

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SİLİSYUM KARBÜR TAKVİYELİ ZİRKONYA ESASLI SERAMİK
KOMPOZİTLERİN SİNERLENEBİLİRLİĞİ VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİ**

Selinay TOPRAK

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2023**

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SİLİSYUM KARBÜR TAKVİYELİ ZİRKONYA ESASLI SERAMİK
KOMPOZİTLERİN SİNERLENEBİLİRLİĞİ VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİ**

Selinay TOPRAK

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2023**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	8
2.1 Seramikler	8
2.1.1 İleri Teknoloji Seramikleri	10
2.1.1.1 İleri teknoloji seramiklerinin özellikleri	10
2.1.1.2 İleri teknoloji seramikleri ve sınıflandırılması	10
2.2 Seramik Biyomalzemeler	12
2.2.1 Biyouyumluluk	14
2.3 Silisyum Karbür (SiC)	14
2.3.1 Silisyum karbürün kristal yapısı	15
2.3.2 Silisyum karbür malzemesinin kullanım alanları	17
2.4 Zirkonya	17
2.4.1 Zirkonya seramiklerin kullanım alanları	18
2.4.2 Zirkonyum' un yapısı ve özellikleri	18
2.4.3 Tamamen stabilize zirkonya (TSZ)	20
2.4.4 Kısmi stabilize zirkonya (PSZ)	20
2.4.5 Yttrium tetragonal zirkonya polikristalin (Y-TZP)	20
2.4.6. Zirkonya ile toklaştırılmış seramikler (ZTC)	21
2.5 Seramiklerin Mekanik Özellikleri	22
2.5.1 Sinterleme	22
2.5.2 Sinterleme değişkenleri	22
2.5.3 Sinterleme aşamaları ve sinterleme çeşitleri	23
2.5.3.1 Katı faz sinterleme	24
2.5.3.2 Sıvı faz sinterleme	24
2.5.3.3 Basınç yardımcı sinterleme	25
2.5.3.4 Sıcak presleme	26
2.5.3.5 Sıcak izostatik presleme (HIP)	27
2.5.4 Yoğunluk	28
2.5.5 Sertlik	28
2.5.6 Kırılma tokluğu	29
2.6 Seramik Malzemelerin Aşınma Davranışları	30
2.6.1 Aşınma	30
2.6.2 Aşınmayı etkileyen faktörler	31
2.6.2.1 Malzeme seçimi	31
2.6.2.2 Sürtünme	31
2.6.2.3 Yüzeğe uygulanan yük	31
2.6.2.4 Sürtünme mesafesi	32
2.6.2.5 Yüzey sertliği	32
2.6.2.6 Yüzey pürüzlülüğü	32
2.6.2.7 Yağlama	32
2.6.3 Aşınma mekanizmaları ve çeşitleri	32
2.6.4 Sürtünme	36
2.6.4.1 Sürtünme katsayısı	37
2.6.4.2 Sürtünme çeşitleri	38
2.6.4.2.1. Kuru sürtünme	39

2.6.4.2.2. Akışkan sürtünme (sıvı sürtünme)	39
2.6.4.2.3. Yuvarlanma sürtünmesi	40
2.6.4.2.4. Kayma sürtünmesi	41
2.6.4.3 Sürtünme kuvvetine etkileyen faktörler	42
2.6.4.3.1. Genel faktörler	42
2.6.4.3.2. Yüzey sıcaklığı faktörü	42
3. MATERYAL ve YÖNTEM	43
3.1 Meteryal	43
3.2 Yöntem	43
3.2.3 Örneklerin XRD analizi ve yoğunluklarının belirlenmesi	47
3.2.4 Örneklerin sertlik ve kırılma tokluklarının belirlenmesi	48
3.2.5. Örneklerin aşınma deneyleri	49
4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	52
4.1. SiC Katkılı 8YSZ'nin XRD İncelemesi ve Sinterlenebilirliği	52
4.3. 8YSZ'nin Tane Boyutu ve Mikroyapısına SiC İlavesinin Etkisi	56
4.4. SiC ilavesinin 8YSZ'nin Sertlik ve Kırılma Tokluğuna Etkisi	58
4.5. 8YSZ'nin Tribolojik Davranışına SiC İlavesinin Etkisi	63
4.5.1. Deney numunelerinin aşınma sonrası yüzey profilleri	64
4.5.2. Numunelerin aşınma hacmi ve spesifik aşınma miktarı	66
5. SONUÇLAR	70
5.1 Sonuçlar	70
5.2 Öneriler	71
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	77

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SİLİSYUM KARBÜR TAKVİYELİ ZİRKONYA ESASLI SERAMİK KOMPOZİTLERİN SİNERLENEBİLİRLİĞİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Selinay TOPRAK

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bülent AKTAŞ
Yıl:2022, Sayfa:77

Yitriya ile kararlı hale getirilmiş polikristal zirkonya (YSZ), metallere kıyasla yüksek sıcaklıklarda mükemmel özelliklere sahip olması ve yüksek tokluğun yanı sıra yüksek mukavemete, düşük termal genleşme katsayısına sahip olması nedeniyle birçok yapısal uygulamalar için ilginç bir malzemedir. Bu özellikler, birçok farklı yapı türlerinde kullanım için onu iyi bir aday yapar. Ancak YSZ darbelere karşı çok sağlam bir malzeme değildir ve kullanım alanını genişletmek için mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi gereklidir. Bu yüzden, bu çalışmada %8 mol yitriya ile kararlı hale getirilmiş zirkonyanın (8YSZ) yapısal özelliklerine, sertliğine, kırılma tokluğuna ve tribolojik özelliklerine SiC katkısının etkisi taramalı elektron mikroskopu (SEM), X-ışınımı difraksiyonu (XRD), Vickers sertlik cihazı ve pin-on-disk tipi aşınma cihazı kullanılarak araştırılmıştır. 8YSZ ve ağırlıkça %1-15 oranlarında SiC tozları kolloidal işleme alanı ile numuneler üretilmiştir. Ağırlıkça %1-15 oranlarında SiC katkılı 8YSZ numuneler 1400°C-1500°C sıcaklıklarda 2 saat süre sinterlendi. 1450°C sinterleme sonrası, ağırlıkça %15 SiC katkısı ile 8YSZ'nin relatif yoğunluğu %98'den %63'e düşmüştür. Sinterleme sonrası SiC katkılı 8YSZ numunelerin SEM mikroyapıları 8YSZ matriste %1 oranından sonra SiC'in çözünmediğini ve ikincil faz olarak 8YSZ taneleri etrafında çökelmiş olduğunu gösterdi. 8YSZ tane sınırlarında SiC'in ikincil fazlarının bulunması nedeniyle 8YSZ'nin ortalama tane boyutu SiC ilavesiyle 4,34 µm'den 1,95 µm'ye düşmüştür. Ayrıca, Vickers sertlik yöntemiyle hem örneklerin sertlikleri hem de kırılma toklukları ölçülmüştür. 8YSZ'ye SiC ilavesi sertlikte bir miktar azalma meydana getirirken kırılma tokluğunda ise 1.65 MPa.m^{0.5}'ten 4.23 MPa.m^{0.5} değerine artırmıştır. Ayrıca, SiC ilave edilmiş 8YSZ numunelerin aşınma testleri, 8YSZ disk üzerinde WC seramik bilye karşısında kuru kayma sürtünme koşulları altında, oda sıcaklığında, 3N yük 0,1 m/s kayma hızı ve 500 m kayma mesafesinde gerçekleştirildi. Sürtünme ve aşınma testi sonuçları, SiC ilavesi ile 8YSZ'nin sürtünme katsayısında ve aşınma miktarında yüksek miktarda ciddi bir azalma olduğunu gösterdi. Sonuç olarak bu çalışma SiC takviyesiyle 8YSZ seramiklerin mekanik özelliklerinde ve tribolojik özelliklerinde yüksek oranda iyileşmeler olduğunu ortaya koymaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: 8YSZ, SiC, Kırılma tokluğu, Sürtünme, Aşınma

ABSTRACT

MSc Thesis

SINTERABILITY AND MECHANICAL PROPERTIES OF SILICON CARBIDE REINFORCED ZIRCONIA BASED CERAMIC COMPOSITES

Selinay TOPRAK

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

**Supervisor: Prof. Dr. Bülent AKTAŞ
Year: 2022, Page:77**

Yttria stabilized polycrystalline zirconia (YSZ) is an interesting material for many structural applications due to its excellent properties at high temperatures compared to metals, high strength as well as high toughness, low coefficient of thermal expansion. These properties make it a good candidate for use in many different types of structures. However, YSZ is not a very durable material against impacts and its mechanical properties need to be improved to expand its usage area. Therefore, in this study, the effects of SiC additives on the structural properties, hardness, fracture toughness and tribological properties of zirconia (8YSZ) stabilized with 8 mol% yttria were investigated using scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), Vickers hardness device and wear. investigated using the device. Samples were produced by alloying 8YSZ and 1-15% wt SiC powders by colloidal process. 8YSZ samples with 1-15% SiC additives by weight were sintered for 2 hours in the temperature range of 1200°C-1600°C. After sintering at 1450°C, the relative density of 8YSZ decreased from 98% to 63% with 15% by weight SiC additive. SEM microstructures of SiC doped 8YSZ samples after sintering showed that after 1% in 8YSZ matrix, SiC did not dissolve and precipitated around 8YSZ grains as a secondary phase. Due to the presence of secondary phases of SiC at the grain boundaries of 8YSZ, the average grain size of 8YSZ decreased from 4,34 µm to 1,95 µm with the addition of SiC. In addition, both the hardness and fracture toughness of the samples were measured with the Vickers hardness method. The addition of SiC to 8YSZ caused some decrease in hardness and increased fracture toughness from 1.65 MPa.m^{0.5} to 4.23 MPa.m^{0.5}. In addition, wear tests of SiC added 8YSZ specimens were performed on 8YSZ disc against commercially available WC ceramic ball under dry sliding friction conditions, at room temperature, 3N load, 0,1 m/s sliding speed and 500 m sliding distance. The friction and wear test results showed that the friction coefficient and wear amount of 8YSZ decreased significantly with the addition of SiC. In conclusion, this study reveals that there are high improvements in mechanical properties and tribological properties of 8YSZ ceramics with SiC reinforcement.

KEYWORDS: 8YSZ, SiC, Fracture Toughness, Friction, Wear

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin yönetilmesinde rol alan , her türlü desteğini esirgemeyerek fikir ve önerileri ile katkıda bulunan yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Bülent AKTAŞ'a, deneyler ve çalışmalarım esnasında bana yardım eden, tecrübelerini aktaran hocam ve meslektaşım Arő. Gör. Abuzer AÇIKGÖZ'e ve çalışmalarım süresince bana ayırdığı vakit, fikirleri ve değerli arkadaşlığı için 100/2000 YÖK Doktora Araőtırmacısı Ruken DAŐ'a, teşekkürlerimi sunarım.

Beni bugünlere getiren, her zaman büyük destek veren ve yanımda olan aileme minnettarım. Hem lisans dönemimde hem de yüksek lisans dönemimde çalışmam boyunca desteklerini esirgemeyen ve meslektaşım olan eşim Şamil TOPRAK'a sonsuz teşekkürlerimi iletmeyi bir borç bilirim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1 Biyo inert ve biyoaktif malzemelerin dokularla ilişkisi	13
Şekil 2.2. Kübik ve hegzogonal SiC yapısı	16
Şekil 2.3 Zirkonya'nın fiziksel özellikleri	19
Şekil 2.4. Kübik Faz - Tetragonal Faz- Monoklinik Faz	19
Şekil 2.5. ZrO ₂ -Y ₂ O ₃ Faz Diyagramının ZrO ₂ 'ca Zengin Bölgeleri	21
Şekil 2.6. Sinterlemenin aşamaları	24
Şekil 2.7. Sıvı faz sinterleme mekanizmasının aşamaları	25
Şekil 2.8. Sıcak Preslemeye Ait Kesit Görüntüsü	26
Şekil 2.9. Sıcak izostatik presleme örneği ile bir basınç kabı	27
Şekil 2.10. Vickers sertlik testi ile oluşturulan sertlik izi ve çatlakların şematik resmi, a) Yarı dairesel, b) Palmqvist	29
Şekil 2.11. Aşınma türleri ve sınıflandırılması	33
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	33
Şekil 2.13. Pürüzlü sert bir yüzey veya abrasif parçacıkların bir yüzeye yapışık olması	34
Şekil 2.14. Yüzeylerden en az birinden daha sert abrasif parçacıkların iki yüzey arasında sıkışması	34
Şekil 2.15. Yorulma aşınması oluşum mekanizması	35
Şekil 2.16. Korozif aşınma	35
Şekil 2.17. Tribo oksidasyon aşınması	36
Şekil 2.18. Sürtünme kuvveti	37
Şekil 2.19. Statik sürtünme kuvveti	38
Şekil 2.20. Kuru sürtünme	39
Şekil 2.21. Sıvı sürtünme	40
Şekil 2.22. Yuvarlanma sürtünme modeli ve sistemin serbest cisim diyagramı	40
Şekil 3.1. Tozların şekillendirilmesinde kullanılacak presleme kalıbı	44
Şekil 3.2 Kutu Tipi Endüstriyel Fırın	45
Şekil 3.3. Zımparalama ve Parlatma Makinesi	45
Şekil 3.4. EMS 550 Kaplama Cihazı	46
Şekil 3.5. ZEISS marka EVO 50 model elektron mikroskobu	46
Şekil 3.6. Dijital Kumpas-Hassas Terazı	47
Şekil 3.7. Arşimet Yoğunluk Kiti	49
Şekil 3.8. Aşınma test cihazı	47
Şekil 3.9. Makro Rockwell) Sertlik Ölçüm Cihazı	50
Şekil 4.1. XRD Grafiği	53
Şekil 4.2. Deneysel Yoğunluk Grafiği	55
Şekil 4.3. Relatif Yoğunluk Grafiği	56
Şekil 4.4. 1450 °C' de 2 saat sinterlenmiş SiC katkılı 8YSZ numunelerin mikroyapıları; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 SiC katkılı 8YSZ, c) %5 SiC katkılı 8YSZ, d) %10 SiC katkılı 8YSZ, e) %15 SiC katkılı 8YSZ.	57
Şekil 4.5. 1450 °C' de 2 saat süre ile tavllanmış SiC katkılı 8YSZ örneklerin tane boyutlarındaki Değişim	58
Şekil 4.6. Farklı oranlardaki SiC katkılı 8YSZ'nin Sertlik Değişimleri	59
Şekil 4.7. a) Katkısız 8YSZ Piramit Uç İzi b) %1 SiC Katkılı 8YSZ Piramit Uç İzi c) %5 SiC Katkılı 8YSZ Piramit Uç İzi d) %15 SiC Katkılı 8YSZ Piramit Uç İzi e) %15 SiC Katkılı 8YSZ Piramit Uç İzi	60
Şekil 4.8. Farklı Oranlarda SiC Katkılı Numunelerin Ortalama Çatlak Boyları	61
Şekil 4.9. Farklı Oranlarda SiC Katkılı Numunelerin Yüzey Çatlakları a) %1 SiC katkılı 8YSZ, b) %5 SiC katkılı 8YSZ, c) %10 SiC katkılı 8YSZ, d) %15 SiC katkılı 8YSZ	62
Şekil 4.10. Farklı oranlardaki SiC katkılı 8YSZ'nin Kırılma Tokluğu Değişimleri	63
Şekil 4.11. 1450 °C' de 2 saat sinterlenmiş katkısız ve SiC katkılı 8YSZ numunelerin sürtünme	

katsayısı grafiği	65
Şekil 4.12. Aşınma izi bölgesinden alınan yüzey profil görüntüleri a) Katkısız 8YSZ, b) %1 SiC katkıli 8YSZ, c) %5 SiC katkıli 8YSZ, d) %10 SiC katkıli 8YSZ, e) %15 SiC katkıli 8YSZ.	66
Şekil 4.13. Aşınma Hacmi Değişim Grafiği.....	67
Şekil 4.14. Spesifik Aşınma Miktarı Değişim Grafiği.	68
Şekil 4.15. 1450 °C’ de 2 saat sinterlenmiş örneklerin aşınma izlerinin SEM mikroyapıları; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 SiC katkıli 8YSZ.....	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Bazı seramik malzemelerin mekanik özellikleri	9
Çizelge 2.2: İleri teknoloji seramiklerin işlevleri ve uygulama örnekleri İleri malzeme teknolojileri sektör raporu (2005)	11
Çizelge 2.3. Bazı ileri teknoloji seramiklerin özellikleri	12
Çizelge 2.4. Silisyum karbürün tipik özellikleri	15
Çizelge 2.5. Sinterlenebilirliğe ve mikroyapıya etki eden değişkenler	22
Çizelge 2.6. Sinterleme aşamaları ve meydana gelen değişimler	24
Çizelge 3.1. Kullanılan numunelerin kimyasal bileşenleri	54
Çizelge 4.1. Yoğunluk değerleri	54

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

8YSZ %8	:mol yitriya ile kararlı hale getirilmiş kübik zirkonya
Gpa	:Gigapascal
KSZ	:Kısmen kararlı zirkonya
k-ZrO ₂	:Kübik zirkonya
Mpa	:Megapascal
m-ZrO ₂	:Monoklinik zirkonya
SiC	:Silisyum Karbür
TSZ	:Tamamen kararlı zirkonya
TZP	:Tetragonal zirkonya polikristali
t-ZrO ₂	:Tetragonal zirkonya
WC	:tungsten Karbür
YMK	:Yüzey merkezli kübik
YSZ	:Yitriya ile kararlı hale getirilmiş zirkonya

1.GİRİŞ

Günümüzde insanların görünüşe daha fazla önem vermeleri ve teknolojinin gelişmeye devam etmesinin bir sonucu olarak metal-seramik restorasyonları alternatifleriyle değiştirmek daha popüler hale gelmiştir. Zirkonya ise bu alternatifler arasında bilinen önemli bir malzemedir. Zirkonya, yüksek derecede sertlik ve tokluğa sahip, ucuz, yüksek kaliteli bir seramik malzemedir. Ayrıca aşınmaya ve korozyona karşı çok dayanıklıdır. Zirkonya estetik görünümü, biyolojik uyumluluğu ve yüksek mukavemeti sayesinde diğer teknolojik alanlarda olduğu gibi diş implantı ve protez gibi sağlık alanında da sıklıkla kullanılmaktadır. Bazı insanlar ayrıca biyoseramikleri metaller ve polimerlere alternatif bir malzeme olarak görmektedir. Biyolojik olarak uyumlu, güçlü ve sağlam oldukları için bunlar genellikle korozyon direnci ve dayanıklılık için kullanılır. Farklı malzemeler seramik vitrinlerde sergilendiğinde yeni özellikler kazanır. Zirkonya'nın kimyasal, fiziksel strese karşı direnci ve doğal görünümü onu tam seramik sistemler için tercih edilen bir malzeme yapar. Bu özelliklerinden ötürü Zirkonya birçok yeni sistemin oluşmasına ve uygulanmasına zemin hazırlamıştır (Türkmen, 2019).

Zirkonyum, 1789 yılında Alman bir kimyager olan Martin Heinrich Klapoth tarafından keşfedilen sert, altın renkli bir elementtir. Zirkonyum, adını Farsça kökenli "altın gibi" anlamına gelen "zargun" kelimesinden almıştır. Joseph Baddeley ise 1892'de Sri Lanka'nın önemli zirkonyum mineralini ve adına ilham kaynağı olan baddeleyiti keşfetmiştir. 1914 yılında saf zirkonyum elde edilmiştir. Saf halinden Anton Eduard van Arkel ve Jan Hendrik de Boer tarafından 1925 yılında uygulanan termal işlemlerle yumuşak, beyaz ve dövülebilir bir metal olan zirkonyum tetraiyodidi elde etmişlerdir. Element Cizelgesunda Zirkonyumun kimyasal sembolünü Zr olarak simgelenir ve atom numarası 40'tır. 91,224 atomik kütle birimi ağırlığındadır (Arın, 2007).

Zirkonyum, 4-B grubu elementlerden bir geçiş metalidir. Erime noktası 1855 derecedir, ancak 4409 derecede buharlaşır. Isıya ve korozyona karşı inanılmaz derecede dirençli grimsi beyaz metalik bir malzemedir. % 99 saf hali kırılıgandır ve hegzagonal yapıya sahiptir. Zirkonyum havada ve suda oksitlenerek korozyona karşı direnç kazanan bir elementtir. Zirkonyum metalleri normal sıcaklıklarda tutulduğunda reaktif hale gelmezler (Küçükoğlu, 2008).

Zirkonyum doğada bulunan ve yapay bileşiklere sahip önemli bir mineraldir. Zirkonya, zirkon silikat veya zirkonyadan elde edilen yapay zirkonyum dioksit bileşimine verilen isimdir. En yaygın yapay zirkonyum bileşiklerinden biridir ve metalin opak beyaz kristal oksitidir. Doğal halinde monoklinal kristal yapıya sahiptir. Zirkonya, zirkonyum dioksit ve zirkonyum oksit olarak da bilinir; ekonomik değeri olan bir zirkonyum şeklidir. Baddeleyit ise çok çeşitli pratik kullanımları olan önemli bir zirkonyum oksit mineralidir. Kullanım alanları arasında başta dental uygulamalar olmak üzere takılar, fenerler, ter önleyici ve askeri malzemeler, lambalar ve losyonlar bulunmaktadır. Ayrıca çelik yapımında, vakum tüplerinde ve suni ipekte, tıpta cerrahi ekipman ve tıbbi aletler gibi uygulamaları da bulunmaktadır (Kılavuz ve ark. 2021).

Zirkonya'nın yüksek sıcaklıklarda uygulanabilmesi için kısmen veya tamamen stabile edilmesi gerekir. Bunun nedeni, zirkonyanın fazdaki dönüşümler nedeniyle parçalanmasıdır. Stabileştirme işlemi için bazı stabilizörler kullanılmaktadır. Magnezyum oksit, kalsiyum oksit, CeO_2 ve Y_2O_3 gibi oksitler bunlardan birkaçıdır ve bileşenleri kararlı bir durumda tutmaya yardımcı olurlar. Stabilizörler içerisinde en yaygın kullanılan termal bariyer kaplama malzemesi olan YKSZ, yüksek kimyasal stabiliteye, yüksek korozyon direncine, yüksek erime noktasına, yüksek genleşme katsayısına, düşük ısı iletkenliğe ve düşük erozyon direncine sahiptir. Bu özellikler YKSZ'yi bugüne kadar ki en dayanıklı kaplama yapmaktadır (Ağaç, 2017).

Y_2O_3 , malzemeleri termal şok hasarından korumak için kullanılan termal kaplamaları stabilize etmede etkilidir. %6 - %8 veya daha fazla Y_2O_3 içeren malzemeler, termal bariyer kaplama olarak kullanıldığında dayanıklılık sağlar (Ağaç, 2017).

Teknolojik gelişmeler, gelişmiş seramik malzemeler için artan bir talebe yol açmaktadır. Bu talep genellikle seramik malzemelerle ilişkilendirilen iki şey olan ısıya ve sürtünmeye direnen malzemeleri içerir. Aslında bu malzemelere olan talep medeniyetin başlangıcından beri var olmuştur. Metaller, stabiliteyi korumadan yüksek sıcaklıklara dayanabilirler. Seramik malzemeler ise yüksek sıcaklık uygulamalarında güçlü kalabilir ve yapısal bütünlüğü koruyabilirler. Metal ve seramiklerin bu özellikleri en önemli yüksek teknoloji ürünü seramiklerden biri olarak elmasın yerini almış sert, yarı iletken bir malzeme olan silisyum karbürde toplanmıştır. Silisyum karbür seramik, silisyum karbür alaşımı veya silisyum karbür süper sert malzeme gibi isimler ile de adlandırılır. SiC, elmadan daha düşük termal iletkenliğe, daha yüksek termal şok direncine ve daha yüksek kırılma indeksi değerine sahiptir. Sert malzemelerin bitim aşamalarında, metalik olmayan malzemelerin taşlanması dolgu maddesi olarak ve üretim maliyetlerinin önemli olduğu seramik parçaların bir bileşeni olarak bulunur. Aşınan parçaları, ısıtma elemanlarını, aşındırıcıları ve seramik pompaları kaplamak için de kullanılır. Metal-seramik matris kompozitlerde ve seramik contaların yanı sıra hafıza diskleri de diğer bir uygulama alanlarıdır (Akınalp 2019; Bakar, 2009).

Seramik malzemeler birçok avantajlı niteliğe sahiptir, ancak en önemli kusurları kırılma yapısına sahip olmalarıdır. Bunun nedeni, seramik malzemelerde bulunan ve metallerden veya polimerlerden daha fazla bağ kuvveti oluşturan iyonik, kovalent ve moleküler bağlardır. Si-C bağları % 87 kovalent bağ gücüne sahiptir. Ancak malzemenin yüksek kovalent bağları, silisyum karbürün 2.300°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yavaş difüzyon hızı nedeniyle katkı maddeleriyle işlenmesini zorlaştırır. Bu durum yüksek yoğunlukların oluşturulmasını engeller. Aynı zamanda düşük kırılma mukavemeti nedeniyle yapısal uygulamasını da

engellemektedir. Sonuç olarak yüksek yoğunlukta silisyum karbür oluşturmak için katkı maddeleri gereklidir (Somiya ve ark., 1991).

Birçok malzemenin özelliklerini birleştirmek, malzemelerin ayrı ayrı elde edemeyeceği yeni ve benzersiz özellikler katarak iyileştirilmesini ve geliştirilmesini sağlar. Bu durum yüzyıllardır insanlar tarafından uygulanmıştır ve bugün de uygulanmaya devam etmektedir. Geliştirilmiş doğal malzemelerin özellikleri kompozit malzemelerin varoluşu ile ikinci planda kalmıştır (Dutdibi, 2011).

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla ayrı bileşenin birleştirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Hiçbir bileşenin tek başına elde edemeyeceği özelliklere sahiptirler (Schwartz, 1999). Bir faz geçişinden yeni bir faz yaratmak imkansızdır. Bunun yerine bilim adamları, farklı özelliklere sahip birden daha fazla malzemeyi birleştirerek kompozit malzemeler oluştururlar. Bu, malzemelerin kendisinden daha büyük ölçekte görülebilen bir arayüz oluşturur. Orijinal malzemelerde elde edilemeyen başka bir özellik katmak için kompozit malzemeler üretilir. Kompozit malzemeler pek çok sıra dışı nitelik ve performansa sahiptir. Bunlar, diğer malzemelere kıyasla yüksek iletkenlik, korozyon direnci, sertlik, yüksek sıcaklık performansı, mukavemet ve ağırlıktır. Mühendislik uygulamalarında kompozit malzemeleri kullanmalarının nedeni bu benzersiz özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Yılmaz, 2011).

Mühendislik uygulamalarında, kompozit malzemelerin önemi giderek artmaktadır. Kompozit malzemeler için uygun üretim yönteminin seçilmesi başarı için kritik öneme sahiptir. Farklı malzemeler, farklı üretim yöntemleri de gerektirir. (Ekerer, 2007). İş koşullarına göre bir malzeme seçerken, malzeme performansı beklentileri karşılamayabilir. Malzeme ömrü azalır, malzeme performansı düşebilir ve diğer olumsuz etkiler ortaya çıkabilir. Farklılaşan üretim yöntemleri, aynı bileşime ve miktara sahip malzemeleri değiştirebilir. Bunun nedeni bazı üretim aşamalarının yarı mamul, başlangıç malzemeleri ve bitirme işlemlerinden ayrı düşünülmesi gerektiğidir (İbrahim ve ark., 1991).

Zirkonya diş implantları ve protezleri için popüler bir seçimdir. Zirkonya malzemelerinin günlük aktiviteler sırasında sürtünmeden yıprandığını görülmüştür. Bu nedenle zirkonyum malzemelerin nasıl aşındığının ve aşınma direncinin nasıl arttığı araştırılması önemlidir (Aktaş, 2008).

Bazı araştırmacılara göre aşınmanın birkaç tanımı vardır. Teknik olarak aşınma, malzemeyi kıran ve yüzeyi aşındıran mikro partiküllerden kaynaklanır. Cisimlerin yüzeylerinde, mekanik etkenlerden oluşan sebepler buna örnektir. Dış etkenlerin neden olduğu bir nesneye verilen istenmeyen fiziksel hasar da denilebilir. DIN 50320 ve ASTM G40-93 standartları aşınmayı, mekanik aşınma nedeniyle oluşan yüzeyde malzeme kaybı olarak tanımlar. Bu, birbiriyle etkileşime giren malzemelerin, sıvıların veya gazların neden olduğu sürtünmeden kaynaklanır. Her iki tanım da aşınmanın geri alınamayacağını ve istenmeyen bir durum olduğunu belirtir (Tekin, 2015)

Aşınmanın tamamını ortadan kaldırılamaz, ancak aşınma hızları yavaşlatılarak malzemelerin ömrünü uzatılabilir. Son zamanlarda sağlanan gelişmeler aşınma dayanımını artırma amaçlı yüzey kaplama metodları mühendislik uygulamalarında çok önemli değişikliklere sebep olmuştur (Şerbetçi, 2019).

Zirkonya-SiC seramikler ile ilgili yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlendiği gibidir ;

Hacimce % 50'a kadar SiC içeren 50 MPa'lık bir yük altında 1400°C ve 1700°C sinterleme sıcaklığı altında Al₂O₃ esaslı malzemelerin mekanik özellikleri araştırılmıştır. SiC içeren Al₂O₃ esaslı malzemeler için % 98'in üzerinde teorik yoğunluk elde edilirken, SiC içeriğinin artmasıyla birlikte yoğunlaşma azalmaya başladığı görülmüştür. Bu, artan SiC partiküllerinin ve topaklanmaların, tane sınırı hareketini engelleyerek yoğunlaştırmayı geciktirdiği kanısına dayandırılabilir. Bununla birlikte, numune içerisinde bir miktar gözeneklilik olduğu ve kompozitin aslında tam olarak yoğunlaşmadığı görülmüştür. XRD analizinden mullit (Al₂SiO₅) miktarının arttığı saptanmıştır bunun nedeni SiC bileşiminin artmasıdır. %30 SiC ve

%50 SiC katkılı Al_2O_3 kompozitleri için elde edilen sertlik değerlerinin düşük olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin, bu numunelerin yüksek miktarda camsı faz ve kalıntı karbon içermesi olduğu belirtilmiştir (Oluwagbenga ve ark., 2014).

ZrO₂ metalleri reaksiyon fazı içermezler. Bu nedenle gözlemlenecek olan mikro yapı ve mekanik özelliklerdeki değişiklikler SiC'den kaynaklanır. Tane sınırı hareketliliği, tane büyümesini ve yoğunlaşmayı da etkiler. Tane sınırı difüzyonu SiC partiküllerinin çapıyla orantılı olarak ilerler. Bu nedenle, yoğunlaşmanın gözlenen gecikmesi, SiC partiküllerin tane sınırı yayınındaki azalmasından kaynaklanmaktadır. Katkısız zirkonya seramiklere kıyasla farklı faz partikülü içeren karışık tozları yoğunlaştırmak için daha yüksek sinterleme sıcaklıkları gereklidir. Katkısız zirkonya seramiklerin ortalama tane boyutu ve tane büyümesi ilave malzemeler ile daha azalabilir. Katkısız zirkonya seramiklerin mukavemetleri, ilave partiküllerinin dahil edilmesiyle dikkate değer ölçüde iyileştirilebilir (Bamba ve ark., 1998).

Bu çalışmada SiC partiküllerinde meydana gelen basma gerilmesi ele alınmıştır. Genellikle monolitik seramiklerde dislokasyon oluşturmak zordur, ancak nanokompozitlerde dislokasyonlar kolayca bulunabilir. Tokluk mikro yapı, dönüşüm, yani tane boyutu, safsızlık, stabilizatör içeriği, sıcaklık ve kusurlar ile ilgilidir. Mikro yapı, mekanik özellikleri (özellikle kırılma mukavemeti) büyük ölçüde etkiler. Azalan kusur boyutu ile mukavemet daha yüksek olur ve mukavemet tokluk ile doğru orantılıdır. SiC partiküllerinin homojen dağılıp mukavemeti arttırmasıyla tokluk değerleri iyileştirilebilir. Mukavemet hem kusur boyutuna hem de kırılma tokluğuna bağlıdır fakat büyük kusur boyutları tokluğu iyileştirebilir ama mukavemete etkisi olmayabilir. Yaygın seramiklerde kırılma tokluğu, Young modülü ve bir çatlak ilerletmek için gerekli olan kırılma enerjisi ile ilişkilidir ve bu nedenle tokluğu iyileştiren faktörlerden biri de Young modülündeki artıştır. Sistemin başka fazlara dönüştürülebilme kabiliyeti de kırılma tokluğunu etkiler ve tokluk, dönüşüm gerçekleştiğinde gelişir (Bamba ve ark., 2003).

Sabit %5 oranında SiC ve %3, %6 ve %9 oranında ZrO₂ içeren Al-SiC-ZrO₂ nanokompozitlerin toz metalürjisi yöntemi ile üretilerek mekanik özellikleri araştırılmıştır. X-ışınımı difraktometresi matriste ki takviyeleri doğrulamıştır ve kayda değer bir topaklanma olmaksızın Al matrisinde homojen olarak dağıldığı göstermiştir. Al matrisi ile karşılaştırıldığında sert seramik partikülleri gelişmiş mekanik özellikler göstermiştir. Al matrisindeki ZrO₂ içeriğindeki artışla birlikte mikrosertliğinin arttığı görülmüştür. Al matrisine partiküller, kompozitlerin akma mukavemetini ve nihai sıkıştırma mukavemetini arttırmıştır. Basınç dayanımındaki bu iyileşme sert seramik malzemelerin ilavesi ve bu malzemelerin homojen dağılmasıyla ilişkilendirilmiştir (Khan ve ark., 2020).

1600°C'de 2 saat sinterlenmiş monolitik alümina ile 1600°C'de belirli oranlarda ki SiC'in 2saat sinterlemesi sonucu oluşan mekanik özelliklerindeki değişimler araştırılmıştır. SiC ilavelerinin aynı işleme koşulları için monolite alüminaya kıyasla tane boyutunda önemli bir azalma sağladığı görülmüştür. Kırılma tokluğu ve mukavemetin de iyileşmeler olmuş fakat ciddi artışlar meydana gelmemiştir. SiC kompozitlerinin monolitik alüminalarından daha düşük aşınma oranı sergilediği görülmüş ve alüminaya SiC eklenmesi, kayma aşınmasında önemli bir düşüşle sonuçlanmıştır (Chen ve ark., 2000).

Literatürde seramik partikül takviyeli seramik esaslı kompozitler üzerine birçok çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca, SiC takviyeli kübik zirkonya (8YSZ) esaslı seramik kompozitlerle ilgili birkaç çalışma bulunmakla birlikte bunlar daha çok mikroyapı ve kırılma tokluğu üzerine yapılmış çalışmalardır. SiC takviyeli 8YSZ seramiklerin tribolojik özellikleri daha önce çalışılmamıştır ve çalışma bu bakımdan özgündür. Bu çalışmanın amacı, %8 mol Y₂O₃ ile kararlı haldeki zirkonya (8YSZ) esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerini ve aşınma direncini farklı oranlarda SiC partiküllerini ekleyerek iyileştirmektir. Bu amaç için bu çalışmada, 8YSZ seramiklere farklı miktarlarda SiC takviye ederek seramik kompozitler üretilmiş ve üretilen seramik kompozitlerin yapısal özellikleri, mikroyapısı, sertlik, kırılma tokluğu ve tribolojik davranışları incelenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1 Seramikler

Yunanca'da seramik kelimesi unlu mamüller anlamında ki "Keramos" kelimesinden gelmektedir. Tanımı tüm metalik olmayan ve organik malzemeleri içerir. Birçok endüstri, çalışmalarını tanımlamak için seramik terimini kullanır. Seramik birçok endüstriyi destekler ve nükleer santrallerde kilit rol oynar. Bunlar başlıca metalurji, otomotiv sanayi, uzay bilimleri, inşaat sanayi ve cam endüstrisidir (Yılmaz, 2004).

İki grup seramik malzeme vardır. Birincisi, kil, feldspat, kuvars ve dolomit gibi bazı inorganik malzemelerin metal oksitlerle karıştırılmasıyla oluşturulan geleneksel seramiklerdir. Pişirilmeden önce yüksek sıcaklıklarda karıştırılır ve şekillendirilirler. Teknik seramik olarak adlandırılan seramikler ise nitrürler, karbürler ve silikatlar gibi diğer oksit olmayan malzemeleri karıştırıp ve kalıplanmasıyla oluşturulan ürünlerdir (Demirel, 2009).

Her malzeme olduğu gibi seramiklerin özellikleri de makro ve mikro yapılarına bağlıdır. Seramikler sert, kırılğan ve son derece dayanıklıdır. Ayrıca yoğunlukları düşüktür, kimyasal ve termal hasara karşı dirençlidirler ve çok kırılğandırılar. Kırılğan ve sert olmaları, işlenmelerini zorlaştırır. Yalıtıkandırılar. Kolayca kırılabilirdikleri için potansiyel olarak güvensizdirler. Metallerle karşılaştırıldığında seramikler kırılğan olduklarından plastik akma göstermezler çünkü erime noktaları yüksektir. Seramik gibi farklı malzemeler aşındırıcı malzemelerle veya ağır yüklerle temas ettiğinde, yerel gerilimleri hızla gelişir. Bu gerilmeler çekme gerilmesi veya kayma gerilmesi şeklinde olabilir. Bu gerilmeler çekme gerilmesi olarak gelişirse, malzeme üzerinde hızla büyüyen mikro çatlaklar oluşacaktır. Bu yüzden çekme dayanımları düşük, basma dayanımları çok yüksektir. Bazı seramik malzemelerin mekanik özelliklerine Çizelge 2.1'de değinilmiştir (Kayalı, 2000).

Çizelge 2.1. Bazı seramiklerin mekanik özellikleri (Chawla, 2003)

MALZEME	ELASTİK MODÜL (GPa) E	POISSON ORANI V	TERMAL GENLEŞME KAYSAYISI (10 ⁻⁶ K ⁻¹) A
SiC	420	0.22	4
Al ₂ O ₃	380	0.25	8
Kordierit (2Al ₂ O ₃ . MgO. 5SiO ₂)	130	0.25	2
Müllit (3Al ₂ O ₃ . 2SiO ₂)	215	0.25	4

Seramik malzemelere olan ilginin artmasının güncel nedenleri aşağıda listelenmiştir ;

- Yüksek sıcaklık dayanımı,
- Yüksek kimyasal kararlılık,
- Sertlik,
- Metalden daha hafif olması, (% 40'a kadar)
- Hammadde olarak bol bulunur ve genellikle metallere göre ucuzdur,
- Pahalı stratejik metaller gerektirmez,
- Korozyona ve aşınmaya karşı dirençlidir,
- Oksidasyona karşı yüksek direnç,
- Düşük sürtünme katsayısı (Yıldırım, 2010).

Son yıllarda malzemede meydana gelen olumlu değişiklikler sayesinde yeni seramik malzemeler geliştirilmiştir. Üst düzey seramik ürünler, onlara önemli bir değer katan güçlü özelliklere sahiptir. Günümüzde bu seramikler “ileri teknoloji seramikleri” veya “ince seramikler” başlığı altında toplanmıştır (Yıldırım, 2010).

Teknik olarak gelişmiş seramik malzemeler, geleneksel versiyonlardan daha üstün kabul edilir. Daha ince yapıları sayesinde daha yüksek performansa sahiptirler. Bu malzemelerin diğer isimleri arasında yüksek performanslı seramikler, mühendislik seramikleri ve ultra seramikler bulunur. Geleneksel versiyonları oluşturmak için sentezlenmiş gelişmiş seramik malzemeler kullanılır. Gelişmiş seramik hammaddeleri yapay yöntemlerle oluşturur ve bu malzemeler belirli fiziksel özelliklere sahip olacak şekilde üretilirler (Yılmaz, 2004)

2.1.1 İleri Teknoloji Seramikleri

2.1.1.1 İleri teknoloji seramiklerinin özellikleri

Seramikler, inorganik, metalik olmayan çok kristalli malzemelerin tozlarının oda sıcaklığında şekillendirilmesiyle oluşturulur. Tipik fiziksel özelliklerini yüksek ısı fırınlarında piştikten sonra kazanmaktadır. Olağanüstü elektriksel, termal ve mekanik özelliklerinden dolayı teknoloji alanında artan öneme sahiptirler. Yeni teknolojiler seramik imalat sanayisini değiştirmeye devam etmektedir. Devam eden gelişimler, geleneksel seramiğin öneminin bir kısmını kaybetmesine neden olur. Ancak o zamandan beri önemleri azalsa da teknoloji ile birlikte farklı özelliklerde yeni seramikler ortaya çıkmıştır (Geçkinli, 1992).

Yüksek teknoloji ürünü seramikler, saf sentetik kimyasallarla üretilen seramik grubunun yeni üyesidir. İlk zamanlarda yüksek performanslı endüstriyel amaçlar için üretilirken, son zamanlarda malzemelerdeki çelişkili özellikleri birleştirmek için çok amaçlı seramikler geliştirilmiştir. Bu, tipik olarak işlevsellik veya performans adına bir özelliğin diğerini kabul edecek şekilde azaltılmasıyla veya farklı malzemeleri bir bileşik yapı oluşturmak için birleştirilerek elde edilmesiyle oluşmuştur. Daha büyük bileşenlere nazaran daha küçük parçalar daha fazla verime sahip olabilir. Bunun nedeni ise birçok küçük bileşenin özelliklerinin fazla olmasıdır. Dolayısıyla çelişkili özellikler farklı yollar ile geliştirilebilmektedir (Salamon, 2014; Brook, 1991).

2.1.1.2 İleri teknoloji seramikleri ve sınıflandırılması

İleri seramikler;

- Fonksiyonel seramikler
- Yapısal seramikler olarak sınıflandırılır.

Elektronik, elektromekanik, optik, fotoelektrik veya manyetik fonksiyonları olan seramiklere fonksiyonel seramik denir. Yapısal seramikler ise daha karmaşıktır ve özellikle yüksek sıcaklıklara dayanıklı makine vb. bileşenlerini içerir. Gelişmiş

seramiğin işlevleri ve uygulama örnekleri Cizelge 2.2'de, özellikleri ise Cizelge 2.3'te gösterilmiştir. (Salamon, 2014; Brook, 1991).

Çizelge 2.2. İleri teknoloji seramiklerin fonksiyonları ve uygulama alanları (İleri malzeme teknolojileri sektör raporu, 2005).

UYGULAMA KONUSU	MALZEME	UYGULAMA ÖRNEĞİ
Mekanik İşlevler		
Yüksek sıcaklık dayanımı Kesme dayanımı Yağlama Aşınma dayanımı	Silikon nitrür, silikon karbür, bor nitrür, titan karbür, titan nitrür, tungsten karbür, bor karbür Bor nitrür, molibden disülfat Alümina, bor karbür	Gaz türbini, dizel motor Kesici takımlar Katı yağlayıcılar Bilyalar, mekanik sızdırmazlık, deliciler
Isıl İşlevler		
Isıl dayanım Isıl yalıtım Isıl transfer	Alümina, Silikon nitrür, silikon karbür Titan oksit, alüminyum nitrür, zirkonyum oksit Bor oksit, alümina	Elektrotlar Yalıtkan, izolatör, nükleer reaktör Elektrik – elektronik parçalar, radyatör
Optik İşlevler		
Işık geçirgenlik Işık indükleme Floresans	Alümina, itriyum oksit, baryum oksit Silikon oksit Galyum-arsenit seramikleri	Sodyumlu lambalar, optik mercekler Fiber optik, fotoalgılayıcı yarıiletken lazerler, diyotlar
Manyetik İşlevler		
Manyetizma Biyolojik işlevler Biyoseramikler	Demir oksit, baryum oksit Alümina, apatitler	Ferrit mıknatıslar, manyetik teyp Yapay diş, kemik
Elektriksel İşlevler		
Süperiletkenlik Yarıiletkenlik Piezoelektriklik Yalıtım İletkenlik İyonik iletkenlik	İtriyum-baryum-bakır oksit çinko asit, baryum titanat kurşun zirkonat titanat alümina, silikon karbür baryum titanat zirkonya, beta-alümina	Mıknatıs Varistör, güneş pili, algılayıcı Ateşleme cihazı Devre elemanları Mikrokondenser Algılayıcı, katı elektrolit
Kimyasal İşlevler		
Soğurma Katalizör korozyon	Köpük silika, alümina Zeolit Zirkonya, alümina	Soğurucu, katalizör taşıyıcı, biyoreaktör katalizör, elektrotlar Katalizör elektrotlar

Çizelge 2.3. Bazı ileri teknoloji seramiklerin mekanik özellikleri (Yılmaz, 2004).

Malzeme	Ergime Sıc. (°C)	Yoğunluk (g/cc)	Mukavvemet (MPa)	Elastik Modül (Gpa)	Sertlik (Kg/mm²)	Tokluk (K_{IC})
<i>Pencere Camı</i>	500	2,2	48	7,2	650	0,5
<i>Al₂O₃</i>	2050	3,96	250-300	36-40	1000-1600	4,5
<i>ZRO₂</i>	2700	5,6	113-130	17-25	1200	6-9
<i>SiC</i>	3000	3,2	310	40-44	2800	3,4
<i>Si₃N₄</i>	1900	3,24	410	30,7	1300	5.0
<i>WC</i>	2700	15,7	350-550	54-70	2000	5-8

2.2 Seramik Biyomalzemeler

Biyomalzemeler, özellikle tıbbi bir cihazın parçası olarak insan vücuduna giren malzemelerdir. Bu doğal veya sentetik malzemeler, canlı dokuya girmeye uygun olmalı ve belirli bir işlevi yerine getirmelidir. Biyomalzemelerin mekanik, kimyasal, fiziksel ve biyolojik gibi bazı özellikleri mevcuttur. Vücudun çeşitli yerlerinde kullanılan bu malzemelerin her bir amaca uygun olması için, canlı doku ve organlarla teması tolere edecek kadar esnek olması gerekir. Her uygulamanın ihtiyaçlarına en iyi şekilde hizmet verebilmek için bu alandaki değişiklikler gereklidir. İdeal bir biyomedikal malzeme aşağıdaki niteliklere sahip olmalıdır:

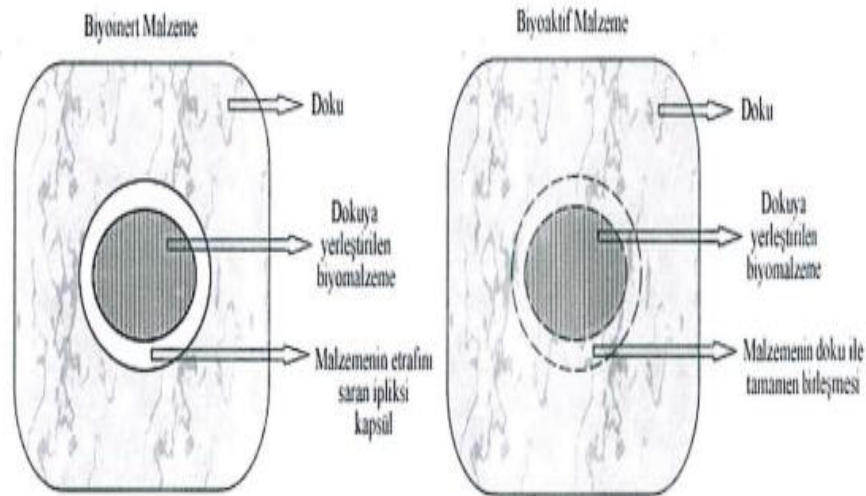
- Olumsuz doku reaksiyonlarını önleyen biyouyumlu kimyasal bileşim,
- Bozulmaya karşı maksimum direnç (örn. metallerin korozyon direnci veya polimerlerin biyolojik bozunmaya gösterdiği direnç)
- Eklem dayandığı döngüsel yükleme için kabul edilebilir bir mukavemet sağlamalı,
- Düşük modül, (kemik erimesini en aza indirir)
- Yüksek aşınma direnci (Aşınma hasarı oluşumunu en aza indirmek için) (Kamburoğlu, 2019).

Son yıllarda seramikler, özellikle yaşam kalitesini iyileştirmek, vücudun hastalıklı veya hasarlı kısımlarını onarmak veya yeniden yapılandırmak için biyoseramik olarak kullanılmaktadır. En sık kullanılanları ise alümina, zirkonya ve birkaç gözenekli seramiktir.

Biyoseramiklerin en önemli özellikleri;

- Toksik, Kanserojen ve alerjik değildir.
- Biyouyumludurlar
- Konağın yaşam döngüsü boyunca biyolojik olarak işlev görebilir (Kamburoğlu, 2019).

Seramik biyomalzemeler kendi içerisinde biyoinert ve biyoaktif olarak iki gruba ayrılır. Metal iyonları ile oksijen iyonlarının belirli bir kristal yapı oluşturulması sonucu oluşan polikristal seramikler biyoinert malzeme olarak adlandırılır ve onları çeşitli amaçlar için yararlı kılan belirli özelliklere sahiptirler. Biyoinert malzemelerin bazı önemli örnekleri alümina ve zirkonyadır. Biyoaktif seramikler ise kemik ve diğer organik malzemelerle bağlanan seramikleri ifade ederler. Şekil 2.1’de biyoinert malzeme ile biyoaktif malzemenin dokularla olan ilişkisi aktarılmıştır (Apaydın, 2018).



Şekil 2.1 Biyoaktif ve biyoinert malzemelerin dokuyla ilişkisi (Yelten, 2010)

Biyobozunur malzemeler, insan vücudu ile temas ettikten sonra belirli bir süre içinde bozunan, çözünen veya emilen maddeleri ifade eder. Biyobozunur malzeme vücut ortamında çözünür ve malzemeyi çevreleyen dokuyu değiştirir (Apaydın, 2018).

Biyoseramik malzemelerin dezavantajları;

Seramikler, mukavemetleri ve çatlamaya karşı dirençleri açısından dezavantajlıdır. Bu durum cerrahi operasyondaki uygulamayı zorlaştırmaktadır. Bu nedenle hem metallerin hem de seramiğin özelliklerini birleştirmek, bu malzemelerin cerrahi operasyonlarda ortaya çıkardığı zorlukların üstesinden gelmenin etkili bir yoludur (Apaydın, 2018).

2.2.1 Biyouyumluluk

Bir materyalin bir hastanın vücuduyla uyumlu olması için belirli bir durumda performans gösterme ve uygun bir konak tepkisi üretme kabiliyetine sahip olması gerekir. Ayrıca biyouyumluluk, vücudun kemiği, yumuşak dokuları ve kan plazması ile etkileşime girmesi gereken tüm tıbbi materyaller de sahip olması gereken temel özelliktir (Gonzalez, 2009).

2.3 Silisyum Karbür (SiC)

Silisyum karbür doğada bulunamaz iken silisyum ve karbon, SiC'nin bileşenlerinden ikisidir ve doğada kolayca bulunur. SiC laboratuvarında oluşturulan mineral ismi moissanit olan sentetik bir materyalin kısaca ifade edilme şeklidir. SiC Acheson Prosesi prensibine dayanarak üretilir. Yüksek saflıkta ki silika kumu, kok kömürü (düşük kükürt oranlı), tuz ve ahşap talaşı ile karıştırılıp uzun kalıplar haline getirilir. Kalıbın iki ucuna yerleştirilen karbon elektrotlardan elektrik geçirilerek kok kömürü dirençsel olarak elektrikli fırında 2500°C'ye kadar ısıtılır. Bu işlem 24 ila 48 saat boyunca tekrarlanır. Bu süre zarfında kok, silika ve silisyum oksit formlarıyla reaksiyona girer ve SiC ortaya çıkar (Çelickioğlu, 2012).

Silisyum karbür, birçok farklı kullanım ve özellik ile birçok farklı biçimde karşımıza gelir. 1970'lerin yeni mühendislik uygulamalarının icadı sayesinde kullanımı genişlemiştir. Silisyum karbürün popüler uygulamalarından biri, daha teknik yapılarda tungsten karbürün kullanılmasıdır. Diğer oksit olmayan seramik ile karşılaştırıldığında, silisyum karbürün üretimi daha ucuzdur ve kullanımı için rekabet artmıştır. Bunun nedeni, silisyum karbürün silisyum nitrürden daha ucuz malzemelerden üretilmesidir ve bu da maliyetin daha uygun olması anlamına gelmektedir (Akarsu, 2009).

Silisyum karbürün bazı genel özellikleri Çizelge 2.4'te bulunabilir.

Çizelge 2.4. Silisyum karbür özellikleri (Akınalp, 2019)

Özellikler	Değerler
Yoğunluk, gr/cm^3	3.1-3.22
Silisyum karbür içeriği, %	97.80
Karbon içeriği, %	0.20-0.80
Renk	Siyah
Eğme mukavemeti, Mpa :	
Oda sıcaklığında	400-410
800°C'de	400-410
Sertlik, kg/mm^2	3100

Sinterlenmiş silisyum karbür, en dayanıklı seramik malzemelerden biridir. Mukavemetinin sınırlandırılması, kristalit topaklaşması, aşırı büyüme, uzun taneler ve gözeneklilik gibi farklı kusurlardan kaynaklanmaktadır (Akınalp, 2019).

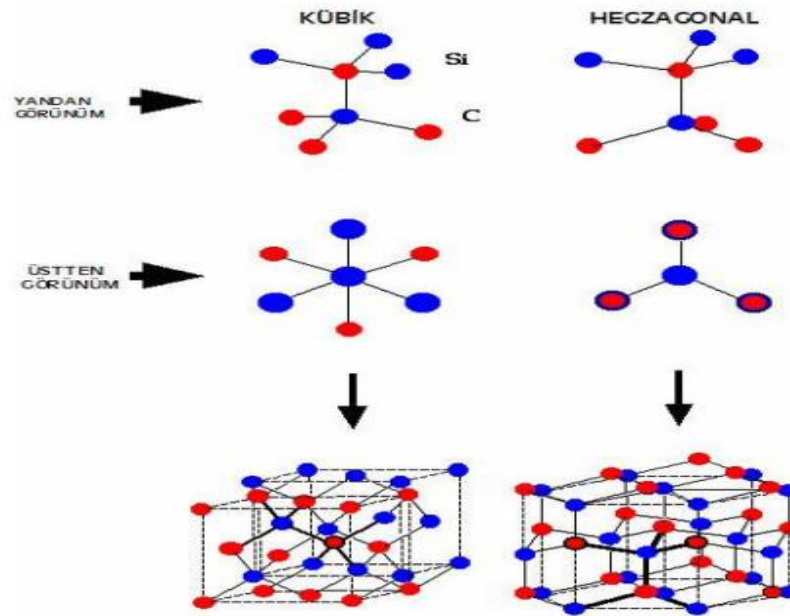
2.3.1 Silisyum karbürün kristal yapısı

Eşsiz özelliklere sahip diğer malzemelerle karşılaştırıldığında silisyum karbür yapısı ve özellikleri bakımından kolayca anlaşılabilir ve üzerinde çalışılan izotropik bir malzemedir. Bu yapıya ait özelliklerinin bütün doğrultularda aynı olduğu bilinmektedir (Akınalp, 2019).

Silisyum karbür, sentetikten oluşan bir malzemedir. Sırasıyla 1400 ila 1800 santigrat derece ve 2000 ila 2400 santigrat derece sıcaklıkta sırasıyla “ β ” kübik yapı ve “ α ” hegzogonal yapı olarak görünen iki farklı yapıya sahiptir (Bakar, 2009).

Hegzogonal katmanlardan oluşur; altıgen bir düzlemde düzenlenmiş bir karbon atomu tabakası, altıgen bir düzlemde düzenlenmiş başka bir silikon atomu tabakasının üstüne oturur. Her bir karbon atomu, tetrahedral formasyonda düzenlenmiş dört silisyum atomu ile çevriliyken, her silisyum atomu, tetrahedral formasyonda düzenlenmiş dört karbon atomu ile çevrilidir (Öğünç, 2006).

Silisyum karbür, karbon ve silikon atomları arasında güçlü bir kovalent bağa sahip yarı iletken bir malzemedir. Temel birim hücrede incelendiğinde kristal yapısı diğer elementlerinkine benzemektedir; her atom, başka bir element çiftinden yapılmış dört atomlu bir tetrahedron ile çevrilidir. Her element, birbiriyle ve aynı tetrahedrondaki başka bir atomla bir çift elektron paylaşır. Şekil 2.2’de SiC kristal yapısı şematize edilmiştir (Akınalp, 2019).



Şekil 2.2. Kübik ve hegzogonal SiC yapısı (Akınalp, 2019)

2.3.2 Silisyum karbür malzemesinin kullanım alanları

Silisyum karbür saflık derecelerine göre üç ana gruba ayrılır. Yüksek arılıkta ki silisyum karbür mühendislik seramiklerinde sinterleme amacıyla kullanılırken, saflık % 97,5'in altında ise refrakter ve abrazif malzeme amaçlı kullanılır. Saflık % 90'ın düştüğünde metalürjik uygulama alanlarında kullanılır. Silisyum karbür uygulamaları her geçen gün artmaktadır. Yüksek performanslı seramiğin en yaygın kullanımı, sinterlenmiş silisyum karbürdür. Silisyum karbür bu özelliklerinden ötürü birçok endüstri de kullanılır. Kimyasal proses endüstrisi için hidrosiklonlarda, roket nozüllerinde, bilgisayar çiplerinde ve günümüzde seramik motorlar ve turboşarjlar için uygun testlerde, yağ depolarında, yakıt pompaları ve diğer ulaşım ekipmanlarında, aşınmaya ve erozyona karşı dirençli olması sebebiyle havacılık endüstrisinde kullanılmaktadır. Silisyum karbür, savunma sanayinde de birçok kullanım alanına sahiptir. Yüksek termal iletkenliği olduğu için uzay teknolojisinde yansıtıcı bir malzeme olarak kullanılır (Bakar, 2009).

2.4 Zirkonya

Zirkonya, son zamanlarda birçok bilimsel ve teknolojik projede kullanılması nedeniyle devrim niteliğinde bir malzemedir. Geleneksel seramik malzemelere zirkonya eklenmesi ileri teknoloji malzemesi olarak kabul edilmiştir ve kabul edilme sebeplerinden bazıları aşağıda sıralanmıştır;

- Yüksek erime sıcaklığı,
- Asidik kimyasallara ve cüruflara karşı yüksek dayanım,
- Korozyona, erezyon ve aşınmaya dayanaklılık
- Düşük termal genleşme katsayısına sahiptir (termal şoka karşı direnç),
- Yüksek kırılma indeksi ve yüksek sıcaklıklarda iyonik olarak iletken olması (Aktaş, 2002).

2.4.1 Zirkonya seramiklerin kullanım alanları

Zirkonya, mukavemeti, tokluğu ve kimyasal inertliği gibi özellikleri nedeniyle birçok gelişmiş teknik uygulamada kullanılmaktadır. Bunlar;

- Refrakter malzeme olarak,
- Isıtma elemanı olarak,
- Yalıtım malzemesi olarak,
- Aşındırıcı kesici takımların üretimi,
- Ekstrüzyon kalıplarında ve aşınmaya dayanıklı makine parçaları,
- Oksidasyona dayanıklı seramik kaplamalarda ve ısı bariyeri uygulamaları,
- Seramik filtre üretimi,
- Yakıt hücreleri,
- Piezoelektrik, elektro-optik devreler ve kapasitörler,
- Katı elektrolitler ve oksijen sensörlerinin imalatı,
- Dizel ve ısı motorları (Sağlam, 2005).

2.4.2 Zirkonyum' un yapısı ve özellikleri

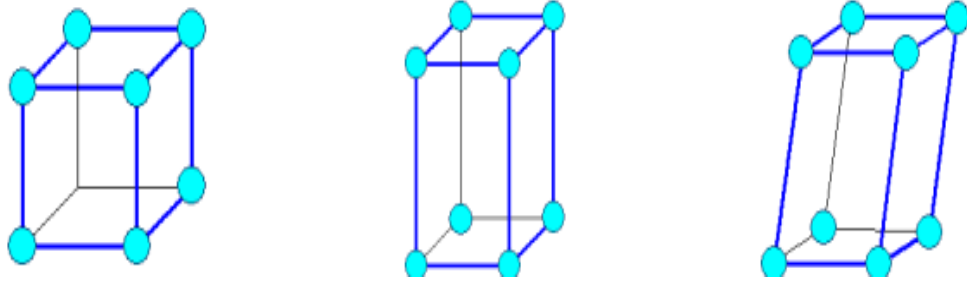
Zirkonyum, periyodik cetvelde sembolü “Zr” olan, 40 atom numarasına sahip ve atom kütlesi 91,22 olan metal bir elementtir. Periyodik Cizelgede D geçiş metali grubunda yer alır. Gümüş-beyaz görünümde, oda sıcaklığında katı ve yoğundur. Doğada nadiren tek başına görünür; bunun yerine genellikle diğer metallerle karıştırılmış olarak bulunur. Yoğunluğu 6.49 g/cm³'tür ve 1852°C'de erir ve kaynama noktası 3580°C'dir (Şivet, 2014).

Zirkonya (ZrO₂), tabiatta badeleyit ve zirkon şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Bu element farklı sıcaklıklarda farklı kristal yapılara oksitlenerek popüler bir teknolojik seramik haline gelir (Yurdakul ve ark., 2019).

Benzer kimyasal özelliklere sahip üç kristal forma sahiptir. Bunlar; Monoklinik, Tetragonal ve Kübik faz şeklindedir. Monoklinik zirkonya oda sıcaklığında saftır. Bununla birlikte, 1170 santigrat dereceye kadar stabildir bu sıcaklığın üzerine ısıtıldığında tetragonal faza durumuna dönüşür. 2370 °C 'nin üzerine çıktığında tetragonal faz kübik faza geçer. Bu üç fazın kristal yapısı, kafes parametreleri, yoğunluk ve faz dönüşüm sıcaklığı Şekil 2.3'de karşılaştırılmıştır. Yüksek basınç altında ortorombik faz adı verilen dördüncü bir fazın oluşabileceği de belirtilmektedir (Küçüköğlü, 2008).

Kristal Yapı		Kafes Parametreleri			Yoğunluk (gr/cm ³)	Faz Dönüşüm Sıcaklığı (°C)
Monoklinik	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	5,156	5,191	5,304	5,83	<1170
Tetragonal	$a = b \neq c$ $\alpha = \gamma = \beta = 90^\circ$	5,094	5,094	5,177	6,1	1170-2370
Kübik	$a = b = c$ $\alpha = \gamma = \beta = 90^\circ$	5,124	5,124	5,124	6,090	2370-2680

Şekil 2.3 Zirkonya'nın fiziksel özellikleri (Balci, 2019)



Şekil 2.4. Kübik Faz - Tetragonal Faz- Monoklinik Faz (Bultan ve ark., 2010)

Kübik sistemde bütün eksenler birbirine diktir ve uzunlukları eşittir . Tetragonal kristal sistemde, iki eksen eşit uzunluktadır, ancak üçüncü eksen onlardan daha uzundur ve tipik şekli bir kare prizmadır Monoklinik sistemde, farklı uzunluklarda üç eksen vardır ve tipik şekil, dikdörtgen tabanlı eğik bir prizmadır (Şekil 2.4)(Bultan ve ark., 2010).

2.4.3 Tamamen stabilize zirkonya (TSZ)

Tamamen kararlı ZrO_2 , mikro yapısı tamamen kübik bir faza sahiptir. Sinterleme sıcaklığı sadece kübik fazdan bulundurduğu için yüksektir ve 1600-1800 santigrat derece arasındadır. Yüksek iyon iletkenliğine sahiptir. TSZ seramikleri düşük mekanik özelliklere sahiptir ve darbelere karşı çok hassastır. Isı değişim dirençleri zayıftır (Agac, 2017).

2.4.4 Kısmi stabilize zirkonya (PSZ)

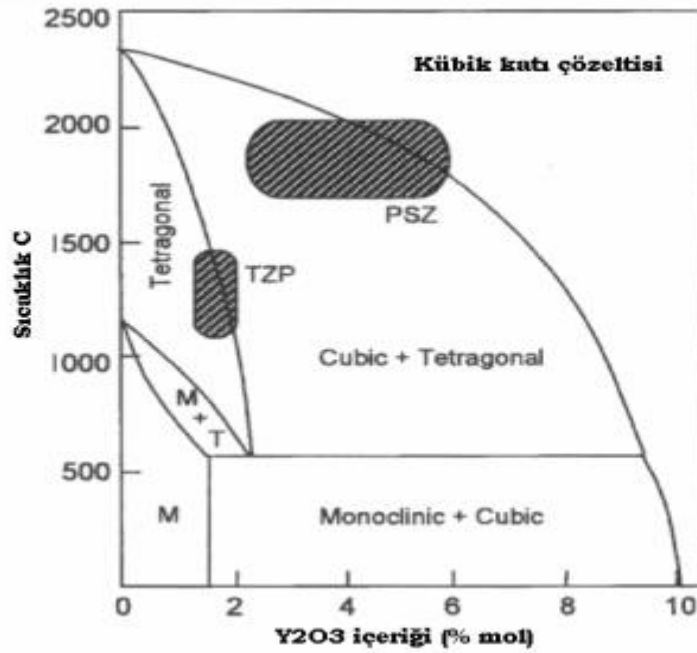
PSZ sisteminde, ince t- ZrO_2 çökeltileri büyük c- ZrO_2 tanecikleri içinde yer alır. Genel olarak PSZ, TZP'ye kıyasla daha iri taneli bir mikro yapıya sahiptir. Tipik olarak aşınan parçalar PSZ'den yapılabilir. Piyasada bulunan PSZ seramiklerini stabilize etmek için MgO_2 ve CaO kullanılır ve MgPSZ ve Ca-PSZ olarak adlandırılırlar (Şivet, 2014).

2.4.5 Yttrium tetragonal zirkonya polikristalin (Y-TZP)

Zirkonyalar, oda sıcaklığında stabil olmazlar ve oda sıcaklığında çok yüksek bir sertlik değerine sahiptirler. Bunun nedeni, seramik malzemenin tetragonal fazda olmasıdır. Ancak 200°C ve 500°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, kristal yapısı değişmektedir. Tetragonal zirkonyum oksit partiküllerinde meydana gelen mikro yapı, tamamen stabilize zirkonya ve kısmi stabilize zirkonyaya göre sinterleme sıcaklığı daha düşüktür. Kompozisyon, difüzyon oranının yavaş olması sebebiyle değişmez ve tetragonal fazda oda sıcaklığın kadar yarı kararlı bir şekilde kalır. Bu durum yttrium tetragonal zirkonya polikristaline yüksek tokluk ve kırılmalara karşı direnç sağlar. Bu fazdaki bir seramiği stabilize etmek için zirkonyum tabanına %3.5-6 oranında itriyum ilave edilir. Y_2O_3 bu tür malzemelerin üretiminde yaygın olarak bir stabilizatör olarak kullanılır (Şivet, 2014).

2.4.6. Zirkonya ile toklaştırılmış seramikler (ZTC)

Bu malzemeler birçok küçük zirkonya partikülü içeren seramik bir matrise karıştırılmasıyla meydana gelir. Zirkonya takviyeli alümina, yüksek mukavemetli ve düşük termal genleşmeli bir matrise karıştırılmış zirkonyadan oluştuğu için en çok tercih edilme sebebi olmuştur. Ölçüldüğünde, her karışım farklı bir termal genleşme katsayısı gösterir vesinterleme sıcaklığından soğutma işlemi sırasında stabilitelelerini korumaya yardımcı olan artık gerilimler sergilerler. Zirkonya ile Sertleştirilmiş Seramikler, ısıl işlem görmüş fırınlarda kesici takımlarda, hassas silindirlerde ve konveyör zincirlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Arın, 2007).



Şekil 2.5. ZrO₂-Y₂O₃ Faz Diyagramının ZrO₂'ca Zengin Bölgeleri (Arın, 2007)

Şekil 2.5'te ZrO₂ - Y₂O₃ Faz Diyagramı gösterilmiştir. Seramik malzemeler tetragonal fazdan monoklinik faza geçtiğinde, farklı termal döngüler monoklinik fazın özelliklerini etkileyebilir. Tetragonal fazı oluşturmak için zirkonya seramik bileşimlerine itriyum veya seryum dioksit eklenebilir. Hangi katkı maddesinin kullanıldığına bağlı olarak itriya ile stabilize edilmiş bir zirkon seramik üretilebilir.

Sinterlendikten sonra, bu aynı seramik bileşimler daha sonra tetragonal fazda olabilir. Elastik veya kimyasal yollarla enerji eklemek, kimyasal veya ruhsal bir evrimin monoklinik bir şekle dönüşmesine neden olabilir. Sıcaklık, nem ve tane boyutundaki değişikliklerin yanı sıra oksijen boşlukları, tanenin şekli ve artık gerilim ve mikroyapının varlığı enerji seviyelerini etkiler. Ticari mühendislik seramiklerinde yaygın olarak kullanılan kompozisyon setleri taramalı alanlardan görülebilmektedir (Şekil 2.5)(Arın, 2007).

2.5 Seramiklerin Mekanik Özellikleri

2.5.1 Sinterleme

Sinterleme, parçacıkların birbirine bağlanması için malzemeleri ısıtmayı baz alan işlemdir. Isıtma işlemi bağ oluşturarak malzemenin yoğunluğunu ve mukavemetini önemli ölçüde artırır. Sinterleme genellikle malzemelerin erime noktasının altında gerçekleşir. Sıcaklık yükseldiğinde, kohezif kütlenin yoğunluğu artarken gözenekliliği azalır. Sinterleme sırasında difüzyon hızı arttıkça, birbirine kenetlenen tozlar yüzeylerindeki temassız alanlardan birbirlerine difüze olarak üst üste geldikleri bir boyun oluştururlar. Bu, daha küçük gözeneklere ve içerideki nemin çökmesine neden olur. İdeal koşullarda sinterlemeden sonra malzeme katı bir kütleyle sertleşir. Bu işlem pekişmiş malzeme kütlesi ile sonuçlanır (Yılmaz, 2011).

2.5.2 Sinterleme değişkenleri

Toz malzeme mikro yapılarının iki farklı değişken tarafından belirlendiği görülmektedir. (Çizelge 2.5) Bunlar, malzemelerin özelliklerini ve işlemin gerçekleştirilme şeklini, diğer bir belirgin kategori, malzeme özelliklerine ve sinterleme sonucunda nasıl değiştiklerini içerir (Akınalp, 2019).

Çizelge 2.5. Sinterleme ve mikroyapıya etki eden parametreler (Akınalp, 2019).

Malzemenin bağlı olduğu değişkenler:	Toz: Şekil, boyut, boyut dağılımı, yığılma, dolaşıklık Kimya: bileşim, safsızlıklar, stokiyometri olmayan, homojenlik
Prosesin bağlı olduğu değişkenler:	Sıcaklık, zaman, basınç, atmosfer, ısıtma/soğutma hızı

2.5.3 Sinterleme aşamaları ve sinterleme çeşitleri

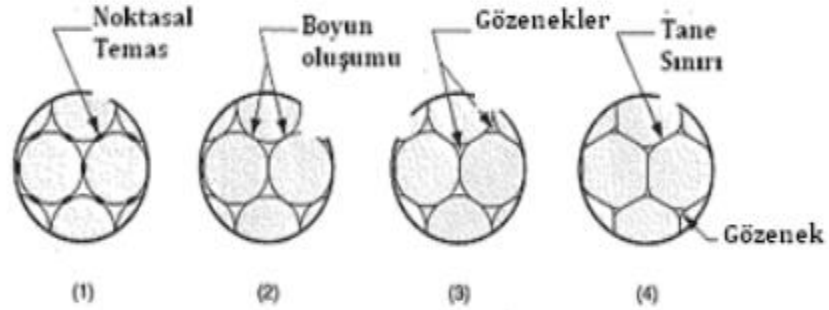
Başlangıçta taneler birbirine doğru hareket ederken yakın mesafedeki temas noktaları artar. Artan temaslar boyun oluşmasını sağlar çünkü bölgelerde yüzey enerjisi yüksek olduğundan dolayı malzeme tanışımını kolaydır (Çağlar, 2015).

Sertleşmenin ikinci aşamasına ara aşama denir. Bu aşamada, parçalar arasında daha küçük boyun bölgeleri oluştuğunda nesnenin ortasındaki porlar daralır ve partiküller birbirine yakınlaşır. Porların azalması çekme oranının artmasına neden olur. Gözeneklilik azaldıkça büzülme kademeli olarak artar (Çağlar, 2015).

Son aşamada, taneler arasındaki sınırlar difüzyon yoluyla parçacıkların gözeneklerini kapatmasına neden olur. Bu süreç, gözeneklerin ve tane büyümesinin tamamen kapanmasını sağlamak için tane sınırlarının yeniden yapılandırılmasına ve tane büyümesinin yönlendirilmesine yardımcı olur. Tane büyümesi hızlı olursa tane sınırları daha hızla hareket eder ve taneler arasında gizli porlar kalır. Tane büyümesinin devamı durumunda, porların eliminasyonu, gözenekler tane sınırlarından uzaklaşacağı için mümkün olmayacaktır. Çizelge 2.6'da sinterleme aşamaları özetlenmiş, Şekil 2.6'da şematize edilmiştir (Çağlar, 2015).

Çizelge 2.6. Sinterleme kademeleri ve meydana gelen değişimler (Çağlar, 2015)

Sinterleme Aşamaları	Fiziksel Değişimler
1. Aşama (Başlangıç Aşaması)	Partiküllerin yeniden düzenlenmesi
	Partiküller arası boyun oluşumu
2. Aşama (Ara Aşama)	Boyun bölgesinin gelişimi
	Tane büyümesi
	Yüksek oranda çekilme
	Devamlı porların oluşumu
3. Aşama (Son Aşama)	Tane büyümesinin devam etmesi
	Devamsız porların oluşumu
	Tane sınırı porlarının eliminasyonu



Şekil 2.6. Sinterlemenin aşamaları (Başar, 2011)

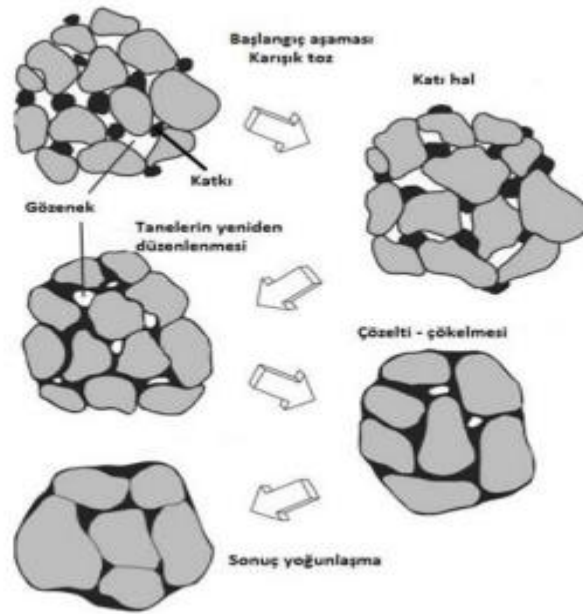
2.5.3.1 Katı faz sinterleme

Toz metalürjisi katı faz tekniklerinde en geniş kullanım alanına sahip uygulamadır. Katı fazda sinterlemenin avantajları düşük sıcaklıklar, düşük takviye matris tepkimesi ve bu özelliklere bağlı olarak yüksek mekanik özellikler sayılabilir. Üretim maliyetlerine ek olarak, toz bazlı yöntemlerin diğer üretim biçimlerine göre daha fazla maliyet gerektirmesi ve tozların neden olduğu patlayıcı ve yanıcı özellikleri dezavantajları arasındadır (Uraylı, 2018).

2.5.3.2 Sıvı faz sinterleme

Kompozit malzemeleri işlerken ve sıcaklığı değişen katıları eritirken, malzemeyi ıslatmak için bir sıvı ara faz gerekir. Malzemenin sıcaklığı arttıkça,

yumuşama başlar, parçacıklar kısmen sıvı faza çözülür. Bir zamanlar sıvı olan malzeme yoğun bir katıya dönüştüğünde kalan boşluklarda ek taneler büyür, porlar dolmaya devam eder. Böylece katı malzeme sıvı malzeme ile kaplanır sonuç olarak arzu edilen özellikleri sinterleme kolaylığı ile birleştiren nihai bir ürün oluşturulur. Bu, tüm yapı boyunca bir kılcal etki oluşmasına yol açar ve daha düşük sinterleme sıcaklıklarında daha etkili bir sinterleme işlemi ile sonuçlanır. Sıvı faz sinterlemesi şeması Şekil 2.7’de gösterilmiştir (Uraylı, 2018).



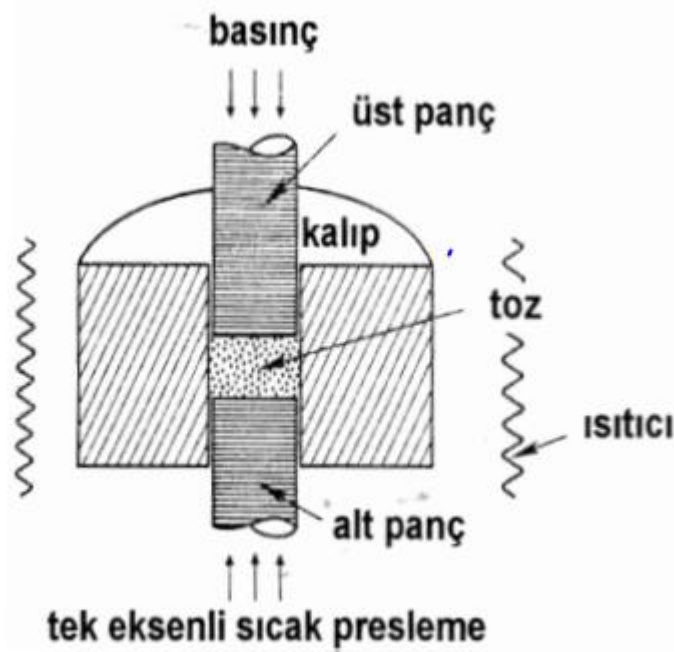
Şekil 2.7. Sıvı faz sinterleme mekanizmasının aşamaları (Uraylı, 2018)

2.5.3.3 Basınç yardımlı sinterleme

Sinterlemenin hem katı hem de sıvı fazlarında malzemenin preslenmesi, yetersiz yoğunlaştırmanın olduğu durumlarda kullanılan basınç uygulamasıdır. Basınçlı sinterleme, sıcak presleme, sıcak izostatik presleme en çok kullanılan yöntemlerdir. Basınç destekli sinterlemenin artan itici gücü, tane büyüme oranlarını yavaşlatmaz. Diğer sinterleme yöntemlerine göre daha yüksek üretim maliyetine sahiptir. Genellikle yeni malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesi için kullanılan bir yöntemdir ayrıca basınçsız sinterleme yöntemlerine kıyasla daha iyi sonuçlar verir (Çelik, 2010).

2.5.3.4 Sıcak presleme

Sıcak presleme, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi sert bir kalıp içinde aksel basınç kullanılarak yapılır.

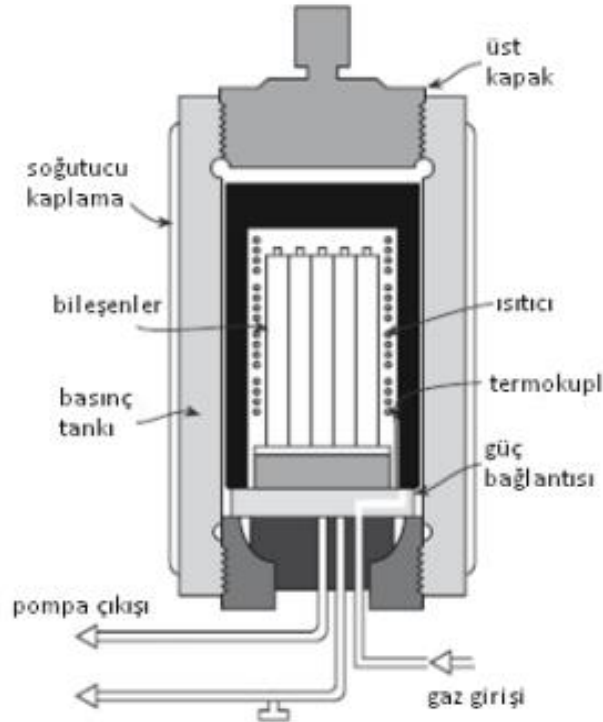


Şekil 2.8. Sıcak Preslemenin Kesit Görüntüsü (Özüdoğru, 2008)

Üst zımba, bir hidrolik sistem vasıtasıyla alt zımbaya basınç uygular. İki metal parça birbirine sürtünme yapsa dahi de birbirlerini iterek geçmezler. Bunun yerine kuvvet, alt zımbanın ortası ve yanları arasında eşit olarak dağılır. Bu, aksel ve radyal gerilimdeki farklılıkların bir sonucu olarak toz yüzeylerinin bir miktar bozulmasına izin verir ve kayma bölgesi oluşturur. Proses esnasında baskın süreçler tane büyümesi ve hacim difüzyonudur. Bor nitrür ve tunsten karbür dahil olmak üzere grafit ötesinde kullanılan malzemelerdir. Kalıp malzemesi olarak grafit kullanılması sayesinde sistemde yüksek sıcaklıklar mümkündür. Kritik sıcaklık farklılıkları proseste olumlu yönde etkiler sağlar. Sistem Şekil 2.8'de gösterilmiştir (Özüdoğru, 2008).

2.5.3.5 Sıcak izostatik presleme (HIP)

Sıcak izostatik presleme yönteminde preslemeyi tamamlamak için toz, deforme olabilen bir kaba yerleştirilir. Daha sonra vakum uygulanarak kap kapatılır ve istenilen basınç ve sıcaklık uygulanarak kap bir sisteme konur. Bu işlem Şekil 2-9'da örnek olarak gösterilmiştir. Alternatif olarak, numuneler geleneksel sinterleme yoluyla önceden ön yoğunlaştırıma ve gözenek kapatma gerçekleştirilebilir. Bir kompresör sistemde basınç oluşturan gazı sağladığında malzemeye konik basınç uygulanır. Numunenin sinterleme sıcaklığına kadar ısıtılması ek adımıyla yüksek bir basınca (birkaç bin psi) ulaşılır. Bunun nedeni, bir gaz kompresörünün sistem için basınçlı gaz sağlamasıdır. Basınçlı gaz uygun bir basınca ulaştığında, kalıbı numunenin etrafında kapatmaya zorlar ve numuneye eşit basınç uygular (Özüdoğru, 2008).



Şekil 2.9. Sıcak izostatik presleme örneği ile bir basınç kabı (Özüdoğru, 2008)

2.5.4 Yoğunluk

Sinterlenmiş numunelerin yoğunluk hesabı yapılırken Arşimet prensibi kullanılmıştır. Bunun için numuneler havada kuru olarak tartılır, daha sonra hassas terazi ile saf sudaki ağırlıkları ölçülür ve Denklem 2.1 yardımıyla kütle yoğunlukları hesaplanır (Yıldırım, 2010).

$$d_b = \frac{m_k}{m_k - \left(\frac{m_s}{d_{su}}\right)} \quad (2.1)$$

d_b = bulk yoğunluğu (sinterleme öncesi yoğunluk), gr/cm³

m_k = numunenin kuru ağırlığı, gr

m_s = numunenin saf su içindeki ağırlığı, gr ve

d_{su} = suyun yoğunluğu, gr/cm³ (Yıldırım, 2010)

2.5.5 Sertlik

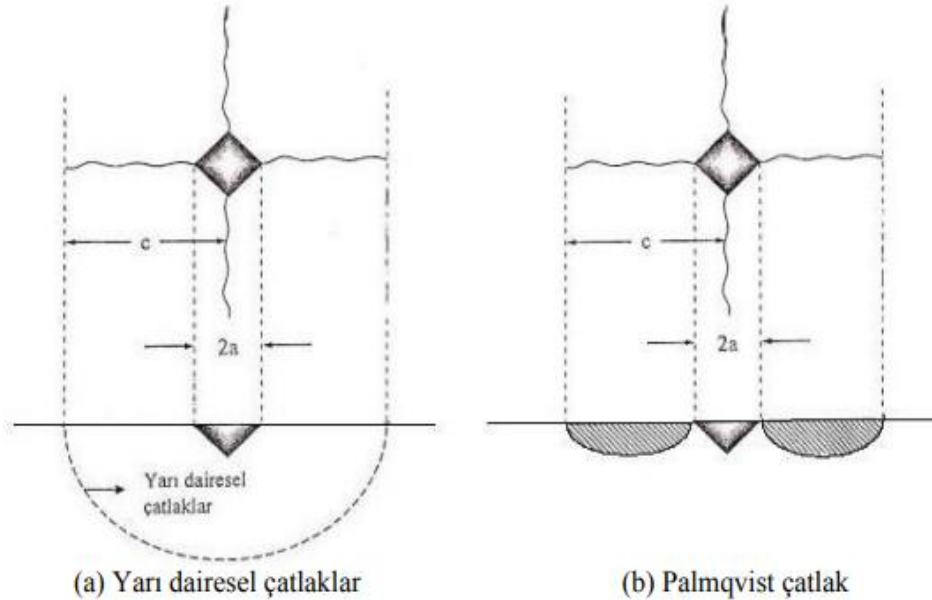
Sertlik, aşınmaya ve kırılmaya karşı dirençli malzemeler üzerinde ölçülen bir niceliktir. Knoop veya Vickers sertlik testi ile ölçümü yapılır. Elmastan yapılmış piramit şeklinde ki batıcı ucun yük uygulaması olayıdır. Belirli bir yükte malzemenin yüzeyine bastırılan batıcı uçun eşkenar dörtgenin iki köşe uzunluğunun ortalama değeri alınır. Değer verilen formülde (Denklem 2.2) yerine konularak Hv, vickers sertliği hesaplanır. Burada da ki yük oluşan izin yüzeylerin toplam alanına bölündüğünden sertliğin birimi kgf/mm² olarak çıkar. Vickers sertliği ölçme yöntemi en hassas sertlik ölçme yöntemlerindedir ve daha uzun zaman alır (Yıldırım, 2010).

$$HV = \frac{1.854P}{a^2}, a = (a_1 + a_2)/2 \quad (2.2)$$

Yük esnekliği aştığında, piramit ucunun altında deforme olmuş bölgeler belirir. Bu, piramit ucunu çevreleyen malzeme yüzeyleri boyunca gerginliğe neden olur. Test sırasında uygulanan ağırlığa bağlı olarak girintinin köşelerinde de çatlaklar oluşur. Elmas piramidin üzerine bir yük yerleştirildiğinde, basınç gerilmeleri çekme gerilmelerine karşı iter. Maksimum yük uygulandığında çatlaklar oluşmaya başlar; kaldırıldıktan sonra, sıkıştırma gerilmeleri ortadan kalkar ve çekme gerilmeleri etkin kalır. Çekme gerilmeleri arttıkça, malzemenin gerilim yoğunluğu ve tokluğu eşit kalır (Yıldırım, 2010).

2.5.6 Kırılma tokluğu

Vickers uçları genellikle kırılma tokluğunu belirlenmesinde büyük rol oynamaktadır. Batıcı uç malzemede çatlaklar meydana getirir ve malzemeye bağlı olarak iki tür çatlak oluşur. Birincisi, sertlik izinin altındaki yüzey altı çekme gerilmesinden kaynaklanan yarım daire biçimli bir çatlak (Şekil 2.10 a), diğeri ise daha düşük yüklerde daha sert sertlik yerinin köşesinden kaynaklanan, yüzeye radyal olarak büyüyen Palmqvist çatlağıdır (Şekil 2.10 b)(Boyacıoğlu, 2007).



Şekil 2.10. Vickers sertlik testi ile oluşturulan sertlik izi ve çatlakların şematik resmi, a) Yarım Dairesel, b) Palmqvist (Boyacıoğlu, 2007)

Palmqvist çatlaklar için denklem 2.3 kullanılır ;

$$K_{IC} = 0,016 \sqrt{\frac{E}{H}} P C^{-3/2} \quad (2.3)$$

E= Elastik Modül

H= Sertlik

P=Uygulanan Yük (Boyacıoğlu, 2007).

2.6 Seramik Malzemelerin Aşınma Davranışları

2.6.1 Aşınma

Hareket eden cisimlerin yüzeylerinde sürtünmeden dolayı malzeme kaybı gibi ağır hasarlar oluşur. Bu malzeme kaybına aşınma denir. Bu, birbirine bağlı iki gövde arasındaki malzeme transferinden kaynaklanabilecek şekilde olduğunda adhezif aşınma olarak adlandırılır.

Yorulma aşınması, birbiri üzerinde yuvarlanma veya kayma gibi yüzeyler arasındaki tekrarlanan sürtünmeden kaynaklanır. Yüzeylerin orijinal görünümünü kaybetmesine ve fonksiyonelliğini kaybetmesine neden olur. Kayan bileşenler arasında çok az sürtünme var ise aşınma hızla gerçekleşir. Buna abrazif aşınma denir. Malzemeler arasındaki çarpışmalardan kaynaklanan aşınma, erozyon aşınması olarak bilinir ve yüksek hızlarda akan sıvılardan kaynaklanan aşınmaya kavitasyon aşınması denir. Malzeme, temas ettiği bir yüzeyle kimyasal olarak bağlanarak ikisi arasında koruyucu bir tabaka oluşturabilir. Bu olguya 'aşındırıcı aşınma' adı verilir ve bazen iki yüzey arasında daha yumuşak harekete yardımcı olabilir. Korozyif aşınma da oksijen etkiye sebep olursa bu tür aşınma oksidatif aşınmadır. Sınırlı harekete sahip malzemeler arasındaki sürtünmede malzeme hasarı ve deformasyon meydana gelebilir. Bu, titreşimli aşınma olarak bilinir. İki sert malzemenin birbiriyle temas etmesi sonucu meydana gelen hasar çarpma aşınması olarak adlandırılır. Belirli hasar

türleri için başka terimler de vardır. Bunlar darbe aşınması, erime aşınması ve difüzyon aşınmasını vb aşınma şekilleridir (Yüksel, 2014).

2.6.2 Aşınmayı etkileyen faktörler

Aşınma, tipik olarak malzemeyi kullanan tarafından bilinen ve beklenen bir hasar şeklidir. Belirli bir durumun olumsuz etkilerini azaltmak için uygun önlemler alınmalıdır. Bu önlemler arasında uygun malzemelerin seçilmesi, minimum sürtünme, yüzeye uygulanan minimum ağırlık, kayma sırasında minimum mesafeyi ve uygun yüzey kalitesini içerebilir. Bir yüzeyin aşınmasını etkileyebilecek ek faktörler, yağlama, yüzeyin sertliği ve yağlayıcı varlığıdır. Oksit tabakaları veya yağlayıcılar, malzemelerin birbirleriyle doğrudan temas halindeyken aşınmaya karşı korunmasına yardımcı olur (Demir, 2012).

2.6.2.1 Malzeme seçimi

Birçok aşınma olgusu malzeme seçimi ile alakalıdır. Doğru seçim yapılmadığı takdirde beklenen performans sağlanamaz ve maddi kayıp yaşanabilir (Demir, 2012).

2.6.2.2 Sürtünme

Aşınma ve sürtünme arasındaki ilişki göz ardı edilmemelidir. Yüksek sürtünme katsayısına sahip metaller nadiren fazla aşınmaya maruz kalırlar. Ancak sürtünme katsayısı düşük olan metaller çok fazla aşınabilirler (Demir, 2012).

2.6.2.3 Yüzeye uygulanan yük

Deneysel çalışmanın sonuçları bize, yüzeye uygulanan yükün aşınma ile orantılı olarak arttığı göstermektedir (Demir, 2012).

2.6.2.4 Sürtünme mesafesi

Sürtünme mesafesi arttıkça aşınma miktarı zamanla artar (Demir, 2012).

2.6.2.5 Yüzey sertliği

Yüzey sertliği aşınma için önemli parametrelerden biridir. Yüzey sertliği artırılarak aşınma azaltılabilir veya aşınma nedeniyle yüzey deformasyonu önlenir (Demir, 2012).

2.6.2.6 Yüzey pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü 10 ile 70 μm arasında olmalıdır. Yüzeyler çok temiz ise yüzeyler arasında soğuk kaynak oluşumu artar. Yüzey kalitesi pürüzlüyse, bu aşınmanın artmasına sebep olur (Demir, 2012).

2.6.2.7 Yağlama

Bir aşınma önleme yöntemi de yağlamadır. Sürtünme yüzeylerini yağlamak, metal-metal temasını önler (Demir, 2012).

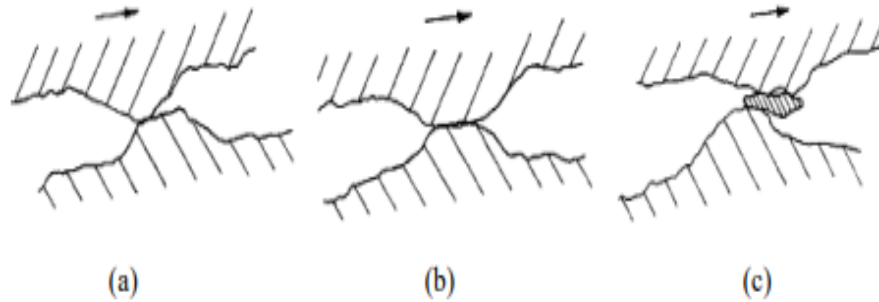
2.6.3 Aşınma mekanizmaları ve çeşitleri

Şekil 2.11'de aşınma mekanizmaları sınıflandırılmıştır.



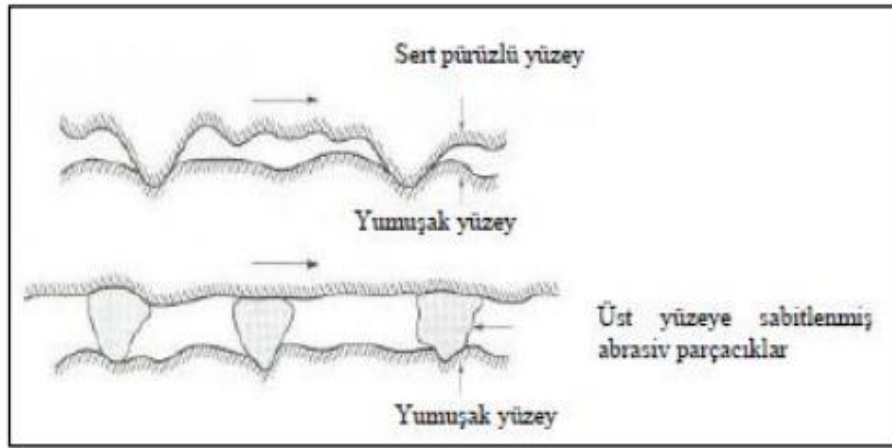
Şekil 2.11. Aşınma türleri ve sınıflandırılması (Mert, 2007)

Adhezyon (adesv) veya kaynama aşınması: Birbirine benzeyen iki malzeme birbiriyle temas ettiğinde birbirine karışarak veya bağlanarak aralarında aşınma meydana gelir. Bunun nedeni, insanların bir malzemeyi sert, diğerini yumuşak olarak seçmesidir. Birisi üretilmiş bir parçaya kuvvet uyguladığında, deformasyonu sürtünme sayesinde malzemenin esneklik eşiğinin ötesine geçer. Yüzeydeki oksit tabakaları ve sıvı moleküller parçalanma ve süblimleşme yoluyla uzaklaştırılır. İki malzeme birbiriyle temas ettiğinde, bir veya her iki malzemeden malzeme kaybolur. Bu, iki yüzey arasında mikro kaynakla oluşturulan bağların kaybı nedeniyle oluşur. Oluşan bu durumun aşamaları Şekil 2.12’de gösterilmiştir (Akça ve ark., 2020).

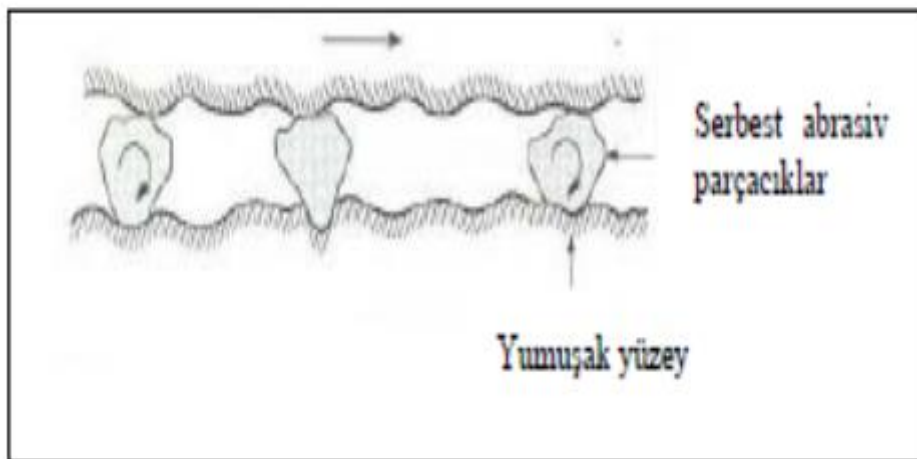


Şekil 2.12. Adhesiv aşınma oluşumu; (a) İki çıkıntının teması ve bağ oluşumu, (b) Bağın kopması diğer yüzeye malzeme transferi ve (c) İki yüzeydeki çıkıntıların etkileşimi sonucu yüzeyde kırıntı oluşumu (Şerbetçi, 2019)

Abrasif Aşınma: Birbiri üzerinde hareket eden yüzeylerde sert ve pürüzlü yüzey veya parçacıklar ile sisteme hasar veren bir aşınma türüdür. Bu aşınma türü için iki durum vardır. İlk durumda sert olan yüzey iki sürtünen yüzeyin daha sert olması durumudur. Bu duruma örnek olarak talaşlı imalat öğütme ve kesme gibi çalışmalardır. Diğer durumda ise sert yüzey iki yüzeyin dışında üçüncü bir cisimdir, genellikle küçük abrasiv parçacıklardır, diğer yüzeyler arasında bulunur ve yüzeylerden birini veya daha fazlasını aşındırabilir. Her iki durum Şekil 2.13 ve Şekil 2.14’te açıklanmıştır (Ayvaz, 2013).

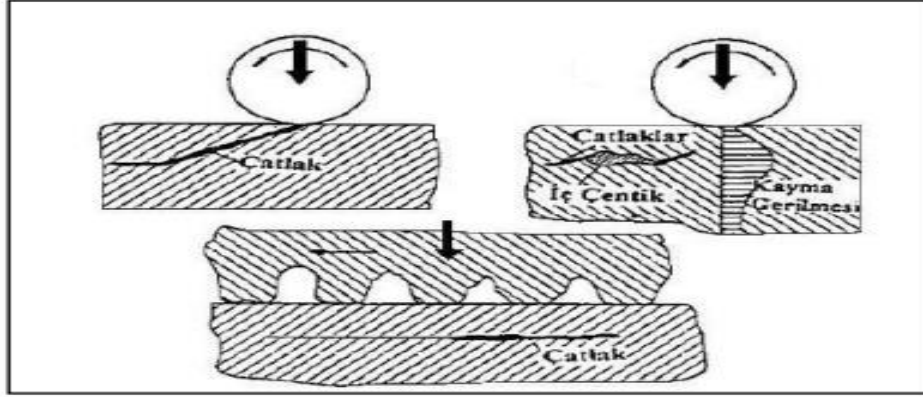


Şekil 2.13. Abrasif parçacıkların bir yüzeye yapışık olma durumu (Ayvaz, 2013)



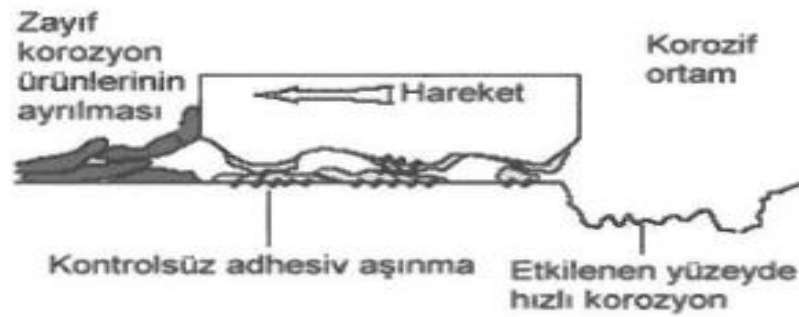
Şekil 2.14. Yüzeylerden en az birinden daha sert abrasif parçacıkların iki yüzey arasında sıkışması (Ayvaz, 2013)

Yorulma (titreşim) aşınması, Yüzeysel yorulması; yüksek basınç koşullarında çalışan parçalarda çok sayıda tekrarlayan yük sonrasında ya yüzey altı çatlaklarının yüzeye yayılması ya da yüzey çatlaklarının gelişmesi ve yüzey altı çatlaklarının birleşmesi ile oluşan bir aşınma şeklidir. (Şekil 2.15) Malzeme parçacıklarının ayrılması söz konusudur. Yetersiz yağlamanın neden olduğu aşınma hasarından farklıdır. İyi yağlanmış koşullarda bile görünür (Özdemir, 2008)



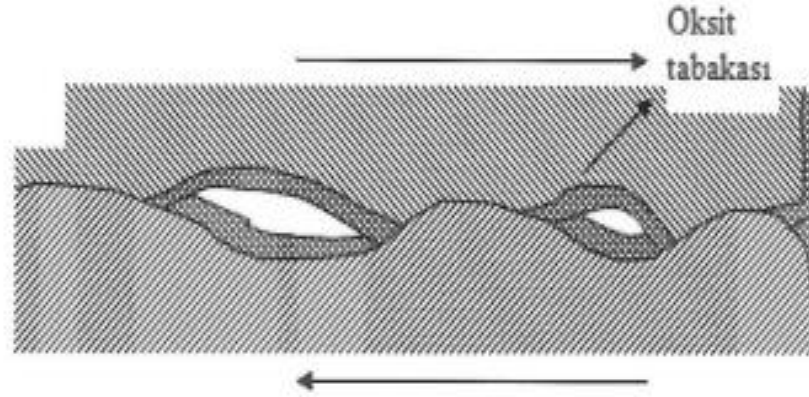
Şekil 2.15. Yorulma aşınması oluşum mekanizması (Özdemir, 2008)

Korozif aşınma mekanizması: Özellikle korozif aşınmada, sıvı ve gazlarla temas ettiğinde kimyasal ve elektrokimyasal etkilerle malzeme yüzeyinde reaksiyon ürünleri meydana gelir. Bu reaksiyon ürünleri yüzeye sıkıca yapıştığı takdirde ana malzeme olarak hareket ederse, aşınma mekanizması ana malzemede meydana gelen aşınma şekliyle aynı olabilir. Bazı durumlarda bu ürünler çok farklı aşınma mekanizmalarına yol açar (Demir, 2012).



Şekil 2.16. Korozif aşınma (Demir, 2012)

Erozyon ve kavitasyon: Katı veya sıvı partiküllerin yüzeye çarpmasıyla oluşan aşınma şeklidir. Erozyon aşınması, bir jet motorunun kanatları veya bir pompanın silindirleri gibi birçok yerde görülebilir. Çarpma açısı, hız ve boyut gibi parametreler erozyon aşınmasında büyük rol oynar (Akça ve ark., 2020).



Şekil 2.17. Tribo oksidasyon aşınması (Akça ve ark., 2020)

2.6.4 Sürtünme

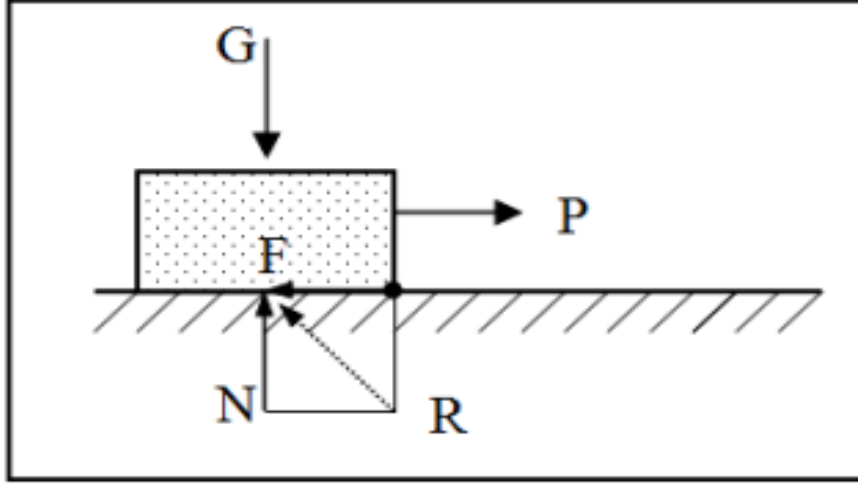
İki malzeme temas halindeyse, sürtünme bir malzemeyi diğerinin üzerinde kaydırma kuvvetine direnir. Kaymaya neden olan kuvvet (F_s) ile temas yüzeyine etki eden normal kuvvet (W) arasında $F_s = \mu_s \times W$ ilişkisi vardır. Burada statik sürtünme katsayısı μ_s ile ifade edilir. Kayma gerçekleştikten sonra sürtünme kuvvetinde azalma meydana gelir, bu durumda $F_k = \mu_k \times W$ bağıntısı kurulabilir. Burada μ_k (temas gövdesinin malzeme yapısı ve bağ yapısı).

Sürtünmeye etki eden faktörler;

- Kayma yüzeyinde yabancı maddeler
- Yağlama
- Birbiriyle temas halinde olan yüzeylerin sertliği
- Temas eden bir nesneye etki eden kuvvet veya yük

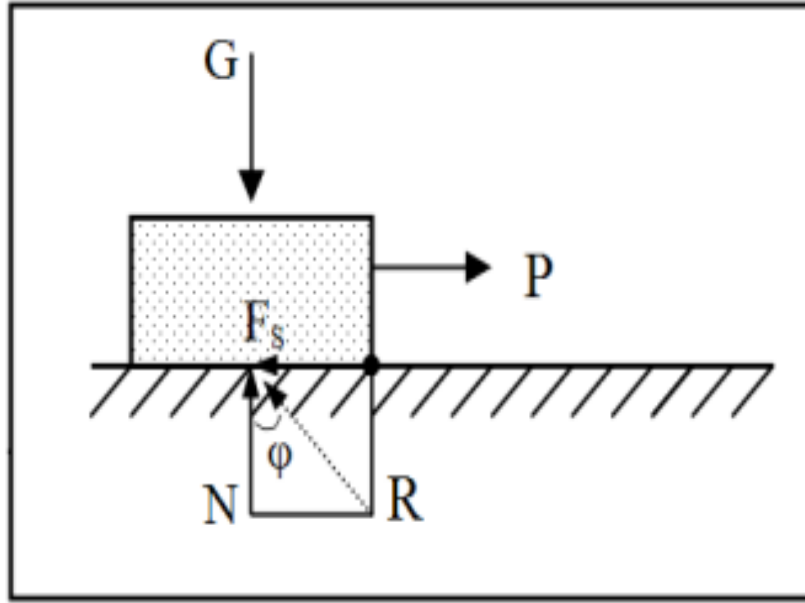
- Temas yüzeylerinin topografyası
- Temas yüzeylerinin yönü ve hareket hızı (Erol, 2022).

2.6.4.1 Sürtünme katsayısı



Şekil 2.18. Sürtünme kuvveti (Mert, 2007)

Şekil 2.18’de G kütleli bir nesnenin yağlamadan yoksun yatay bir düzlem üzerine yerleştirildiğini varsayalım. Nesne ile düzlem arasındaki sürtünme dirence neden olduğundan, düzlemin sürtünmesi ağırlığı sabit tutmaya yarar. Cisme G ağırlığında bir P kuvveti uygulanırsa, sistemdeki dengesizlik devam edecektir çünkü N ’de herhangi bir değişiklik olmadan yalnızca P etki edecektir. Cisimlerin hareket etmesinin nedeni, etkileşen iki yüzey arasındaki sürtünmedir. Bu sürtünme, bir yüzey tarafından uygulanan basıncın büyüklüğünü azaltır. Basıncı, P adı verilen belirli bir değere düşürüldüğünde hareket başlar. Bunun nedeni $F=P$ ’dir. Çeşitli deneyler, sürtünme katsayısının, μ , F/G ’ye eşit olduğunu göstermiştir. Hareket eden nesneler, onları iten yalnızca statik sürtünmenin maksimum kuvveti ile sürtünme katsayısına yapışır. $F/G < P$, bir nesnenin hareket halinde olduğunu veya hareket ettiğini gösterir. Statik sürtünme, denge durumunda değişmeden kalan F değeri için kullanılan terimdir. Bu değere F_s dersek adı statik sürtünme katsayısı olan μ_s olur. Şekil 2.19’da gösterilen diyagram statik sürtünme kuvvetidir (Mert, 2007).



Şekil 2.19. Statik sürtünme kuvveti (Mert, 2007)

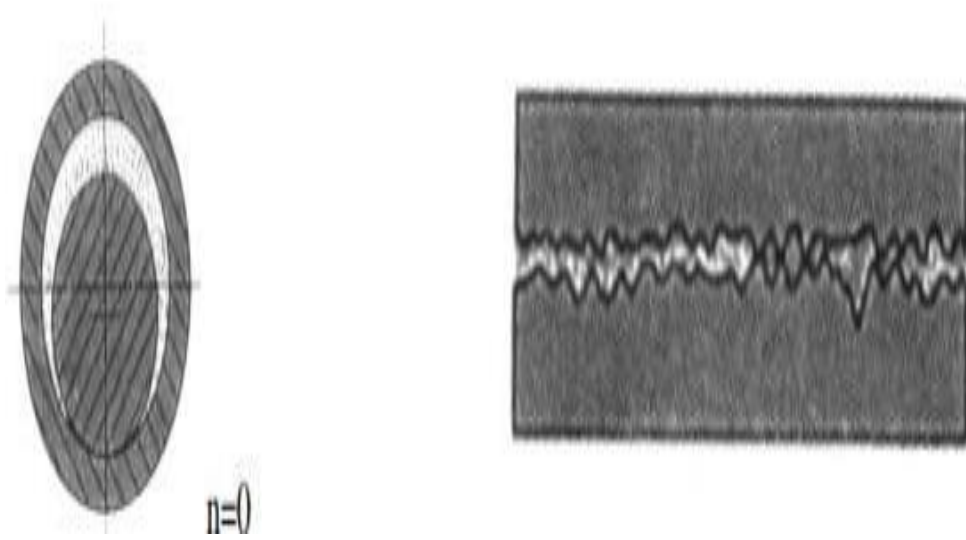
Deneyler, bir nesneyi hareket ettikten sonra sabit bir hızla hareket ettirmek için P kuvvetinin gücünün azaltılması gerektiğini göstermiştir. Buradan sürtünme kuvveti F_s 'de $P=F_s$ denklemine göre azalacaktır. Bu durumda oluşan sürtünme kuvvetine kinetik sürtünme kuvveti denir. Kinetik sürtünmeyi F_k ile gösterirsek, $F_k = N \cdot \mu_k$ şeklinde gösterilir. Burada kinetik sürtünme katsayısıdır μ_k 'dir. $\mu_s > \mu_k$ olduğu tanımda açık olarak anlaşılır (Mert, 2007).

2.6.4.2 Sürtünme çeşitleri

Sürtünme, iki cisim arasındaki temastan kaynaklanan harekete karşı dirençtir. Bu bir malzeme özelliği değildir, ancak sürtünme, etkileşen en az iki cismin tribolojik sisteminin bir parçasıdır. Sürtünme iki türe ayrılır. Birincisi, kuru bir ortamda meydana gelen ve "Coulomb" sürtünmesi sembolü ile temsil edilen kuru sürtünmedir. Bu sürtünme, kuru koşullar altında meydana gelirken, yağlanmış bir ortamda meydana gelen sürtünme ise sıvı sürtünmesidir (Ergün Ağdacı, 2019).

2.6.4.2.1. Kuru sürtünme

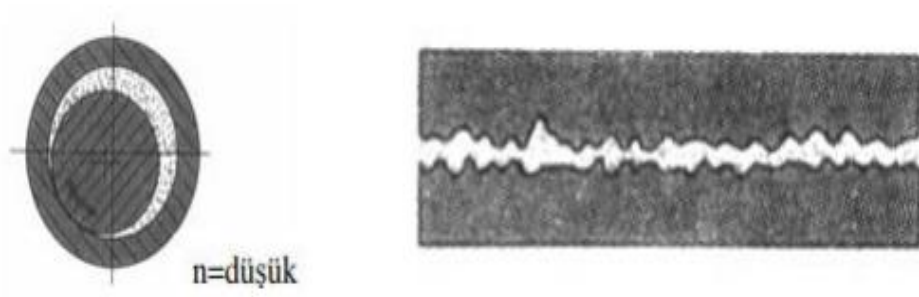
Kuru sürtünme, birbiriyle temas halinde olan iki yüzey arasındaki yağlayıcı eksikliğine dayanır. Kuru sürtünme temas halindeki yüzeylerin düzgün biçimde olmasına ve yüzey ağırlığına bağlıdır. Sürtünme, yüzeylerdeki çok küçük (mikron derecesindeki) girinti çıkıntıların birbirine teması ile meydana gelmektedir. Bir makine parçasını az sürtünme ile çalıştırmak, onun çabuk aşınmasına neden olur. Tersine, çalışan bir motordan kaynaklanan sürtünme çok fazla ısı üretebilir ve ögenin ömrünü kısaltabilir (Akgündüz, 2019)



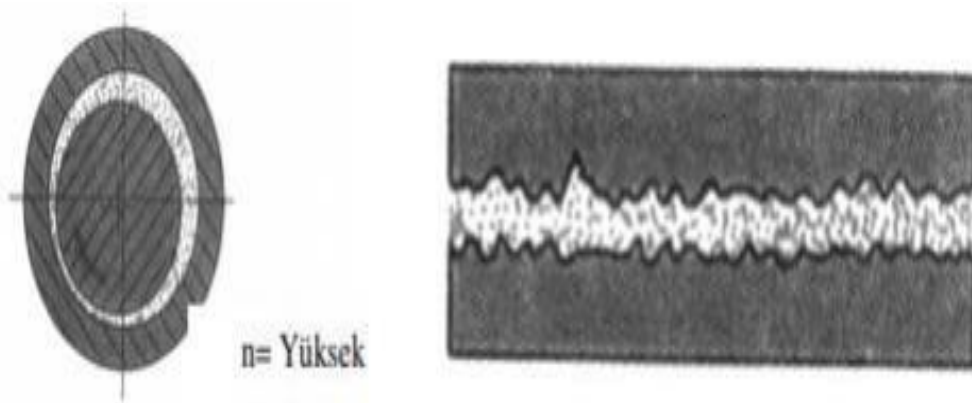
Şekil 2.20. Kuru sürtünme (Akgündüz, 2019)

2.6.4.2.2. Akışkan sürtünme (sıvı sürtünme)

Birçok mühendislik uygulaması, ekipmanın su, nem veya yağ gibi yağlama sıvılarıyla taşınmasını içerir. Su veya gres gibi bir yağlama elemanının bulunduğu yerde temas eden yüzeyler arasında ince bir sıvı film tabakası olduğunda oluşan sürtünme kuvvetine sıvı sürtünme denir. (Şekil 2.21- Şekil 2.22) (Kapusuz, 2019).



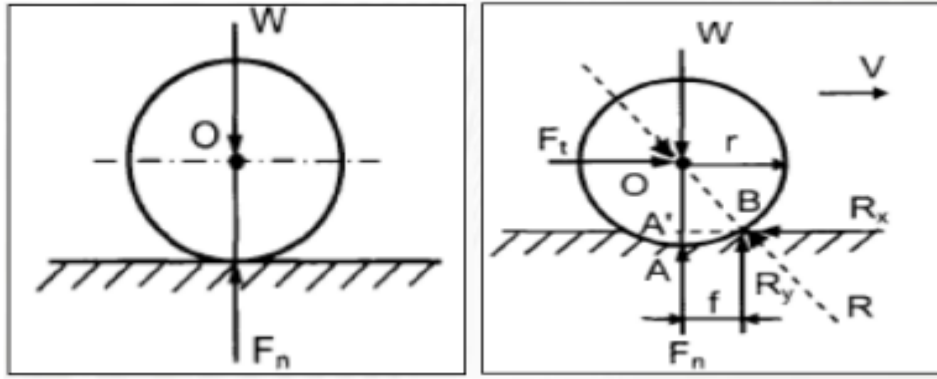
Şekil 2.21. Yarı sıvı sürtünme (Akgündüz, 2019)



Şekil 2.22 Sıvı sürtünme (Akgündüz, 2019)

2.6.4.2.3. Yuvarlanma sürtünmesi

Sürtünme direnci, iki yüzey birbirine karşı yuvarlanma hareketi ettiğinde ortaya çıkar. (Şekil 2.23) Temas noktalarında yuvarlanma sürtünmesi meydana geldiğinde, mükemmel rijit silindirik veya küresel bir nesne sert ve pürüzsüz bir düzlem üzerinde serbestçe yuvarlanırsa sürtünmenin olmayacağı teorize edilmiştir. Gerçekte, yuvarlanan nesnelerin yüzeylerinde plastik olmayan deformasyon meydana gelir. Hareketin meydana geldiği yerde, bir fiziksel temas alanı kendini gösterir. Bu temaslar, hareket yönünde hareket eden bir dalga oluştururlar. Sürtünme, cismin ısınmasına ve gerilmesine neden olan yuvarlanmayı içerir. Bu, ihmal edilebilir bir sürtünme direnci sağlayan elastik bir etki üretir (Esatoğlu, 2018).



Şekil.2.23. Yuvarlanma sürtünme düzeneği ve düzeneğin serbest cisim diyagramı (Esatoğlu, 2018)

2.6.4.2.4. Kayma sürtünmesi

İki sert yüzey birbirine baskıldığında veya biri diğerinin üzerinden geçtiğinde yalnızca birkaç küçük alan temas eder. Bu nokta, iki yüzey arasındaki fiziksel teması ifade eden pürüzlülük olarak bilinir. Kayma esnasında teğetsel kuvvetler artarken birleşimler kayar. Bu birleşimlerin kesilmesi için gerekli sürtünme kuvveti birleşimdeki malzemenin azalmasıyla doğru orantılıdır. Bu nedenle sürtünme kuvveti Denklem 2.4'te verilmiştir (Esatoğlu, 2018).

$$F_S = A \cdot S \quad (2.4)$$

F_S : Kesme için gereken sürtünme kuvveti,

A : Kayma yüzeyinin boyutundan bağımsız temas alanını ve

S : Malzemede kesme gerilmesini ifade etmektedir (Esatoğlu, 2018).

Uygulamada, kayma sürtünmesi ayrıca bazı ek etkilerle ilişkilendirilebilir. Bu etkiler, daha sert malzemelerin pürüzlülüğünden dolayı yumuşak malzemelerde çizilme ve yüzey düzensizliklerinin çakışması gibi etkilerdir (Esatoğlu, 2018).

2.6.4.3 Sürtünme kuvvetine etkileyen faktörler

2.6.4.3.1. Genel faktörler

Sert bir yüzey daha yumuşak olana baskı yaptığında, ikincisini bir çentik oluşturur. Çentiğin açılmasında harcanan deformasyon enerjisinin sürtünme kuvvetinden sağlandığı söylenebilir. Sonuç olarak, sürtünme kuvveti bu çatlakların boyutuyla doğru orantılı olarak artar (Timur, 2007).

2.6.4.3.2. Yüzey sıcaklığı faktörü

Sürtünme önemli miktarda aşırı ısı üretir. İki yüzey arasındaki sürtünme tipik olarak daha geniş temas alanları oluşturur ve bu da genel olarak daha fazla sürtünmeye neden olur. Isı enerjisi yüzey boyunca hızla aktarıldığı için sürtünme kaynaklı yüzey üzerindeki sıcaklık dağılımını tahmin etmek zordur. Çünkü yüzey boyunca sıcaklık önemli ölçüde değişir. Sürtünmeye neden olan yüzeylere yakın olarak konulan termokupllar sürtünme sırasında ölçülen sıcaklık değerlerini ortalama değer olarak kabul eder. Bu yüzden sıcaklığın belirlenmesi zorlaşır (Timur, 2007).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Meteryal

Bu çalışmada, %8 mol yitriya ile stabilize edilmiş kübik zirkonya (8YSZ) içerisine farklı oranlarda SiC takviyesinin sinterlenebilirliğe, mikroyapıya, tane boyutuna, mekanik özelliklere ve aşınmaya olan etkisi X-ışını difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), Vickers Sertlik cihazı, pin-on-disk tipi aşınma cihazı ve profilometre kullanılarak incelenmiştir.

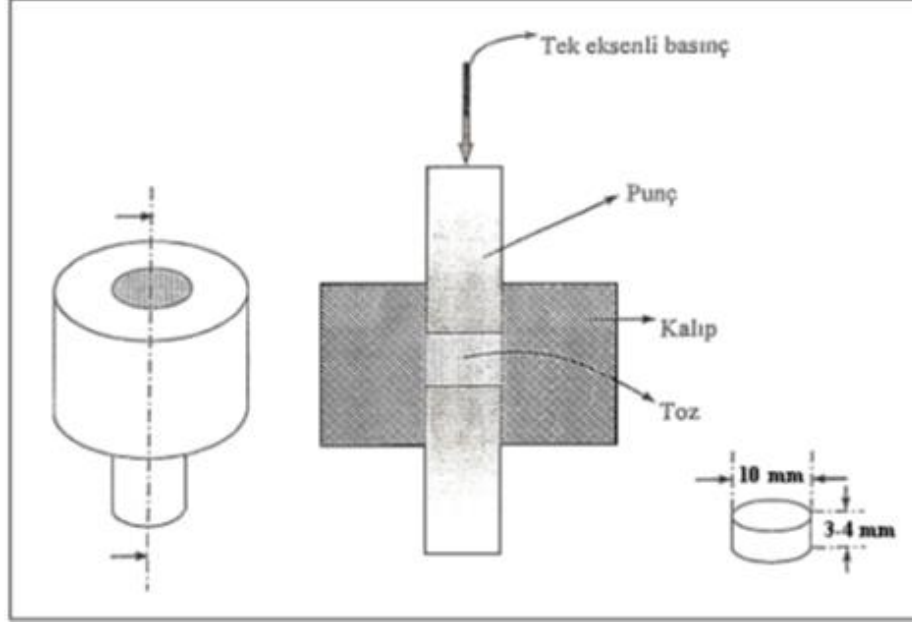
3.2 Yöntem

3.2.1 Deneyde kullanılan numunelerin hazırlanması

Bu çalışmada ana matris malzemesi olarak ticari olarak satın alınan 0.3 µm boyutunda %8 mol yitriya ile karalı hal elde edilmiş kübik zirkonya (8YSZ), takviye elemanı olarak da 5 µm toz boyutunda β-SiC tozları kullanılmıştır.

Katkılama işlemleri için ağırlıkça %1, 5, 10 ve 15 oranlarında SiC tozlar ve 8YSZ tozlar mekanik karıştırma ile bir plastik konteyner içerisinde zirkonya bilyalar ve ethanol ortamında “speks” tipi bir karıştırıcı ile 200 dev/dak hızda 12 saat süre ile karıştırıldı. Karıştırma sonrası elde edilen bulamaçlar plastik tankın kapağı açık tutularak 24 saat boyunca kurumaya bırakıldı. Kurutma işlemi sonucunda oluşan orta sertlikteki topak olan tozları birbirinden ayırmak, kırmak ve öğütmek için plastik tank içerisinde zirkonya bilyalar ile “speks” tipi karıştırıcıda 200 dev/dak hızda 30 dakika karıştırma yapıldı. Bu karıştırma sonucunda elde edilen karışım tozlar (SiC +8YSZ) 60 µm’ luk bir elekten geçirildi. Mekanik karıştırma ile elde edilen karışım tozlar sinterleme eğrileri, mikro yapı incelemeleri, yoğunluk ölçümleri ve oda sıcaklığı mekanik özelliklerinin belirlenmesi için Şekil 3.1’deki tek eksenli olan presleme kalıbında 200 MPa basınçta 10 mm çapında pelet numuneler üretildi. Her

kuru presleme işlemi sonrasında çelik kalıp iç yüzeyleri temkinlice temizlendi ve kalıbın yan duvarlarına stearik asit tekrar sürüldü.



Şekil 3.1. Tozların şekillendirilmesinde kullanılacak presleme kalıbı (Aktaş, 2008)

3.2.2 Örneklerin mikroyapısal incelemeleri

Kuru presleme ile üretilen örneklerin ön ve son sinterleme işlemleri Şekil 3.2'deki kutu tipi fırın kullanılarak gerçekleştirildi. Ağırlıkça %1-15 SiC takviyeli 8YSZ kompozit örnekler 5 °C /dk. bir ısıtma hızıyla 1000 °C'de 1 saat ön sinterleme yapıldı ve ardından dakikada 5 °C'lik bir soğutma hızıyla 1000 °C'den oda sıcaklığına (~25°C) soğutma işlemi yapıldı. Ön sinterleme işleminden sonra SiC takviyeli 8YSZ kompozit örnekler 5° C/dk. bir ısıtma hızında 1400, 1450 ve 1500 °C sıcaklıklarda 2 saat sinterleme yapıldı.

Sinterleme sonrası örneklerin mikroyapı incelemeleri için metalografik yüzey hazırlıkları yapıldı. Metalografik yüzey hazırlığında homojen bir yüzey kalitesi ve uygulama kolaylığı sağlamak için örnekler epoksi reçine kullanılarak kalıplandı. Numuneler yüzey kalitelerinin artırılması için Şekil 3.3 'de gösterilen parlatma ve zımparalama makinesinde 320, 600, 800, 1000, 1200, 1500 grid'lik SiC zımparalar kullanılarak zımparalandı. Zımparalanan numunelerin yüzeyleri daha sonra 1 ve 3

μm 'luk elmas solüsyon kullanılarak parlatıldı ve ardından yüzeyler alkol ile temizlendi. Numuneler SEM görüntülerinin incelenebilmesi için kutu tipi bir fırında 20 dk. 150°C ısı kullanılarak reçine kalıptan çıkarıldı. Daha sonra SEM mikroyapı incelemeleri için numunelerin parlatılan yüzeyleri kutu tipi sinterleme fırınında 1350°C 'de 30 dakika bekletilerek termal dağlama yapıldı ve SEM' de mikroyapısı incelemek üzere hazır hale getirildi.



Şekil 3.2 Kutu Tipi Fırın



Şekil 3.3. Zımparalama ve Parlatma Makinesi

Mikro yapı incelemeleri için sinterleme işlemine tabi tutulan numuneler Şekil 3.4'te gösterilen EMS 550 marka gümüş palladyum tabaka ile kaplama yapıldı. Daha sonra Şekil 3.5'te gösterilen taramalı elektron mikroskobu (SEM) (ZEISS marka Evo 50 model) ile incelemeler yapıldı. Yapılan incelemelerin sonucunda Image J programı kullanılarak sinterlenmiş örneklerin ortalama tane boyutları hesaplandı.



Şekil 3.4. EMS 550 Numune Kaplama Cihazı



Şekil 3.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

3.2.3 Örneklerin XRD analizi ve yoğunluklarının belirlenmesi

Sinterlenen numunelerin faz analizi ve kafes parametreleri X-Ray difraksiyon (XRD) analizi (Rigaku-Dmax 2000 model, $\text{CuK}\alpha$, $\lambda=1.5405 \text{ \AA}$) kullanılarak belirlendi. XRD analizi için sinterlenmiş örnekler $0,03^\circ/\text{sn}$ tarama hızında ve 2θ $10-90^\circ$ değerleri aralığında analiz edildi ve kırınım açıları ölçüldü. Ayrıca, örneklerin XRD desenlerinden elde edilen veriler Rietveld arıtımı (match yazılımı) ile arıtılarak en uygun birim hücre parametre değerleri elde edilmiştir. Yapı arıtımı için Pseudo Voight fonksiyonu kullanılmıştır.

Ağırlıkça %1, 5, 10 ve 15 SiC katkılı 8YSZ örneklerin 1400, 1450 ve 1500 °C 'de 2 saat sinterleme sonrası yoğunlukları Şekil 3.6'da gösterilen Arşimet yoğunluk kiti kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümlerde saf su kullanılmıştır. Bu yoğunluk ölçümü Denklem 3.1'de gösterilen prensibe dayanmaktadır ve her örnek için 3 ölçüm yapıp ortalamaları alınmıştır.

$$\rho_{\text{örnek}} = \frac{m_a}{m_a - m_b} \times \rho_{\text{sıvı}} \quad (3.1)$$

Burada; " $\rho_{\text{örnek}}$ " örneğin yoğunluğu (gr/cm^3), " m_a " örneğin havadaki ağırlığı (gr), " m_w " örneğin su içerisindeki ağırlığı (gr) ve " $\rho_{\text{sıvı}}$ " saf suyun yoğunluğudur (gr/cm^3).



Şekil 3.6. Arşimet Yoğunluk Kiti

3.2.4 Örneklerin sertlik ve kırılma tokluklarının belirlenmesi

1400 °C’de 2 saat sinterlenmiş katkısız ve SiC katkılı 8YSZ örneklerin sertlikleri ve kırılma tokluklarının ölçülmesinde üniversitemiz bünyesinde bölüm malzeme laboratuvarındaki Şekil 3.7’de gösterilen Vickers sertlik ölçme cihazı kullanıldı. Ağırlıkça %1, 5,10 ve 15 SiC katkılı 8YSZ numunelerin her biri için 5 kg yük 15 sn süre ile uygulandı ve 5 farklı bölgeden iz oluşturularak ortalamaları alınarak sertlikler ölçüldü. Sertlik değerleri Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$H_V = \frac{1.854xF}{d^2} \quad (3.2)$$

Burada; "F" uygulanan yük (kg) ve "d" ise iz köşegenlerinin ortalamasıdır (mm).

Örneklerin kırılma toklukları ise Vickers sertlik ucunun 5 kg yük altında 15 sn uygulanması sonrasında izlerin kenarında oluşturulan çatlakların uzunluğunun ölçülmesi ile hesaplanmıştır. Çatlak uzunluğu çevresel faktörlerden etkilenmesin diye Vickers sertlik ucu uygulandıktan hemen sonra çatlak uzunlukları ölçülmüştür. Örneklerin kırılma toklukları (K_{IC}) Anstis ve ark. (1981) önerdiği half-penny-crack yaklaşımı ile Denklem 3.3 kullanılarak hesaplandı (Anstis vd., 1981). Her bir örnekten 5 adet ölçüm alınmış ve bunların ortalaması alınarak kırılma toklukları belirlenmiştir.

$$K_{IC} = 0.016\left(\frac{E}{H_V}\right)^{1/2} \frac{P}{C^{3/2}} \quad (3.3)$$

Burada; “P” uygulanan yük (kg), “C” ortalama çatlak boyu (μm), “E” Young modülü (GPa.) ve “Hv” ise Vickers sertliğidir (kg/mm^2).



Şekil 3.7. Vickers Sertlik Ölçüm Cihazı

3.2.5. Örneklerin aşınma deneyleri

Bu çalışmada aşınma deneyleri üniversitemiz bünyesinde bölüm malzeme laboratuvarına ait Şekil 3.8’de gösterilen TRD marka aşınma test cihazı kullanılmıştır. Aşınma deneyi öncesi 1400 °C’de sinterlenmiş örneklerin yüzeyleri 600 numaralı zımpara ile zımparalanarak yüzeyleri homojen hale getirildi. Aşınma deneylerinde pin-on-disk yöntemi kullanılmış ve SiC katkılı 8YSZ numune karşısında aşındırıcı eleman olarak WC bilye kullanılmıştır. Numunelerin aşınma testleri oda sıcaklığında, 3 N yük altında, 500 m kayma mesafesinde ve 0,1 m/sn kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testi ile elde edilen sürtünme katsayısı verileri TRD Wear programıyla alınıp Origin programında grafiğe dönüştürülmüştür.

Aşınma deneyleri tamamlandıktan sonra numuneler üzerinde biriken aşınma parçacıkları alkol ile yıkanarak temizlendi. Daha sonra, temizlenen numunelerin yüzeyindeki aşınma izlerinin 2 boyutlu profil görüntüleri Şekil 3.9’daki Time TR 200 model profilmetre kullanılarak alındı. Her numune için 4 farklı aşınma iz bölgesinden yüzey profil görüntüleri alınarak ortalama değerler elde edildi.



Şekil 3.8. Aşınma test cihazı



Şekil 3.9. Time TR 200 marka profilmetre cihazı

Aşınma sonrası numunelerde meydana gelen hacim kaybını hesaplamak için profilmetre ile ölçülen 2 boyutlu aşınma yüzey profilleri Autocad programına aktarıldı. Aşınma Hacminin hesaplanması için kapatılan çizgiler katı model oluşturmak için Solidworks programına aktarıldı ve ardından çizgiler arasında kalan aşınma bölgesinin hacmi Solidworks programı ile hesaplandı.

1400 °C’de 2 saat sinterlenmiş katkısız ve SiC katkılı 8YSZ numunelerin 3 N yükte, 0,1 m/sn kayma hızı, 500 m kayma mesafesindeki aşınma deney sonuçları kullanılarak Denklem 3.4’te ki spesifik aşınma miktarları hesaplandı.

$$K_w = V_w / (F \cdot S) \quad (3.4)$$

Burada;

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

V_w : aşınmanın hacmi (mm^3)

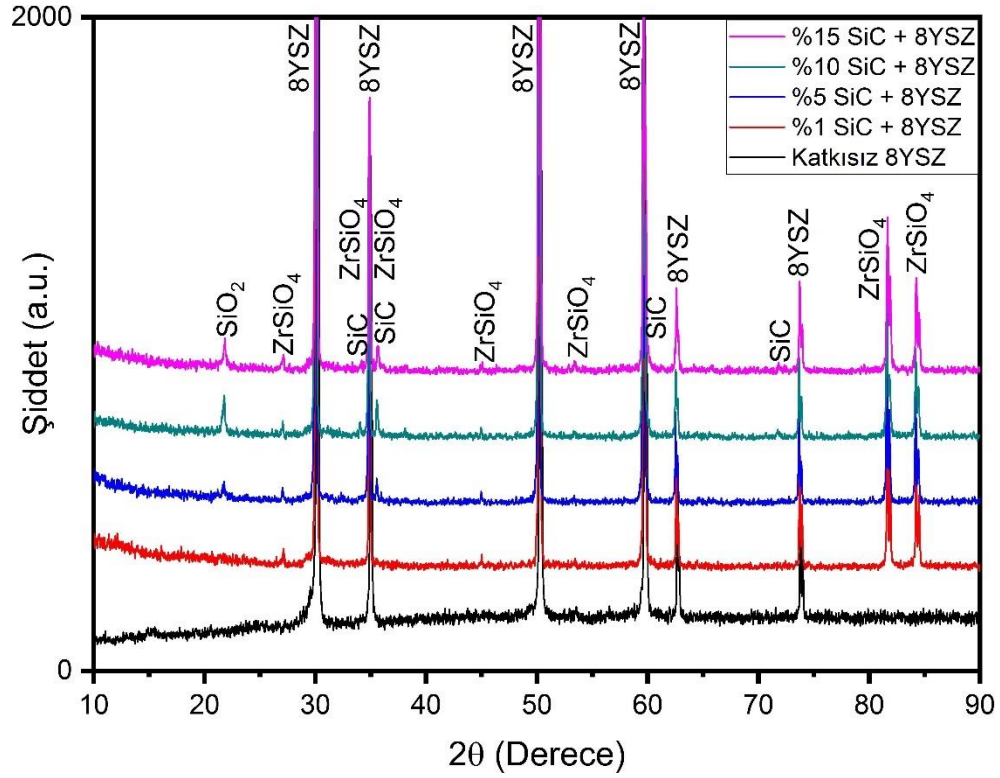
F : numuneye uygulanan yük (N)

S : oluşan kayma mesafesi (m)

4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. SiC Katkılı 8YSZ'nin XRD İncelemesi ve Sinterlenebilirliği

1450 °C'de 2 saat sinterlenmiş katkısız ve SiC katkılı 8YSZ örneklerin XRD deseni Şekil 4.1'de verilmektedir. SiC'ün %1 oranında 8YSZ içerisine ilave edildiği örneklerin kırınım deseninde sadece 8YSZ (PDF: 00-049-1642) ve ZrSiO₄ (PDF: 00-006-0266) fazı gözlemlenirken, ağırlıkça %5, 10 ve 15 SiC katkılı örneklerde ise bu fazlara ek olarak SiC (mossanite, PDF: 00-029-1130) ve SiO₂ (cristoballite, PDF: 00-039-1425) fazları da görülmüştür. SiC tozları, üretim yönteminin (SiO₂'nin karbotermik indirgenmesi veya mekanik öğütme sırasında meydana gelen tozların yüzey oksidasyonunun) bir sonucu olarak her zaman oksitler silikon dioksit (SiO₂) olarak bulunan oksijenle kirlenir (Brynstad ve ark., 1984). Ağırlıkça %5, 10 ve 15 SiC katkılı örneklerinin XRD kırınım deseninde yaklaşık 20 derecelik açıda camsı bir faz oluştuğu gözlemlenmiştir. Bamba ve arkadaşları, (1998) gözlenen bu camsı fazın 8YSZ ve SiC tozlarında safsızlık olarak bulunan SiO₂'ten kaynaklanabileceğini ifade etmişlerdir (Bamba ve ark., 1998). Ayrıca, Pourasad ve arkadaşları, (2017) çalışmalarında SiC ün yapıya girmesi ile yapıda dört farklı reaksiyonun meydana gelebileceğini ve yapıya SiC ilave edildiğinde yapıda bulunan oksijenin SiO₂ fazını oluşturmak için SiC ile reaksiyona girebileceğini belirtmişlerdir (Pourasad ve ark., 2017). SiC eklemesine bağlı olarak %5 katkıya kadar, ZrSiO₄ fazı artış gösterse de, %5 ten daha büyük katkı durumunda yüksek sıcaklıklarda zirkonda faz ayrışmasının meydana gelmesi beklendiğinden SiC ilavesi bu fazın miktarında bir azalışa neden olmuştur ve SiC ilavesi ile ZrO₂ fazının miktarı azalırken SiO₂ fazının miktarında bir artış gözlemlenmiş ve SiC ilavesi SiO₂ faz oluşumunu desteklemiştir (Beiyue ve ark., 2009; Irankhah ve ark., 2023).



Şekil 4.1. 1450 °C'de 2 saat sinterlenen katkısız ve SiC katkılı 8YSZ numunelerin XRD deseni

Örneklerin XRD desenlerinden elde edilen veriler Rietveld arıtımı (match yazılımı) ile arıtılarak en uygun birim hücre parametre değerleri elde edilmiştir. Yapı arıtımı için Pseudo Voight fonksiyonu kullanılmıştır. Yapı oldukça uyumlu bir şekilde arıtılmıştır ve arıtım parametreleri wR değeri 7,8-15,1 ve χ değeri 2,8-4,4 arasında elde edilmiştir. Rietveld arıtımından elde edilen faz yüzdeleri ve kafes parametreleri Çizelge 4.1'de verilmektedir.

SiC ilavesi ZrO_2 'nin birim hücre parametrelerinde %15 katkıda belirgin bir azalmaya neden olmuştur. SiC'ün eklenmesi $ZrSiO_4$ birim hücre parametrelerinde konumsal düzensizlikten dolayı düzensiz bir değişim göstermiştir (Toraya ve ark., 1984).

Çizelge 4.1. Örneklerin XRD deseninden elde edilen fazlar ve Rietveld arıtımı ile elde edilen birim hücre parametre değerleri.

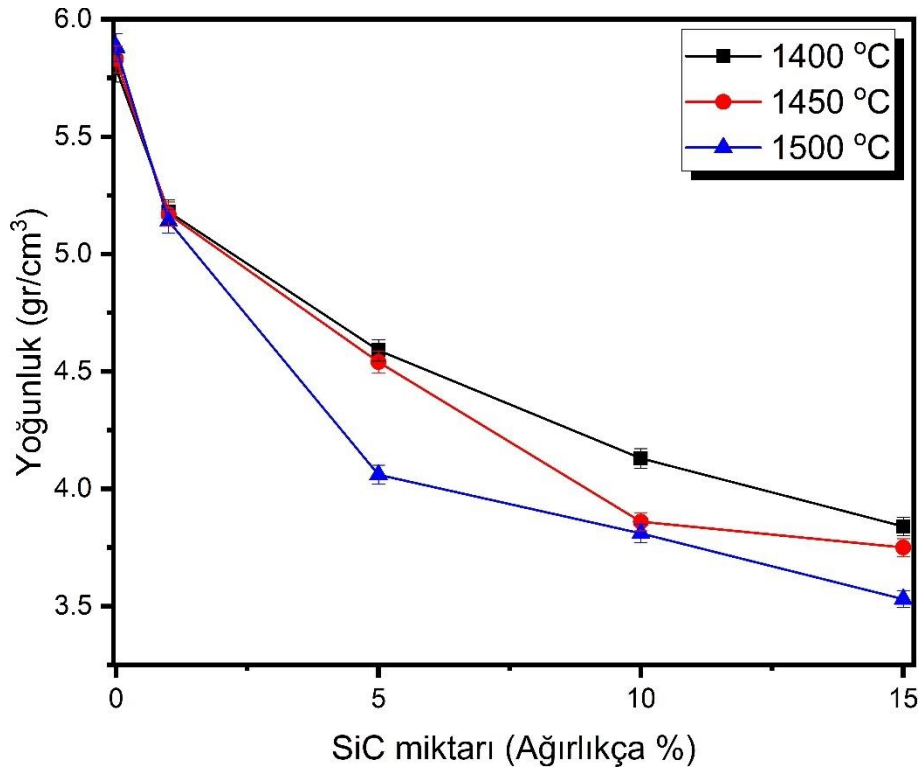
Numune kodu	Fazlar	Kristal sistem	Kafes parametresi (Å)			Faz miktarı (%)	wR	χ^2
			a	b	c			
8YSZ	ZrO ₂	Kübik	5,146	-	-	100	15,5	5,1
%1 SiC+8YSZ	ZrO ₂	Kübik	5,133	-	-	98,3	9,4	3,1
	ZrSiO ₄	Tetragonal	6,56	-	5,97	1,7		
%5 SiC+8YSZ	ZrO ₂	Kübik	5,133	-	-	93,1	15,1	4,4
	ZrSiO ₄	Tetragonal	6,56	-	5,99	1,6		
	SiC	Kübik	4,36	-	-	2,5		
	SiO ₂	Tetragonal	4,99	-	7,00	2,8		
%10 SiC+8YSZ	ZrO ₂	Kübik	5,132	-	-	87	10,8	3,5
	ZrSiO ₄	Tetragonal	6,57	-	5,94	0,2		
	SiC	Kübik	4,36	-	-	4,8		
	SiO ₂	Tetragonal	4,99	-	7,02	8,0		
%15 SiC+8YSZ	ZrO ₂	Kübik	5,123	-	-	83,8	7,8	2,8
	ZrSiO ₄	Tetragonal	6,58	-	5,97	2,3		
	SiC	Kübik	4,35	-	-	4,8		
	SiO ₂	Tetragonal	4,98	-	7,01	9,1		

Farklı oranlarda SiC katkısının ve sinterleme sıcaklığının 8YSZ'nin sintelenebilirliğine etkisini belirlemek için 1400, 1450 ve 1500 °C'de 2 saat sinterlenmiş ve örneklerin yoğunlukları Arşimet prensibiyle ölçülerek katkı miktarları arasındaki ilişki araştırılmıştır. Relatif yoğunluk; örneğin ölçülen deneysel yoğunluğunun teorik yoğunluğuna oranlanmasıyla hesaplanmaktadır. Bu çalışmada, relatif yoğunlukların hesaplanmasında 8YSZ ve SiC için teorik yoğunluklar sırasıyla 5,98 ve 3,21 gr/cm³ alınmıştır ve karışım kuralı kullanılarak hesaplanmıştır. Numunelerin deneysel ve relatif yoğunluk değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

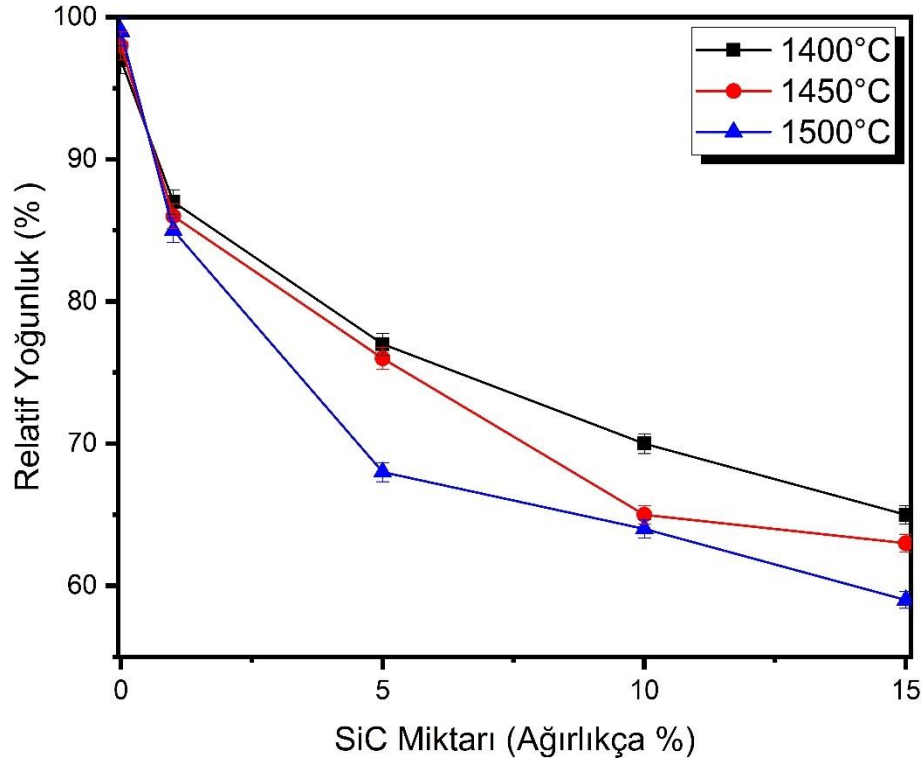
Çizelge 4.2. Örneklerin deneysel ve relatif yoğunluk değerleri

Numune kodu	Deneysel Yoğunluk (gr/cm ³)			Relatif Yoğunluk (%)		
	1400 °C	1450 °C	1500 °C	1400 °C	1450 °C	1500 °C
Katkısız 8YSZ	5,79	5,83	5,88	97	98	99
%1 SiC + 8YSZ	5,18	5,17	5,14	87	86	85
%5 SiC + 8YSZ	4,59	4,54	4,06	77	76	68
%10 SiC + 8YSZ	4,13	3,86	3,81	70	65	64
%15 SiC + 8YSZ	3,84	3,75	3,53	65	63	59

Şekil 4.2 ve 4.3 farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş örneklerin SiC katkı oranı ile deneysel ve relatif yoğunlukların değişimini göstermektedir. SiC katkı oranı ve sinterleme sıcaklığı arttıkça deneysel ve relatif yoğunluğun azaldığı gözlenmiştir. Katkisız 8YSZ numune incelendiğinde ise sıcaklık artışıyla yoğunluk doğru orantılı olarak bir miktar artmıştır. En yüksek yoğunlukların elde edildiği optimum sinterleme sıcaklığı 1450 °C olarak bulunmuştur. Katkisız 8YSZ’de 1450 °C’de 2 saat sinterleme sonrası %98 relatif yoğunluk elde edilirken SiC katkılı 8YSZ örneklerde ise %63 ile %86 aralığında düşük yoğunluklar elde edilmiştir. Yani SiC katkı miktarı arttıkça yoğunlaşmada bir azalma meydana gelmiştir. SiC katkılı örneklerin yoğunluklarının %99 değerlerine çıkarılması için numunelerin sıcak presleme yöntemiyle şekillendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, kuru preslemeyle şekillendirmenin ve normal ortamda sinterlemenin örneklerin sinterlenebilirliğe olan etkisi araştırılmıştır.



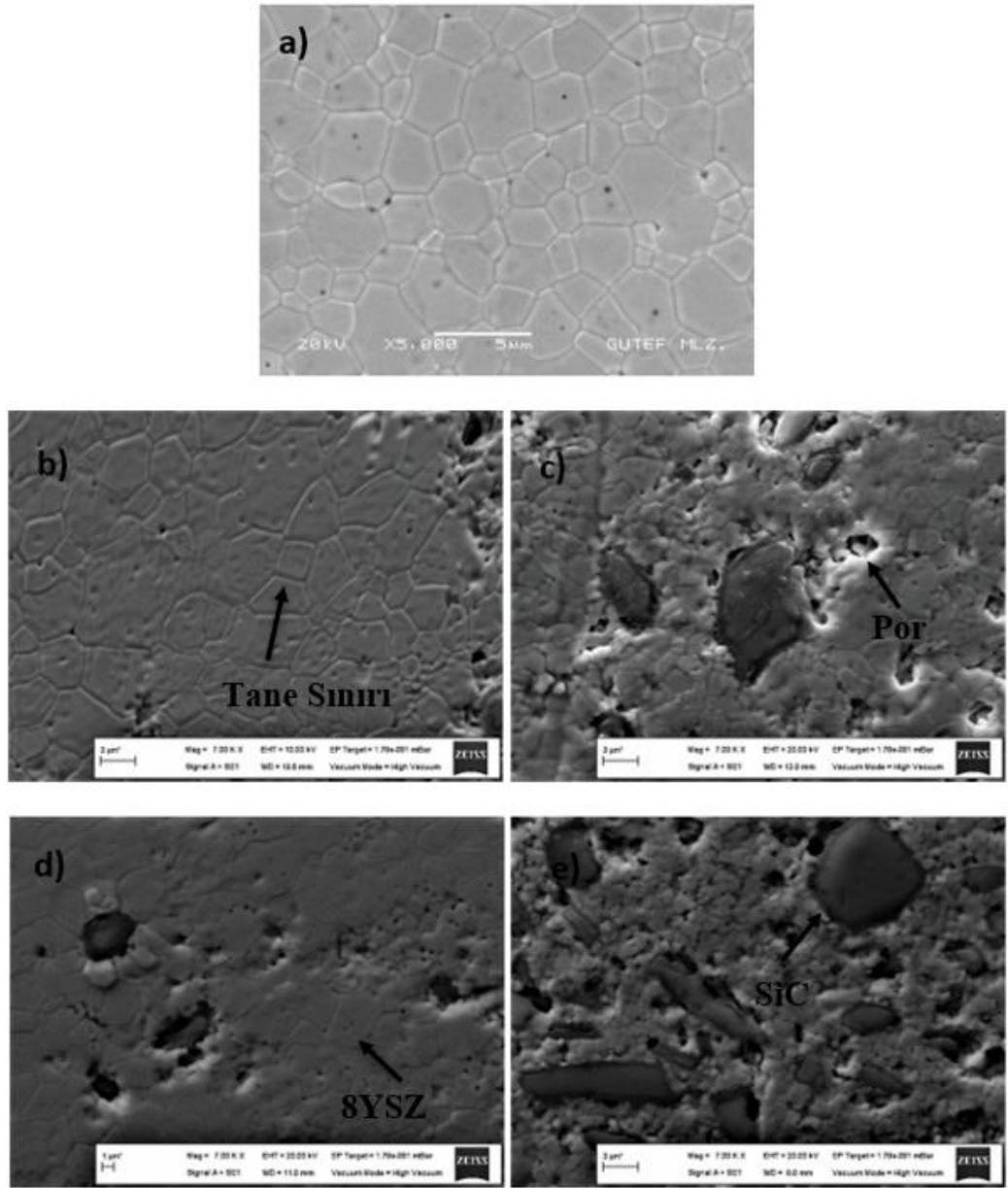
Şekil 4.2. SiC miktarı ve sinterleme sıcaklığına bağlı olarak deneysel yoğunluktaki değişim



Şekil 4.3. SiC miktarı ve sinterleme sıcaklığı ile relatif yoğunluktaki değişim

4.3. 8YSZ'nin Tane Boyutu ve Mikroyapısına SiC İlavesinin Etkisi

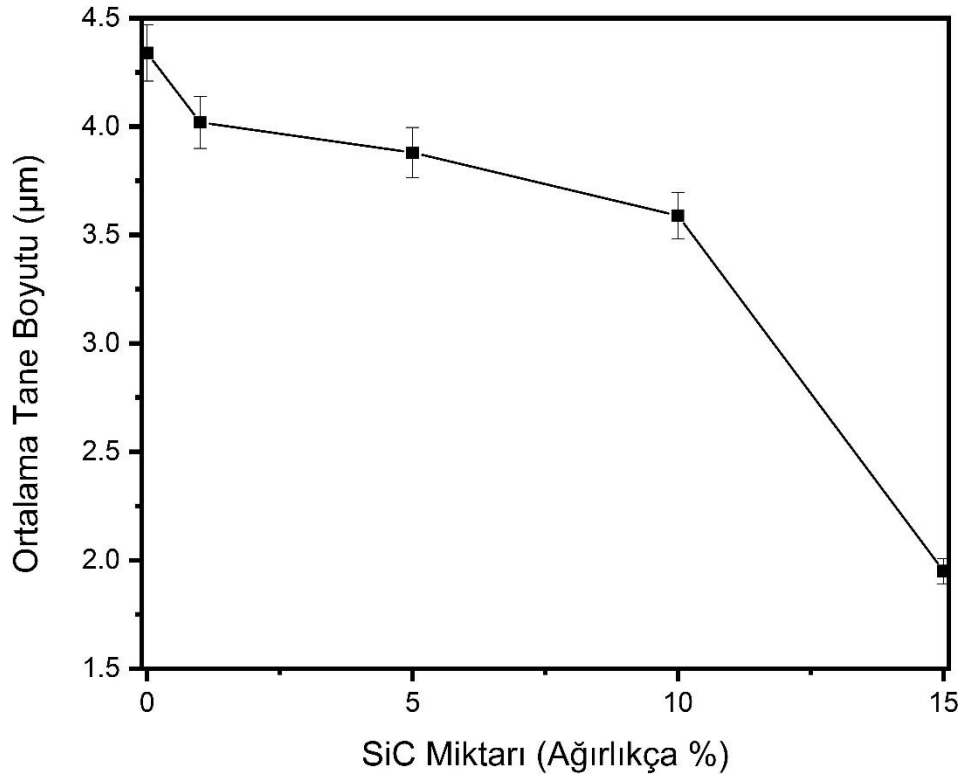
1450°C'de 2 saat sinterlenmiş katkısız ve SiC katkılı 8YSZ örneklerin SEM mikroyapıları Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Mikroyapılar incelendiğinde, katkısız ve %1 SiC katkılı 8YSZ örnekler yalnızca kaba poligonal eş eksenli 8YSZ tanelerinden oluştuğunu göstermektedir (Şekil 4.4-a-b). Oysaki ağırlıkça %5, 10 ve 15 SiC katkılı 8YSZ numunelerin mikro yapısı incelendiğinde ise çoğunlukla daha küçük küresel formda açık renkte 8YSZ tanelerinden oluşmaktadır ve ayrıca tane sınırlarının kesişme noktalarında ise çökelmiş olan siyah renkte SiC ikincil faz çökeltilerinin meydana geldiği görülmektedir (Şekil 4.4-c-d-e). 8YSZ tane sınırlarında çökelen SiC ikincil fazının varlığı aynı zamanda XRD analizi ile doğrulanmıştır. Ağırlıkça %1 SiC katkılı örneklerin mikroyapısında sadece 8YSZ fazların bulunması SiC'in matris yapısında tamamen çözündüğünü göstermektedir. Ağırlıkça %5-15 SiC katkılı örneklerin mikroyapısında ise 8YSZ taneleriyle birlikte SiC fazların gözlenmesi, matris yapıda %1 oranından sonra SiC'in çözünmediğini göstermektedir. Yani 8YSZ içerisinde SiC'in çözünürlüğü sınırlıdır ve bu oranın %1 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.4. 1450°C’ de 2 saat sinterlenmiş SiC katkılı 8YSZ numunelerin mikroyapıları; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 SiC katkılı 8YSZ, c) %5 SiC katkılı 8YSZ, d) %10 SiC katkılı 8YSZ, e) %15 SiC katkılı 8YSZ.

SiC katkı miktarı ile 8YSZ’nin tane boyutundaki değişim Şekil 4.5’te gösterilmektedir. Şekil 4.5 incelendiğinde sinterleme sonrasında SiC katkısı ile 8YSZ’nin tane boyutunda ciddi bir azalma meydana gelmiştir. Tane boyutu ölçüm sonuçları SiC katkı miktarı arttıkça tane boyutundaki azalmanın orantılı olduğunu göstermektedir. 8YSZ’nin ortalama tane boyutu ağırlıkça %15 SiC katkısıyla 4,34 μm ’den 1,95 μm değerine düşmüştür. Ağırlıkça %5-15 aralığında SiC katkılı 8YSZ

örneklerde SiC yapıda tamamen çözünmeyip tane sınırlarında ikincil faz olarak bulunmaktadır. 8YSZ tane sınırlarında çökelmiş ve yapıda homojen dağılmış bu sert SiC ikincil fazları pinning etkisi yaparak tane sınırlarının hareketini engellemektedir. Bu pinning etkisinin bir sonucu olarak SiC 8YSZ'nin tane boyutunda ciddi bir azalmaya neden olmuştur. Şekil 4.4'teki SEM görüntülerinden de tane sınırı göçünün SiC ikincil fazları tarafından engellendiği açık bir şekilde görülebilmektedir.

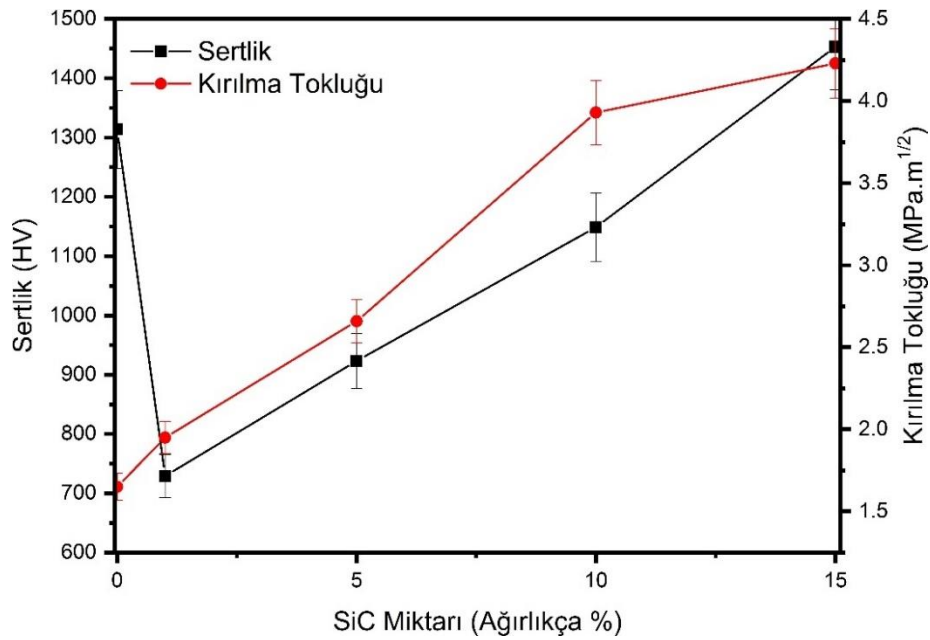


Şekil 4.5. 1450 °C' de 2 saat tavllanmış SiC katkılı 8YSZ örneklerin tane boyutlarındaki değişim

4.4. SiC ilavesinin 8YSZ'nin Sertlik ve Kırılma Tokluğuna Etkisi

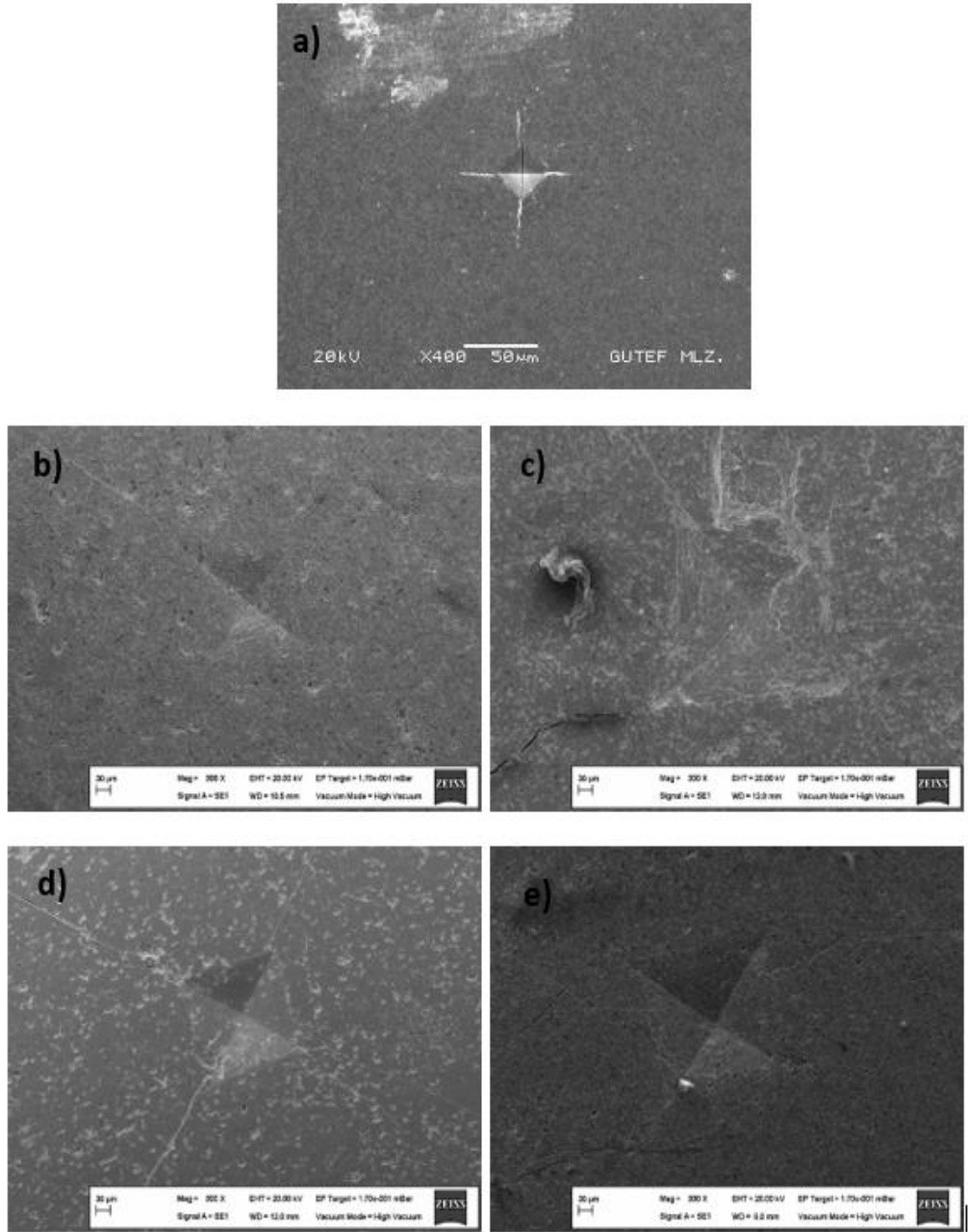
Farklı oranlarda SiC katkılı 8YSZ numunelerin sertlikleri Vickers yöntemiyle 5 kg yük 15 sn uygulanarak ölçülmüştür. Örneklerin kırılma toklukları ise numune üzerinde sertlik izini köşe noktalarında oluşturulan çatlakların uzunluğu ölçülerek kırılma toklukları hesaplanmıştır. Örneklerin sertlik ve kırılma toklukları Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.6 baktığımızda sertlik değerlerinin katkı miktarına bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Katkısız, %1, %5, %10 ve %15 SiC katkılı 8YSZ örneklerin

sertlikleri sırasıyla 1317, 729, 923, 1149 ve 1463 kg/mm² olarak ölçülmüştür. En yüksek sertlik değeri 1463 kg/mm² olarak %15 katkı oranında bulunmuştur. %1 SiC katkılı numunede sertlik bir miktar düşmüş ve akabinde %1 oranından sonra doğrusal olarak sertlik artmıştır. SiC katkısının 8YSZ'nin sertlik değerlerini arttırdığı söylenebilir. Ayrıca SiC takviyesiyle 8YSZ'nin kırılma tokluğunda ciddi bir artış meydana gelmiştir. 8YSZ'nin kırılma tokluğu ağırlıkça %15 SiC katkısı ile 1,65 MPa.m^{1/2}'den 4,23 MPa.m^{1/2} değerine artmıştır. 8YSZ'nin kırılma tokluğundaki bu artışa SiC takviyesi ile tane boyutunda meydana gelen küçülme ve 8YSZ matrisinde SiC'in sert ikincil faz parçacıkları olarak bulunması neden olmuştur. Bu matris yapıdaki SiC ikincil faz parçacıkları çatlakları köprüleme ve yön değiştirme mekanizması ile çatlağın enerjisini azaltarak kırılma tokluklarında bir artışa neden olmaktadır (Aktas ve ark., 2016). Aynı zamanda 8YSZ içerisine takviye yapılan SiC'in 8YSZ'ye göre daha yüksek Young modülü ile sertliğe sahip olmasıyla birlikte düşük termal genleşme katsayısının olması SiC katkılı 8YSZ örneklerin kırılma tokluğundaki artışın nedeni olabilir.



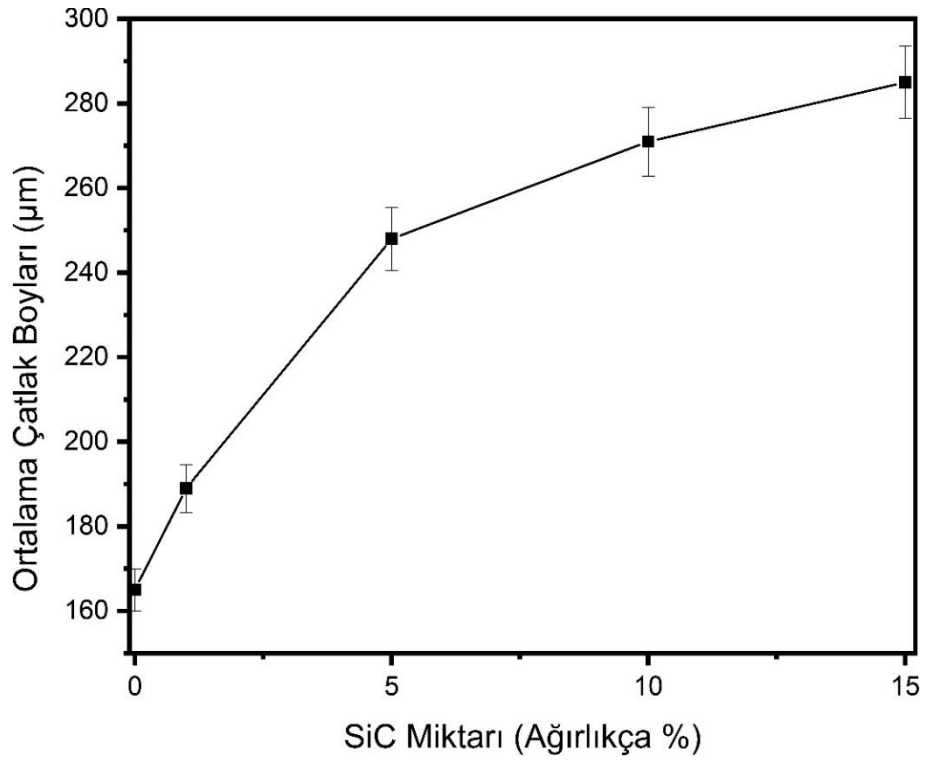
Şekil 4.6. Farklı oranlardaki SiC katkılı 8YSZ'nin Sertlik ve kırılma tokluklarındaki değişimler

Vickers sertlik yöntemi ile 5 kg'lık bir yükün 15 saniye uygulanması sonucunda örneklerde oluşturulan izler ve iz köşegenlerinde oluşan çatlakların SEM mikroyapı resimleri Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Şekil 4.7'ye baktığımızda katkısız ve SiC katkılı 8YSZ örneklerin hepsinde iz köşegeninin dört köşesinde düzgün çatlaklar oluşmuştur ve iz köşegenlerinde oluşan çatlaklar ise çoğunlukla radyal ve medyan tipi çatlaklardır.



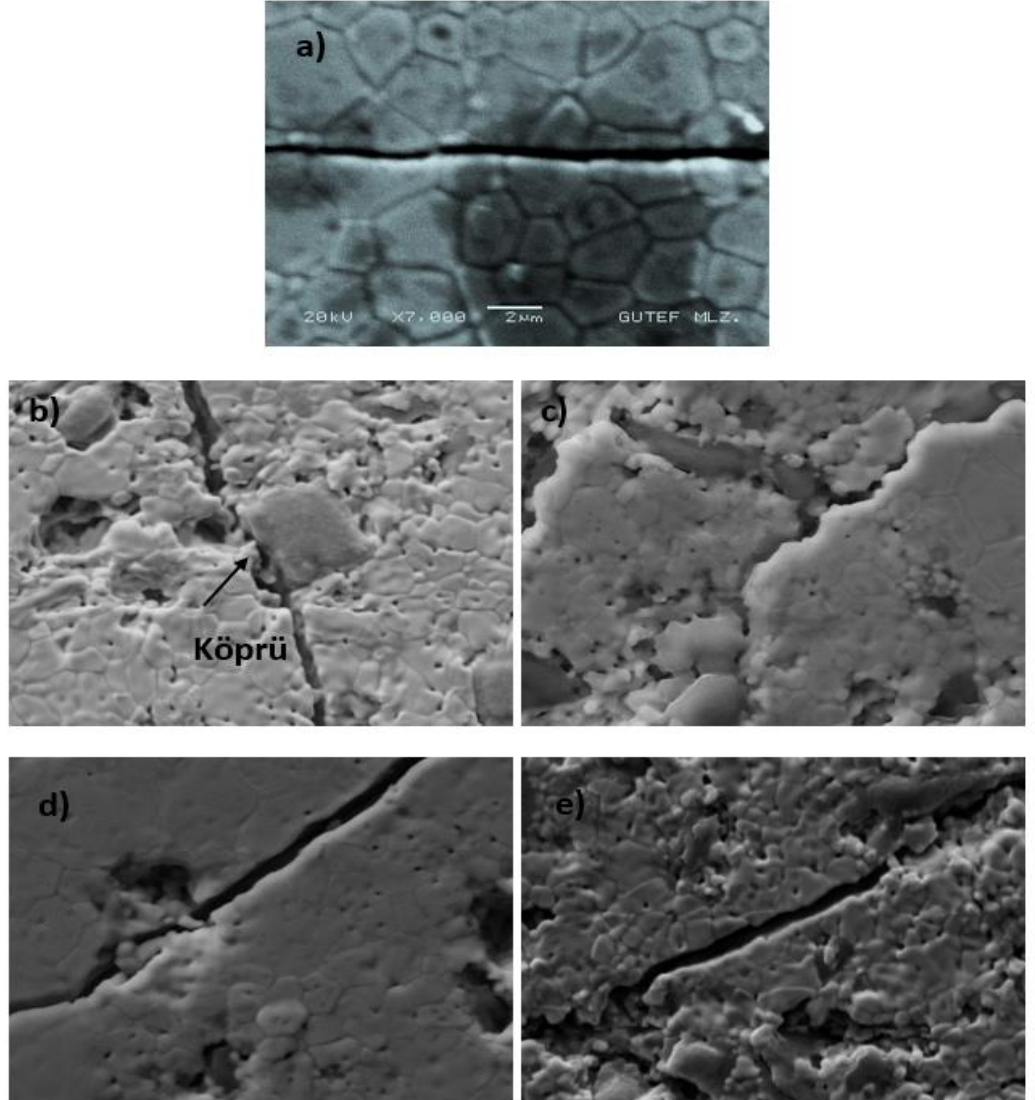
Şekil 4.7. Farklı çatlak uzunluklarına sahip Vickers sertlik izlerinin SEM görüntüleri; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 SiC, c) %5 SiC, d) %10 SiC ve e) %15 SiC katkılı 8YSZ

Farklı oranlardaki SiC katkıli 8YSZ numunelerin ortalama çatlak boyları Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Çatlak boyları SEM görüntülerinden iz köşegenlerindeki çatlak boyları ölçülmüştür. Her numune için 5 izin oluşturduğu çatlakların ortalaması baz alınarak ortalama çatlak uzunlukları hesaplanmıştır. En uzun çatlak boyu %15 SiC katkıli oranındaki numune de 285,3 μm olarak ölçülmüştür. Malzemelerde sertlik ile çatlak boyu doğru orantılı olarak ilerlemiştir. Grafikteki artış SiC miktarının artmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.8 incelediğinde SiC katkı miktarı arttıkça ortalama çatlak boylarının da arttığı gözlemlenmiştir. Bu çatlak uzunluklarındaki artış SiC ilavesi ile 8YSZ’nin yoğunluğundaki azalmanın bir sonucu olarak meydana gelmiş olabilir. SiC katkıli örneklerin düşük yoğunluğa sahip olması yüksek porozite olduğunu gösterir. SiC katkıli 8YSZ örneklerde yüksek miktardaki porozite çentik etkisi yapabilmektedir ve bu da çatlakların ilerlemesini kolaylaştırmaktadır. Bu durum çatlak boylarında bir artışa neden olmuş olabilir.



Şekil 4.8. Katkisız ve SiC katkıli 8YSZ örneklerin ortalama çatlak boyları

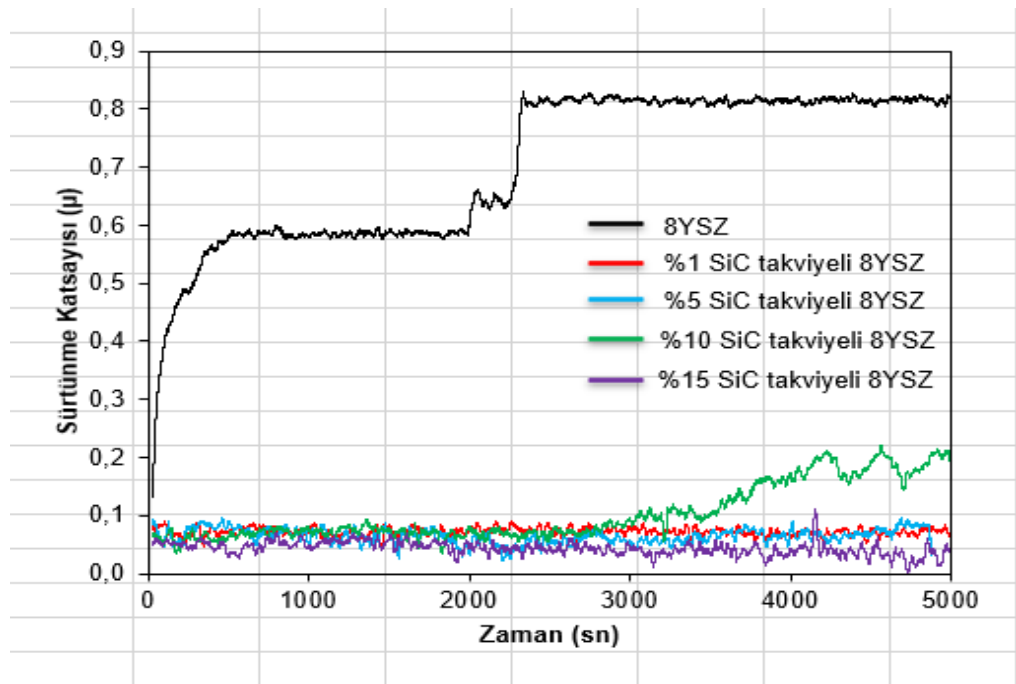
Katkısız ve SiC katkılı 8YSZ örneklerde gözlemlenen çatlak yayılma modları Şekil 4.9'da verilmektedir. Şekil 4.9'da gözlemlendiği gibi, katkısız 8YSZ'de çatlak tanelerin içinden ilerleyerek yayılmaktadır (Şekil 4.9-a). Oysaki SiC katkılı 8YSZ örneklerde çatlaklar daha çok tane sınırlarından ilerleyerek yayılmaktadır. SiC katkılı 8YSZ örneklerde çatlaklar, mikroyapıda sert çökelti fazı olarak yapıda bulunan SiC parçacıkları ile karşılaştıklarında yön değiştirmiştir. Bu çatlak yön değiştirmesi çatlakların enerjisinde azalmaya neden olarak kırılma tokluğunda bir artış sağlamaktadır (Aktas ve ark., 2014).



Şekil 4.9. Farklı Oranlarda SiC Katkılı Numunelerin Yüzey Çatlakları; a) Katkısız 8YSZ, b) %1 SiC, c) %5 SiC, d) %10 SiC ve e) %15 SiC katkılı 8YSZ

4.5. 8YSZ'nin Tribolojik Davranışına SiC İlavesinin Etkisi

Katkısız ve farklı oranlarda SiC katkıli 8YSZ numunelerine karşı aşındırıcı eleman olarak WC bilye kullanarak aşınma testleri 0,1 m/sn kayma hızında, 3 N yük, 500 m kayma mesafesinde ve oda sıcaklığında (25°C) gerçekleştirilmiştir. Uygulanan aşınma deneyi süresince numunelere ait sürtünme katsayıları kaydedilmiştir. Şekil 4.10'da katkısız ve SiC katkıli 8YSZ örneklerin sürtünme katsayısının zamanla değişimini gösteren grafiği verilmektedir.



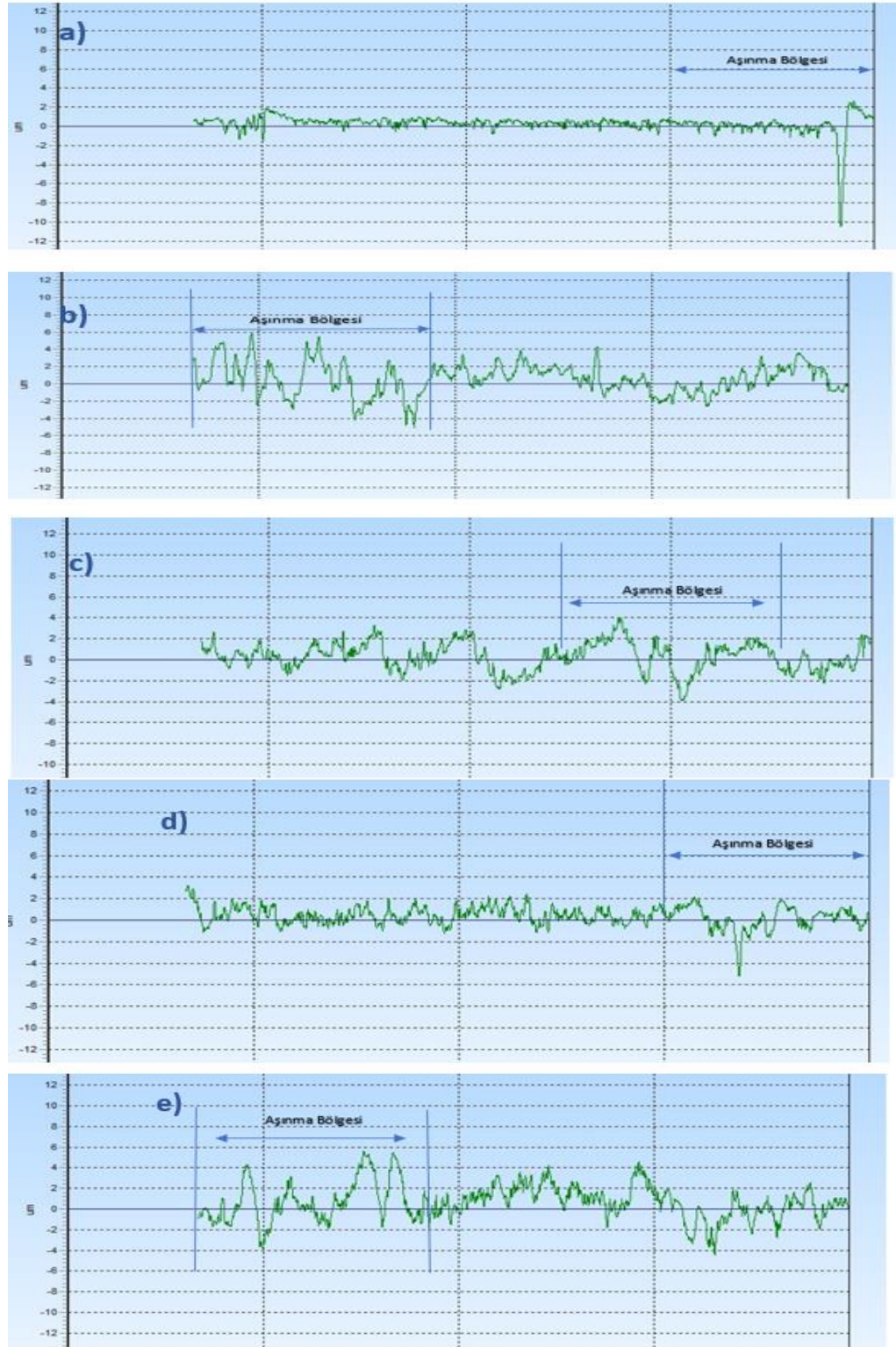
Şekil 4.10. 1450 °C'de 2 saat sinterlenmiş katkısız ve SiC katkıli 8YSZ numunelerin sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 4.10'daki sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde deneyin başında sürtünme katsayısı düşük bir değerde olmasına rağmen belirli bir kayma mesafesinden sonra sürtünme katsayısında artış meydana gelmektedir. Bu değişim deneyin başlangıcında numunede pürüzlülüğün az olmasından kaynaklanmaktadır. Kayma mesafesi arttıkça numuneden kopan partiküller sürtünme katsayısında artışa sebep olmaktadır. Ayrıca SiC ilavesi ve katkı miktarındaki artışla birlikte 8YSZ'nin sürtünme katsayısında ciddi bir azalma meydana gelmiştir. Katkısız 8YSZ'de ortalama sürtünme katsayısı 0,7 iken ağırlıkça %15 SiC katkıli 8YSZ'de ise ortalama

sürtünme katsayısı yaklaşık 0,05 değerine düşmektedir. Bu sürtünme katsayısındaki yüksek miktardaki azalma SiC'in kendinden katı yağlayıcılık özelliğinden kaynaklanmaktadır. Kaplama bilimi ve teknolojisindeki ilerlemeler kendi kendini yağlayan kaplamalar için tercih edilen aday malzemeler olarak bor karbür (B_4C), silisyum karbür (SiC), Karbon nitrür (CN_x) ve elmas benzeri karbon (DLC) gibi malzemeler sert ve kaygan karbon bazlı kaplamaların ortaya çıkmasına yol açmıştır (Robertson, 2002). Plazma yöntemleriyle sentezlenen amorf silisyum karbür (SiC) 10 ila 25 GPa arasında nispeten yüksek sertlik aralığına sahiptir. Bu amorf SiC filmin yağlama performansı, $800^\circ C$ 'de tavlama ile büyük ölçüde iyileşmektedir. $800^\circ C$ 'de tavlendiğinde, geri kalan tüm hidrojen filminden serbest kalmaktadır. Hidrojen giderme işleminin bir sonucu olarak grafit benzeri yapıların oluşmasına neden olarak düşük sürtünmeye yol açmaktadır (Donnet ve ark., 2008).

4.5.1. Deney numunelerinin aşınma sonrası yüzey profilleri

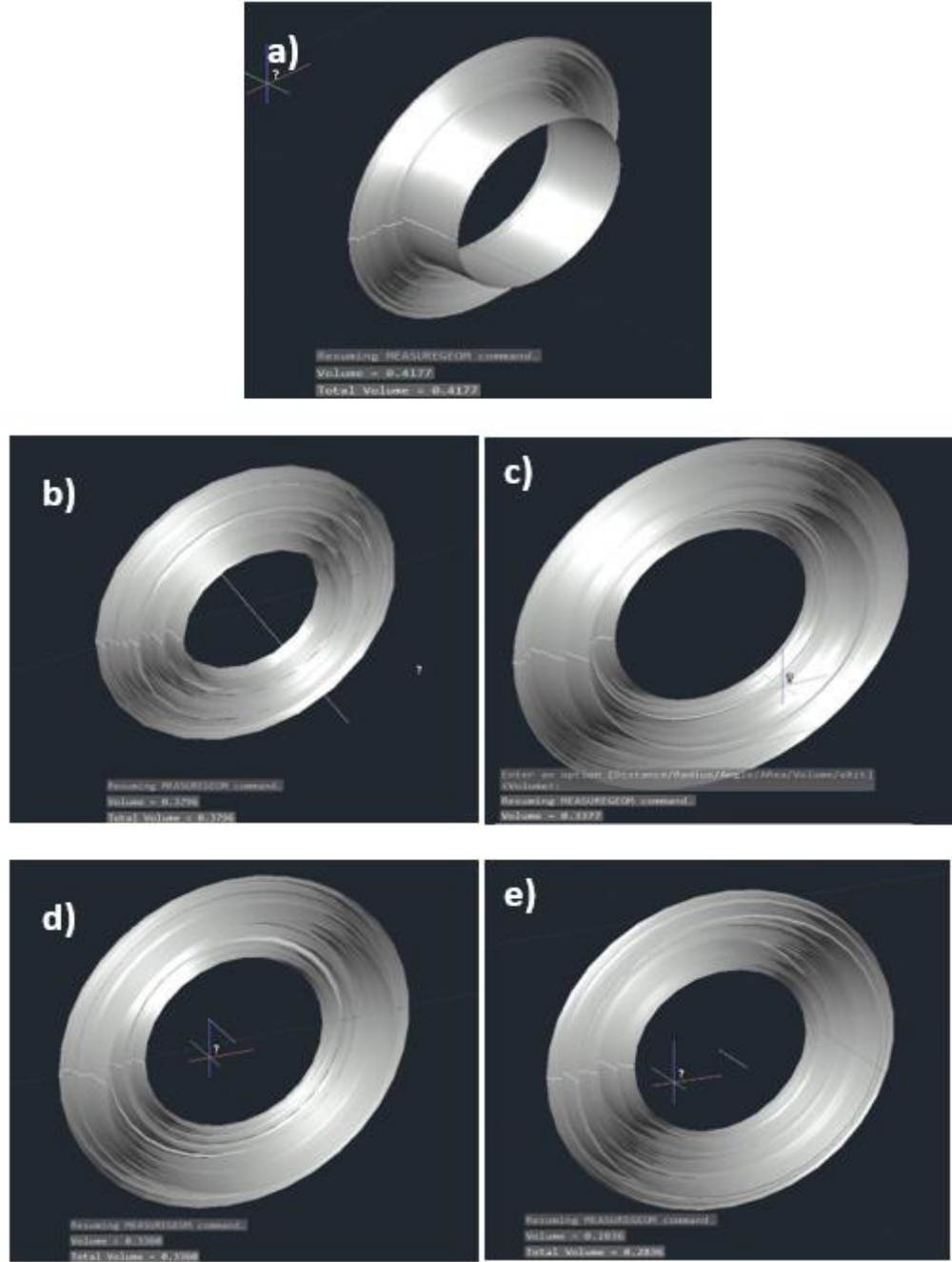
Şekil 4.11'de $1450^\circ C$ 'de 2 saat sinterlenmiş katkısız ve SiC katkılı 8YSZ örneklerin $0,1\text{ m/sn}$ kayma hızında, 3 N yük, 500 m kayma mesafesinde aşınan bölgedeki izlerden alınan yüzey profil görüntüleri verilmektedir. Görüntüler incelendiğinde SiC miktarının artmasıyla genel olarak izlerin derinliğinde azalma meydana gelmiştir. Bu durum bizlere katkısız numunelerde aşınma daha fazla olurken, SiC katkılı numunelerde aşınma miktarının azaldığı sonucunu vermektedir.



Şekil 4.11. Aşınma izi bölgesinden alınan yüzey profil görüntüleri a) Katkısız 8YSZ, b) %1 SiC katkılı 8YSZ, c) %5 SiC katkılı 8YSZ, d) %10 SiC katkılı 8YSZ, e) %15 SiC katkılı 8YSZ

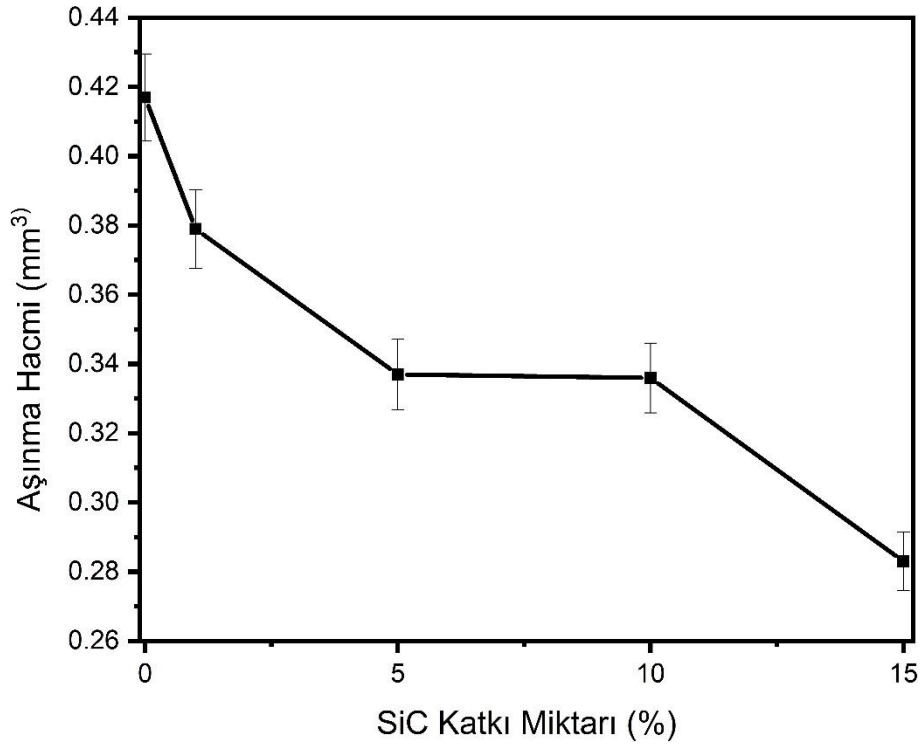
4.5.2. Numunelerin aşınma hacmi ve spesifik aşınma miktarı

Şekil 4.13'te 1450°C'de 2 saat sinterlenmiş katkısız ve SiC katkılı 8YSZ numunelerin 3 N yük 500 m kayma mesafesindeki aşınma bölgelerinin katı modellemesi görülmektedir.



Şekil 4.12. Örneklerin aşınma iz bölgesinin katı modellemesi; a) Katkısız 8YSZ b) %1 SiC, c) %5 SiC, d) %10 SiC ve e) %15 SiC katkılı 8YSZ

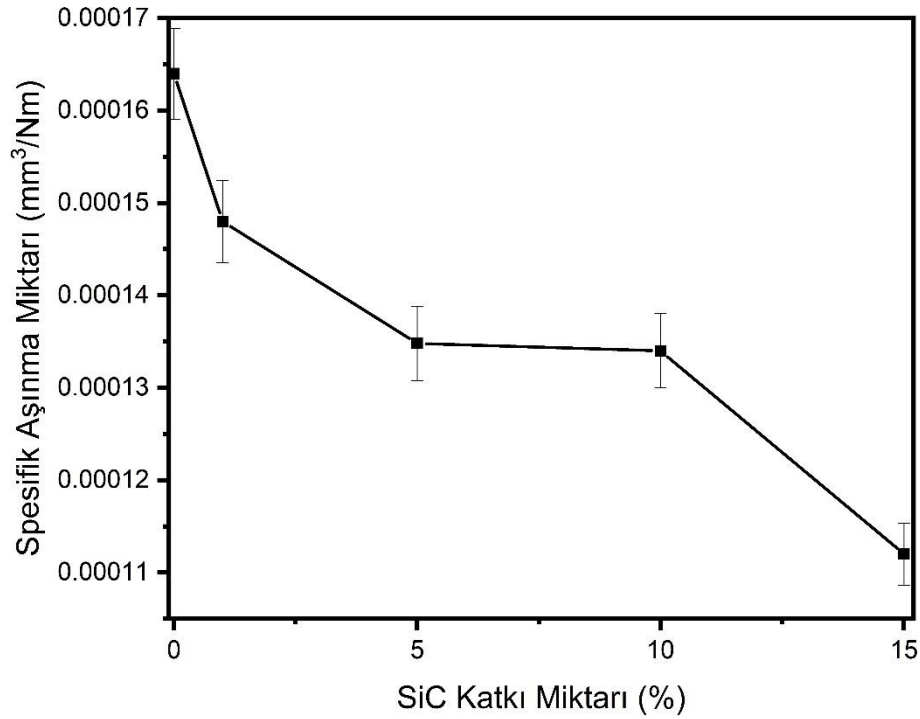
Şekil 4.13'te 1450 °C'de 2 saat sinterlenmiş katkısız ve SiC katkılı 8YSZ numunelerin 3 N yükteki aşınma hacimlerdeki değişimler verilmektedir. Şekil 4.13 incelendiğinde; ağırlıkça %1-15 SiC katkılı 8YSZ numunelerde aşınma hacminde bir azalma meydana geldiği görülmektedir. 8YSZ'nin aşınma hacmi ağırlıkça %15 SiC takviyesiyle 0,417 mm³'ten 0,283 mm³ değerine düşmüştür. SiC takviyesi 8YSZ'nin aşınma direncinde ciddi bir artışa neden olmuştur. Kompozitlerin aşınma direnci genellikle bileşim ve mikro yapı, takviye parçacıklarının boyutu, hacim oranı ve dağılımı, mekanik özellikler ve matris ve takviye arasındaki arayüzlerin özelliklerine bağlıdır (Parchovianský ve ark., 2017). Takviye yapılan SiC'ün 8YSZ'nin matrisinde ikincil faz olarak bulunması aşınma direncinde artışa neden olmaktadır.



Şekil 4.13. Aşınma Hacmi Değişim Grafiği

Spesifik aşınma oranları, 3 N yükte, 0,1 m/sn kayma hızında, 500 m kayma mesafesinde 1450 °C'de 2 saat sinterlenmiş katkısız ve SiC katkılı 8YSZ numunelerinin verilerinden hesaplanmıştır. Şekil 4.14 'de spesifik aşınma miktarlarındaki değişimler verilmektedir. Katkısız 8YSZ'nin spesifik aşınma miktarı, SiC ilavesi ile azalma göstermiştir. Deney sonuçları, SiC takviyesinin ve miktarının spesifik aşınma miktarına önemli etkisinin olduğunu göstermiştir. Bu aşınma

direncindeki artışında 8YSZ yapıda ikincil faz olarak bulunan SiC partiküllerin katı yağlayıcılık özelliğinden olduğu düşünülmektedir. Alüminyum matrisli metal kompozitlerin tribolojik özelliklerinde SiC, B₄C, Al₂O₃, TiC ve AlN gibi seramik parçacıkların eklenmesiyle başarılı bir şekilde bir gelişme elde edilmiştir. Alüminyum matris alaşımına SiC seramik parçacıklarının eklenmesiyle kompozitlerin hem mekanik mukavemeti hem de aşınma direnci artar. Bu alüminyum bazlı seramik kompozitlerde yüksek aşınma direnci yapıda bulunan SiC'in kendi kendini yağlama özelliğinin bir sonucunda ortaya çıkmaktadır (Ravindran ve ark., 2013).

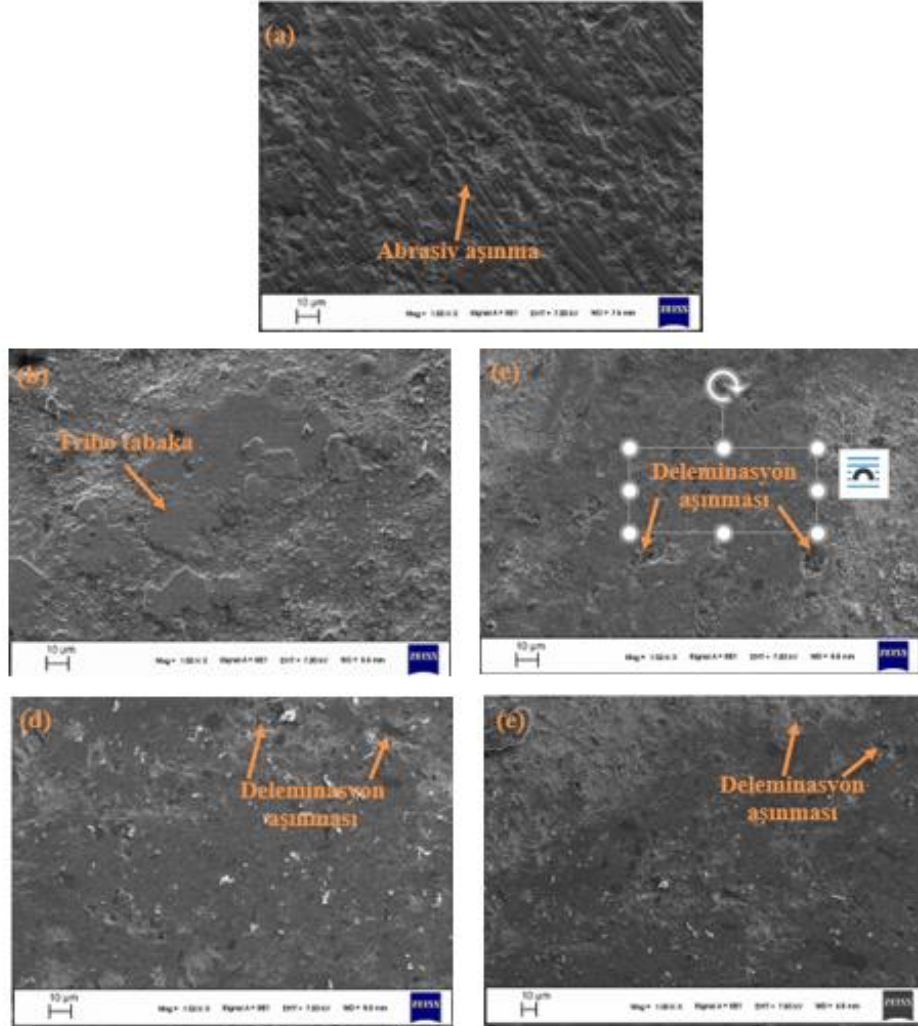


Şekil 4.14. Spesifik Aşınma Miktarı Değişim Grafiği

4.5.3. Aşınma mekanizması

Aşınma testi sonrası örneklerden aşınma izi bölgesinden SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 4.15'de katkısız ve farklı oranlarda SiC katkıli 8YSZ örneklerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri verilmektedir. Katkısız numune de çoğunlukla abrasiv aşınma ve yer yer de delaminasyon aşınması meydana geldiği görülmüştür. SiC katkıli 8YSZ numunelerde ise yer yer abarasiv aşınma ve bunun yanısıra

çoğunlukla delaminasyon aşınması meydana gelmiştir. Ayrıca SiC katkıli 8YSZ örneklerde aşınma iz bölgesinde SiC tribo tabakalarının oluştuğu gözlenmiştir.



Şekil 4.15. 1450 °C’ de 2 saat sinterlenmiş örneklerin aşınma izlerinin SEM mikroyapıları; (a) Katkısız 8YSZ, (b) %1, (c) %5, (d) %10 ve (e) %15 SiC katkıli 8YSZ

5. SONUÇLAR

5.1 Sonuçlar

DeneySEL çalışmalar kapsamında, 8YSZ içerisine ağırlıkça %1, 5, 10 ve 15 SiC takviye edilerek seramik esaslı kompozitler üretilmiştir. Üretilen SiC takviyeli 8YSZ kompozitlerin yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen araştırma sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

1. SiC takviye oranı ve sinterleme sıcaklığı arttıkça deneysel ve relatif yoğunlukta bir azalma meydana gelmiştir. En yüksek yoğunluklar 1450 °C'de 2 saat sinterleme sonrası elde edilmiştir. Katkısız 8YSZ'de %98 relatif yoğunluk elde edilirken SiC katkılı 8YSZ örneklerde ise %63 ile %86 aralığında düşük yoğunluklar elde edilmiştir.
2. SEM mikroyapı incelemeleri ve XRD analizi 8YSZ matrisinde SiC'in ağırlıkça %1 oranına kadar çözündüğünü ve ağırlıkça %5-15 SiC katkı aralığında ise çözünmeyerek yapıda SiC ikincil fazlarının oluştuğunu göstermiştir. Ayrıca XRD sonuçları yapıda yüksek sinterleme sıcaklığında ZrSiO₄ ve SiO₂ fazlarının oluştuğunu ortaya koymuştur.
3. SiC katkısıyla ve katkı miktarında ki artış ile 8YSZ'nin tane boyutunda yüksek miktarda bir azalma meydana gelmiştir. 8YSZ'nin ortalama tane boyutu ağırlıkça %15 SiC katkısıyla 4,34 µm'den 1,95 µm değerine düşmüştür.
4. Katkısız, %1, %5, %10 ve %15 SiC katkılı 8YSZ örneklerin sertlikleri sırasıyla 1317, 729, 923, 1149 ve 1463 kg/mm² olarak ölçülmüştür. En yüksek sertlik değeri 1463 kg/mm² olarak %15 katkı oranında bulunmuştur. Ayrıca SiC takviyesiyle 8YSZ'nin kırılma tokluğunda ciddi bir artış meydana gelmiştir. 8YSZ'nin kırılma tokluğu ağırlıkça %15 SiC katkısı ile 1,65 MPa.m^{1/2}, den 4,23 MPa.m^{1/2} değerine artmıştır.
5. SiC ilavesi ve katkı miktarındaki artışla birlikte 8YSZ'nin sürtünme katsayısında ciddi bir azalma meydana gelmiştir. Katkısız 8YSZ'de ortalama

sürtünme katsayısı 0,7 iken ağırlıkça %15 SiC katkılı 8YSZ’de ise ortalama sürtünme katsayısı yaklaşık 0,05 değerine düşmektedir. Bu sürtünme katsayısındaki yüksek miktardaki azalma SiC’in kendinden katı yağlayıcılık özelliğinden kaynaklanmaktadır.

6. SiC takviyesi ile 8YSZ numunelerin aşınma hacminde ciddi bir azalma meydana getirmiştir. 8YSZ’nin aşınma hacim kaybı, ağırlıkça %15 SiC takviyesi ile $0,417 \text{ mm}^3$ ’ten $0,283 \text{ mm}^3$ değerine düşmüştür. SiC takviyesi 8YSZ’nin aşınma direncinde ciddi bir artışa neden olmuştur.
7. Katkısız 8YSZ örneklerinde kısımca delaminasyon aşınması ve çoğunlukta abrasiv aşınma meydana geldiği görülmüştür. SiC katkılı 8YSZ örneklerinde ise kısımca abrasiv ve çoğunlukla delaminasyon aşınması meydana gelmiştir.

5.2 Öneriler

- Örneklerin şekillendirilmesi sıcak izostatik presleme veya sıcak presleme ile şekillendirme yapılabilir.
- Mikroyapıda tane sınırlarındaki faz oluşumlarını net olarak ortaya koyabilmek için geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ile incelenebilir.
- Farklı yüklerde, kayma hızlarında ve farklı servis şartlarında (sıcaklık, nem vb.) aşınma testleri yapılabilir.
- Örneklerin aşınma izlerinden SEM ile karakterizasyon yapılarak aşınma mekanizmaları ortaya konulabilir.

KAYNAKLAR

- AGAC, Ö., 2017. Mechanical and biological properties of Alumina And Titania Co-doped Zirconia Ceramics. Atılım University, The Department of Metallurgical and Materials Engineering. A Thesis Submitted To The Graduate School Of Natural And Applied Sciences. Istanbul.
- AKARSU, A.C., 2009. Titanyum Diborür Katkılı Sıcak Preslenmiş Bor Karbür-Silisyum Karbür Kompozitlerinin Özelliklerinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- AKÇA, H., İYİBİLGİN, O. ve GEPEK, E., 2020. Biyomalzemeler ile İmplant Üretimi Sürecinin Biyotriboloji Yönünden Değerlendirilmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8, 667-692, Düzce.
- AKGÜNDÜZ, M., 2019. Farklı Malzemelerle Kaplanmış Segman-Silindir Çiftinin Sürtünme ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- AKINALP, Y.A., 2019. Silisyum Karbür Esaslı İleri Teknoloji Seramiklerin Dökümü, Sinterlenmesi ve Karakterizasyonu. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- AKTAŞ, B., 2002. %8 Mol Yttria İle Stabilize Edilmiş Kübik Zirkonyanın Sinterlenebilirliğe ve Tane Büyümesine Çeşitli Metal Oksitlerin Etkisinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- 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.
- AKTAS, B., TEKELİ, S. ve SALMAN, S., 2014. Synthesis and Properties of La₂O₃-doped 8 Mol% Yttria-Stabilized Cubic Zirconia, Journal of materials engineering and performance 23 (1), 294-301.
- AKTAS B., TEKELİ S., SALMAN S., 2016. Improvements in Microstructural and Mechanical Properties of ZrO₂ Ceramics After Addition of BaO, Ceramics International 42 (3), 3849-3854.
- AKTAŞ, B., TEKELİ, S. ve KÜÇÜKTÜVEK, M., 2014. Grain growth and sinterability in Er₂O₃-doped cubic zirconia c-ZrO₂. International Journal of Materials Research, 105(2), 208-214.
- AKTAŞ, B. ve TEKİN, H., 2009. Effect of Co₃O₄ addition on friction and dry-sliding wear behavior of 8YSZ. Journal of Materials Engineering and Performance, 28(1), 549-556.
- ANTIS, G.R., CHANTIKUL, P., LAWN, B.R. and MARSHALL, D.B., 1981. A Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: I-direct Crack Measurements and II-Strength Method, J. Am. Ceram. Soc., 64 pp. 533-543.
- APAYDIN, H.S., 2018. Zirkonya Takviyeli Alümina Esaslı Seramik Malzemelerin Üretimi ve Karakterizasyonu. Ondokuz Mayıs Üniversitesi ,Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Samsun.

- ARIN, M., 2007. Zirkonya Seramiklerinin ve ZrO₂-Tin Kompozitlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu. Çalışmaları İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- AYVAZ, S., 2013. Cr-Mo Çeliklerinin Aşınma ve Korozyon Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
- BAKAR, B., 2009. Alümina Katkılı β Silisyum Karbürün Sinterlenmesine Karakterizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- BALCI, O., 2019. Aşınma Amaçlı Uygulamalar İçin Alümina İle Toklaştırılmış Zirkonya-Titanyum Diborür (at_z-tib₂) Seramik Kompozitlerinin Üretilmesi. Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Alanya.
- BAMBA, N., CHOA Y.H., SEKINO T. and NIIHARA K., 1998. Effects of Nano-Sized Silicon Carbide Particulate on Microstructure and Ionic Conductivity for 8 Mol % Ytria Stabilized Zirconia Based Nanocomposites, Solid State Ionics 111 ,171–179.
- BAMBA, N., CHOA Y.H., SEKINO T. and NIIHARA K., 2003. Mechanical Properties and Microstructure for 3 Mol% Ytria Doped Zirconia/Silicon Carbide Nanocomposites, Journal of the European Ceramic Society 23 773–780.
- BAŞAR, E. F., 2011. Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Basıncısız Sinterleme ile Üretimi ve Karakterizasyonu. Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Antalya.
- BEIYUE, M., JINGKUN Y., 2009. Phase Composition of SiC-ZrO₂ Composite Materials Synthesized from Zircon Doped with La₂O₃, Journal of Rare Earths, Volume 27, Issue 5, Pages 806-810.
- BOYACIOĞLU, T., 2007. Katı Oksit Hücrelerinde Elektrolit Malzemesi Olarak Kullanılan Kübik Zirkonyum Oksit (c-ZrO₂) Değişik Oranlarda Metal Oksit Katkıları İle Oda Sıcaklığındaki Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- BROOK, R.J., 1991. Advanced ceramic materials: an overview. Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials, 1-8.
- BRYNESTAD, J., BAMBERGER E.C., HEATHERLY E.D. and LAND F.J., 1984. Removal of Oxide Contamination from Silicon Carbide Powders, Journal of the American Ceramic Society, Volume 67, Issue 9, Pages C- 184-C- 185.
- BULTAN, Ö., ÖNGÜL, D. ve TÜRKÖĞLU, P., 2010. Fabrication Techniques And Microstructure Classifications Of Zirconia. İstanbul Üniversitesi Dışhekimliği Fakültesi Dergisi DERLEME Cilt: 44, Sayı: 2 Sayfa: 197-204, İstanbul.
- CHEN, H.J, W. RAINFORT M. and LEE, W.E., 2000. The Wear Behaviour of Al₂O₃-SiC Ceramic Nanocomposites. Scripta mater. 42 555–560, Department of Engineering Materials, The University of Sheffield, Mappin St., Sheffield, S1 3JD UK
- CHAWLA, K.K., 2003. Ceramic Matrix Composites, Kluwer Academic Publishers. USA.
- ÇAĞLAR, E., 2015. Bor Karbür /B karbür Silisyum Tabakalı Kompozitlerin Spark Plazma Sinterleme Tekniği İle Üretimi ve Karakterizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

- ÇELİK, Y., 2010. Bor Karbür'ün Spark Plazma Yöntemiyle Sinterlenmesi, Çeşitli Sinterleme Katkılarının Sinterleme ve Malzeme Özelliklerine Etkileri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- ÇELİKÇİOĞLU, Ö., 2012. Alümina-Silisyum Karbür-Karbon Esaslı Dökülebilir Harçlar. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
- DEMİR, A., 2012. Farklı çeliklerin Yorulma Aşınmasında Malzeme sertliğinin Aşınma Üzerine Etkisi. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Edirne.
- DEMİREL, M., 2009. Nikel Oksit (NiO) Tozlarının Hazırlanması ve Adsorplama Özelliklerinin Belirlenmesi. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale.
- DONNET, C. ve ERDEMİR A., 2008. Tribology of Diamond-Like Carbon Films – Fundamentals and Applications, Springer, New York,
- DUTDİBİ, C., 2011. Mekanik Alaşımlama ve Sinterleme süreçleriyle Al₁₂Si-XSiC ve Al₁₂Si-Xb₄c (x = ağırlıkça %5, %10 ve %15) Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyon Çalışmaları İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- EKERER, A.F., 2007. Alumina-SiC Partikül Destekli T/M Al-Matriksli Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- EROL, E., 2022. Fenolik Reçine Esaslı Fren Balatalarında Kullanılan Metalik Talaşların Aşınma, Sürtünme ve Isı İletim Katsayısına Etkileri. Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Mersin.
- ESATOĞLU, L., 2018. Elyaf Takviyeli PPS Kompozitlerinin Sürtünme ve Aşınma Karakterizasyonu. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- GEÇKİNLİ, E., 1992. İleri Teknoloji Malzemeleri, İ.T.Ü. Kimya Metalurji Fak. Metalurji Müh. Bölümü, İstanbul.
- GONZALEZ, A.F.R., 2009. Introduction to biometarials in orthopaedic surgery- chapter 1. ASM İnternatiol.
- İBRAHİM, İ.A., MOHAMMED, F.A. and LAVERNIA, E.J., 1991. Particulate Reinforced Metal Matrix Composites a review, Journal of Materials Science.26, 1137- 1156.
- İRANKHAH, R., MOBASHERPOUR İ., ALIZADEH M., NEZHAD S.M.M. and NIKZAD L., AZAR S.S., Carbothermal reduction of ZrSiO₄ for in situ formation of ZrO₂-based composites using spark plasma sintering.
- KAMBUROĞLU, K., 2019. Biyouyumlu Zirkonya Medikal Seramiklerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu. Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Alanya.
- KAPUSUZ, H., 2019. Sürekli Slab Döküm Prosesinde Döküm Parametrelerinin Kalıp Sürtünmesine Etkisinin İncelenmesi. İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Hatay.
- KAYALI, E.S., 2000. Seramik Malzemelerin Mekanik Davranışları Ders Notları.
- KHAN, A., ABDELRAZEQ ,M.W. and MATTLİ M. R., YUSUF M.M., ALASHRAF A., MATLİ P.R. and SHAKOOR R.A., 2020. Structural and Mechanical Properties of Al-SiC-ZrO₂ Nanocomposites Fabricated by Microwave Sintering Technique.

- KILAVUZ, Ş. F., ŞEN M., 2021. Dünyanın zaman kapsülü: ZİR KON. MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, 32: 25-39.
- KÜÇÜKOĞLU, D., 2008. Zirkonya Blokların Aşındırmayla Oluşan Kırılma Dayanımları. Yeditepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Master Tezi, İstanbul.
- MAHMUD, N.N., VAJPAI S.K. and AMEYAMA, K., 2014. Fabrication of Ytria Stabilized Zirconia-Silicon Carbide Composites with High Strength and High Toughness by Spark Plasma Sintering of Mechanically Milled Powders. Materials Transactions, Vol. 55, No. 12, pp. 1827 to 1833, Japan Society of Powder and Powder Metallurgy. Japan.
- MERT, Z., 2007. Tek Silindirli Bir Motorda Sürtünmeye Etki Eden Faktörlerin Belirlenmesi ve Sürtünme Gücünün Azaltılması. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilim Uzmanlığı Tezi, Zonguldak.
- OLUWAGBENGA, T. J., IAENG Member., ROKEBRAND, and SIGALAS L., 2014. Microstructure and Properties of Al₂O₃-SiC Nanomaterials. Proceedings of the World Congress on Engineering Vol II, London, U.K. Ceramics International, Volume 49, Issue 2, 2023, Pages 2681-2688.
- ÖĞÜNÇ, H., 2006. Sıcak Presleme İle Sinterlenmiş α -SiC Matriksli B4C Kompozitlerinin Özelliklerinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- ÖZDEMİR, K., 2008. İlk Aşınma Bölgesinde Takım Aşınmasını Etkileyen Parametrelerin Deneysel Analizi. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa
- ÖZÜDOĞRU, R.E., 2008. WC-Co Semente Karbürlerin Üretimi ve Karakterizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- PARCHOVIANSKY, M., BALKO J., ŠVANCAREK P., SEDLACEK J., DUZSA J., LOFAJ F. and GALUSEK D., 2017. Mechanical Properties and Sliding Wear Behaviour of Al₂O₃-SiC Nanocomposites with 3–20 vol% SiC, Journal of the European Ceramic Society, Volume 37, Issue 14, Pages 4297-4306,
- PİCONİ, C.G. and MACCAURO, G., 1999. Zirconia as a ceramic biomaterial. Biomaterials 20,1-25.,Italy.
- POURASAD, J., EHSANİ N., VALEFI Z. and KHAILIFESOLTANI, S.A., 2017. Preparation of a nanostructured SiC-ZrO₂ coating to improve the oxidation resistance of graphite, Surface and Coatings Technology, Volume 323, Pages 58-64.
- RAVINDRAN, P., MANISEKAR K., NARAYANASAMY R., NARAYANASAMY P., 2013. Tribological Behaviour Of Powder Metallurgy-Processed Aluminium Hybrid Composites With the Addition of Graphite Solid Lubricant, Ceramics International, Volume 39, Issue 2, March, Pages 1169-1182.
- ROBERTSON, J., 2002. Diamond-like amorphous carbon. Mate. Sci. Eng. R 37, 129–281.
- SAĞLAM, O.E., 2005. Farklı Oranlarda SiO₂ Katkılı Kübik Zirkonyada (8YSZ) Sinterlenebilirlik ve Statik Tane Büyümesinin İncelenmesi. Ankara.
- SALAMON, D., 2014. Advanced Ceramics. Advanced Ceramics for Dentistry, 103-122. Elsevier.

- SCHWART, M.M., 1999. Composite Materials: Mechanical Behaviour and Structural Analysis, Springer, New York, USA.
- SOMIYA, S. and INOMATA, Y., 1991. Silicon Carbide Ceramics, Ed. Elsevier Applied Science.13p, London.
- ŞERBETÇİ, R., 2019. Değişik Metal Oksit Katkılı Zirkonya Seramiklerin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Harran Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.
- ŞİVET, Ö., 2014. Zirkonya Korların Değişik Yöntemlerle Aşındırılması Sırasında Meydana Gelen Isı Değişikliklerinin Değerlendirilmesi. Yeditepe Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- TEKİN, H., 2015. Co3O4 Katkılı Zirkonya (8YSZ) Seramiklerin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. Harran Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.
- TİMUR, M., 2007. Otomotivde Kullanılan Sürtünme Malzemelerinin Sürtünme Katsayısını Tespit Eden Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyon.
- TORAYA, H., YOSHIMURA M. and SAMIYA S.,1984. Quantitative Analysis of Monoclinic-Stabilized Cubic ZrO2 Systems by X-RAY Diffraction, September, Communications of the American Ceramic Society c- 183.
- TÜRKMEN, E., 2019. Farklı Yapıdaki Zirkonya Seramiklerin Yapay Yaşlandırma Sonrası Sertlik ve Kırılma Mukavemetlerinin Mikroyapı Analizi İle İncelenmesi. İstanbul Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- URAYLI, Ç., 2018. Cu-B4C Kompozit Malzemelerdeki Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu.
- WANG, L., WANG, Y., SUN, X.G., A.C ,HE, J.Q., PAN, Z.Y. and WANG, C.H., 2012. Thermal Shock Behavior of 8YSZ and Double-Ceramic-Layer La2Zr2O7/8YSZ Thermal Barrier Coatings Fabricated by Atmospheric Plasma Spraying. Ceramics International 38.,595–3606, China.
- YELTEN, A., 2010. Sol-Jel Yöntemi ile Üretilmiş Alümina-Bovine Hidroksiapatit (Bha) Kompozitlerinin Özellikleri ve Karakterizasyonu. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye
- YILDIRIM, M., 2010. Zirkonya/Mullit Seramik Matriksli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya.
- YILMAZ, E., 2011. Seryum Oksit İlaveli Alümina-Zirkonya Kompozitlerinin Spark Plazma Sinterleme Yöntemi İle Üretimi ve Karakterizasyonu. İstanbul.
- YILMAZ, Ş. ve YARALI, Y., 2004. Seramik Kompozit Malzemeler. Metal Makina, 150, 468–473,
- YURDAKUL, A. ve BAŞTÜRK N., 2019. Fren Balatası Üretimi için Zirkonya Esaslı Yeni Kompozisyonların Geliştirilmesi. Academic Platform Journal of Engineering and Science, 7-2, 274-284, Antalya.
- YÜKSEL, F., 2014. Alüminyum Matrisli B4C Partikül Takviyeli Aşınma Direnci Yüksek Kompozit Malzemelerin Aşınma Özelliklerinin Belirlenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.