSARAÇ, U., 1999. Endüstriyel Yatak Alaşımlarının Aşınma Davranışlarının Karakterizasyonu. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 1-108, Sakarya.
- PARAS L.P., CORTES, D.M., TIJERINA, J.T., IRIGOYEN, M., GUERRA, J., 2018. Experimental evaluation of the tribological behaviour of CeO<sub>2</sub> nanolubricants under extreme pressures. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 400, 1-6.
- PASARIBU, H.B., SLOETJES, J.W., SCHIPPER, D.J., 2003. Friction Reduction by Adding Copper Oxide Into Alumina and Zirconia Ceramics. *Wear*, 255: 699-707.
- PICONI, C., MACCAURA, G., 1999. Zirconia as a Ceramic Biomaterial. *Biomaterials*, 20; 1-25.
- PURKAYASTHA, S. and DWIVEDI, D.K., 2012. Effect of CeO<sub>2</sub> on the friction and sliding wear performance of Ni/WC coatings. *International Conference on Advances in Electrical and Mechanical Engineering (ICAEME'2012)*, 121-126.
- RAMASW, A.P., 1999. Evaluation of CaO-CeO<sub>2</sub>-partially Stabilized Zirconia Thermal Barrier Coatings. *Ceramics International*, 25, 317-324.
- SARIKAYA, Ö., 2007. Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri (Birinci Baskı). 1-90, Sakarya.
- SALEH, BEA., TEICK, MC., 1991. *Fundamental of Photonics* A Wiley-Interscience Publication, Newyork.
- STACHOWIAK, GW., BATCHELOR, AW., 1993. *Engineering Tribology*, Tribology Series. Elsevier, 23.
- STACHOWIAK, GW., BATCHELOR, AW. ,2005. *Engineering Tribology*, 3<sup>th</sup> Edition.
- SATO, T., SHIMADO, M., 1985. Transformation of Yttria Doped Tetragonal ZrO<sub>2</sub> Polycrystals By Annealing in Water. *J Amer Ceram Soc*, 68; 356-359.
- SUNDH, A., MALIM, M., SJOGREN, G., 2005. Fracture Resistance of Yttrium-Oxide Partially-Stabilized Zirconia All-Ceramic Bridges After, Veneering and Mechanical Fatigue Testing. *Dent Mater*, 21; 476-82.
- SWABB, JJ., LOW, J., 1991. Low Temperature Degradation of Y-TZP Materials. *J Mater Science*, 26; 6706-6717.
- TEKELİ, S., AKTAŞ, B., KÜÇÜKTÜVEK, M., 2012. Microstructural and Mechanical Properties of Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> Ceramics with Different Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Contents. *High Temperature Materials and Processes*, 31(6), 701-706.
- TEKİN, H., 2015. Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Katkılı Zirkonya (8YSZ) Seramiklerin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.
- TOPLAN, N., 2001. Plazma Püskürtme Kaplama Tekniği ile Seramik Esaslı Şekilli Parça (Zirkonya Esaslı Tüp) Üretimi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya.
- TOPBAŞ, M.A., 1993. *Endüstri Malzemeleri II*. Prestij Yayıncılık.
- TOSUN, T., 2007. Kuron ve Köprü Protezlerinde Zirkonyum. 22. Baskı, *Dentalife*, 18-26.

- TURHAN, H., 1994. Ostenitik Manganlı Çeliğin Aşınma Davranışlarının Araştırılması. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
- WEI, J. ve ark., 2018. Friction and Wear Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Silicon Carbide Ceramic Matrix (C<sub>f</sub>/SiC) Composite and Zirconia (ZrO<sub>2</sub>) Ceramic Under Dry Condition. Tribology International, 119; 45-54.
- WANG, LY., TU, J.P., CHEN, W.X., WANG, Y.C., LIU, X.K., OLK, C., CHENG, D.H., ZHANG, X.B., 2003. Friction and Wear Behavior of Electroless Ni-Based CNT Composite Coatings. Wear, 254; 1289-1293.
- WOYDT, M., KADOORI, J., HARIG, K.H., HAUSNER, H., 1991. Unlubricated Sliding Behavior of Various Zirconia-based Ceramics. J. Eur. Ceram. Soc. 7: 135-145.
- YILDIZ, T., GÜR, A.K., 2006. Aşınma Sistemleri. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, 4; 2; 86-91.
- YILMAZ, O., İPEKOĞLU, B., BOZTUĞ, D., PEHLİVAN, D., SEZER, H., GÜRELİ, L., BİRDANE, G., 1995 (Yayınlanmamış). Karadeniz Bölgesi Granitoyid Kuşaklarına Bağlı Zirkon Oluşumlarının Belirlenmesi. DPT 90 K 120570 No' lu Teknolojik Araştırma Projesi, İ.Ü. jeoloji Müh. Böl., 249s.
- YILMAZ, F., 1997. Sürtünme ve Aşınma, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Bildiriler Kitabı, 229-256, İstanbul.
- ZHANG, Z., WANG, Z., LIANG, B., LA, P., 2006. Effects of CeO<sub>2</sub> on friction and wear characteristics of Fe–Ni–Cr alloy coatings. Tribology International, 39(9):971-978.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı:** Rahime ŞERBETÇİ

**Uyruğu:** T.C. (Türkiye Cumhuriyeti)

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Şanlıurfa – 16.08.1994

**e-mail:** [canos\\_fa@hotmail.com](mailto:canos_fa@hotmail.com)

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise:	Sabiha Özlek, Haliliye/ Şanlıurfa	2008-2012
Üniversite :	Harran Üniversitesi, Haliliye / Şanlıurfa	2012-2016
Yüksek Lisans :	Harran Üniversitesi, Haliliye / Şanlıurfa	2016-2019

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2017	Okyanus Çorap	Kalite Kontrol

### YABANCI DİLLER

İngilizce